

**Industria y Comercio**

SUPERINTENDENCIA

DELEGATURA DE PROPIEDAD INDUSTRIAL

División de Nuevas Creaciones

**SOLICITUD  
PATENTE DE INVENCION**

21. EXPEDIENTE No. \_\_\_\_\_

54. TÍTULO DISPOSITIVOS QUE INCORPORAN  
UNA SUPERFICIE IMPREGNADA CON LÍQUIDO

51. CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL \_\_\_\_\_

71. SOLICITANTE MASSACHUSETTS INSTITUTE

DOMICILIO CAMBRIDGE, ESTADOS UNIDOS

74. APODERADO ALVARO CORREA.

22. BOGOTÁ, D.C., 27 FEBRERO 2014



No. 14-042258- -00000-0000

Fecha: 2014-02-27 16:44:06 Dep. 2020 DIR.NUEVASCR  
Tra. 11 PATENTEIYII Eve: 378 FASENACIONALI  
Act. 411 PRESENTACION Folios: 9, - 9

Resivo de radicación

DIRECCIÓN DE NUEVAS CREACIONES  
SOLICITUD FASE NACIONAL -PCT

|                                                                                                               |                                                                                                                                               |                                                                                                            |                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                                             | TIPO DE SOLICITUD                                                                                                                             | <input checked="" type="checkbox"/> Patente de invención<br><input checked="" type="checkbox"/> Capítulo I | <input type="checkbox"/> Patente de Modelo de Utilidad<br><input type="checkbox"/> Capítulo II          |
| 2                                                                                                             | DATOS SOLICITUD INTERNACIONAL PCT (86)                                                                                                        |                                                                                                            |                                                                                                         |
| Solicitud Internacional No.                                                                                   |                                                                                                                                               | PCT/US2011/061898                                                                                          | Fecha 22/11/2011                                                                                        |
| Publicación Internacional No.                                                                                 |                                                                                                                                               | WO/2013/022467                                                                                             | Fecha 14/02/2013                                                                                        |
| 3                                                                                                             | TÍTULO DE LA INVENCIÓN (200 caracteres o espacios máximos)                                                                                    |                                                                                                            |                                                                                                         |
| DISPOSITIVOS QUE INCORPORAN UNA SUPERFICIE IMPREGNADA CON LIQUIDO                                             |                                                                                                                                               |                                                                                                            |                                                                                                         |
| 4                                                                                                             | CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL (CIP)                                                                                                             |                                                                                                            |                                                                                                         |
| B08B 17/06 (2006.01), B64D 15/00 (2006.01), C04B 111/20 (2006.01), C09D 5/16 (2006.01), F03D 11/00 (2006.01)  |                                                                                                                                               |                                                                                                            |                                                                                                         |
| 5                                                                                                             | SOLICITANTE (S) <input type="checkbox"/> Esta persona también es inventor. Para datos adicionales utilizar hoja de información complementaria |                                                                                                            |                                                                                                         |
| APELLIDOS O RAZÓN SOCIAL NOMBRE IDENTIFICACIÓN TIPO                                                           |                                                                                                                                               |                                                                                                            |                                                                                                         |
| 1. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY                                                                      |                                                                                                                                               |                                                                                                            |                                                                                                         |
| 6                                                                                                             | DATOS DEL SOLICITANTE                                                                                                                         |                                                                                                            |                                                                                                         |
| DIRECCIÓN                                                                                                     |                                                                                                                                               | 77 Massachusetts Avenue Cambridge, MA 02139-4307                                                           | No. TELÉFONO 6341500                                                                                    |
| CIUDAD                                                                                                        |                                                                                                                                               | Cambridge                                                                                                  | CORREO ELECTRÓNICO <a href="mailto:Alvaro.correa@bakermckenzie.com">Alvaro.correa@bakermckenzie.com</a> |
| DEPARTAMENTO/ESTADO                                                                                           |                                                                                                                                               | Massachusetts                                                                                              | NACIONALIDAD O LUGAR DE CONSTITUCIÓN Estados Unidos de América                                          |
| PAÍS DE RESIDENCIA                                                                                            |                                                                                                                                               | Estados Unidos de América                                                                                  |                                                                                                         |
| 7                                                                                                             | INVENTOR (ES) Para datos adicionales utilizar hoja de información complementaria                                                              |                                                                                                            |                                                                                                         |
| APELLIDOS                                                                                                     |                                                                                                                                               | NOMBRES                                                                                                    | NACIONALIDAD                                                                                            |
| 1. DHIMAN                                                                                                     |                                                                                                                                               | Rajeev                                                                                                     | Canadá                                                                                                  |
| 2. SMITH, J.                                                                                                  |                                                                                                                                               | David                                                                                                      | Estados Unidos de América                                                                               |
| 3. VARANASI                                                                                                   |                                                                                                                                               | Kripa, K.                                                                                                  | India                                                                                                   |
| 4. REZA-GARDUNO CABELLO                                                                                       |                                                                                                                                               | Ernesto                                                                                                    | Estados Unidos de América                                                                               |
| DIRECCIÓN DE CORREO ELECTRÓNICO:                                                                              |                                                                                                                                               |                                                                                                            |                                                                                                         |
| 8                                                                                                             | DATOS INVENTOR (ES)                                                                                                                           |                                                                                                            |                                                                                                         |
| PAÍS RESIDENCIA                                                                                               | DEPARTAMENTO/ESTADO                                                                                                                           | CIUDAD                                                                                                     | DIRECCIÓN                                                                                               |
| 1. Estados Unidos de América                                                                                  | Massachusetts                                                                                                                                 | Malden                                                                                                     | 8 Island Hill Avenue, No. 213 Malden, MA 02148                                                          |
| 2. Estados Unidos de América                                                                                  | Massachusetts                                                                                                                                 | Cambridge                                                                                                  | 285 3rd Street, Apt. 843 Cambridge, MA 02142                                                            |
| 3. Estados Unidos de América                                                                                  | Massachusetts                                                                                                                                 | Lexington                                                                                                  | 31 Fletcher Avenue, Unit 5 Lexington, MA 02420                                                          |
| 4. Estados Unidos de América                                                                                  | Massachusetts                                                                                                                                 | Cambridge                                                                                                  | 372 Memorial Drive Cambridge, MA 02139                                                                  |
| OTRO(S) SOLICITANTE(S) Y/O (OTRO(S)) INVENTOR(ES)                                                             |                                                                                                                                               |                                                                                                            |                                                                                                         |
| <input type="checkbox"/> Los demás solicitantes y/o (demás) inventores se indican en una hoja a continuación. |                                                                                                                                               |                                                                                                            |                                                                                                         |
| 9                                                                                                             | REPRESENTANTE LEGAL <input checked="" type="checkbox"/> APODERADO                                                                             |                                                                                                            |                                                                                                         |
| APELLIDOS                                                                                                     | NOMBRES                                                                                                                                       | IDENTIFICACIÓN                                                                                             |                                                                                                         |
| Correa                                                                                                        | Alvaro                                                                                                                                        | C.C. 79.143.366 T.P. 20.281                                                                                |                                                                                                         |

|           |                         |                                              |                                 |
|-----------|-------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------|
| DIRECCIÓN | Av. 82 No. 10-62 Piso 5 | No. TELÉFONO                                 | 6341500                         |
| CIUDAD    | Bogotá                  | CORREO ELECTRÓNICO                           | Alvaro.correa@bakermckenzie.com |
| PAÍS      | Colombia                | No. RADICACIÓN DE PROTOCOLO DE PODER GENERAL |                                 |

|    |                                                                                               |             |                         |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------|
| 10 | DECLARACIONES DE PRIORIDAD <input checked="" type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO |             |                         |
|    | (33) PAÍS DE ORIGEN                                                                           | CÓDIGO PAÍS | (31) NÚMERO             |
|    | 1. Estados Unidos de América                                                                  | US          | 61/515,395              |
|    |                                                                                               |             | (32) FECHA (AAAA/MM/DD) |
|    |                                                                                               |             | 05/08/2011              |

|                                                                                                                                                                                                                  |                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 11                                                                                                                                                                                                               | DECLARACIÓN SOBRE USO DE RECURSOS GENÉTICOS O BIOLÓGICOS |
| <i>Declaro que el objeto de la presente solicitud de patente fue obtenido a partir de recursos genéticos o biológicos de los que cualquiera de los países miembros de la Comunidad Andina es país de origen.</i> |                                                          |
| <input type="checkbox"/> SI <input checked="" type="checkbox"/> NO                                                                                                                                               |                                                          |
| Nota: En caso afirmativo deberá anexar copia del contrato de acceso de recursos genéticos o productos derivados, o certificado o número de registro, expedido por la Autoridad competente.                       |                                                          |

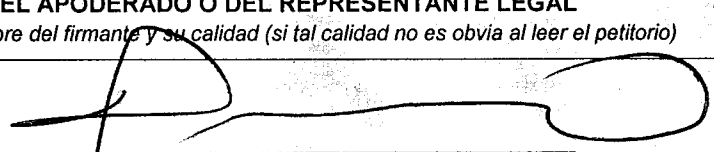
|                                                                                                                                                                                                                     |                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 12                                                                                                                                                                                                                  | DECLARACIÓN SOBRE USO DE CONOCIMIENTOS TRADICIONALES |
| <i>Declaro que el objeto de la presente solicitud de patente fue obtenido a partir de conocimientos tradicionales de comunidades indígenas, afroamericanas o locales de países miembros de la Comunidad Andina.</i> |                                                      |
| <input type="checkbox"/> SI <input checked="" type="checkbox"/> NO                                                                                                                                                  |                                                      |
| Nota: En caso afirmativo deberá anexar la licencia o autorización de uso de conocimiento tradicional, o certificado, o número de registro expedido por la Autoridad competente.                                     |                                                      |

|                                                                                                                                                                                                                                        |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 13                                                                                                                                                                                                                                     | REDUCCIÓN DE TASAS |
| <i>Declaro que carezco de medios económicos para presentar la solicitud de patente.</i>                                                                                                                                                |                    |
| <input type="checkbox"/> SI <input checked="" type="checkbox"/> NO                                                                                                                                                                     |                    |
| Nota: En caso de ser persona natural y carecer de medios económicos, y por lo tanto, aplique la reducción de tasas a que se refiere la resolución vigente en tarifas, debe firmar la presente solicitud bajo la gravedad de juramento. |                    |
| Micro, pequeñas y medianas empresas <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                           |                    |
| Universidades públicas o privadas <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                             |                    |
| Entidades sin ánimo de lucro <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                  |                    |

Debe aportar los documentos que se indican en el numeral 17 de anexos

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 14                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | AUTORIZACIÓN DE NOTIFICACIÓN EN LÍNEA <input checked="" type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO |
| Manifiesto que he leído y entendido perfectamente los términos y condiciones de uso de medios electrónicos para las notificaciones en línea a través de Internet de los actos administrativos proferidos por la Superintendencia de Industria y Comercio que deben ser notificados personalmente y, en consecuencia, autorizo el servicio de notificación a través de internet. |                                                                                                          |

|    |                                        |               |                  |
|----|----------------------------------------|---------------|------------------|
| 15 | COMPROBANTE DE PAGO O PAGO ELECTRÓNICO | N° 14-0014282 | Fecha 07/02/2014 |
|----|----------------------------------------|---------------|------------------|

|                                                                                                                   |                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 16                                                                                                                | FIRMA DEL SOLICITANTE, DEL APODERADO O DEL REPRESENTANTE LEGAL |
| Junto a cada firma, indicar el nombre del firmante y su calidad (si tal calidad no es obvia al leer el petitorio) |                                                                |
|                               |                                                                |

|                                                                                                                     |                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 17                                                                                                                  | ANEXOS                                                                                                                                                     |
| Documentación Técnica<br>Solicitud Internacional en castellano                                                      | Documentación Jurídica                                                                                                                                     |
| 1. <input checked="" type="checkbox"/> Descripción N° de folios:                                                    | 9. <input type="checkbox"/> Poderes, si fuera el caso.                                                                                                     |
| 2. <input checked="" type="checkbox"/> Reivindicaciones N° Reivindicaciones: 29                                     | 10. <input checked="" type="checkbox"/> Documento que legalmente pruebe la cesión del inventor al solicitante o a su causante.                             |
| 3. <input checked="" type="checkbox"/> Dibujos y/o figuras N° folios: 14                                            | 11. <input type="checkbox"/> Copia del contrato de acceso de recursos genéticos o productos derivados, certificado o número de registro, si fuera el caso. |
| 4. <input checked="" type="checkbox"/> Resumen.                                                                     | 12. <input type="checkbox"/> Copia de la licencia o autorización de Conocimientos Tradicionales, certificado o número de registro, si fuera el caso.       |
| 5. <input type="checkbox"/> Certificado de depósito de material biológico si fuera el caso.                         | 13. Reducción de tasas                                                                                                                                     |
| 6. <input type="checkbox"/> Listado de secuencias de nucleótidos y/o aminoácidos en forma digital si fuera el caso. | Micro, pequeñas o medianas empresas                                                                                                                        |
| 7. <input type="checkbox"/> Arte final 12 x 12.                                                                     | <input type="checkbox"/> Copia simple de la declaración de renta del año inmediatamente anterior, o en su defecto prueba documental idónea.                |
| 8. <input checked="" type="checkbox"/> Anexo formato digital.                                                       | <input type="checkbox"/> Documento de constancia de cumplimiento con lo establecido en la ley 905 de 2004.                                                 |
|                                                                                                                     | Universidades públicas o privadas                                                                                                                          |
|                                                                                                                     | <input type="checkbox"/> Copia acto de reconocimiento institucional emitido por el Ministerio de Educación                                                 |
|                                                                                                                     | Entidades sin ánimo de lucro                                                                                                                               |
|                                                                                                                     | <input type="checkbox"/> Copia de registro vigente en Cámara de comercio.                                                                                  |
|                                                                                                                     | <input type="checkbox"/> Hoja de información complementaria.                                                                                               |

☐ Otros, especificar

14. ☐ Comprobante de pago de la tasa de presentación de la solicitud.  
15. ☐ Comprobante de pago por reivindicación de prioridad.  
16. ☐ Comprobante de pago de la tasa por concepto de excedente de palabras en la publicación.  
17. ☐ Comprobante de pago por reivindicación adicional a 10.

# SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO

NIT : 800.176.089-2

- / -



**Industria y Comercio**  
SUPERINTENDENCIA

## RECIBO DE CAJA

**No. 14 - 0014282**

Bogotá D.C., Febrero 07 de 2014 - 08:04:24

RECIBIDO DE : BAKER

NI 900.532.339

### \*\*\* Soporte del Pago \*\*\*

| TIPO PAGO    | BANCO           | CUENTA    | No. PAGO  | FECHA PAGO | VR PAGO        |
|--------------|-----------------|-----------|-----------|------------|----------------|
| CONSIGNACION | BANCO DE BOGOTA | 062754387 | 596562083 | 06/02/2014 | 129.666.000.00 |

### \*\*\* Conceptos Pagados \*\*\*

| CANT. | RENTISTICO              | CONCEPTO                                   | Vr. UNDITARIO | Vr. CONCEPTO            |
|-------|-------------------------|--------------------------------------------|---------------|-------------------------|
| 1     | 50005-01-01 SOLICITUDES | 1 TRAMITES DE SOL. DE PATENTE DE INVENCIÓN | 515.000.00    | 515.000.00              |
|       |                         |                                            |               | <del>\$515.000.00</del> |
|       |                         |                                            |               | =====                   |

**SON: \*\*QUINIENTOSQUINCE MIL PESOS MONEDA CORRIENTE\*\***

Responsable: \_\_\_\_\_

Recibo de Caja Aplicado al Expediente No. \_\_\_\_\_

SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO



**No. 14-042258- -00000-0000**

Fecha: 2014-02-27 16:44:06  
Tra. 11 PATENTE IYII  
Act. 411 PRESENTACION

Dep. 2020 DIR. NUEVASCR  
Eve: 378 FASENACIONALI  
Folios: 8

Sede Centro: Carrera 13 No. 27 - 00 Pisos 3,4,5 y 10 Bogotá, D.C.- Colombia

Web: [www.sic.gov.co](http://www.sic.gov.co) e-mail: [info@sic.gov.co](mailto:info@sic.gov.co) Conmutador: (571) 5870000 Fax: (571) 5870284 Línea: 018000-910165 Call Center: (571) 6513240

Febrero 7 de 2014 - 08:04:41



**Industria y Comercio**

SUPERINTENDENCIA

**SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO**

**DIVISION DE NUEVAS CREACIONES**

**EXTRACTO PARA PUBLICACIÓN**

**SOLICITUD DE PATENTE DE INVENCION PCT**

|                                                                                |                                                       |                                                                                                                 |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| (21) N° de solicitud:                                                          |                                                       | (51) Int Cl:                                                                                                    |                                |
| 22) Fecha de solicitud:                                                        |                                                       | (71) Solicitante(s) MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY                                                       |                                |
| (30) Prioridad                                                                 | (31) No.<br>61/515,395                                | 32) Fecha<br>05/08/2011                                                                                         | (33) País<br>US                |
|                                                                                |                                                       | (72) Inventor(es) DHIMAN, Rajeev;<br>SMITH, J., David;<br>VARANASI, Kripa, K.;<br>REZA-GARDUNO CABELLO, Ernesto |                                |
|                                                                                |                                                       | (74) Apoderado: ALVARO CORREA ORDOÑEZ                                                                           |                                |
| (85)                                                                           | Fecha limite inicio fase nacional: 05/03/2014         |                                                                                                                 | (87) Publicación internacional |
| (86)                                                                           | Datos relativos a la presentación de la solicitud PCT |                                                                                                                 | Fecha: 14/02/2013              |
|                                                                                | Fecha de presentación de la solicitud: 22/11/2011     |                                                                                                                 | N° publicación: WO/2013/022467 |
|                                                                                | No. de solicitud PCT/US2011/061898                    |                                                                                                                 |                                |
| (54) Titulo: DISPOSITIVOS QUE INCORPORAN UNA SUPERFICIE IMPREGNADA CON LIQUIDO |                                                       |                                                                                                                 |                                |

**Resumen:**

La invención se refiere a un artículo que tiene una superficie impregnada con líquido, la cual superficie tiene una matriz de partes en ella, espaciadas suficientemente cerca para contener de forma estable un líquido entre ellas o dentro de las mismas y preferentemente también una película delgada. La superficie le proporciona al artículo propiedades no humectantes deseadas. En comparación con superficies no humectantes anteriores, que incluyen un gas (p. ej., aire) atrapado dentro de las texturas de la superficie, estas superficies impregnadas con líquido son resistentes al empalme y la formación de escarcha y, por lo tanto, son más fuertes.



**Industria y Comercio**

SUPERINTENDENCIA

|                                                                                                                  |                    |                                       |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|-----------|
| <b>SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO</b>                                                                  |                    |                                       |           |
| <b>DIVISION DE NUEVAS CREACIONES</b>                                                                             |                    |                                       |           |
| <b>TARJETA ARCHIVO PROPIETARIOS</b>                                                                              |                    |                                       |           |
| PATENTE DE INVENCION ____ PCT <input checked="" type="checkbox"/> MODELO DE UTILIDAD ____ DISEÑO INDUSTRIAL ____ |                    |                                       |           |
| (21) N° de solicitud:                                                                                            |                    | (22) Fecha de solicitud:              |           |
| (51) Clasificación Internacional :                                                                               |                    |                                       |           |
| (71) Solicitante(s)<br><b>MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY</b>                                              |                    |                                       |           |
| (72) Inventor(es)<br><b>DHIMAN, Rajeev; SMITH, J., David; VARANASI, Kripa, K.; REZA-GARDUNO CABELLO, Ernesto</b> |                    |                                       |           |
| (74) Apoderado: <b>ALVARO CORREA ORDOÑEZ</b>                                                                     |                    |                                       |           |
| (30) Prioridad                                                                                                   | (31) No. Prioridad | 32) Fecha                             | (33) País |
|                                                                                                                  | <b>61/515,395</b>  | <b>05/08/2011</b>                     | <b>US</b> |
| (85) Fecha inicio fase nacional: <b>05/03/2014</b>                                                               |                    | (87) Publicación internacional        |           |
| (86) Datos relativos a la presentación de la solicitud PCT                                                       |                    | Fecha: <b>14/02/2013</b>              |           |
| Fecha de presentación de la solicitud: <b>22/11/2011</b>                                                         |                    | N° publicación: <b>WO/2013/022467</b> |           |
| No. de solicitud <b>PCT/US2011/061898</b>                                                                        |                    |                                       |           |
| (54) Título:<br><b>DISPOSITIVOS QUE INCORPORAN UNA SUPERFICIE IMPREGNADA CON LIQUIDO</b>                         |                    |                                       |           |



**Industria y Comercio**

SUPERINTENDENCIA

**SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO**

**DIVISION DE NUEVAS CREACIONES**

**TARJETA ARCHIVO TEMATICO**

PATENTE DE INVENCION \_\_\_\_\_ PCT X MODELO DE UTILIDAD \_\_\_\_\_ DISEÑO INDUSTRIAL \_\_\_\_\_

(21) N° de solicitud:

(22) Fecha de solicitud:

(51) Clasificación Internacional :

(71) Solicitante(s)

**MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY**

(72) Inventor(es)

**DHIMAN, Rajeev; SMITH, J., David; VARANASI, Kripa, K.; REZA-GARDUNO CABELLO, Ernesto**

(74) Apoderado: ALVARO CORREA ORDOÑEZ

(30) Prioridad

(31) *No. Prioridad*

**61/515,395**

(32)

*Fecha*

**05/08/2011**

(33)

*País*

**US**

(85) Fecha límite inicio fase nacional: **05/03/2014**

(86) Datos relativos a la presentación de la solíc. PCT

Fecha de presentación de la solicitud: **22/11/2011**

No. de solicitud **PCT/US2011/061898**

(87) Publicación internacional:

Fecha: **14/02/2013**

No. Publicación : **WO/2013/022467**

(54) Título:

**DISPOSITIVOS QUE INCORPORAN UNA SUPERFICIE IMPREGNADA CON LIQUIDO**

(57) Resumen:

La invención se refiere a un artículo que tiene una superficie impregnada con líquido, la cual superficie tiene una matriz de partes en ella, espaciadas suficientemente cerca para contener de forma estable un líquido entre ellas o dentro de las mismas y preferentemente también una película delgada. La superficie le proporciona al artículo propiedades no humectantes deseadas. En comparación con superficies no humectantes anteriores, que incluyen un gas (p. ej., aire) atrapado dentro de las texturas de la superficie, estas superficies impregnadas con líquido son resistentes al empalamiento y la formación de escarcha y, por lo tanto, son más fuertes.



PLANILLA DE RADICACIÓN - DIGITALIZACIÓN DIARIA  
RELACIÓN DE ANEXOS

|                     |                                                                                                                                                     |            |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Dependencia:        | Fecha: <u>2020</u> / <u>2014</u> / <u>02</u> / <u>27</u><br>AAAA MM DD                                                                              | Recorrido: |
| Tipo de Radicación: | Entrada: <input checked="" type="checkbox"/> Salida: <input type="checkbox"/> Traslado: <input type="checkbox"/> Convenio: <input type="checkbox"/> | Planilla:  |

| ID | No. Radicación | Consecutivo | Item |
|----|----------------|-------------|------|
| 1  | 14-42258       | 0           | 7    |
| 2  |                |             |      |
| 3  |                |             |      |
| 4  |                |             |      |
| 5  |                |             |      |
| 6  |                |             |      |
| 7  |                |             |      |
| 8  |                |             |      |
| 9  |                |             |      |
| 10 |                |             |      |
| 11 |                |             |      |
| 12 |                |             |      |
| 13 |                |             |      |
| 14 |                |             |      |
| 15 |                |             |      |
| 16 |                |             |      |
| 17 |                |             |      |

| <i>Item</i>  | <i>Unidad de Conservación</i> |
|--------------|-------------------------------|
| 1            | Bolsa                         |
| 2            | Caja                          |
| 3            | Libro                         |
| 4            | Sobre                         |
| 5            | Tomo                          |
| 6            | Otro                          |
| <i>Item</i>  | <i>Soporte Documental</i>     |
| <del>X</del> | CD                            |
| 8            | Disquete                      |
| 9            | DVD                           |
| 10           | Folleto                       |
| 11           | Foto                          |
| 12           | Periódico                     |
| 13           | Plano                         |
| 14           | Publicación Periódica         |
| 15           | USB                           |
| 16           | Otro                          |

Observaciones:

EL CD ANEXO CONTIENE UN TOTAL DE 10 ARCHIVOS:

10 EN FORMATO PDF, (LOS CUALES FUERON PROCESADOS)

EL CD SE ENCUENTRA UBICADO EN EL FOLIO (8)

11



SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO



No. 14-042258-00000-0000

Fecha: 2014-02-27 16:44:06  
Tra. 11 PATENTE IYII  
Act. 411 PRESENTACION

Dep. 2020 DIR. NUEVAS CR  
Eve. 378 FASE NACIONAL I  
Folios: 8

SIONES

PATENTE DE INVENCION ☐

MC

Art 33 Decisión 486/00

|                                   |                                                                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/>          | Indicación que se solicita una patente.                                             |
| <input type="checkbox"/>          | Datos de identificación del solicitante o de la persona que presenta la solicitud   |
| <input type="checkbox"/>          | Descripción de la invención                                                         |
| <input type="checkbox"/>          | Dibujos de ser estos pertinentes                                                    |
| <input type="checkbox"/>          | Comprobante de pago de las tasas establecidas (De ser el caso formato de descuento) |
| Completa <input type="checkbox"/> | Incompleta <input type="checkbox"/>                                                 |

PATENTE DE INVENCION PCT ☒

MODELO DE UTILIDAD PCT ☐

Art.33 Decisión 486/00, Circular Única

|                                              |                                                                                                                         |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/>          | Indicación que se solicita una PCT                                                                                      |
| <input checked="" type="checkbox"/>          | Copia de la solicitud en español, tal como fue presentada inicialmente (capítulo descriptivo, reivindicatorio, resumen) |
| <input checked="" type="checkbox"/>          | Dibujos de ser estos pertinentes                                                                                        |
| <input checked="" type="checkbox"/>          | Comprobante de pago de las tasas establecidas (de ser el caso formato de descuento)                                     |
| Completa <input checked="" type="checkbox"/> | Incompleta <input type="checkbox"/>                                                                                     |

DISEÑO INDUSTRIAL ☐

(Art. 119 Decisión 486/00)

|                                   |                                                                                                           |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/>          | Indicación que se solicita Diseño industrial                                                              |
| <input type="checkbox"/>          | Datos de identificación del solicitante o de la persona que presenta la solicitud                         |
| <input type="checkbox"/>          | Representación gráfica y fotográfica del Diseño industrial o muestra del material que incorpora el diseño |
| <input type="checkbox"/>          | Comprobante de pago de las tasas establecidas                                                             |
| Completa <input type="checkbox"/> | Incompleta <input type="checkbox"/>                                                                       |

ESQUEMA DE TRAZADO ☐

(Art. 92 Decisión 486/00)

|                                   |                                                                                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/>          | Indicación que se solicita un esquema de trazado                                  |
| <input type="checkbox"/>          | Datos de identificación del solicitante o de la persona que presenta la solicitud |
| <input type="checkbox"/>          | Representación gráfica de un esquema de trazado                                   |
| <input type="checkbox"/>          | Comprobante de pago de las tasas establecidas                                     |
| Completa <input type="checkbox"/> | Incompleta <input type="checkbox"/>                                               |



(51) International Patent Classification:

*B08B 17/06* (2006.01) *B64D 15/00* (2006.01)  
*C09D 5/16* (2006.01) *C04B 111/20* (2006.01)  
*F03D 11/00* (2006.01)

(21) International Application Number:

PCT/US2011/061898

(22) International Filing Date:

22 November 2011 (22.11.2011)

(25) Filing Language:

English

(26) Publication Language:

English

(30) Priority Data:

61/515,395 5 August 2011 (05.08.2011) US

(71) Applicant (for all designated States except US): **MAS-SACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY** [US/US]; 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139-4307 (US).

(72) Inventors; and

(75) Inventors/Applicants (for US only): **DHIMAN, Rajeev** [CA/US]; 8 Island Hill Avenue, No. 213, Malden, MA 02148 (US). **SMITH, J., David** [US/US]; 143 Albany Sreet, Apt. 12, Cambridge, MA 02139 (US). **VARANASI, Kripa, K.** [IN/US]; 31 Fletcher Avenue, Unit 5, Lexington, MA 02420 (US). **REZA-GARDUNO CABELLO, Ernesto** [US/US]; 372 Memorial Drive, Cambridge, MA 02139 (US).

(74) Agents: **HAULBROOK, William, R.** et al.; Choate, Hall & Stewart LLP, Two International Place, Boston, MA 02110 (US).

(81) Designated States (unless otherwise indicated, for every kind of national protection available): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,

[Continued on next page]

(54) Title: DEVICES INCORPORATING A LIQUID - IMPREGNATED SURFACE

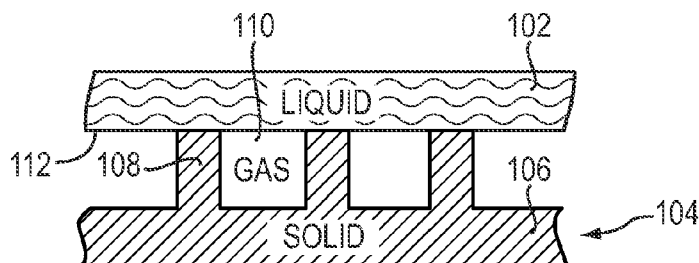


FIG. 1A

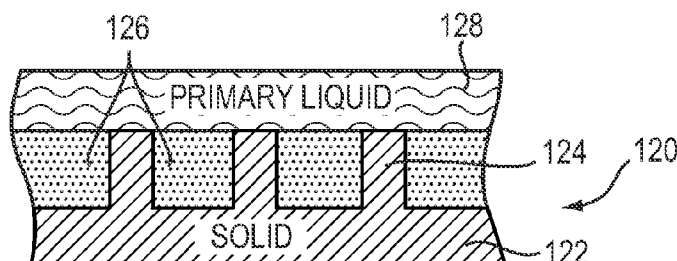


FIG. 1C

(57) Abstract: An article with a liquid-impregnated surface (120), the surface (120) having a matrix of features (124) thereupon, spaced sufficiently close to stably contain a liquid (126) therebetween or therewithin, and preferable also a thin film thereupon. The surface (120) provides the article with advantageous non-wetting properties. Compared to previous non-wetting surfaces (104), which include a gas (110) (e.g., air) entrained within surface textures (108), these liquid-impregnated surfaces (120) are resistant to impalement and frost formation, and are therefore more robust.



OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) Designated States** (unless otherwise indicated, for every kind of regional protection available): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Published:**

- with international search report (Art. 21(3))
- before the expiration of the time limit for amending the claims and to be republished in the event of receipt of amendments (Rule 48.2(h))

**(88) Date of publication of the international search report:**

13 June 2013

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/US2011/061898

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. B08B17/06 C09D5/16 F03D11/00 B64D15/00 C04B111/20  
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B08B C09D F03D C04B B64D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                                                                                                                                      | Relevant to claim No. |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| X         | DAVID QUÉRÉ: "Non-sticking drops; Non-sticking drops",<br>REPORTS ON PROGRESS IN PHYSICS, INSTITUTE<br>OF PHYSICS PUBLISHING, BRISTOL, GB,<br>vol. 68, no. 11,<br>7 September 2005 (2005-09-07), pages<br>2495-2532, XP020084626,<br>ISSN: 0034-4885, DOI:<br>10.1088/0034-4885/68/11/R01<br>paragraph [3.3.3]<br>----- | 1-29                  |
| X         | US 2006/013735 A1 (ENGELKING JOACHIM [DE]<br>ET AL) 19 January 2006 (2006-01-19)<br>paragraphs [0030] - [0032], [0058] -<br>[0065], [0073], [0074]; figures 2a-2c<br>-----<br>-/--                                                                                                                                      | 1, 10,<br>13-15       |



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

## \* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&amp;" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

11 April 2013

Date of mailing of the international search report

24/04/2013

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Petrucchi, Luigi

## Box No. IV Text of the abstract (Continuation of item 5 of the first sheet)

An article with a liquid-impregnated surface (120), the surface (120) having a matrix of features (124) thereupon, spaced sufficiently close to stably contain a liquid (126) therebetween or therewithin, and preferable also a thin film thereupon. The surface (120) provides the article with advantageous non-wetting properties. Compared to previous non-wetting surfaces (104), which include a gas (110) (e.g., air) entrained within surface textures (108), these liquid-impregnated surfaces (120) are resistant to impalement and frost formation, and are therefore more robust.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/US2011/061898

| C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                           |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Category*                                            | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Relevant to claim No.     |
| X                                                    | WO 2011/087458 A1 (UNIV SINGAPORE [SG];<br>XIE XIAN NING [SG]; LOH KIAN PING [SG])<br>21 July 2011 (2011-07-21)<br>the whole document                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 1,6,8,<br>10,<br>13-15,20 |
| X                                                    | WO 2010/129807 A1 (UNIV CALIFORNIA [US];<br>MAO SAMUEL S [US]; ZORMPA VASILEIA [US];<br>CHEN XI) 11 November 2010 (2010-11-11)<br>the whole document                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1,6,8-15                  |
| X                                                    | US 5 624 713 A (RAMER PAUL [US])<br>29 April 1997 (1997-04-29)<br>column 3, line 63 - column 4, line 35                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 1,7,<br>16-18             |
| X                                                    | JP 5 240251 A (NTN TOYO BEARING CO LTD)<br>17 September 1993 (1993-09-17)<br>abstract                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 1,7,<br>16-18             |
| X                                                    | JP 2004 037764 A (FUJI XEROX CO LTD)<br>5 February 2004 (2004-02-05)<br>abstract; figure 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 1,7,<br>16-18             |
| A                                                    | ULRIKE BAUER ET AL: "The insect-trapping<br>rim of Nepenthes pitchers: surface<br>structure and function",<br>PLANT SIGNALING & BEHAVIOR,<br>vol. 4, no. 11, November 2009 (2009-11),<br>pages 1019-1023, XP055025454,<br>ISSN: 1559-2316, DOI:<br>10.4161/psb.4.11.9664<br>the whole document                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1                         |
| A                                                    | Holger F. Bohn ET AL: "Insect<br>aquaplaning: Nepenthes pitcher plants<br>capture prey with the peristome, a fully<br>wetttable water-lubricated anisotropic<br>surface",<br>Proceedings of the National Academy of<br>Sciences,<br>21 September 2008 (2008-09-21), pages<br>14138-14143, XP055025182,<br>DOI: 10.1073/pnas.0405885101<br>Retrieved from the Internet:<br>URL: <a href="http://www.pnas.org/content/101/39/14138.full.pdf#page=1&amp;view=FitH">http://www.pnas.org/content/101/39/14138.full.pdf#page=1&amp;view=FitH</a><br>[retrieved on 2012-04-20]<br>the whole document | 1                         |
|                                                      | -----<br>-/--                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                           |

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/US2011/061898

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                                                                                                                                                         | Relevant to claim No. |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| T         | TAK-SING WONG ET AL: "Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity", NATURE, vol. 477, no. 7365, 22 September 2011 (2011-09-22), pages 443-447, XP055025132, ISSN: 0028-0836, DOI: 10.1038/nature10447 the whole document<br>-----                                                                      | 1-29                  |
| T         | LAFUMA A ET AL: "Slippery pre-suffused surfaces;Slippery pre-suffused surfaces", EUROPHYSICS LETTERS: A LETTERS JOURNAL EXPLORING THE FRONTIERS OF PHYSICS, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, BRISTOL, FR, vol. 96, no. 5, 3 November 2011 (2011-11-03), page 56001, XP020214166, ISSN: 0295-5075, DOI: 10.1209/0295-5075/96/56001<br>----- | 1-29                  |
| E         | WO 2012/100099 A2 (HARVARD COLLEGE [US]; AIZENBERG JOANNA [US]; AIZENBERG MICHAEL [US]; K) 26 July 2012 (2012-07-26) the whole document<br>-----                                                                                                                                                                                           | 1-24,28, 29           |
| E         | WO 2012/100100 A2 (HARVARD COLLEGE [US]; AIZENBERG JOANNA [US]; HATTON BENJAMIN [US]; ING) 26 July 2012 (2012-07-26) the whole document<br>-----                                                                                                                                                                                           | 1-18, 25-27           |

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/US2011/061898

| Patent document<br>cited in search report | Publication<br>date | Patent family<br>member(s) | Publication<br>date         |
|-------------------------------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------|
| US 2006013735                             | A1                  | 19-01-2006                 | AU 2003215589 A1 09-09-2003 |
|                                           |                     |                            | EP 1478926 A1 24-11-2004    |
|                                           |                     |                            | US 2006013735 A1 19-01-2006 |
|                                           |                     |                            | WO 03071275 A1 28-08-2003   |
| WO 2011087458                             | A1                  | 21-07-2011                 | CN 102753643 A 24-10-2012   |
|                                           |                     |                            | SG 182498 A1 30-08-2012     |
|                                           |                     |                            | US 2013003258 A1 03-01-2013 |
|                                           |                     |                            | WO 2011087458 A1 21-07-2011 |
| WO 2010129807                             | A1                  | 11-11-2010                 | CN 102803127 A 28-11-2012   |
|                                           |                     |                            | EP 2427406 A1 14-03-2012    |
|                                           |                     |                            | JP 2012526041 A 25-10-2012  |
|                                           |                     |                            | US 2012128963 A1 24-05-2012 |
|                                           |                     |                            | WO 2010129807 A1 11-11-2010 |
| US 5624713                                | A                   | 29-04-1997                 | CA 2244676 A1 31-07-1997    |
|                                           |                     |                            | EP 1009544 A1 21-06-2000    |
|                                           |                     |                            | JP 2000510353 A 15-08-2000  |
|                                           |                     |                            | NO 983405 A 22-09-1998      |
|                                           |                     |                            | US 5624713 A 29-04-1997     |
|                                           |                     |                            | WO 9727004 A1 31-07-1997    |
| JP 5240251                                | A                   | 17-09-1993                 |                             |
| JP 2004037764                             | A                   | 05-02-2004                 | NONE                        |
| WO 2012100099                             | A2                  | 26-07-2012                 | WO 2012100099 A2 26-07-2012 |
|                                           |                     |                            | WO 2012100100 A2 26-07-2012 |
| WO 2012100100                             | A2                  | 26-07-2012                 | WO 2012100099 A2 26-07-2012 |
|                                           |                     |                            | WO 2012100100 A2 26-07-2012 |

## DEVICES INCORPORATING A LIQUID-IMPREGNATED SURFACE

### Cross-Reference to Related Application

[0001] This application claims priority to and the benefit of, and incorporates herein by reference in its entirety, U.S. Provisional Patent Application No. 61/515,395, which was filed on August 5, 2011.

### Technical Field

[0002] This invention relates generally to non-wetting and low adhesion surfaces. More particularly, in certain embodiments, the invention relates to non-wetting surfaces that resist liquid impalement, ice formation, scale formation, hydrate formation, and/or have antifouling properties.

### Background

[0003] The advent of micro/nano-engineered surfaces in the last decade has opened up new techniques for enhancing a wide variety of physical phenomena in thermofluids sciences. For example, the use of micro/nano surface textures has provided nonwetting surfaces capable of achieving less viscous drag, reduced adhesion to ice and other materials, self-cleaning, and water repellency. These improvements result generally from diminished contact (i.e., less wetting) between the solid surfaces and adjacent liquids.

[0004] One type of non-wetting surface of interest is a superhydrophobic surface. In general, a superhydrophobic surface includes micro/nano-scale roughness on an intrinsically hydrophobic surface, such as a hydrophobic coating. Superhydrophobic surfaces resist contact with water by virtue of an air-water interface within the micro/nano surface textures.

[0005] One of the drawbacks of existing non-wetting surfaces (e.g., superhydrophobic, superoleophobic, and supermetallophobic surfaces) is that they are susceptible to impalement, which destroys the non-wetting capabilities of the surface. Impalement occurs when an impinging liquid (e.g., a liquid droplet or liquid stream) displaces the air entrained within the surface textures. Previous efforts to prevent impalement have focused on reducing surface texture dimensions from micro-scale to nano-scale.

[0006] Another drawback with existing non-wetting surfaces is that they are susceptible to ice formation and adhesion. For example, when frost forms on existing superhydrophobic surfaces, the surfaces become hydrophilic. Under freezing conditions, water droplets can stick

to the surface, and ice may accumulate. Removal of the ice can be difficult because the ice may interlock with the textures of the surface. Similarly, when these surfaces are exposed to solutions saturated with salts, for example as in desalination or oil and gas applications, scale builds on surfaces and results in loss of functionality. Similar limitations of existing non-wetting surfaces include problems with hydrate formation, and formation of other organic or inorganic deposits on the surfaces.

[0007] There is a need for non-wetting surfaces (e.g., superhydrophobic surfaces, superoleophobic surfaces, and supermetallophobic surfaces) that are more robust. In particular, there is a need for non-wetting surfaces that resist impalement and ice formation.

#### Summary of the Invention

[0008] Described herein are non-wetting surfaces that include a liquid impregnated within a matrix of micro/nano-engineered features on the surface, or a liquid filling pores or other tiny wells on the surface. Compared to previous non-wetting surfaces, which include a gas (e.g., air) entrained within the surface textures, these liquid-impregnated surfaces are resistant to impalement and frost formation, and are therefore more robust. The invention is fundamental in nature and can be used in any application that benefits from non-wetting surfaces. For example, the methods described herein may be used to reduce viscous drag in oil and gas pipelines, prevent ice formation on aircraft and/or powerlines, and minimize the accumulation of impinging liquids.

[0009] The methods and apparatus described herein have several advantages over existing non-wetting surfaces, referred to herein as gas-impregnated surfaces. For example, compared to gas-impregnated surfaces, liquid-impregnated surfaces have a much higher resistance to impalement. This enables a liquid-impregnated surface to withstand higher pressures (e.g., higher droplet velocities) during liquid impingement. In certain embodiments, a liquid-impregnated surface resists impalement through the use of micro-scale surface textures, rather than nano-scale textures, as utilized in previous gas-impregnated surface approaches. The use of micro-scale textures, rather than nano-scale textures is extremely advantageous at least because micro-scale features are less expensive and much easier to fabricate.

[0010] Through proper selection of the impregnating liquid, the liquid-impregnated surfaces described herein are easily customizable to suit a wide variety of applications. For example, water drag reduction on a solid surface may be achieved with the use of oil as the impregnating liquid, because water slips readily on oils. The use of oil as the impregnating liquid is also

suitable for the prevention of frost and ice formation. In this application, the frost and ice may form only on the peaks of the surface textures, thereby greatly reducing ice formation rates and adhesion strengths.

5     **[0011]** In one aspect, the invention is directed to an article comprising a liquid-impregnated surface, said surface comprising a matrix of features spaced sufficiently close to stably contain a liquid therebetween or therewithin. In certain embodiments, the liquid has viscosity at room temperature no greater than about 1000 cP (or cSt), no greater than about 100 cP (or cSt), or no greater than about 50 cP (or cSt). In certain embodiments, the liquid has vapor pressure at  
10   greater than about 20 mm Hg, no greater than about 1 mm Hg, or no greater than about 0.1 mmHg.

**[0012]** In certain embodiments, the features have substantially uniform height and wherein the liquid fills space between the features and coats the features with a layer at least about 5 nm in thickness over the top of the features. In certain embodiments, the features define pores or other wells and the liquid fills the features.

15   **[0013]** In certain embodiments, the liquid has receding contact angle of 0° such that the liquid forms a stable thin film on the top of the features.

**[0014]** In certain embodiments, the matrix has a feature-to-feature spacing from about 1 micrometer to about 100 micrometers. In certain embodiments, the matrix has a feature-to-feature spacing from about 5 nanometers to about 1 micrometer. In certain embodiments, the  
20   matrix comprises hierarchical structures. For example, the hierarchical structures may be micro-scale features that comprise nano-scale features thereupon.

**[0015]** In certain embodiments, the features have height no greater than about 100 micrometers. In certain embodiments, the features are posts. In certain embodiments, the features include one or more spherical particles, nanoneedles, nanograss, and/or random  
25   geometry features that provides surface roughness. In certain embodiments, the feature comprises one or more pores, cavities, interconnected pores, and/or interconnected cavities. In certain embodiments, the surface comprises porous media with a plurality of pores having different sizes.

**[0016]** In certain embodiments, the liquid comprises a perfluorocarbon liquid, a  
30   perfluoroFluorinated vacuum oil (such as Krytox 1506 or Fromblin 06/6), a fluorinated coolant (e.g., perfluoro-tripentylamine sold as FC-70, manufactured by 3M), an ionic liquid, a fluorinated ionic liquid that is immiscible with water, a silicone oil comprising PDMS, a

fluorinated silicone oil, a liquid metal, an eletro-rheological fluid, a magneto-rheological fluid, a ferrofluid, a dielectric liquid, a hydrocarbon liquid, a fluorocarbon liquid, a refrigerant, a vacuum oil, a phase-change material, a semi-liquid, grease, synovial fluid, and/or a bodily fluid.

5    **[0017]**    In certain embodiments, the article is a steam turbine part, a gas turbine part, an aircraft part, or a wind turbine part, and the liquid-impregnated surface is configured to repel impinging liquid. In certain embodiments, the article is eyeglasses, goggles, a ski mask, a helmet, a helmet face shield, or a mirror, and the liquid-impregnated surface is configured to inhibit fogging thereupon. In certain embodiments, the article is an aircraft part, a wind turbine  
10    part, a power transmission line, or a windshield, and the liquid-impregnated surface is configured to inhibit formation of ice thereupon. In certain embodiments, the article is a pipeline (or a part or coating thereof), and the liquid-impregnated surface is configured to inhibit the formation of hydrate thereupon and/or enhance the slippage (reduce drag) of fluid flowing thereupon (or therethrough). In certain embodiments, the article is a heat exchanger  
15    part or an oil or gas pipeline (or a part or coating thereof), and the liquid-impregnated surface is configured to inhibit the formation and/or adhesion of salt thereupon. In certain embodiments, the liquid-impregnated surface is configured to inhibit corrosion.

**[0018]**    In certain embodiments, the article is an artificial joint and the liquid-impregnated surface is configured to reduce friction between mating surfaces and/or provide long-lasting  
20    lubrication of the joint. In certain embodiments, the article is an engine part (e.g., piston or cylinder), and the liquid-impregnated surface is configured to provide long-lasting lubrication of the part. In certain embodiments, the liquid-impregnated surface is configured to release liquid from the surface over time, thereby providing lubrication over time.

**[0019]**    In certain embodiments, the liquid-impregnated surface is an anti-fouling surface  
25    configured to resist adsorption of debris thereupon. In certain embodiments, the article is a heat exchanger part, and the liquid-impregnated surface is configured to facilitate shedding of condensate thereupon, thereby enhancing condensation heat transfer.

Brief Description of the Drawings

[0020] The objects and features of the invention can be better understood with reference to the drawing described below, and the claims.

[0021] FIG. 1a is a schematic cross-sectional view of a liquid contacting a non-wetting surface, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0022] FIG. 1b is a schematic cross-sectional view of a liquid that has impaled a non-wetting surface, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0023] FIG. 1c is a schematic cross-sectional view of a liquid in contact with a liquid-impregnated surface, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0024] FIG. 2a is a schematic cross-sectional view of a droplet resting on a liquid-impregnated surface, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0025] FIG. 2b is an SEM image of a non-wetting surface that includes posts, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0026] FIG. 2c is a schematic perspective view of a non-wetting surface that includes posts, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0027] FIG. 2d is a schematic top, cross-sectional view of a non-wetting surface that includes posts, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0028] FIG. 3 includes a photograph of a microtextured surface, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0029] FIGS. 4a and 4b include a sequence of high speed video images depicting the impingement of a water droplet on a gas-impregnated surface and a liquid-impregnated surface, respectively, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0030] FIG. 5 includes a sequence of high speed video images showing a droplet impacting a liquid-impregnated surface tilted at 25° with respect horizontal, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0031] FIGS. 6a-6d include a sequence of ESEM images showing the formation of frost on a gas-impregnated non-wetting surface, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0032] FIG. 7a-7c include images from droplet impact testing on dry and frosted superhydrophobic surfaces, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0033] FIG. 8 is a plot of measured normalized ice adhesion strength versus normalized surface area, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0034] FIG. 9 is a plot of roll-off angle versus surface solid fraction, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0035] FIGS. 10, 11, and 12 are plots of droplet rolling velocity on a tilted liquid-impregnated surface, in accordance with certain embodiments of the invention.

5 [0036] FIGS. 13 and 14 include Environmental SEM (ESEM) images of frost nucleation on micropost surfaces impregnated with silicone oil, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0037] FIG. 15 is an image of a droplet of water on a surface having a matrix of post features and impregnated with silicone oil, contrasting an impaled state with a nonwetted state, in  
10 accordance with certain embodiments of the invention.

[0038] FIG. 16 is a schematic describing six liquid-impregnated surface wetting states, in accordance with certain embodiments of the invention.

[0039] FIG. 17 is a schematic showing conditions for the six liquid-impregnated surface wetting states shown in FIG. 16, in accordance with certain embodiments of the invention.

#### Description

15 [0040] It is contemplated that compositions, mixtures, systems, devices, methods, and processes of the claimed invention encompass variations and adaptations developed using information from the embodiments described herein. Adaptation and/or modification of the compositions, mixtures, systems, devices, methods, and processes described herein may be performed by those of ordinary skill in the relevant art.

20 [0041] Throughout the description, where articles, devices and systems are described as having, including, or comprising specific components, or where processes and methods are described as having, including, or comprising specific steps, it is contemplated that, additionally, there are articles, devices, and systems of the present invention that consist essentially of, or consist of, the recited components, and that there are processes and methods  
25 according to the present invention that consist essentially of, or consist of, the recited processing steps.

[0042] Similarly, where articles, devices, mixtures, and compositions are described as having, including, or comprising specific compounds and/or materials, it is contemplated that, additionally, there are articles, devices, mixtures, and compositions of the present invention that  
30 consist essentially of, or consist of, the recited compounds and/or materials.

[0043] It should be understood that the order of steps or order for performing certain actions is immaterial so long as the invention remains operable. Moreover, two or more steps or actions may be conducted simultaneously.

[0044] The mention herein of any publication, for example, in the Background section, is not an admission that the publication serves as prior art with respect to any of the claims presented herein. The Background section is presented for purposes of clarity and is not meant as a description of prior art with respect to any claim.

[0045] In certain embodiments, a static contact angle  $\theta$  between a liquid and solid is defined as the angle formed by a liquid drop on a solid surface as measured between a tangent at the contact line, where the three phases – solid, liquid, and vapor – meet, and the horizontal. The term “contact angle” usually implies the *static* contact angle  $\theta$  since the liquid is merely resting on the solid without any movement.

[0046] As used herein, dynamic contact angle,  $\theta_d$ , is a contact angle made by a *moving* liquid on a solid surface. In the context of droplet impingement,  $\theta_d$  may exist during either advancing or receding movement.

[0047] As used herein, a surface is “non-wetting” if it has a dynamic contact angle with a liquid of at least 90 degrees. Examples of non-wetting surfaces include, for example, superhydrophobic surfaces, superoleophobic surfaces, and supermetallophobic surfaces.

[0048] As used herein, contact angle hysteresis (CAH) is  $CAH = \theta_a - \theta_r$ , where  $\theta_a$  and  $\theta_r$  are advancing and receding contact angles, respectively, formed by a liquid on a solid surface. The advancing contact angle  $\theta_a$  is the contact angle formed at the instant when a contact line is about to advance, whereas the receding contact angle  $\theta_r$  is the contact angle formed when a contact line is about to recede.

[0049] FIG. 1a is a schematic cross-sectional view of a contacting liquid 102 in contact with a traditional or previous non-wetting surface 104 (i.e., a gas impregnating surface), in accordance with one embodiment of the invention. The surface 104 includes a solid 106 having a surface texture defined by posts 108. The regions between the posts 108 are occupied by a gas 110, such as air. As depicted, while the contacting liquid 102 is able to contact the tops of the posts 108, a gas-liquid interface 112 prevents the liquid 102 from wetting the entire surface 104.

[0050] Referring to FIG. 1b, in certain instances, the contacting liquid 102 may displace the impregnating gas and become impaled within the posts 108 of the solid 106. Impalement may

occur, for example, when a liquid droplet impinges the surface 104 at high velocity. When impalement occurs, the gas occupying the regions between the posts 108 is replaced with the contacting liquid 102, either partially or completely, and the surface 104 may lose its non-wetting capabilities.

5    **[0051]**    Referring to FIG. 1c, in certain embodiments, a non-wetting, liquid-impregnated surface 120 is provided that includes a solid 122 having textures (e.g., posts 124) that are impregnated with an impregnating liquid 126, rather than a gas. In the depicted embodiment, a contacting liquid 128 in contact with the surface, rests on the posts 124 (or other texture) of the surface 120. In the regions between the posts 124, the contacting liquid 128 is supported by the  
10    impregnating liquid 126. In certain embodiments, the contacting liquid 128 is immiscible with the impregnating liquid 126. For example, the contacting liquid 128 may be water and the impregnating liquid 126 may be oil.

15    **[0052]**    The solid 122 may include any intrinsically hydrophobic, oleophobic, and/or metallophobic material or coating. For example, the solid 122 may include: hydrocarbons, such as alkanes, and fluoropolymers, such as teflon, trichloro(1H,1H,2H,2H-perfluorooctyl)silane (TCS), octadecyltrichlorosilane (OTS), heptadecafluoro- 1,1,2,2-tetrahydrodecyltrichlorosilane, fluoroPOSS, and/or other fluoropolymers. Additional possible materials or coatings for the solid 122 include: ceramics, polymeric materials, fluorinated materials, intermetallic compounds, and composite materials. Polymeric materials may  
20    include, for example, polytetrafluoroethylene, fluoroacrylate, fluoroetherthane, fluorosilicone, fluorosilane, modified carbonate, chlorosilanes, silicone, polydimethylsiloxane (PDMS), and/or combinations thereof. Ceramics may include, for example, titanium carbide, titanium nitride, chromium nitride, boron nitride, chromium carbide, molybdenum carbide, titanium carbonitride, electroless nickel, zirconium nitride, fluorinated silicon dioxide, titanium dioxide,  
25    tantalum oxide, tantalum nitride, diamond-like carbon, fluorinated diamond-like carbon, and/or combinations thereof. Intermetallic compounds may include, for example, nickel aluminide, titanium aluminide, and/or combinations thereof.

30    **[0053]**    The textures within the liquid-impregnated surface 120 are physical textures or surface roughness. The textures may be random, including fractal, or patterned. In certain embodiments, the textures are micro-scale or nano-scale features. For example, the textures may have a length scale L (e.g., an average pore diameter, or an average protrusion height) that is less than about 100 microns, less than about 10 microns, less than about 1 micron, less than

about 0.1 microns, or less than about 0.01 microns. In certain embodiments, the texture includes posts 124 or other protrusions, such as spherical or hemispherical protrusions. Rounded protrusions may be preferable to avoid sharp solid edges and minimize pinning of liquid edges. The texture may be introduced to the surface using any conventional method, including mechanical and/or chemical methods such as lithography, self-assembly, and deposition, for example.

**[0054]** The impregnating liquid 126 may be any type of liquid that is capable of providing the desired non-wetting properties. For example, the impregnating liquid 126 may be oil-based or water-based (i.e., aqueous). In certain embodiments, the impregnating liquid 126 is an ionic liquid (e.g., BMI-IM). Other examples of possible impregnating liquids include hexadecane, vacuum pump oils (e.g., FOMBLIN<sup>®</sup> 06/6, KRYTOX<sup>®</sup> 1506) silicon oils (e.g., 10 cSt or 1000 cSt), fluorocarbons (e.g., perfluoro-tripentylamine, FC-70), shear-thinning fluids, shear-thickening fluids, liquid polymers, dissolved polymers, viscoelastic fluids, and/or liquid fluoroPOSS. In certain embodiments, the impregnating liquid is (or comprises) a liquid metal, a dielectric fluid, a ferro fluid, a magneto-rheological (MR) fluid, an electro-rheological (ER) fluid, an ionic fluid, a hydrocarbon liquid, and/or a fluorocarbon liquid. In one embodiment, the impregnating liquid 126 is made shear thickening with the introduction of nano particles. A shear-thickening impregnating liquid 126 may be desirable for preventing impalement and resisting impact from impinging liquids, for example.

**[0055]** To minimize evaporation of the impregnating liquid 126 from the surface 120, it is generally desirable to use impregnating liquids 126 that have low vapor pressures (e.g., less than 0.1 mmHg, less than 0.001 mmHg, less than 0.00001 mmHg, or less than 0.000001 mmHg). In certain embodiments, the impregnating liquid 126 has a freezing point of less than -20 °C, less than -40 °C, or about

-60 °C. In certain embodiments, the surface tension of the impregnating liquid 126 is about 15 mN/m, about 20 mN/m, or about 40 mN/m. In certain embodiments, the viscosity of the impregnating liquid 126 is from about 10 cSt to about 1000 cSt).

**[0056]** The impregnating liquid 126 may be introduced to the surface 120 using any conventional technique for applying a liquid to a solid. In certain embodiments, a coating process, such as a dip coating, blade coating, or roller coating, is used to apply the impregnating liquid 126. Alternatively, the impregnating liquid 126 may be introduced and/or replenished by liquid materials flowing past the surface 120 (e.g., in a pipeline). After the

impregnating liquid 126 has been applied, capillary forces hold the liquid in place. Capillary forces scale roughly with the inverse of feature-to-feature distance or pore radius, and the features may be designed such that the liquid is held in place despite movement of the surface and despite movement of air or other fluids over the surface (e.g., where the surface 120 is on the outer surface of an aircraft with air rushing over, or in a pipeline with oil and/or other fluids flowing therethrough). In certain embodiments, nano-scale features are used (e.g., 1 nanometer to 1 micrometer) where high dynamic forces, body forces, gravitational forces, and/or shearing forces could pose a threat to remove the liquid film, e.g., for surfaces used in fast flowing pipelines, on airplanes, on wind turbine blades, etc. Small features may also be useful to provide robustness and resistance to impact.

**[0057]** Compared to gas-impregnated surfaces, the liquid-impregnated surfaces described herein offer several advantages. For example, because liquids are incompressible over a large range of pressures, liquid-impregnated surfaces are generally more resistant to impalement. In certain embodiments, while nano-scale (e.g., less than one micron) textures may be necessary to avoid impalement with gas-impregnated surfaces, micro-scale (e.g., from 1 micron to about 100 microns) textures are sufficient for avoiding impalement with liquid-impregnated surface. As mentioned, micro-scale textures are much easier to manufacture and more practical than nano-scale textures.

**[0058]** Liquid-impregnated surfaces are also useful for reducing viscous drag between a solid surface and a flowing liquid. In general, the viscous drag or shear stress exerted by a liquid flowing over a solid surface is proportional to the viscosity of the liquid and the shear rate adjacent to the surface. A traditional assumption is that liquid molecules in contact with the solid surface stick to the surface, in a so-called “no-slip” boundary condition. While some slippage may occur between the liquid and the surface, the no-slip boundary condition is a useful assumption for most applications.

**[0059]** In certain embodiments, non-wetting surfaces, such as liquid-impregnated surfaces, are desirable as they induce a large amount of slip at the solid surface. For example, referring again to FIGS. 1a and 1c, when a contacting liquid 102, 128 is supported by an impregnating liquid 126 or a gas, the liquid-liquid or liquid-gas interface is free to flow or slip with respect to the underlying solid material. Drag reductions of as much as 40% may be achieved due to this slippage. As mentioned, however, gas-impregnated surfaces are susceptible to impalement.

When impalement occurs with a gas-impregnated surface, the benefits of reduced drag reduction may be lost.

**[0060]** Another advantage of the liquid-impregnated surfaces described herein is that they are useful for minimizing the formation and adhesion of frost or ice. In theory, previous (i.e., gas-impregnated) superhydrophobic surfaces, reduce ice formation and adhesion by forcing the ice to rest atop low surface energy, micro-and/or nanoscale surface textures, so that the ice contacts mostly air. In practice, however, these gas-impregnated surfaces can actually result in increased formation and adhesion of ice. For example, when the temperature of the gas-impregnated surface is brought below freezing, the gas-impregnated surface may begin to accumulate frost, which converts the surface from superhydrophobic to hydrophilic. When water contacts the now hydrophilic surface, the water may infiltrate the hydrophilic textures and freeze. The adhesive bond between the gas-impregnated surface and the ice may be strengthened by interlocking between the ice and the surface textures. Similarly, the liquid-impregnated surfaces described herein are useful in situations where nucleation on the surface poses a problem, for example, to reduce scaling, hydrate-formation, plaque build-up on surgical implants, and the like.

**[0061]** According to classical nucleation theory, clusters of water molecules gathered together under random thermal motion must reach a critical size in order to sustain growth. The free energy barrier,  $\Delta G^*$ , to the heterogeneous nucleation of an embryo of critical size on a flat surface, and the corresponding nucleation rate are expressed as

$$\Delta G^* = \frac{\pi \sigma_{IV} r_c^2}{3} (2 - 3m + m^3) \quad (1)$$

and

$$J = J_0 \exp(\Delta G^* / kT) . \quad (2)$$

The parameter  $m$  is the ratio of the interfacial energies given by

$$m = \frac{(\sigma_{SV} - \sigma_{SI})}{\sigma_{IV}} , \quad (3)$$

where  $\sigma_{SV}$ ,  $\sigma_{SI}$ , and  $\sigma_{IV}$  are the interfacial energies for the substrate-vapor, substrate-ice, and ice-vapor interfaces, respectively. In defining the free energy in terms of a critical radius  $r_c$ , the substrate and the ice are assumed to be isotropic, and the nucleating particles are assumed to be spherical. The critical radius  $r_c$  can then be defined by the Kelvin equation:

$$\ln(p / p_o) = 2\sigma_{IV} / n_l k T r_c . \quad (4)$$

[0062] Nucleation experiments on solids demonstrate much lower energy barriers to nucleation than the free energy barrier predicted by Equation 1. This is likely due to nanoscale heterogeneity and roughness, as high surface energy patches of a surface and nanoscale concavities may act as nucleation sites. Liquids, however, are commonly very smooth and homogeneous, and nucleation of water on liquids has been shown experimentally to agree well with classical theory. Consequently, the energy barrier to frost nucleation or condensation is generally much higher for hydrophobic liquids than it is for solids. In certain embodiments, impregnating a liquid within the textures of a liquid-impregnated surface prevents nucleation in these regions and forces preferential nucleation on the peaks of the surfaces textures (e.g., the tops of posts). With respect to ice formation, use of a liquid-impregnated surface overcomes or reduces the ice formation and adhesion challenges encountered with gas-impregnated, superhydrophobic surfaces.

[0063] In certain embodiments, the liquid-impregnated surfaces described herein have advantageous droplet roll-off properties that minimize the accumulation of liquid or ice layers on the surfaces. To prevent ice formation, for example, it is important for a surface to be able to shed super-cooled droplets (e.g., freezing rain) before the droplets freeze. Otherwise, droplets with sufficiently high velocity (such as a rain droplet) may penetrate the textures of a surface and remain pinned until ice is formed. Advantageously, in certain embodiments, the liquid-impregnated surfaces described herein have low roll-off angles (i.e., the angle or slope of a surface at which a droplet in contact with the surface will begin to roll or slide off the surface). The low roll-off angles associated with liquid-impregnated surfaces allow droplets in contact with the surface to easily roll off the surface before the liquid can freeze and ice can accumulate. As described in more detail below, the roll-off angle for water on a surface (i.e., an octadecyltrichlorosilane-treated silicone post surface impregnated with hexadecane) was measured to be  $1.7^\circ \pm 0.1^\circ$ . In certain embodiments, the roll-off angle for a liquid-impregnated surface is less than about  $2^\circ$ , or less than about  $1^\circ$ .

[0064] FIG. 2 is a schematic cross-sectional view of a liquid droplet 202 resting on a liquid-impregnated surface 204, in accordance with certain embodiments of the invention. In one embodiment, the morphology of the droplet edge, which governs its mobility, is affected by the properties of the impregnating liquid 126. For example, as depicted, the droplet may “pick up” the impregnating liquid 126 locally near the droplet edges. The pooling of impregnating liquid 126 at the edges of the droplet gives rise to pinning forces. During droplet roll-off, the pinning

forces and viscous forces resist droplet movement due to gravity. For a surface tilted at an angle  $\alpha$ , the force balance equation for droplet roll-off is given by

$$V\rho g \sin \alpha = \pi r^2(1-\phi)\mu v_o / h + 2r\sqrt{\phi}\gamma_w(\cos \theta_r - \cos \theta_a), \quad (5)$$

where  $V\rho g \sin \alpha$  is the gravity force on the droplet,  $\pi r^2(1-\phi)\mu v_o / h$  is the viscous force, and

5  $2r\sqrt{\phi}\gamma_w(\cos \theta_r - \cos \theta_a)$  is the pinning force. In this equation,  $V$  is droplet volume,  $\rho$  is the density of the non-wetted liquid,  $\phi$  is surface solid fraction (area fraction of the substrate in direct contact with the non-wetted phase),  $\mu$  is dynamic viscosity of the impregnated liquid,  $v_o$  is droplet sliding velocity (characteristic drop velocity),  $h$  is a characteristic length scale over which shearing of the impregnated liquid occurs (e.g., a height of surface posts or other surface texture height),  $\alpha$  is the angle the substrate makes with respect to the horizontal,  $g$  is the acceleration of gravity,  $r$  is the contact radius of the non-wetted droplet,  $\theta_a$  and  $\theta_r$  are the advancing and receding contact angles of the non-wetted droplet, and  $\gamma_w$  is the surface energy of the non-wetted liquid in equilibrium with vapor.

[0065] FIGS. 2b through 2d depict a non-wetting surface 250 that includes a base portion 252 and an array of substantially square posts 254, which have post tops 256. As shown, the posts 254 have a height  $h$ , a side length  $a$ , and a post spacing  $b$  (i.e., a distance between adjacent post surfaces). The base portion 252 includes base regions 258 between the posts 260. The surface solid fraction  $\phi$  for the surface 250 is given by  $\phi = a^2 / (a + b)^2$ .

[0066] In certain embodiments, the choice of impregnating liquid influences the speed with which droplet roll-off occurs. For example, if the liquid has a high viscosity, roll-off may occur very slowly.

[0067] The liquid-impregnated surfaces described herein have a wide variety of applications across many different industries. For example, in certain embodiments, the liquid-impregnated surfaces are used to repel liquids. There are many physical processes that involve impingement of liquids on solid surfaces. Examples include water droplets impinging steam turbine blades, oil droplets impinging gas turbine blades, and rain droplets impinging aircraft and wind turbine surfaces. For steam and gas turbines, water droplets entrained in steam impinge on and stick to turbine blades, thereby reducing turbine power output. By applying a liquid-impregnated surface to the turbine blades, however, droplets can be shed off the blades and turbine power output can be significantly improved. In one embodiment, liquid-impregnated surfaces present

a large energy barrier to condensation and are suitable as anti-fogging coatings for surfaces such as windows, glasses, and/or mirrors.

**[0068]** In certain embodiments, liquid-impregnated surfaces are used to provide ice-phobicity, thereby preventing or minimizing the formation of ice. Ice may form on surfaces in many situations, such as aircraft, wind turbines, power transmission lines, and windshields. Ice formed on liquid-impregnated surfaces exhibits much lower adhesion compared to ordinary surfaces and therefore can easily be removed resulting into significant energy savings. Liquid-impregnated surfaces are also ice-repellent in the sense that their atomically smooth and low energy surface results in a large energy barrier to desublimation (frost formation). In certain embodiments, liquid-impregnated surfaces inhibit macroscopic ice formation from freezing rain. For aircraft, since the liquid-impregnating surfaces result in diminished ice and frost adhesion, the energy and environmentally harmful chemicals required to deice aircraft can be significantly reduced. When liquid-impregnated surfaces are used on power transmission lines, ice is less likely to form and can be more easily removed. Liquid-impregnated surfaces can also significantly reduce ice formation on wind turbines, thereby increasing turbine efficiency.

**[0069]** In certain embodiments, liquid-impregnated surfaces are used to provide hydrate-phobicity, thereby preventing or minimizing the formation of hydrates. Hydrates form in oil and gas pipelines during deep-sea drilling and/or extraction. Hydrates can plug pipelines and cause a catastrophic rise in liquid pressures. By choosing a suitable impregnating liquid, a liquid-impregnated surface presents a high energy barrier to nucleation of hydrates and thus resists hydrate formation. Furthermore, hydrates formed on liquid-impregnated surfaces show much lower adhesion strength compared to ordinary surfaces and hence can be easily removed. In certain embodiments, the impregnating liquid is a permanent liquid supplied with an original coating. Alternatively, the impregnating liquid may be continuously supplied by oil present in the pipeline.

**[0070]** In certain embodiments, liquid-impregnated surfaces are used to provide salt-phobicity, thereby preventing or minimizing the formation of salts or mineral scale. Salts may form on solid surfaces in water-based or steam-based industrial facilities, such as heat exchangers in power and desalination plants. Salts may also form on the surfaces of oil and gas pipelines. Formation of salts reduces the thermal performance of heat exchangers and also requires expensive maintenance and/or shutdowns. Liquid-impregnated surfaces exhibit a high energy barrier to salt nucleation that resists salt formation and leads to much lower adhesion

strength compared to ordinary surfaces, thus facilitating easy removal. The impregnating liquid may be a permanent liquid supplied with an original coating, and/or it may be continuously supplied or replenished by an adjacent liquid phase (e.g., oil present in an oil or gas pipeline).

**[0071]** In certain embodiments, the liquid-impregnated surfaces are used to reduce viscous drag between a solid surface and a flowing liquid. Many engineering applications, such as the transportation of crude oil in pipelines, require transport of liquids through pipes over long distances. Due to drag forces between the liquids and adjacent surfaces, the energy consumption associated with the transport of these liquids is often significant. Use of liquid-impregnated surfaces may greatly reduce the energy consumption in these applications. By suitably choosing the impregnated liquid, liquid-impregnated surfaces can exhibit enhanced slippage of the contacting liquid and hence lead to a drastic reduction in liquid-solid drag. In certain embodiments, liquid-impregnated surfaces may be effective for use in artificial arteries and/or veins.

**[0072]** In certain embodiments, liquid-impregnated surfaces are useful for inhibiting corrosion. By using a corrosion-resistant impregnating liquid, the underlying solid material may be protected from a corrosive environment. Additionally, the ability of liquid-impregnated surfaces to shed liquid droplets reduces corrosion as moisture is more easily removed from the surface.

**[0073]** Liquid-impregnated surfaces may also be used in stents, artificial arteries, and/or other surgical implants to prevent or reduce deposit build-up thereupon.

**[0074]** In certain embodiments, a liquid-impregnated surface is used to provide self-lubricating bone joints. For example, a liquid-impregnated surface may be used as a material for artificial joints implanted during knee and/or hip replacement surgeries. The liquid-impregnated surface provides significantly reduced friction between mating surfaces and also provides long-lasting lubrication. The impregnating liquid may be a permanent liquid incorporated before implantation, or it may be continuously supplied by lubricating fluids present within the body (e.g., synovial fluid).

**[0075]** There are many other applications in which liquid-impregnated surfaces may be used to provide lubrication. For example, liquid-impregnated surfaces may be used in bearings, on piston/cylinder surfaces, and/or in any other automotive or mechanical devices or equipment where a reduction in friction between adjacent moving surfaces is beneficial. In one embodiment, the impregnating liquid within the surface provides a long-lasting supply of

lubricant and hence reduces the time and energy spent in applying lubricant to necessary locations.

[0076] Liquid-impregnated surfaces may also be used to provide anti-fouling and/or self-cleaning. For example, liquid-impregnated surfaces may be used for anti-fouling by resisting  
5 the adsorption of debris by virtue of their low surface energy. In certain embodiments, particles and chemicals on the liquid-impregnated surface are absorbed and carried away by droplets that are shed from the surface. This self-cleaning property is important for many applications, such as self-cleaning glass (e.g., for windows, glasses, and/or mirrors) and industrial coatings.

10 [0077] Liquid-impregnated surfaces may also be used to promote the condensation of moisture. For example, liquid-impregnated surfaces may be used to shed condensate easily and thereby enhance condensation heat transfer (e.g., drop-wise condensation). In certain embodiments, liquid-impregnated surfaces are applied to heat exchangers, ranging from steam condensers, to HVAC condensers, to natural gas condensers used in liquefying natural gas.

15 [0078] In certain embodiments, the liquid-impregnated surfaces described herein are useful for coatings on sports equipment such as ski glasses/goggles (e.g., antifogging), skis, snowboards, ice skates, swimsuits, and the like.

[0079] FIG. 15 is an image of a droplet of water on a surface having a matrix of post features and impregnated with silicone oil, contrasting an impaled state with a nonwetted state. In the  
20 example showing an impaled state – which may be disfavored for certain embodiments in which an extremely non-wetting surface is desired – the droplet is water, the impregnated liquid is silicone oil, and the surface is untreated silicon with 10 micrometer square posts having 10 micrometer spacing. In the impaled state, liquid does not roll off of the surface. In the example showing a non-wetted state – which is favored for certain embodiments in which  
25 non-wetting is desired – the conditions are the same except that the surface is treated with OTS (octadecyltrichlorosilane). Other coatings could be used.

[0080] FIG. 16 is a schematic describing six liquid-impregnated surface wetting states, in accordance with certain embodiments of the invention. The six surface wetting states (state 1 through state 6) depends on the four wetting conditions shown at the bottom of FIG. 16  
30 (conditions 1 to 4). In most embodiments, the non-wetted states are preferred (states 1 to 4). Additionally, where a thin film stably forms on the tops of the posts (or other features on the

surface), as in non-wetted states 1 and 3, even more preferable non-wetting properties (and other related properties described herein) may be observed.

**[0081]** In order to achieve non-wetted states, it is preferable to have low solid surface energy and low surface energy of the impregnated liquid compared to the nonwetted liquid. For example, surface energies below about  $25 \text{ mJ/m}^2$  are preferred. Low surface energy liquids include certain hydrocarbon and fluorocarbon-based liquids, for example, silicone oil, perfluorocarbon liquids, perfluorinated vacuum oils (e.g., Krytox 1506 or Fromblin 06/6), fluorinated coolants such as perfluoro-tripentylamine (e.g., FC-70, sold by 3M, or FC-43), fluorinated ionic liquids that are immiscible with water, silicone oils comprising PDMS, and fluorinated silicone oils.

**[0082]** Examples of low surface energy solids include the following: silanes terminating in a hydrocarbon chain (such as octadecyltrichlorosilane), silanes terminating in a fluorocarbon chain (e.g. fluorosilane), thiols terminating in a hydrocarbon chain (such butanethiol), and thiols terminating in a fluorocarbon chain (e.g. perfluorodecane thiol). In certain embodiments, the surface comprises a low surface energy solid such as a fluoropolymer, for example, a silsesquioxane such as fluorodecyl polyhedral oligomeric silsesquioxane. In certain embodiments, the fluoropolymer is (or comprises) tetrafluoroethylene (ETFE), fluorinated ethylenepropylene copolymer (FEP), polyvinylidene fluoride (PVDF), perfluoroalkoxytetrafluoroethylene copolymer (PFA), polytetrafluoroethylene (PTFE), tetrafluoroethylene, perfluoromethylvinylether copolymer (MFA), ethylenechlorotrifluoroethylene copolymer (ECTFE), ethylene-tetrafluoroethylene copolymer (ETFE), perfluoropolyether, or Tecnoflon.

**[0083]** In FIG. 16,  $\Gamma_{wv}$  is the surface energy of the non-wetted phase in equilibrium with vapor;  $\Gamma_{ow}$  is the interfacial energy between the non-wetted phase and the impregnated liquid;  $\Gamma_{ov}$  is the surface energy of the impregnated liquid phase in equilibrium with vapor;  $\Gamma_{sv}$  is the surface energy of the solid in equilibrium with vapor;  $\Gamma_{so}$  is the interfacial energy between the impregnated phase and the solid;  $\Gamma_{sw}$  is the interfacial energy between the solid and the non-wetted phase;  $r$  = total surface area divided by projected surface area;  $\theta_{c1}$ ,  $\theta_{c2}$ ,  $\theta_{c3}$ ,  $\theta_{c4}$ ,  $\theta_{w1}$ ,  $\theta_{w2}$ , are the macroscopic contact angles made by the non-wetted phase in each wetting state;  $\theta_{os(v)}^*$  is the macroscopic contact angle of oil on the textured substrate when the phase surrounding the textured substrate is vapor;  $\theta_{os(v)}$  is the contact angle of oil on a smooth

solid substrate of the same chemistry when the phase surrounding the oil droplet is vapor;  $\Theta_{os(w)}$  is the macroscopic contact angle of oil on the textured substrate when the phase surrounding the oil droplet is water; and  $\theta_{os(w)}$  is the contact angle of oil on a smooth substrate of the same chemistry as the textured surface when the phase surrounding the oil droplet is water.

[0084] FIG. 17 is a schematic showing conditions for the six liquid-impregnated surface wetting states shown in FIG. 16, in accordance with certain embodiments of the invention.

#### Experimental Examples

[0085] FIG. 3 includes a photograph of a microtextured surface 302, in accordance with certain embodiments of the invention. The surface 302 was made of silicon and includes a square pattern of 10  $\mu\text{m}$  pillars spaced 25  $\mu\text{m}$  apart. As depicted, a bottom portion 304 of the surface 302 was impregnated with hexadecane (an impregnating liquid), while a top portion 306 was impregnated with air (i.e., no impregnating liquid). An edge 308 of the hexadecane defines a boundary between the top portion 306 and the bottom portion 304. Impregnation with hexadecane was achieved by (i) dipping the bottom portion 304 of surface 302 in a bath of hexadecane and (ii) withdrawing the bottom portion 304 from the hexadecane at a slow rate (10 mm/min), with the help of a dip coater. The impregnation was robust as the hexadecane remained in place while being sprayed with water jets having an impact velocity of approximately 5 m/s. Contact angle hysteresis and roll-off angle for a 7  $\mu\text{L}$  water droplet were measured on the bottom portion 304 of the surface 302 (i.e., the liquid-impregnated portion of surface 302). Contact angle hysteresis (CAH) and roll-off angle were both extremely low: CAH was less than 1° whereas the roll-off angle was only  $1.7 \pm 0.1^\circ$ .

[0086] FIGS. 4a and 4b depict a sequence of high speed video images depicting the impingement of a water droplet 402 on a gas-impregnated surface 404 and a liquid-impregnated surface 406, respectively. As discussed above, when a liquid droplet impinges a surface, it can exert large pressures on the surface. This is true even for millimetric sized drops impacting the surface at a velocity less than about 5 m/s. As a result of these pressures, droplets may become impaled on a gas-impregnated surface, thereby causing the gas-impregnated surface to lose its enhanced drop shedding qualities. Droplet impalement is depicted in FIG. 4a in which the droplet is shown to stick to the gas-impregnated surface 404, rather than bounce off of the surface. To prevent sticking, previous approaches with gas-impregnated surfaces emphasize the introduction of texturing at nano-scale. However, with a

liquid-impregnated surface approach, even microtextures, on the order of 10  $\mu\text{m}$ , can successfully shed impinging droplets. This is shown in FIG. 4b in which the same microtexture that impaled the water drop when air was present completely repelled the droplet when it was impregnated with hexadecane. The scale bar 408 in these figures is 3 mm.

5   **[0087]** FIG. 5 includes a sequence of high speed video images showing a droplet 502 impacting a liquid-impregnated surface 504 tilted at 25° with respect horizontal. The water droplet 502 in this instance slipped and eventually bounced off the surface 504, demonstrating that the liquid-impregnated surface 504 could shed the impinging droplet successfully, and was robust against impalement. The water droplet in this case was 2.5 mm in diameter. The liquid-  
10   impregnated surface 504 was a microtextured surface containing an impregnating liquid of hexadecane in an array of 10  $\mu\text{m}$  square posts of silicon, spaced 25  $\mu\text{m}$  apart.

**[0088]** FIGS. 6a-6d include a sequence of ESEM images showing the formation of frost on a gas-impregnated, superhydrophobic surface 602, in accordance with certain embodiments of the invention. The superhydrophobic surface 602 included an array of hydrophobic square  
15   posts 604 with width, edge-to edge spacing, and aspect ratio of 15  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$ , and 7, respectively. FIG. 6a depicts a dry surface (i.e., no frost), while FIGS. 6b-6d depict the formation of frost 606 on the surface. The intrinsic water contact angle of the hydrophobic coating on the posts was 110°. The surface was maintained at a temperature of -13°C by means of a cold stage accessory of the ESEM. At the beginning of the experiment, the chamber  
20   pressure was maintained at ~100 Pa, well below the saturation pressure to ensure a dry surface. The vapor pressure in the chamber was then slowly increased until frost nucleation was observed. Frost nucleation and growth occurred without any particular spatial preference on all of the available area, including post tops, sidewalls, and valleys, due to the uniform intrinsic wettability of the surface.

25   **[0089]** FIG. 7a-7c depict images from droplet impact testing on dry and frosted superhydrophobic surfaces, in accordance with certain embodiments of the invention. The testing was conducted using water droplets having a radius of 1 mm and impacting the surface at a velocity of 0.7 m/s. FIG. 7a is a top view SEM image of the representative Si post array surface 702 having a width, edge-to-edge spacing, and aspect ratio of 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ , and 1,  
30   respectively. FIG. 7b includes a sequence of high-speed video images of droplet impact on a dry surface 704. As depicted, the droplet recoils from the surface 704, as the anti-wetting capillary pressure is greater than the dynamic wetting pressures. FIG. 7c includes a sequence

of high-speed video images of droplet impact on a surface covered with frost 706. The results show that frost 706 alters the wetting properties of the surface, making the surface hydrophilic, and causing Cassie-to-Wenzel wetting transition of the impacting drop, subsequent pinning, and formation of “Wenzel” ice on the surface.

5    **[0090]** FIG. 8 is a plot of measured normalized ice adhesion strength versus normalized surface area, in accordance with certain embodiments of the invention. Normalized ice adhesion strength is the ice adhesion strength as measured with textured surfaces divided by the ice adhesion strength as measured with a smooth surface. Normalized surface area is the total surface area normalized by the projected area. As the figure indicates, the normalized ice  
10 adhesion strength was found to increase with normalized surface area and shows a strong linear trend. The best linear fit to the data (solid line, correlation coefficient  $R^2 = 0.96$ ) has a slope of one and passes through the origin (extrapolated using a dashed line), indicating that ice is contacting all available surface area, including the sides of the posts. The interlocking of the ice with the textured surface results in increased adhesion strength. Insets (a)-(d) in this figure  
15 are top view optical images of representative replicated PDMS post arrays from sparse to dense spacing ( $a=15\text{ }\mu\text{m}$ ,  $h=10\text{ }\mu\text{m}$ ,  $b=45, 30, 15,$  and  $5\text{ }\mu\text{m}$ , respectively, where  $a$ ,  $h$ , and  $b$  are dimensions shown in Figs. 2C and 2D) showing the excellent quality of replication.

**[0091]** Roll-off experiments were conducted using a Ramehart Goniometer with a tilting stage to measure the drop-shedding properties of an octadecyltrichlorosilane-treated silicone  
20 post surface (with  $25\text{ }\mu\text{m}$  post spacing) impregnated with hexadecane. A roll-off angle of  $1.7^\circ \pm 0.1^\circ$  was measured for a  $7\text{ }\mu\text{l}$  drop. Advancing and receding contact angles were  $98^\circ \pm 1^\circ$  and  $97^\circ \pm 1^\circ$ , respectively. This very low roll-off angle allows the liquid-impregnated surface to shed liquid droplets quickly (e.g., before they freeze in freezing rain applications).

**[0092]** FIGS. 9 and 10 show experimental measurements of water droplet mobility on liquid  
25 impregnating surfaces. FIG. 9 is a plot of roll-off angle  $\alpha$  (or the tilt angle) as a function of surface solid fraction  $\phi$ , for four different fluids impregnated in the surface (feature dimensions  $a$  and  $b$  are as shown in Fig. 2D). Note that the “Air” case represents a conventional superhydrophobic surface (i.e., a gas-impregnated surface). The plot shows that roll-off angle  $\alpha$  was very small (less than  $5^\circ$ ) for silicone oils and was not significantly affected by solid  
30 fraction  $\phi$ . For an ionic liquid (i.e., BMI-IM), which does not wet the impregnating surface completely, the roll-off angle  $\alpha$  was relatively higher, almost equal to the air case, and increased with solid fraction  $\phi$  due to increased pinning of the droplet on microposts. This is

likely because an increase of solid fraction  $\phi$  means more microposts in a unit area. FIG. 10 is a plot of water droplet sliding velocity  $v_o$ , for a test in which the surface was tilted at 30°, as a function of solid fraction  $\phi$  for 1000 cSt silicone oil. The plot shows that sliding velocity  $v_o$  decreased when the solid fraction  $\phi$  increased, due to increased pinning.

5 [0093] FIGS. 11 and 12 show additional experimental measurements of water droplet sliding velocity  $v_o$  for different impregnating fluids having different viscosities, when the surface was tilted to 30°. The figures show that sliding velocity  $v_o$  with air is higher than with silicone oils, but sliding velocity  $v_o$  has the same decreasing trend with solid fraction  $\phi$  due to increased pinning. FIG. 12 is a plot of sliding velocity  $v_o$  as a function of solid fraction  $\phi$  for 10 cSt  
10 silicone oil. The plot shows that the magnitude of sliding velocity  $v_o$  is higher than with 1000 cSt but less than with air. The trend with solid fraction  $\phi$  remains the same. The measurements in FIGS. 10 and 12 show that droplet mobility (e.g., sliding velocity  $v_o$ ) increases as the viscosity of the impregnating liquid decreases. This suggests that the greatest mobility is likely achieved low viscosity impregnating fluids, such as air.

15 [0094] In one experiment, the viscosity of the impregnating liquid was varied to determine the influence of viscosity on droplet impingement. The surface used for the test included silicon microposts (10x10x10  $\mu m$ ) with a post spacing of 10  $\mu m$ . When the viscosity of the impregnating liquid was 10 cSt, the impinging water droplet was able to bounce-off the liquid-impregnated surface. By contrast, when the viscosity of the impregnating liquid was 1000 cSt,  
20 the impinging water droplet remained on the surface (i.e., it did not bounce off the surface). Unlike a similar impingement experiment conducted with a gas-impregnated surface, however, the droplet was able to subsequently roll-off the surface, although the sliding velocity was low.

[0095] FIGS. 13 and 14 include Environmental SEM (ESEM) images of frost nucleation on micropost surfaces impregnated with silicone oil. FIG. 13 shows a surface 1402 before  
25 nucleation was triggered. FIG. 14 shows a surface 1404 during nucleation and indicates that frost 1306 had the tendency to nucleate on the micropost tops.

#### Equivalents

[0096] While the invention has been particularly shown and described with reference to specific preferred embodiments, it should be understood by those skilled in the art that various changes in form and detail may be made therein without departing from the spirit and scope of  
30 the invention as defined by the appended claims.

[0097] What is claimed is:

- 1 1. An article comprising a liquid-impregnated surface, said surface comprising a matrix of  
2 features spaced sufficiently close to stably contain a liquid therebetween or therewithin.
- 1 2. The article of claim 1, wherein said liquid has viscosity at room temperature no greater  
2 than about 1000 cP.
- 1 3. The article of claim 1 or 2, wherein said liquid has vapor pressure at room temperature  
2 no greater than about 20 mm Hg.
- 1 4. The article of claim 2, wherein said liquid has a viscosity at room temperature no  
2 greater than about 100 cP.
- 1 5. The article of claim 2, wherein said liquid has a viscosity at room temperature no  
2 greater than about 50 cP.
- 1 6. The article of any one of the preceding claims, wherein the features have substantially  
2 uniform height and wherein the liquid fills space between the features and coats the features  
3 with a layer at least about 5 nm in thickness over the top of the features.
- 1 7. The article of any one of the preceding claims, wherein the features define pores or  
2 other wells and wherein the liquid fills the features.
- 1 8. The article of any one of the preceding claims, wherein the liquid has receding contact  
2 angle of  $0^\circ$  such that the liquid forms a stable thin film on the top of the features.
- 1 9. The article of any one of the preceding claims, wherein the matrix has a feature-to-  
2 feature spacing from about 1 micrometer to about 100 micrometers.
- 1 10. The article of any one of the preceding claims, wherein the matrix has a feature-to-  
2 feature spacing from about 5 nanometers to about 1 micrometer.
- 1 11. The article of any one of the preceding claims, wherein the matrix comprises  
2 hierarchical structures.
- 1 12. The article of claim 11, wherein the hierarchical structures are micro-scale features that  
2 comprise nano-scale features thereupon.
- 1 13. The article of any one of the preceding claims, wherein the features have height no  
2 greater than about 100 micrometers.
- 1 14. The article of any one of the preceding claims, wherein the features are posts.
- 1 15. The article of any one of the preceding claims, wherein the features comprise at least  
2 one member selected from the group consisting of a spherical particle, a nanoneedle, a  
3 nanograss, and a random geometry feature that provides surface roughness.

1 16. The article of any one of the preceding claims, wherein the features comprise at least  
2 one member selected from the group consisting of a pore, a cavity, interconnected pores, and  
3 interconnected cavities.

1 17. The article of claim 16, wherein the surface comprises porous media with a plurality of  
2 pores having different sizes.

1 18. The article of any one of the preceding claims, wherein the liquid comprises a member  
2 selected from the group consisting of silicone oil, a perfluorocarbon liquid, a  
3 perfluoroFluorinated vacuum oil (such as Krytox 1506 or Fromblin 06/6), a fluorinated coolant  
4 (e.g., perfluoro-tripentylamine sold as FC-70, manufactured by 3M), an ionic liquid, a  
5 fluorinated ionic liquid that is immiscible with water, a silicone oil comprising PDMS, a  
6 fluorinated silicone oil, a liquid metal, an eletro-rheological fluid, a magneto-rheological fluid,  
7 a ferrofluid, a dielectric liquid, a hydrocarbon liquid, a fluorocarbon liquid, a refrigerant, a  
8 vacuum oil, a phase-change material, a semi-liquid, grease, synovial fluid, bodily fluid.

1 19. The article of any one of the preceding claims, wherein the article is a member selected  
2 from the group consisting of a steam turbine part, a gas turbine part, an aircraft part, and a wind  
3 turbine part, and wherein the liquid-impregnated surface is configured to repel impinging  
4 liquid.

1 20. The article of any one of claims 1-18, wherein the article is a member selected from the  
2 group consisting of eyeglasses and a mirror, and wherein the liquid-impregnated surface is  
3 configured to inhibit fogging thereupon.

1 21. The article of any one of claims 1-18, wherein the article is a member selected from the  
2 group consisting of an aircraft part, a wind turbine, a power transmission line, and a  
3 windshield, and wherein the liquid-impregnated surface is configured to inhibit formation of  
4 ice thereupon.

1 22. The article of any one of claims 1-18, wherein the article is a pipeline (or a part or  
2 coating thereof), and wherein the liquid-impregnated surface is configured to inhibit the  
3 formation of hydrate thereupon and/or enhance the slippage (reduce drag) of fluid flowing  
4 thereupon.

1 23. The article of any one of claims 1-18, wherein the article is a heat exchanger part or an  
2 oil or gas pipeline (or a part or coating thereof), and wherein the liquid-impregnated surface is  
3 configured to inhibit the formation and/or adhesion of salt thereupon.

1 24. The article of any one of claims 1-18, wherein the liquid-impregnated surface is  
2 configured to inhibit corrosion.

1 25. The article of any one of claims 1-18, wherein the article is an artificial joint and  
2 wherein the liquid-impregnated surface is configured to reduce friction between mating  
3 surfaces and/or provide long-lasting lubrication of the joint.

1 26. The article of any one of claims 1-18, wherein the article is an engine part (e.g., piston  
2 or cylinder), and wherein the liquid-impregnated surface is configured to provide long-lasting  
3 lubrication of the part.

1 27. The article of claim 25 or 26, wherein the liquid-impregnated surface is configured to  
2 release liquid from the surface over time, thereby providing lubrication over time.

1 28. The article of any one of claims 1-18, wherein the liquid-impregnated surface is an anti-  
2 fouling surface configured to resist adsorption of debris thereupon.

1 29. The article of any one of claims 1-18, wherein the article is a heat exchanger part, and  
2 wherein the liquid-impregnated surface is configured to facilitate shedding of condensate  
3 thereupon, thereby enhancing condensation heat transfer.

Abstract

The invention is directed to an article with a liquid-impregnated surface, the surface having a matrix of features thereupon, spaced sufficiently close to stably contain a liquid therebetween or therewithin, and preferable also a thin film thereupon. The surface provides the article with advantageous non-wetting properties. Compared to previous non-wetting  
5 surfaces, which include a gas (e.g., air) entrained within surface textures, these liquid-impregnated surfaces are resistant to impalement and frost formation, and are therefore more robust.

LIBA/2241422.1

**DISPOSITIVOS QUE INCORPORAN UNA SUPERFICIE IMPREGNADA CON  
LIQUIDO**

**Referencia cruzada a las solicitudes relacionadas**

5           La presente solicitud reivindica la prioridad y el beneficio de la solicitud de patente provisional estadounidense N.º 61/515.395, presentada el 5 de agosto de 2011, que se incorpora al presente por referencia en su totalidad.

10

**Campo técnico**

          La presente invención se refiere generalmente a superficies no humectantes y de baja adhesión. Más específicamente, en determinadas realizaciones, la invención  
15 se refiere a superficies no humectantes que combaten el empalamiento líquido, la formación de hielo, la formación de incrustaciones, la formación de hidratos y/o tienen propiedades antiincrustantes.

20

**Antecedentes**

          El advenimiento de las superficies de nanoingeniería/microingeniería en la última década ha abierto nuevas técnicas para mejorar una amplia variedad de fenómenos físicos en las ciencias en termofluidos. Por ejemplo, el uso

de texturas de micro/nanosuperficies ha proporcionado superficies no humectantes que pueden lograr menor resistencia viscosa, adhesión reducida al hielo y otros materiales, autolimpieza y repelencia al agua. Estas mejoras  
5 generalmente son el resultado del contacto disminuido (es decir, menos humectación) entre las superficies sólidas y los líquidos adyacentes.

Un tipo de superficie no humectante de interés es una superficie superhidrófoba. En general, una superficie  
10 superhidrófoba incluye rugosidad a micro/nanoescala en una superficie intrínsecamente hidrófoba, por ejemplo un recubrimiento hidrófobo. Las superficies superhidrófobas evitan el contacto con el agua en virtud de una interfaz aire-agua dentro de las texturas de micro/nanosuperficies.

15 Una de las desventajas de las superficies no humectantes existentes (p. ej., superficies superhidrófobas, superoleófobas y supermetalófobas) es que son susceptibles al empalamiento, que destruye las capacidades no humectantes de la superficie. El empalamiento se produce cuando un líquido  
20 incidente (p. ej., una gotita de líquido o corriente de líquido) se desplaza por el aire atrapado dentro de las texturas de la superficie. Los intentos anteriores para evitar el empalamiento se han concentrado en reducir las dimensiones de las texturas de las superficies de microescala

a nanoescala.

Otra desventaja de las superficies no humectantes existentes es que son susceptibles a la formación de hielo y la adhesión. Por ejemplo, cuando se forma escarcha en las superficies superhidrófobas existentes, las superficies se vuelven hidrófilas. En condiciones de congelamiento, las gotas de agua se pueden adherir a la superficie y se puede acumular hielo. La eliminación del hielo puede ser difícil ya que el hielo se puede entrelazar con las texturas de la superficie. Asimismo, cuando estas superficies están expuestas a soluciones saturadas con sales, por ejemplo en la desalinización o en aplicaciones de aceite y gas, se construyen incrustaciones en las superficies y se producen pérdidas de funcionalidad. Limitaciones similares de las superficies no humectantes existentes incluyen los problemas con la formación de hidratos y la formación de otros depósitos orgánicos o inorgánicos en las superficies.

Existe la necesidad de superficies no humectantes (p. ej., superficies superhidrófobas, superficies superoleófobas y superficies supermetalófobas) que sean más fuertes. En particular, existe la necesidad de superficies no humectantes que combatan el empalamiento y la formación de hielo.

### **Compendio de la invención**

En el presente se describen superficies no humectantes que incluyen un líquido impregnado dentro de una matriz de partes de nanoingeniería/microingeniería en la superficie o un líquido que llena los poros u otros orificios pequeños en la superficie. En comparación con superficies no humectantes anteriores, que incluyen un gas (p. ej., aire) atrapado dentro de las texturas de la superficie, estas superficies impregnadas con líquido son resistentes al empalamiento y la formación de escarcha y, por lo tanto, son más fuertes. La invención es fundamental en la naturaleza y se puede utilizar en cualquier aplicación que se beneficie de superficies no humectantes. Por ejemplo, se pueden utilizar los métodos descritos aquí para reducir la resistencia viscosa en tuberías de aceite y gas, evitar la formación de hielo en aeronave y/o líneas eléctricas y minimizar la acumulación de líquido incidente.

Los métodos y aparatos descritos en el presente tienen varias ventajas sobre las superficies no humectantes existentes, denominadas aquí superficies impregnadas con gas. Por ejemplo, en comparación con las superficies impregnadas con gas, las superficies impregnadas con líquido tienen una resistencia mucho mayor al empalamiento. Esto permite que una superficie impregnada con líquido resista mayores presiones (p. ej., mayores velocidades de goteo) durante el impacto

líquido. En determinadas realizaciones, una superficie impregnada con líquido combate el empalamiento a través del uso de texturas de superficies a microescala en lugar de texturas a nanoescala, como se utilizaba en enfoques previos  
5 de superficies impregnadas con gas. El uso de texturas a microescala en lugar de texturas a nanoescala es extremadamente ventajoso al menos porque las partes a microescala son menos costosas y más fáciles de fabricar.

A través de la selección adecuada del líquido de  
10 impregnación, las superficies impregnadas con líquido descritas en el presente son fácilmente adaptables a una amplia variedad de aplicaciones. Por ejemplo, se puede lograr una reducción de la resistencia del agua en una superficie sólida con el uso de aceite como líquido de impregnación, ya  
15 que el agua se desliza fácilmente en los aceites. El uso de aceite como líquido de impregnación también es adecuado para la prevención de formación de escarcha y hielo. En esta aplicación, la escarcha y el hielo se pueden formar solamente en los picos de las texturas de las superficies, reduciendo  
20 así en gran medida los índices de formación de hielo y las fuerzas de adhesión.

En un aspecto, la invención se refiere a un artículo que comprende una superficie impregnada con líquido, dicha superficie comprende una matriz de partes espaciadas

suficientemente cerca para contener de forma estable un líquido entre ellas o dentro de las mismas. En determinadas realizaciones, el líquido tiene una viscosidad a temperatura ambiente no mayor que aproximadamente 1000 cP (o cSt), no mayor que aproximadamente 100 cP (o cSt) o no mayor que aproximadamente 50 cP (o cSt). En determinadas realizaciones, el líquido tiene una presión de vapor a temperatura ambiente no mayor que aproximadamente 20 mm Hg, no mayor que aproximadamente 1 mm Hg o no mayor que aproximadamente 0,1 mmHg.

En determinadas realizaciones, las partes tienen una altura sustancialmente uniforme y en donde el líquido llena el espacio entre las partes y cubre las partes con una capa de al menos aproximadamente 5 nm de grosor sobre la parte superior de las partes. En determinadas realizaciones, las partes definen poros u otros orificios y el líquido llena las partes.

En determinadas realizaciones, el líquido tiene un ángulo de contacto de retroceso de  $0^{\circ}$  para que el líquido forme una película delgada estable en la parte superior de las partes.

En determinadas realizaciones, la matriz tiene un espaciamiento entre partes de entre aproximadamente 1 micrómetro y aproximadamente 100 micrómetros. En determinadas

realizaciones, la matriz tiene un espaciamiento entre partes de entre aproximadamente 5 nanómetros y aproximadamente 1 micrómetro. En determinadas realizaciones, la matriz comprende estructuras jerárquicas. Por ejemplo, las  
5 estructuras jerárquicas pueden ser partes a microescala que comprenden partes a nanoescala sobre ellas.

En determinadas realizaciones, las partes tienen una altura no mayor que aproximadamente 100 micrómetros. En determinadas realizaciones, las partes son postes. En  
10 determinadas realizaciones, las partes incluyen una o más partículas esféricas, nanoagujas, "nanograss" (nanohierba) y/o partes de geometría aleatoria que proporcionan rugosidad de superficie. En determinadas realizaciones, la parte comprende uno o más poros, cavidades, poros interconectados y/o  
15 cavidades interconectadas. En determinadas realizaciones, la superficie comprende medio poroso con diversos poros que tienen diferentes tamaños.

En determinadas realizaciones, el líquido comprende un líquido de perfluorocarbono, un aceite de vacío  
20 perfluorofluorado (por ejemplo Krytox 1506 o Fromblin 06/6), un refrigerante fluorado (p. ej., perfluoro-tripentilamina vendido como FC-70, fabricado por 3M), un líquido iónico, un líquido iónico fluorado que es inmiscible con agua, un aceite de silicona que comprende PDMS, un aceite de silicona

fluorado, un metal líquido, un fluido electrorreológico, un fluido magnetorreológico, un ferrofluido, un líquido dieléctrico, un líquido de hidrocarburo, un líquido de fluorocarbono, un refrigerante, un aceite de vacío, un  
5 material de cambio de fase, un semilíquido, grasa, líquido sinovial y/o un fluido corporal.

En determinadas realizaciones, el artículo es una parte de turbina de vapor, una parte de turbina de gas, una parte de aeronave o una parte de turbina de viento, y la superficie  
10 impregnada con líquido está configurada para repeler el líquido incidente. En determinadas realizaciones, el artículo es anteojos, gafas de protección, una máscara de esquí, un casco, un protector de casco o un espejo, y la superficie impregnada con líquido está configurada para inhibir el  
15 empañamiento. En determinadas realizaciones, el artículo es una parte de aeronave, una parte de turbina de viento, una línea de transmisión de energía o un parabrisas, y la superficie impregnada con líquido está configurada para inhibir la formación de hielo. En determinadas realizaciones,  
20 el artículo es una tubería (o una parte o recubrimiento de esta) y la superficie impregnada con líquido está configurada para inhibir la formación de hidratos y/o mejorar el deslizamiento (reducir la resistencia) del fluido que fluye sobre ella (o a través de ella). En determinadas

realizaciones, el artículo es una parte de termocambiador o una tubería de aceite o gas (o una parte o recubrimiento de esta) y la superficie impregnada con líquido está configurada para inhibir la formación y/o adhesión de sal sobre ella. En  
5 determinadas realizaciones, la superficie impregnada con líquido está configurada para inhibir la corrosión.

En determinadas realizaciones, el artículo es una junta artificial y la superficie impregnada con líquido está configurada para reducir la fricción entre las superficies de  
10 contacto y/o proporcionar lubricación de larga duración de la junta. En determinadas realizaciones, el artículo es una pieza de motor (p. ej., pistón o cilindro) y la superficie impregnada con líquido está configurada para proporcionar lubricación de larga duración de la pieza. En determinadas  
15 realizaciones, la superficie impregnada con líquido está configurada para liberar líquido desde la superficie a lo largo del tiempo, proporcionando así lubricación a lo largo del tiempo.

En determinadas realizaciones, la superficie impregnada  
20 con líquido es una superficie antiincrustante configurada para combatir la adsorción de restos en ella. En determinadas realizaciones, el artículo es una parte de termocambiador y la superficie impregnada con líquido está configurada para facilitar desprendimiento de condensado en ella, mejorando

así la transferencia de calor de condensación.

### **Breve descripción de los dibujos**

Los objetos y partes de la invención se pueden  
5 comprender mejor con referencia al dibujo descrito a  
continuación y las reivindicaciones.

La figura 1a es una vista transversal esquemática de un  
líquido que se pone en contacto con una superficie no  
humectante, de acuerdo con determinadas realizaciones de la  
10 invención.

La figura 1b es una vista transversal esquemática de un  
líquido que tiene empalada una superficie no humectante, de  
acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

La figura 1c es una vista transversal esquemática de un  
15 líquido en contacto con una superficie impregnada con  
líquido, de acuerdo con determinadas realizaciones de la  
invención.

La figura 2a es una vista transversal esquemática de  
una gotita sobre una superficie impregnada con líquido, de  
20 acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

La figura 2b es una imagen SEM de una superficie no  
humectante que incluye postes, de acuerdo con determinadas  
realizaciones de la invención.

La figura 2c es una vista en perspectiva esquemática de

una superficie no humectante que incluye postes, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

La figura 2d es una vista transversal superior esquemática de una superficie no humectante que incluye  
5 postes, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

La figura 3 incluye una fotografía de una superficie microtexturada, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

10 Las figuras 4a y 4b incluyen una secuencia de imágenes de video de alta velocidad que representan el impacto de una gotita de agua sobre una superficie impregnada con gas y una superficie impregnada con líquido, respectivamente, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

15 La figura 5 incluye una secuencia de imágenes de video de alta velocidad que muestran una gotita que impacta una superficie impregnada con líquido inclinada a 25° con respecto a la horizontal, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

20 Las figuras 6a-6d incluyen una secuencia de imágenes ESEM que muestran la formación de escarcha sobre una superficie no humectante impregnada con gas, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

Las figuras 7a-7c incluyen imágenes de las pruebas de

impacto de las gotitas sobre superficies superhidrófoba secas y escarchadas, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

La figura 8 es una gráfica de una fuerza de adhesión al  
5 hielo normalizada contra un área de la superficie normalizada medidas, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

La figura 9 es una gráfica de un ángulo de caída contra una fracción sólida de la superficie, de acuerdo con  
10 determinadas realizaciones de la invención.

Las figuras 10, 11 y 12 son gráficas de la velocidad de rotación de la gotita en una superficie impregnada con líquido inclinada, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

15 Las figuras 13 y 14 incluyen imágenes de Environmental SEM (ESEM) de nucleación de escarcha en superficies de microposte impregnadas con aceite de silicona, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

La figura 15 es una imagen de una gotita de agua en una  
20 superficie que tiene una matriz de partes de postes e impregnada con aceite de silicona, contrastando un estado empalado con un estado no húmedo, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

La figura 16 es un esquema que describe seis estados de

humectación de una superficie impregnada con líquido, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

La figura 17 es un esquema que muestra las condiciones para los seis estados de humectación de una superficie  
5 impregnada con líquido que se muestra en la figura 16, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

### **Descripción**

Se contempla que las composiciones, las mezclas, los  
10 sistemas, los dispositivos, los métodos y los procesos de la invención reivindicada abarcan las variaciones y adaptaciones desarrolladas utilizando la información de las realizaciones descritas en el presente. Los entendidos en la técnica pueden realizar una adaptación y/o modificación de las  
15 composiciones, las mezclas, los sistemas, los dispositivos, los métodos y los procesos descritos en el presente.

En toda la descripción, cuando se describe que los artículos, dispositivos y sistemas tienen, incluyen o comprenden componentes específicos, o cuando se describe que  
20 los procesos y métodos tienen, incluyen o comprenden etapas específicas, se contempla, adicionalmente, que existen artículos, dispositivos y sistemas de la presente invención que consisten esencialmente, o consisten, en los componentes nombrados y que existen procesos y métodos de acuerdo con la

presente invención que consisten esencialmente, o consisten, en las etapas de procesamiento descrita.

Asimismo, cuando se describe que los artículos, dispositivos, mezclas y composiciones tienen, incluyen o  
5 comprenden compuestos y/o materiales específicos, se contempla, adicionalmente, que existen artículos, dispositivos, mezclas y composiciones de la presente invención que consisten esencialmente, o consisten, en los compuestos y/o materiales descritos.

10 Se entenderá que el orden de las etapas o el orden para realizar determinadas acciones es irrelevante mientras que la invención siga siendo operable. Además, se pueden llevar a cabo dos o más etapas o acciones simultáneamente.

La mención de cualquier publicación en el presente, por  
15 ejemplo, en la sección Antecedente, no es una admisión de que la publicación sirve como técnica anterior con respecto a cualquiera de las reivindicaciones que se presentan en este documento. La sección Antecedentes se presenta con el objetivo de claridad y no se refiere a una descripción de la  
20 técnica anterior con respecto a cualquier reivindicación.

En determinadas realizaciones, un ángulo de contacto estático  $\theta$  entre un líquido y un sólido se define como el ángulo formado por la gota de un líquido en una superficie sólida según lo medido entre una tangente en la línea de

contacto, donde se encuentran las tres fases (sólida, líquida y vapor) y la horizontal. El término "ángulo de contacto" usualmente implica el ángulo de contacto *estático*  $\theta$  ya que el líquido está simplemente apoyado en el sólido sin ningún  
5 movimiento.

Según se emplea aquí, ángulo de contacto dinámico,  $\theta_d$ , es un ángulo de contacto hecho por un líquido *en movimiento* en una superficie sólida. En el contexto de impacto de una gotita, puede existir  $\theta_d$  ya sea durante un movimiento de  
10 avance o retroceso.

Según se emplea aquí, una superficie es "no humectante" si tiene un ángulo de contacto dinámico con un líquido de al menos 90 grados. Ejemplos de superficies no humectantes incluyen, por ejemplo, superficies superhidrófobas,  
15 superficies superoleófobas y superficies supermetalófobas.

Según se emplea aquí, la histéresis del ángulo de contacto (CAH) es  $CAH = \theta_a - \theta_r$ , en donde  $\theta_a$  y  $\theta_r$  son ángulos de contacto de avance y retroceso, respectivamente, formados por un líquido en una superficie sólida. El ángulo de  
20 contacto de avance  $\theta_a$  es el ángulo de contacto formado en el instante cuando una línea de contacto está por avanzar, mientras el ángulo de contacto de retroceso  $\theta_r$  es el ángulo de contacto formado cuando una línea de contacto está por retroceder.

La figura 1a es una vista transversal esquemática de un líquido de contacto 102 en contacto con una superficie tradicional o no humectante anterior 104 (es decir, una superficie de impregnación con gas), de acuerdo con una  
5 realización de la invención. La superficie 104 incluye un sólido 106 que tiene la textura de una superficie definida por postes 108. Las regiones entre los postes 108 están ocupadas por un gas 110, por ejemplo aire. Como se ilustra, cuando el líquido de contacto 102 se puede poner en contacto  
10 con las partes superiores de los postes 108, una interfaz gas-líquido 112 evita que el líquido 102 humedezca toda la superficie 104.

Con referencia a la figura 1b, en determinados casos, el líquido de contacto 102 puede desplazar el gas de  
15 impregnación gas y se puede empalar dentro de los postes 108 del sólido 106. El empalamiento se puede producir, por ejemplo, cuando la gotita de un líquido choca con la superficie 104 a alta velocidad. Cuando se produce el empalamiento, el gas que ocupa las regiones entre los postes  
20 108 es reemplazado por el líquido de contacto 102, ya sea parcialmente o completamente, y la superficie 104 puede perder sus capacidades no humectantes.

Con referencia a la figura 1c, en determinadas realizaciones, se proporciona una superficie impregnada con

líquido no humectante 120 que incluye un sólido 122 que tiene texturas (p. ej., postes 124) que están impregnados con un líquido de impregnación 126, en lugar de un gas. En la realización ilustrada, un líquido de contacto 128 en contacto  
5 con la superficie se apoya en los postes 124 (u otra textura) de la superficie 120. En las regiones entre los postes 124, el líquido de contacto 128 está sostenido por el líquido de impregnación 126. En determinadas realizaciones, el líquido de contacto 128 es inmiscible con el líquido de impregnación  
10 126. Por ejemplo, el líquido de contacto 128 puede ser agua y el líquido de impregnación 126 puede ser aceite.

El sólido 122 puede incluir cualquier recubrimiento o material intrínsecamente hidrófobo, oleófobo y/o metalófobo. Por ejemplo, el sólido 122 puede incluir: hidrocarburos, por  
15 ejemplo alcanos, y fluoropolímeros, por ejemplo teflón, tricloro(1H,1H,2H,2H-perfluorooctil)silano (TCS), octadeciltriclorosilano (OTS), heptadecafluoro-1,1,2,2-tetrahidrodeciltriclorosilano, fluoroPOSS y/u otros fluoropolímeros. Recubrimientos o materiales posibles  
20 adicionales para el sólido 122 incluye: cerámicas, materiales poliméricos, materiales fluorados, compuestos intermetálicos y materiales compuestos. Los materiales poliméricos pueden incluir, por ejemplo, politetrafluoroetileno, fluoroacrilato, fluoroeuratano, fluorosilicona, fluorosilano, carbonato

modificado, clorosilanos, silicona, polidimetilsiloxano (PDMS) y/o combinaciones de estos. Las cerámicas pueden incluir, por ejemplo, carburo de titanio, nitruro de titanio, nitruro de cromo, nitruro de boro, carburo de cromo, carburo de molibdeno, carbonitruro de titanio, níquel electrolítico, nitruro de circonio, dióxido de silicona fluorada, dióxido de titanio, óxido de tántalo, nitruro de tántalo, carbono tipo diamante, carbono tipo diamante fluorado y/o combinaciones de estos. Los compuestos intermetálicos pueden incluir, por ejemplo, aluminuro de níquel, aluminuro de titanio y/o combinaciones de estos.

Las texturas dentro de la superficie impregnada con líquido 120 son texturas físicas o rugosidad de superficies. Las texturas pueden ser aleatorias, incluso fractales o modeladas. En determinadas realizaciones, las texturas son partes a microescala o nanoescala. Por ejemplo, las texturas pueden tener una escala de longitud  $L$  (p. ej., un diámetro de poro promedio o una altura de protuberancia promedio) que es menor que aproximadamente 100 micrones, menor que aproximadamente 10 micrones, menor que aproximadamente 1 micrón, menor que aproximadamente 0,1 micrones o menor que aproximadamente 0,01 micrones. En determinadas realizaciones, la textura incluye postes 124 u otras protuberancias, por ejemplo protuberancias esféricas o hemisféricas. Pueden ser

preferibles protuberancias redondeadas para evitar bordes sólidos afilados y minimizar la fijación de bordes líquidos. La textura se puede introducir a la superficie utilizando cualquier método convencional, incluso métodos mecánicos y/o  
5 químicos tales como litografía, autoensamblaje y deposición, por ejemplo.

El líquido de impregnación 126 puede ser cualquier tipo de líquido que pueda proporcionar las propiedades no humectantes deseadas. Por ejemplo, el líquido de impregnación  
10 126 se puede basar en aceite o se puede basar en agua (es decir, acuoso). En determinadas realizaciones, el líquido de impregnación 126 es un líquido iónico (p. ej., BMI-IM). Otros ejemplos de líquidos de impregnación posibles incluyen hexadecano, aceites de bombas de vacío (p. ej., FOMBLIN®  
15 06/6, KRYTOX® 1506) aceites de silicona (p. ej., 10 cSt o 1000 cSt), fluorocarbonos (p. ej., perfluoro-tripentilamina, FC-70), fluidos pseudoplásticos, fluidos dilatantes, polímeros líquidos, polímeros disueltos, fluidos viscoelásticos y/o fluoroPOSS líquido. En determinadas  
20 realizaciones, el líquido de impregnación es (o comprende) a metal líquido, un fluido dieléctrico, un ferrofluido, un fluido magnetorreológico (MR), un fluido electrorreológico (ER), un fluido iónico, un líquido de hidrocarburo y/o un líquido de fluorocarbono. En una realización, el líquido de

impregnación 126 se hace dilatante con la introducción de nanopartículas. Puede ser deseable un líquido de impregnación dilatante 126 para evitar el empalamiento y combatir el impacto de los líquidos incidentes, por ejemplo.

5           Para minimizar la evaporación del líquido de impregnación 126 de la superficie 120, generalmente es recomendable utilizar líquidos de impregnación 126 que tengan bajas presiones de vapor (p. ej., menores que 0,1 mmHg, menores que 0,001 mmHg, menores que 0,00001 mmHg o menores  
10 que 0,000001 mmHg). En determinadas realizaciones, el líquido de impregnación 126 tiene un punto de congelación menor que -20 °C, menor que -40 °C o aproximadamente -60 °C. En determinadas realizaciones, la tensión superficial del líquido de impregnación 126 es aproximadamente 15 mN/m,  
15 aproximadamente 20 mN/m o aproximadamente 40 mN/m. En determinadas realizaciones, la viscosidad del líquido de impregnación 126 es entre aproximadamente 10 cSt y aproximadamente 1000 cSt).

El líquido de impregnación 126 se puede introducir a la  
20 superficie 120 utilizando cualquier técnica convencional para aplicar un líquido a un sólido. En determinadas realizaciones, se utiliza un proceso de recubrimiento, por ejemplo un recubrimiento por inmersión, recubrimiento con cuchilla o recubrimiento con rodillo, para aplicar el líquido

de impregnación 126. Alternativamente, el líquido de impregnación 126 se puede introducir y/o reponer por materiales líquidos que fluyen más allá de la superficie 120 (p. ej., en una tubería). Después de que se ha aplicado el

5 líquido de impregnación 126, fuerzas capilares mantienen el líquido en su lugar. Las fuerzas capilares escalan aproximadamente con la inversa de la distancia entre partes o el radio de los poros, y las partes pueden estar diseñadas para que el líquido se mantenga en su lugar a pesara del

10 movimiento de la superficie y a pesar del movimiento del aire u otros fluidos sobre la superficie (p. ej., donde la superficie 120 está en la superficie exterior de una aeronave con aire que se precipita, o en una tubería con aceite y/o otros fluidos que fluyen a través de ella). En determinadas

15 realizaciones, se utilizan partes a nanoescala (p. ej., entre 1 nanómetro y 1 micrómetro) en donde las fuerzas dinámicas altas, las fuerzas del cuerpo, las fuerzas gravitacionales y/o las fuerzas de corte podrían representar una amenaza para eliminar la película líquida, p. ej., para superficies

20 utilizadas en tuberías de corriente rápida, en aeronaves, en palas de turbinas de viento, etc. También pueden ser útiles pequeñas partes para proporcionar solidez y resistencia al impacto.

En comparación a las superficies impregnadas con gas,

las superficies impregnadas con líquido descritas aquí ofrecen varias ventajas. Por ejemplo, debido a que los líquidos son incompresible a través de una amplia gama de presiones, las superficies impregnadas con líquido  
5 generalmente son más resistentes al empalamiento. En determinadas realizaciones, aunque es posible que sean necesarias texturas a nanoescala (p. ej., menos que un micrón) para evitar el empalamiento con superficies impregnadas con gas, las texturas a microescala (p. ej.,  
10 entre 1 micrón y aproximadamente 100 micrones) son suficientes para evitar el empalamiento con superficies impregnadas con líquido. Como se mencionó, las texturas a microescala son más fáciles de fabricar y más prácticas que las texturas a nanoescala.

15 Las superficies impregnadas con líquido también son útiles para reducir la resistencia viscosa entre una superficie sólida y un líquido que fluye. En general, la resistencia viscosa o el esfuerzo de corte ejercido por un líquido que fluye sobre una superficie sólida es proporcional  
20 a la viscosidad del líquido y la velocidad de corte adyacente a la superficie. Una hipótesis tradicional es que las moléculas del líquido en contacto con la superficie sólida se adhieren a la superficie, en una condición de contorno denominada "antideslizante". Aunque se puede producir algo de

deslizamiento entre el líquido y la superficie, la condición de contorno antideslizante es una hipótesis útil para la mayoría de las aplicaciones.

En determinadas realizaciones, son convenientes superficies no humectantes, por ejemplo superficies impregnadas con líquido, ya que inducen una gran cantidad de deslizamiento en la superficie sólida. Por ejemplo, también con referencia a las figuras 1a y 1c, cuando un líquido de contacto 102, 128 está sostenido por un líquido de impregnación 126 o un gas, la interfaz líquido-líquido o líquido-gas puede fluir o deslizarse con respecto al material sólido subyacente. Se pueden lograr reducciones de resistencia superiores a 40 % debido a este deslizamiento. Como se mencionó, sin embargo, las superficies impregnadas con gas son susceptibles al empalamiento. Cuando se produce empalamiento con una superficie impregnada con gas, se pueden perder los beneficios de la reducción de resistencia reducida.

Otra ventaja de las superficies impregnadas con líquido descritas en el presente es que son útiles para minimizar la formación y adhesión de escarcha o hielo. En teoría, las superficies superhidrófobas anteriores (es decir, impregnadas con gas) reducen la formación y la adhesión de hielo forzando al hielo a descansar en lo alto de las texturas de

superficies a microescala y/o nanoescala de baja energía superficial para que el hielo se ponga en contacto principalmente con aire. En la práctica, son embargo, estas superficies impregnadas con gas en realidad puede dar lugar a un aumento de la formación y la adhesión de hielo. Por ejemplo, cuando la temperatura de la superficie impregnada con gas se lleva a bajo cero, la superficie impregnada con gas puede comenzar a acumular escarcha, que convierte la superficie de superhidrófoba a hidrófila. Cuando el agua entra en contacto con la nueva superficie hidrófila, el agua puede infiltrarse en las texturas hidrófilas y congelarse. La unión adhesiva entre la superficie impregnada con gas y el hielo se puede fortalecer por enclavamiento entre el hielo y las texturas de las superficies. De forma similar, las superficies impregnadas con líquido descritas aquí son útiles en situaciones donde la nucleación en la superficie plantea un problema, por ejemplo, para reducir el escalamiento, la formación de hidratos, la acumulación de placa en implantes quirúrgicos y similares.

De acuerdo con la teoría clásica de nucleación, grupos de moléculas de agua reunidos con agitación térmica aleatoria deben alcanzar un tamaño crítico con el fin de sostener el crecimiento. La barrera de energía libre,  $\Delta G^*$ , para la nucleación heterogénea de un embrión de tamaño crítico en una

superficie plana y la velocidad de nucleación correspondiente se expresan como

$$\Delta G^* = \frac{\pi \sigma_{IV} r_c^2}{3} (2 - 3m + m^3) \quad (1)$$

y

$$J = J_0 \exp(\Delta G^* / kT). \quad (2)$$

El parámetro  $m$  es la proporción de las energías interfaciales dadas por

$$m = \frac{(\sigma_{SV} - \sigma_{SI})}{\sigma_{IV}}, \quad (3)$$

en donde  $\sigma_{SV}$ ,  $\sigma_{SI}$ , y  $\sigma_{IV}$  son las energías interfaciales para las interfaces sustrato-vapor, sustrato-hielo y hielo-vapor, respectivamente. En la definición de la energía libre en términos de un radio crítico  $r_c$ , se supone que el sustrato y el hielo son isotrópicos y se supone que las partículas de nucleación son esféricas. El radio crítico  $r_c$  se puede definir por la ecuación de Kelvin:

$$\ln(p / p_o) = 2\sigma_{IV} / n_l k T r_c. \quad (4)$$

Los experimentos de nucleación con sólidos demuestran barreras de energía mucho más bajas para la nucleación que la barrera de energía libre prevista por la ecuación 1. Esto es probablemente debido a la rugosidad y la heterogeneidad a nanoescala, ya que los parches de alta energía superficial de una superficie y las concavidades a nanoescala pueden actuar como sitios de nucleación. Los líquidos, sin embargo,

comúnmente son muy suaves y homogéneos y se ha demostrado experimentalmente que la nucleación del agua en líquidos está de acuerdo con la teoría clásica. Por consiguiente, la barrera de energía para la nucleación de escarcha o la condensación generalmente es mucho mayor para los líquidos hidrófobos que para los sólidos. En determinadas realizaciones, impregnar un líquido dentro de las texturas de una superficie impregnada con líquido evita la nucleación en estas regiones y fuerza la nucleación preferencial en los picos de las texturas de las superficies (p. ej., las partes superiores de los postes). Con respecto a la formación de hielo, el uso de una superficie impregnada con líquido supera o reduce los desafíos de formación y adhesión de hielo encontrados con superficies superhidrófobas impregnadas con gas.

En determinadas realizaciones, las superficies impregnadas con líquido descritas aquí tienen propiedades de caída de gotitas ventajosas que minimizan la acumulación de líquido o las capas de hielo en las superficies. Para evitar la formación de hielo, por ejemplo, es importante que una superficie pueda desprender gotitas superenfriadas (p. ej., lluvia helada) antes de que las gotitas se congelen. De lo contrario, las gotitas con velocidad suficientemente alta (por ejemplo una gotita de lluvia) pueden penetrar las

texturas de una superficie y permanecer fijas hasta que se forme hielo. De manera conveniente, en determinadas realizaciones, las superficies impregnadas con líquido descritas aquí tienen bajos ángulos de caída (es decir, el  
5 ángulo o pendiente de una superficie en la cual una gotita en contacto con la superficie comenzará a caer o deslizarse de la superficie). Los bajos ángulos de caída asociados con las superficies impregnadas con líquido permiten que las gotitas en contacto con la superficie caigan fácilmente de la  
10 superficie antes de que se pueda congelar el líquido y se pueda acumular hielo. Como describe más detalladamente a continuación, se midió que el ángulo de caída para el agua en la superficie (es decir, una superficie de postes de silicona tratada con octadeciltriclorosilano impregnada con  
15 hexadecano) era  $1,7^{\circ} \pm 0,1^{\circ}$ . En determinadas realizaciones, el ángulo de caída para una superficie impregnada con líquido es menor que  $2^{\circ}$  o menor que aproximadamente  $1^{\circ}$ .

La figura 2 es una vista transversal esquemática de la gotita de un líquido 202 sobre una superficie impregnada con  
20 líquido 204, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención. En una realización, la morfología del borde de la gotita, que regula su movilidad, se ve afectada por las propiedades del líquido de impregnación 126. Por ejemplo, como se ilustra, la gotita puede "levantar" el líquido de

impregnación 126 cerca localmente de los bordes de la gotita. La agrupación del líquido de impregnación 126 en los bordes de la gotita genera fuerzas de fijación. Durante la caída de la gotita, las fuerzas de fijación y las fuerzas viscosas  
5 combaten el movimiento de la gotita debido a la gravedad. Para una superficie inclinada en un ángulo  $\alpha$ , la ecuación de equilibrio de fuerzas para la caída de la gotita se da por

$$V\rho g \sin \alpha = \pi r^2(1-\phi)\mu v_o/h + 2r\sqrt{\phi}\gamma_w(\cos \theta_r - \cos \theta_a), \quad (5)$$

en donde  $V\rho g \sin \alpha$  es la fuerza de gravedad en la gotita,  
10  $\pi r^2(1-\phi)\mu v_o/h$  es la fuerza viscosa y  $2r\sqrt{\phi}\gamma_w(\cos \theta_r - \cos \theta_a)$  es la fuerza de fijación. En esta ecuación,  $V$  es el volumen de gotita,  $\rho$  es la densidad del líquido no humectante,  $\phi$  es la fracción sólida de la superficie (fracción de área del sustrato en contacto directo con la fase no húmeda),  $\mu$  es la  
15 viscosidad dinámica del líquido impregnado,  $v_o$  es la velocidad de deslizamiento de la gotita (velocidad de gota característica),  $h$  es una escala de longitud característica sobre la cual se produce el corte del líquido impregnado (p. ej., una altura de postes de superficie u la altura de otra  
20 textura de superficie),  $\alpha$  es el ángulo que hace el sustrato con respecto al horizontal,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $r$  es el radio de contacto de la gotita no húmeda,  $\theta_a$  y  $\theta_r$  son los ángulos de contacto de avance y retroceso de la gotita no húmeda y  $\gamma_w$  es la energía de la superficie del

líquido no húmedo en equilibrio con vapor.

Las figuras de 2b a 2d presentan una superficie no humectante 250 que incluye una porción de base 252 y una matriz de postes sustancialmente cuadrados 254, que tienen partes superiores de postes 256. Como se muestra, los postes 254 tienen una altura  $h$ , una longitud lateral  $a$  y un espaciado entre postes  $b$  (es decir, una distancia entre las superficies de postes adyacentes). La porción de base 252 incluye regiones de base 258 entre los postes 260. La fracción sólida de la superficie  $\Phi$  para la superficie 250 se da por  $\Phi = a^2 / (a + b)^2$ .

En determinadas realizaciones, la elección de líquido de impregnación afecta la velocidad con la cual se produce la caída de la gotita. Por ejemplo, si el líquido tiene una viscosidad alta, la caída se puede producir muy lentamente.

Las superficies impregnadas con líquido descritas aquí tienen una amplia variedad de aplicaciones a través de muchas industrias diferentes. Por ejemplo, en determinadas realizaciones, las superficies impregnadas con líquido se utilizan para repeler líquidos. Existen muchos procesos físicos que involucran el impacto de líquidos en superficies sólidas. Los ejemplos incluyen gotitas de agua que chocan con las palas de turbinas de vapor, gotitas de aceite que chocan con las palas de turbinas de gas y gotitas de agua que chocan

con superficies de aeronaves y de turbinas de viento. Para las turbinas de vapor y gas, las gotitas de agua atrapadas en el vapor chocan y se adhieren a las palas de las turbinas, reduciendo así la salida de potencia de la turbina. Al  
5 aplicar una superficie impregnada con líquido a las palas de las turbinas, sin embargo, las gotitas pueden desprenderse de las palas y se puede mejorar significativamente la salida de potencia de la turbina. En una realización, las superficies impregnadas con líquido presentan una gran barrera de energía  
10 para la condensación y son adecuadas como recubrimientos antiempañamiento para las superficies tales como ventanas, anteojos y/o espejos.

En determinadas realizaciones, se utilizan superficies impregnadas con líquido para proporcionar fobicidad al hielo, evitando o minimizando así la formación de hielo. Se puede  
15 formar hielo en superficies en muchas situaciones, por ejemplo aeronaves, turbinas de viento, líneas de transmisión de energía y parabrisas. El hielo formado en las superficies impregnadas con líquido presenta adhesión mucho más baja en comparación con las superficies comunes y, por lo tanto, se  
20 puede eliminar fácilmente logrando ahorros de energía significativos. Las superficies impregnadas con líquido también son repelentes al hielo en el sentido que su superficie de poca de energía atómicamente suave produce una

gran barrera de energía para la desublimación (formación de escarcha). En determinadas realizaciones, las superficies impregnadas con líquido inhiben la formación de hielo macroscópica de la lluvia helada. Para aeronaves, debido a

5 que las superficies de impregnación de líquidos producen adhesión de escarcha y hielo disminuida, se puede reducir significativamente la energía y los químicos perjudiciales para el medio ambiente necesarios para la descongelar la aeronave. Cuando las superficies impregnadas con líquido se

10 utilizan en líneas de transmisión de energía, es menos probable que se forme hielo y se puede eliminar fácilmente. Las superficies impregnadas con líquido también pueden reducir significativamente la formación de hielo en las turbinas de viento, aumentando así la eficacia de la turbina.

15 En determinadas realizaciones, se utilizan superficies impregnadas con líquido para proporcionar fobicidad a hidratos, evitando o minimizando así la formación de hidratos. Los hidratos se forman en tuberías de aceite y gas durante la extracción y/o perforación en aguas profundas. Los

20 hidratos pueden tapar las tuberías y provocar un aumento catastrófico en las presiones de líquidos. Al elegir un líquido de impregnación adecuado, una superficie impregnada con líquido presenta una barrera de alta energía para la nucleación de hidratos y, por lo tanto, combate la formación

de hidratos. Por otra parte, los hidratos formados en las superficies impregnadas con líquido muestran fuerza de adhesión mucho menor en comparación con las superficies comunes y, por lo tanto, se puede eliminar fácilmente. En

5 determinadas realizaciones, el líquido de impregnación es un líquido permanente suministrado con un recubrimiento original. Alternativamente, el líquido de impregnación puede ser suministrado continuamente por el aceite presente en la tubería.

10 En determinadas realizaciones, se utilizan superficies impregnadas con líquido para proporcionar fobicidad a la sal, evitando o minimizando así la formación de sales o escala mineral. Las sales se pueden formar en superficies sólidas en instalaciones industriales basadas en agua o basadas en

15 vapor, por ejemplo intercambiadores de calor en las plantas de energía y desalinización. Las sales también se pueden formar en las superficies de tuberías de aceite y gas. La formación de sales reduce el rendimiento térmico de los intercambiadores de calor y también requiere mantenimiento

20 y/o detenciones costosas. Las superficies impregnadas con líquido presentan una barrera de alta energía para la nucleación de sales que combate la formación de sales y provoca fuerza de adhesión mucho menor en comparación con las superficies comunes y, por lo tanto, facilita la eliminación.

El líquido de impregnación puede ser un líquido permanente suministrado con un recubrimiento original y/o se puede suministrar o reponer continuamente por una fase de líquido adyacente (p. ej., aceite presente en una tubería de aceite o  
5 gas).

En determinadas realizaciones, se utilizan las superficies impregnadas con líquido para reducir la resistencia viscosa entre una superficie sólida y un líquido que fluye. Muchas aplicaciones de ingeniería, por ejemplo el  
10 transporte de petróleo crudo en tuberías, requieren el transporte de líquidos a través de tuberías durante largas distancias. Debido a las fuerzas de resistencias entre los líquidos y las superficies adyacentes, el consumo de energía asociado con el transporte de estos líquidos suele ser  
15 significativo. El uso de superficies impregnadas con líquido puede reducir en gran medida el consumo de energía en estas aplicaciones. Eligiendo de forma adecuada el líquido impregnado, las superficies impregnadas con líquido pueden presentar deslizamiento mejorado del líquido de contacto y,  
20 por lo tanto, provocar una reducción drástica de la resistencia entre líquido-sólido. En determinadas realizaciones, las superficies impregnadas con líquido pueden ser eficaces para el uso en arterias y/o venas artificiales.

En determinadas realizaciones, las superficies

impregnadas con líquido son útiles para inhibir la corrosión. Al utilizar un líquido de impregnación resistente a la corrosión, el material sólido subyacente puede estar protegido de un ambiente corrosivo. Adicionalmente, la  
5 capacidad de las superficies impregnadas con líquido de desprender gotitas de líquido reduce la corrosión ya que la humedad es más fácil de eliminar de la superficie.

Las superficies impregnadas con líquido también se pueden utilizar en stents, arterias artificiales y/u otros  
10 implantes quirúrgicos para evitar o reducir la acumulación de depósitos.

En determinadas realizaciones, una superficie impregnada con líquido se utiliza para proporcionar articulaciones de los huesos autolubrificantes. Por ejemplo, a  
15 superficie impregnada con líquido se puede utilizar como material para juntas artificiales implantadas durante cirugías de reemplazo de rodilla o cadera. La superficie impregnada con líquido proporciona fricción significativamente reducida entre las superficies de contacto  
20 y también proporciona lubricación de larga duración. El líquido de impregnación puede ser un líquido permanente incorporado antes del implante o se puede suministrar continuamente por los fluidos de lubricación presentes dentro del cuerpo (p. ej., líquido sinovial).

Existen muchas otras aplicaciones en las cuales se pueden utilizar superficies impregnadas con líquido para proporcionar lubricación. Por ejemplo, se pueden utilizar superficies impregnadas con líquido en rodamientos, en  
5 superficies de pistones/cilindros y/o en otros dispositivos o equipos automotrices o mecánicos donde es beneficiosa una reducción en la fricción entre las superficies móviles adyacentes. En una realización, el líquido de impregnación dentro de la superficie proporciona un suministro de larga  
10 duración de lubricante y, por lo tanto, reduce el tiempo y energía gastados en aplicar lubricante a las ubicaciones necesarias.

Las superficies impregnadas con líquido también se pueden utilizar para proporcionar antiincrustación y/o  
15 autolimpieza. Por ejemplo, se pueden utilizar superficies impregnadas con líquido para antiincrustación combatiendo la adsorción de restos en virtud de su energía superficial. En determinadas realizaciones, las partículas y químicos en la superficie impregnada con líquido se absorben y transportan  
20 por gotitas que se desprenden de la superficie. Esta propiedad de autolimpieza es importante para muchas aplicaciones, por ejemplo vidrio autolimpiante (p. ej., para ventanas, anteojos y/o espejos) y recubrimientos industriales.

Las superficies impregnadas con líquido también se pueden utilizar para promover la condensación de la humedad. Por ejemplo, las superficies impregnadas con líquido se pueden utilizar para desprender condensado fácilmente y  
5 mejorar así la transferencia de calor de condensación (p. ej., condensación por goteo). En determinadas realizaciones, las superficies impregnadas con líquido se aplican a los intercambiadores de calor, desde condensadores de vapor a condensadores HVAC y a condensadores de gas natural  
10 utilizados en licuefacción de gas natural.

En determinadas realizaciones, las superficies impregnadas con líquido descritas aquí son útiles para recubrimientos en equipos deportivos tales como gafas de esquí (p. ej., antiempañamiento), esquís, tablas de  
15 snowboard, patines de hielo, trajes de baño y similares.

La figura 15 es una imagen de una gotita de agua en una superficie que tiene una matriz de partes de postes e impregnada con aceite de silicona, contrastando un estado empalado con un estado no húmedo. En el ejemplo que muestra  
20 un estado empalado, que puede ser desfavorecido por determinadas realizaciones en las cuales se desea una superficie no extremadamente humectante, la gotita es agua, el líquido es impregnado es aceite de silicona y la superficie es silicona sin tratar con postes cuadrados de 10

micrómetros que tienen espaciamiento de 10 micrómetros. En el estado empalado, el líquido no cae de la superficie. En el ejemplo que muestra un estado no húmedo, que se ve favorecido por determinadas realizaciones en las cuales se desea no humectación, las condiciones son las mismas excepto que la superficie se trata con OTS (octadeciltriclorosilano). Se pueden utilizar otros recubrimientos.

La figura 16 es un esquema que describe seis estados de humectación de una superficie impregnada con líquido, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención. Los seis estados de humectación (del estado 1 al estado 6) dependen de las cuatro condiciones de humectación que se muestran al final de la figura 16 (condiciones de entre 1 y 4). En la mayoría de las realizaciones, se prefieren los estados no húmedos (estados entre 1 y 4). Adicionalmente, cuando una película delgada se forma establemente en las partes superiores de los postes (u otras partes en la superficie), como en los estados no húmedos 1 y 3, se pueden observar propiedades no humectantes incluso más preferibles (y otras propiedades relacionadas descritas en el presente).

Para lograr estados no húmedos, es recomendable tener baja energía de superficie sólida y baja energía de superficie del líquido impregnado en comparación con el líquido no húmedo. Por ejemplo, se prefieren energías de las

superficies menores que aproximadamente  $25 \text{ mJ/m}^2$ . Los líquidos de baja energía de superficie incluye determinados líquidos basados en hidrocarburo y fluorocarbono, por ejemplo, aceite de silicona, líquidos de perfluorocarbono, aceites de vacío perfluorados (p. ej., Krytox 1506 o Fromblin 06/6), refrigerantes fluorados tales como perfluorotripentilamina (p. ej., FC-70, comercializado por 3M o FC-43), líquidos iónicos fluorados que son inmiscibles con agua, aceites de silicona que comprenden PDMS y aceites de silicona fluorados.

Ejemplos de sólidos de baja energía de superficie incluyen los siguientes: silanos que terminan en una cadena de hidrocarburo (por ejemplo octadeciltriclorosilano), silanos que terminan en una cadena de fluorocarbono (p. ej. fluorosilano), tioles que terminan en una cadena de hidrocarburo (como butanotiol) y tioles que terminan en una cadena de fluorocarbono (p. ej. tiol perfluorodecano). En determinadas realizaciones, la superficie comprende un sólido de baja energía de superficie tal como un fluoropolímero, por ejemplo, un silsesquioxano tal como silsesquioxano oligomérico poliédrico fluorodecilo. En determinadas realizaciones, el fluoropolímero es (o comprende) tetrafluoroetileno (ETFE), copolímero de etileno-propileno fluorado (FEP), fluoruro de polivinilideno (PVDF), copolímero

de perfluoroalcoxitetrafluoroetileno (PFA), politetrafluoroetileno (PTFE), tetrafluoroetileno, copolímero de perfluorometilviniléter (MFA), copolímero de etilenclorotrifluoroetileno (ECTFE), copolímero de etileno-  
5 tetrafluoroetileno (ETFE), perfluoropoliéter o Tecnoflon.

En la figura 16,  $\Gamma_{wv}$  es la energía de superficie de la fase no húmeda en equilibrio con vapor;  $\Gamma_{ow}$  es la energía interfacial entre la fase no húmeda y el líquido impregnado;  $\Gamma_{ov}$  es la energía de superficie de la fase  
10 de líquido impregnado en equilibrio con vacío;  $\Gamma_{sv}$  es la energía de superficie del sólido en equilibrio con vapor;  $\Gamma_{so}$  es la energía interfacial entre la fase impregnada y el sólido;  $\Gamma_{sw}$  es la energía interfacial entre el sólido y la fase no húmeda;  $r$  = superficie total dividida por el  
15 área de la superficie proyectada;  $\theta_{c1}$ ,  $\theta_{c2}$ ,  $\theta_{c3}$ ,  $\theta_{c4}$ ,  $\theta_{w1}$ ,  $\theta_{w2}$ , son los ángulos de contacto macroscópicos hechos por la fase no húmeda en cada estado húmedo;  $\theta^*_{os}(v)$  es el ángulo de contacto macroscópico de aceite en el sustrato texturizado cuando la  
20 fase que rodea el sustrato texturizado es vapor;  $\theta_{os}(v)$  es el ángulo de contacto de aceite en un sustrato sólido suave de la misma química cuando la fase que rodea la gotita de aceite es vapor;  $\theta^*_{os}(w)$  es el ángulo de contacto macroscópico de aceite en el sustrato texturizado cuando la

fase que rodea la gotita de aceite es agua; y  $\theta_{os}(w)$  es el ángulo de contacto de aceite en un sustrato suave de la misma química que la superficie texturizada cuando la fase que rodea la gotita de aceite es agua.

5           La figura 17 es un esquema que muestra las condiciones para los seis estados de humectación de una superficie impregnada con líquido que se muestra en la figura 16, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención.

#### 10           Ejemplos experimentales

La figura 3 incluye una fotografía de una superficie microtexturada 302, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención. La superficie 302 era de silicona e incluía un patrón cuadrado de pilares de 10  $\mu\text{m}$  con una separación de  
15 25  $\mu\text{m}$ . Como se ilustra, se impregnó una porción inferior 304 de la superficie 302 con hexadecano (un líquido de impregnación), mientras que una porción superior 306 se impregnó con aire (es decir, sin líquido de impregnación). Un borde 308 del hexadecano define un contorno entre la porción  
20 superior 306 y la porción inferior 304. Se logró la impregnación con hexadecano (i) sumergiendo la porción inferior 304 de la superficie 302 en un baño de hexadecano y (ii) retirando la porción inferior 304 del hexadecano a un índice lento (10 mm/min), con la ayuda de un revestidor por

inmersión. La impregnación fue fuerte ya que el hexadecano permaneció en su lugar mientras se roció con chorros de agua que tenían una velocidad de impacto de aproximadamente 5 m/s. Se midieron la histéresis del ángulo de contacto y el ángulo de caída de una gotita de agua de 7  $\mu$ L sobre la porción inferior 304 de la superficie 302 (es decir, la porción impregnada con líquido de la superficie 302). La histéresis del ángulo de contacto (CAH) y el ángulo de caída fueron extremadamente bajos: CAH fue inferior a 1°, mientras que el ángulo de caída fue solamente 1,7  $\pm$  0,1°.

Las figuras 4a y 4b ilustran una secuencia de imágenes de video de alta velocidad que representan el impacto de una gotita de agua 402 sobre una superficie impregnada con gas 404 y una superficie impregnada con líquido 406, respectivamente. Como se comentó anteriormente, cuando una gotita de líquido choca con una superficie, puede ejercer gran presión sobre la superficie. Esto se aplica incluso para las gotitas de tamaño milimétrico que impactan la superficie a una velocidad inferior a aproximadamente 5 m/s. Como consecuencia de estas presiones, se pueden empalar las gotitas sobre una superficie impregnada con gas, provocando así que la superficie impregnada con gas pierda su calidad mejorada de desprendimiento de gotas. El empalamiento de las gotitas se ilustra en la figura 4a en donde se muestra que la

gotita se adhiere a la superficie impregnada con gas 404, en lugar de rebotar en la superficie. Para evitar la adherencia, enfoques anteriores con superficies impregnadas con gas enfatizan la introducción de la texturización a nanoescala.

5 Sin embargo, con un enfoque de superficie impregnada con líquido, incluso las microtexturas del orden de 10  $\mu\text{m}$ , pueden desprender gotitas incidentes con éxito. Esto se muestra en la figura 4b en donde la misma microtextura que empaló la gota de agua cuando había aire presente, repelió  
10 completamente la gotita cuando estaba impregnada con hexadecano. La barra de escala 408 en estas figuras es de 3 mm.

La figura 5 incluye una secuencia de imágenes de video de alta velocidad que muestran una gotita 502 que impacta una  
15 superficie impregnada con líquido 504 inclinada a  $25^\circ$  con respecto a la horizontal. La gotita de agua 502 en este caso se resbaló y eventualmente rebotó sobre la superficie 504, demostrando que la superficie impregnada con líquido 504 pudo desprender a la gotita incidente con éxito y fue resistente  
20 al empalamiento. En este caso, la gotita de agua era de 2,5 mm de diámetro. La superficie impregnada con líquido 504 era una superficie microtexturada que contenía un líquido de impregnación de hexadecano en una matriz de postes cuadrados de 10  $\mu\text{m}$  de silicona, con una separación de 25  $\mu\text{m}$ .

Las figuras 6a-6d incluyen una secuencia de imágenes ESEM que muestran la formación de escarcha sobre una superficie superhidrófoba impregnada con gas 602, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención. La superficie superhidrófoba 602 incluía una matriz de postes cuadrados hidrófobos 604 con un ancho, separación entre bordes y relación de aspecto de 15  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  y 7, respectivamente. La figura 6a ilustra una superficie seca (es decir, sin escarcha), mientras que las figuras 6b-6d muestran la formación de escarcha 606 sobre la superficie. El ángulo de contacto del agua intrínseco del recubrimiento hidrófobo sobre los postes era de  $110^\circ$ . Se mantuvo la superficie a una temperatura de  $-13^\circ\text{C}$  mediante un accesorio de etapa fría de ESEM. Al principio del experimento, se mantuvo la presión de la cámara a  $\sim 100\text{ Pa}$ , muy por debajo de la presión de saturación para garantizar una superficie seca. Luego, se aumentó lentamente la presión de vapor en la cámara hasta que se observó nucleación de la escarcha. La nucleación de la escarcha y el crecimiento se produjeron sin ninguna preferencia espacial específica sobre toda el área disponible, incluido partes superiores de postes, paredes laterales y valles, debido a la humectabilidad intrínseca uniforme de la superficie.

Las figuras 7a-7c muestran imágenes de las pruebas de

impacto de las gotitas sobre superficies superhidrófobas secas y escarchadas, de acuerdo con determinadas realizaciones de la invención. Las pruebas se realizaron utilizando gotitas de agua que tenían un radio de 1 mm y que

5 impactaban la superficie a una velocidad de 0,7 m/s. La figura 7a es una imagen SEM de una vista superior de la superficie de la matriz de postes Si representativa 702 que tiene un ancho, separación entre bordes y relación de aspecto de 10  $\mu$ m, 20  $\mu$ m y 1, respectivamente. La figura 7b incluye

10 una secuencia de imágenes de video de alta velocidad del impacto de una gotita sobre una superficie seca 704. Como se ilustró, la gotita retrocede desde la superficie 704 porque la presión capilar antihumectante es mayor que las presiones dinámicas humectantes. La figura 7c incluye una secuencia de

15 imágenes de video de alta velocidad del impacto de una gotita sobre una superficie cubierta con escarcha 706. Los resultados muestran que la escarcha 706 altera las propiedades humectantes de la superficie, haciendo que la superficie sea hidrófila y provocando transición de humedad

20 Cassie a Wenzel de la gota que impacta, fijación posterior y formación de hielo "Wenzel" sobre la superficie.

La figura 8 es una gráfica de una fuerza de adhesión al hielo normalizada contra un área de la superficie normalizada medidas, de acuerdo con determinadas realizaciones de la

invención. La fuerza de adhesión al hielo normalizada es la fuerza de adhesión medida con superficies texturadas dividida entre la fuerza de adhesión al hielo medida con una superficie lisa. El área de la superficie normalizada es el  
5 área de superficie total normalizada por el área proyectada. Como indica la figura, se descubrió que la fuerza de adhesión al hielo normalizada aumenta con el área de superficie normalizada y muestra una fuerte tendencia lineal. El mejor ajuste lineal a los datos (línea continua, coeficiente de  
10 correlación  $R^2 = 0,96$ ) tiene una pendiente de uno y pasa por el origen (extrapolado utilizando una línea discontinua), lo que indica que el hielo está en contacto con toda la superficie disponible, incluido los lados de los postes. El enclavamiento del hielo con la superficie texturada produce  
15 mayor fuerza de adhesión. Los recuadros (a)-(d) en esta figura son imágenes ópticas de vista superior de matrices de postes PDMS replicadas representativas desde espaciado disperso hasta espaciado denso ( $a=15\text{ }\mu\text{m}$ ,  $h=10\text{ }\mu\text{m}$ ,  $b=45, 30, 15$  y  $5\text{ }\mu\text{m}$ , respectivamente, en donde  $a$ ,  $h$  y  $b$  son las  
20 dimensiones que se muestran en las figuras 2C y 2D), lo que muestra la excelente calidad de replicación.

Se realizaron los experimentos de caída utilizando un ganiómetro Rame-Hart con una etapa de inclinación para medir las propiedades de desprendimiento de gotas de una superficie

de poste de silicona tratada con octadeciltriclorosilano (con 25  $\mu\text{m}$  de espaciado entre postes) impregnada con hexadecano. Se midió un ángulo de caída de  $1,7^\circ \pm 0,1^\circ$  para una gota de 7  $\mu\text{l}$ . Los ángulos de contacto de avance y retroceso fueron  $98^\circ \pm 1^\circ$  y  $97^\circ \pm 1^\circ$ , respectivamente. Este ángulo de caída muy bajo permite que la superficie impregnada con líquido desprenda gotitas de líquido rápidamente (p. ej., antes de que se congelen en aplicaciones de lluvia helada).

Las figuras 9 y 10 muestran mediciones experimentales de movilidad de las gotitas de agua sobre superficies impregnadas con líquido. La figura 9 es una gráfica de un ángulo de caída  $\alpha$  (o el ángulo de inclinación) en función de la fracción sólida de la superficie  $\Phi$  para cuatro fluidos diferentes impregnados en la superficie (las dimensiones de las partes a y b son las que se muestran en la figura 2D). Observe que el caso del "Aire" representa una superficie superhidrófoba convencional (es decir, una superficie impregnada con gas). La gráfica muestra que el ángulo de caída  $\alpha$  fue muy pequeño (menos de  $5^\circ$ ) para los aceites de silicona y no se vio afectado significativamente por la fracción sólida  $\Phi$ . Para un líquido iónico (es decir, BMI-IM), que no humecta por completo la superficie de impregnación, el ángulo de caída fue relativamente superior  $\alpha$ , casi igual al caso del aire, y aumentó con la fracción sólida  $\Phi$  debido al

aumento de la fijación de la gotita sobre los micropostes. Esto es probable porque un aumento de la fracción sólida  $\phi$  significa más micropostes en una unidad de área. La figura 10 es una gráfica de la velocidad de deslizamiento de la gotita de agua  $v_o$ , para una prueba en la cual la superficie se inclinó a  $30^\circ$ , en función de la fracción sólida  $\phi$  para el aceite de silicona 1000 cSt. La gráfica muestra que la velocidad de deslizamiento  $v_o$  disminuyó cuando aumentó la fracción sólida  $\phi$ , debido al aumento de fijación.

10 Las figuras 11 y 12 muestran mediciones experimentales adicionales de velocidad de deslizamiento de la gotita de agua  $v_o$  para diferentes fluidos de impregnación que tienen diferentes viscosidades, cuando se inclinó la superficie  $30^\circ$ . Las figuras muestran que la velocidad de deslizamiento  $v_o$  con  
15 aire es mayor que con los aceites de silicona, pero la velocidad de deslizamiento  $v_o$  tiene la misma tendencia a disminuir con la fracción sólida  $\phi$  debido al aumento de fijación. La figura 12 es una gráfica de velocidad de deslizamiento  $v_o$  en función de la fracción sólida  $\phi$  para  
20 aceite de silicona 10 cSt. La gráfica muestra que la magnitud de velocidad de deslizamiento  $v_o$  es mayor que con 1000 cSt pero inferior que con aire. La tendencia con la fracción sólida  $\phi$  permanece igual. Las mediciones en las figuras 10 y 12 muestran que la movilidad de las gotitas (p. ej.,

velocidad de deslizamiento  $v_o$ ) aumenta a medida que disminuye la viscosidad del líquido de impregnación. Esto sugiere que la mayor movilidad se logra probablemente por los fluidos de impregnación de baja viscosidad, como el aire.

5           En un experimento, se varió la viscosidad del líquido de impregnación para determinar la influencia de la viscosidad sobre el impacto de una gotita. La superficie utilizada para la prueba incluía micropostes de silicona ( $10 \times 10 \times 10 \text{ } \mu\text{m}$ ) con un espaciamiento entre postes de  $10 \text{ } \mu\text{m}$ .  
10 Cuando la viscosidad del líquido de impregnación fue 10 cSt, la gotita de agua incidente pudo rebotar sobre la superficie impregnada con líquido. Por el contrario, cuando la viscosidad del líquido de impregnación fue 1000 cSt, la gotita de agua incidente permaneció sobre la superficie (es  
15 decir, no rebotó sobre la superficie). A diferencia de un experimento de impacto similar realizado con una superficie impregnada con gas, sin embargo, la gotita pudo rodar posteriormente por la superficie, aunque la velocidad de deslizamiento fue baja.

20           Las figuras 13 y 14 incluyen imágenes de Environmental SEM (ESEM) de nucleación de escarcha en superficies de microposte impregnadas con aceite de silicona. La figura 13 muestra una superficie 1402 antes de disparar la nucleación. La figura 14 muestra una superficie 1404 durante la

nucleación e indica que la escarcha 1306 tuvo tendencia a nuclearse sobre las partes superiores de los micropostes.

#### Equivalentes

Aunque la invención se ha mostrado y descrito  
5 particularmente con referencia a realizaciones preferidas  
específicas, los entendidos en la técnica deben comprender  
que se pueden hacer diversos cambios en la forma y los  
detalles sin apartarse del espíritu y el alcance de la  
invención definidos por las reivindicaciones adjuntas.

## **Reivindicaciones**

1. Un artículo que comprende una superficie impregnada con líquido, dicha superficie comprende una matriz de partes espaciadas suficientemente cerca para contener de forma  
5 estable un líquido entre ellas o dentro de las mismas.

2. El artículo de la reivindicación 1 en el cual dicho líquido tiene una viscosidad a temperatura ambiente no mayor que aproximadamente 1000 cP.

3. El artículo de la reivindicación 1 o 2 en el cual  
10 dicho líquido tiene una presión de vapor a temperatura ambiente no mayor que aproximadamente 20 mm Hg.

4. El artículo de la reivindicación 2 en el cual dicho líquido tiene una viscosidad a temperatura ambiente no mayor que aproximadamente 100 cP.

15 5. El artículo de la reivindicación 2 en el cual dicho líquido tiene una viscosidad a temperatura ambiente no mayor que aproximadamente 50 cP.

6. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el cual las partes tienen una altura  
20 sustancialmente uniforme y en donde el líquido llena el espacio entre las partes y cubre las partes con una capa de al menos aproximadamente 5 nm de grosor sobre la parte superior de las partes.

7. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones

anteriores en el cual las partes definen poros u otros orificios y en el cual el líquido llena las partes.

8. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el cual el líquido tiene un ángulo de contacto  
5 de retroceso de  $0^\circ$  para que el líquido forme una película delgada estable en la parte superior de las partes.

9. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el cual la matriz tiene un espaciamiento entre partes de entre aproximadamente 1 micrómetro y  
10 aproximadamente 100 micrómetros.

10. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el cual la matriz tiene un espaciamiento entre partes de entre aproximadamente 5 nanómetros y aproximadamente 1 micrómetro.

15 11. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el cual la matriz comprende estructuras jerárquicas.

12. El artículo de la reivindicación 11 en el cual las estructuras jerárquicas son partes a microescala que  
20 comprenden partes a nanoescala sobre ellas.

13. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el cual las partes tienen una altura no mayor que aproximadamente 100 micrómetros.

14. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones

anteriores en el cual las partes son postes.

15 15. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el cual las partes comprenden al menos un miembro seleccionado del grupo que consiste en una partícula esférica, una nanoaguja, un "nanograss" (nanohierba) y una parte de geometría aleatoria que proporciona rugosidad de superficie.

10 16. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el cual las partes comprenden al menos un miembro seleccionado del grupo que consiste en un poro, una cavidad, poros interconectados y cavidades interconectadas.

17. El artículo de la reivindicación 16 en el cual la superficie comprende medios porosos con diversos poros que tienen diferentes tamaños.

15 18. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el cual el líquido comprende un miembro seleccionado del grupo que consiste en aceite de silicona, un líquido de perfluorocarbono, un aceite de vacío perfluorofluorado (por ejemplo Krytox 1506 o Fromblin 06/6),  
20 un refrigerante fluorado (p. ej., perfluoro-tripentilamina vendido como FC-70, fabricado por 3M), un líquido iónico, un líquido iónico fluorado que es inmiscible con agua, un aceite de silicona que comprende PDMS, un aceite de silicona fluorado, un metal líquido, un fluido electrorreológico, un

fluido magnetorreológico, un ferrofluido, un líquido dieléctrico, un líquido de hidrocarburo, un líquido de fluorocarbono, un refrigerante, un aceite de vacío, un material de cambio de fase, un semilíquido, grasa, líquido  
5 sinovial, un fluido corporal.

19. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones anteriores en donde el artículo es un miembro seleccionado del grupo que consiste en una parte de turbina de vapor, una parte de turbina de gas, una parte de aeronave y una parte de  
10 turbina de viento, y en donde la superficie impregnada con líquido está configurada para repeler el líquido incidente.

20. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones 1-18 en el cual el artículo es un miembro seleccionado del grupo que consiste en anteojos y un espejo, y en donde la  
15 superficie impregnada con líquido está configurada para inhibir el empañamiento.

21. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones 1-18 en el cual el artículo es un miembro seleccionado del grupo que consiste en una parte de aeronave, una turbina de  
20 viento, una línea de transmisión de energía y un parabrisas, y en donde la superficie impregnada con líquido está configurada para inhibir la formación de hielo.

22. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones 1-18 en el cual el artículo es una tubería (o una parte o

recubrimiento de esta) y en donde la superficie impregnada con líquido está configurada para inhibir la formación de hidratos y/o mejorar el deslizamiento (reducir la resistencia) del fluido que fluye sobre ella.

5           23. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones 1-18 en el cual el artículo es una parte de termocambiador o una tubería de aceite o gas (o una parte o recubrimiento de esta) y en donde la superficie impregnada con líquido está configurada para inhibir la formación y/o adhesión de sal  
10 sobre ella.

24. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones 1-18 en el cual la superficie impregnada con líquido está configurada para inhibir la corrosión.

25. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones  
15 1-18 en el cual el artículo es una junta artificial y en donde la superficie impregnada con líquido está configurada para reducir la fricción entre las superficies de contacto y/o proporcionar lubricación de larga duración de la junta.

26. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones  
20 1-18 en el cual el artículo es una pieza de motor (p. ej., pistón o cilindro) y en donde la superficie impregnada con líquido está configurada para proporcionar lubricación de larga duración de la pieza.

27. El artículo de la reivindicación 25 o 26 en el cual

la superficie impregnada con líquido está configurada para liberar líquido desde la superficie a lo largo del tiempo, proporcionando así lubricación a lo largo del tiempo.

28. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones  
5 1-18 en el cual la superficie impregnada con líquido es una superficie antiincrustante configurada para combatir la adsorción de restos en ella.

29. El artículo de cualquiera de las reivindicaciones  
1-18 en el cual el artículo es una parte de termocambiador y  
10 en donde la superficie impregnada con líquido está configurada para facilitar desprendimiento de condensado en ella, mejorando así la transferencia de calor de condensación.

## **Resumen**

La invención se refiere a un artículo que tiene una superficie impregnada con líquido, la cual superficie tiene una matriz de partes en ella, espaciadas suficientemente  
5 cerca para contener de forma estable un líquido entre ellas o dentro de las mismas y preferentemente también una película delgada. La superficie le proporciona al artículo propiedades no humectantes deseadas. En comparación con superficies no humectantes anteriores, que incluyen un gas (p. ej., aire)  
10 atrapado dentro de las texturas de la superficie, estas superficies impregnadas con líquido son resistentes al empalamiento y la formación de escarcha y, por lo tanto, son más fuertes.

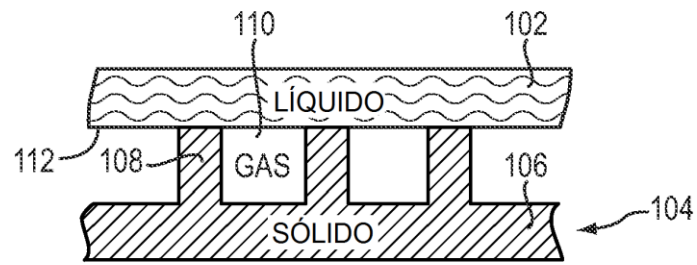


FIG. 1A

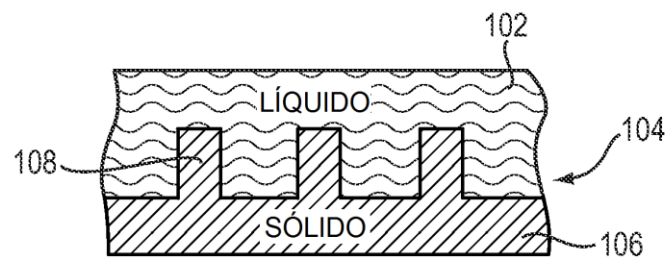


FIG. 1B

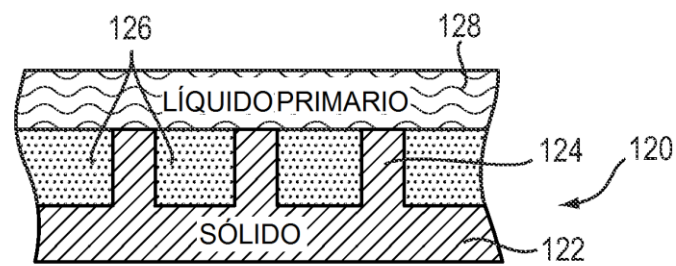


FIG. 1C

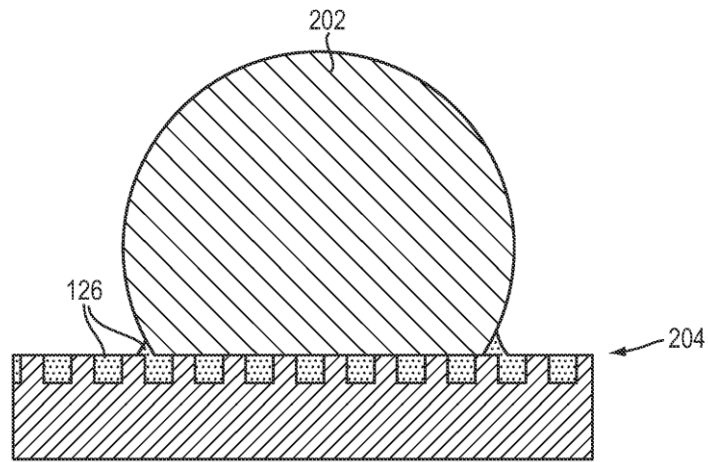


FIG. 2A

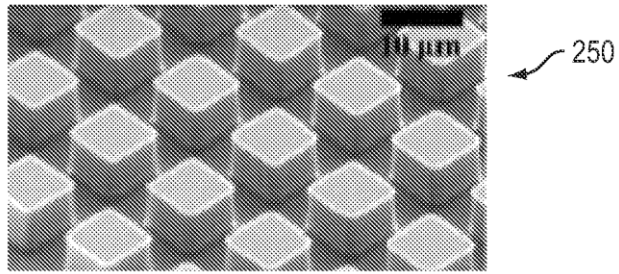


FIG. 2B

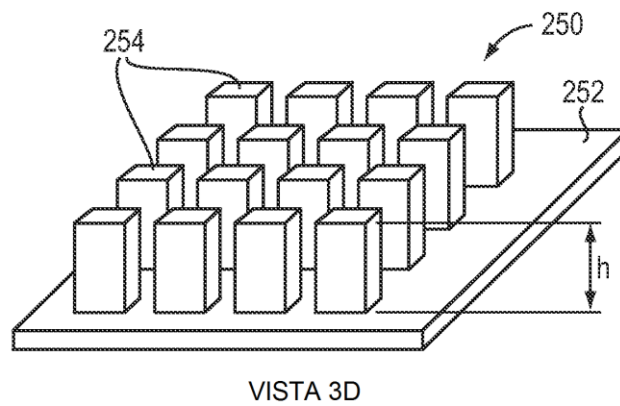
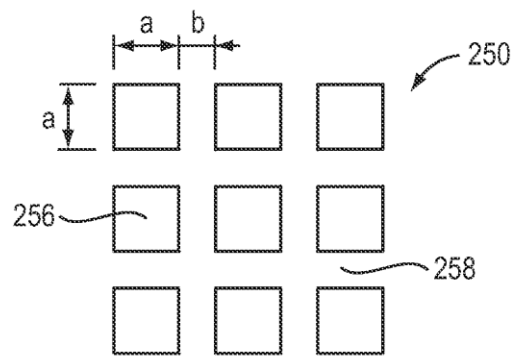


FIG. 2C



VISTA SUPERIOR

FIG. 2D

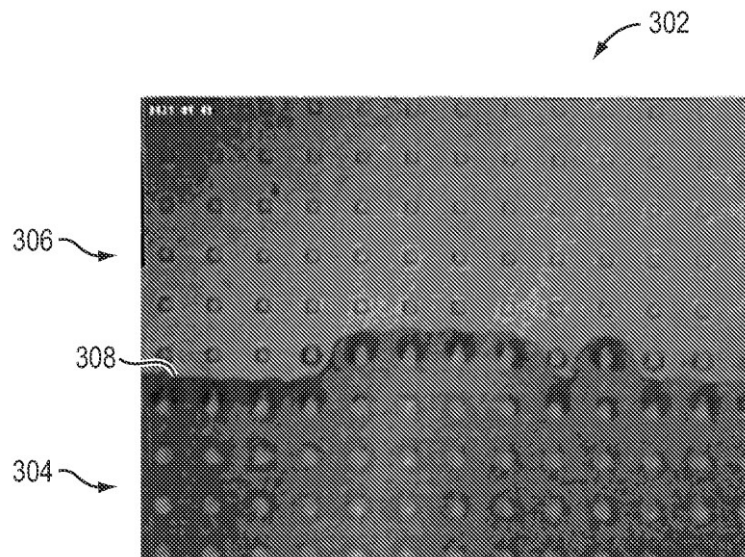


FIG. 3

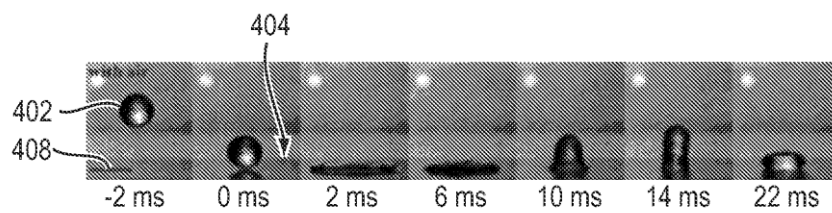


FIG. 4A

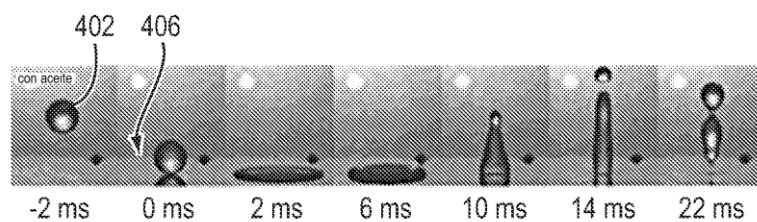


FIG. 4B

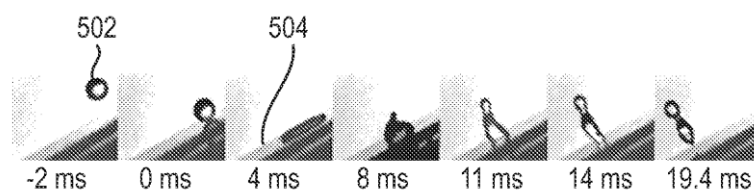


FIG. 5

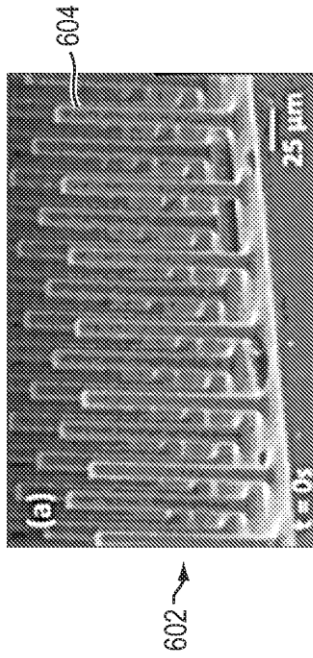


FIG. 6A

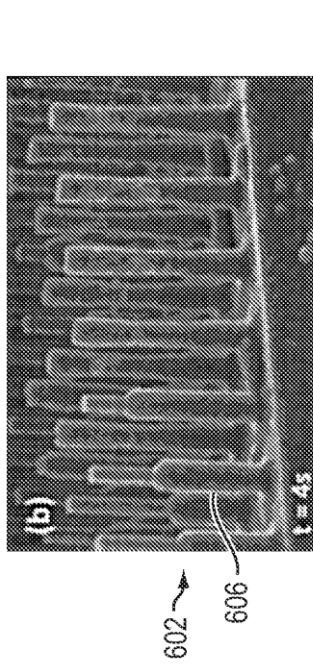


FIG. 6B

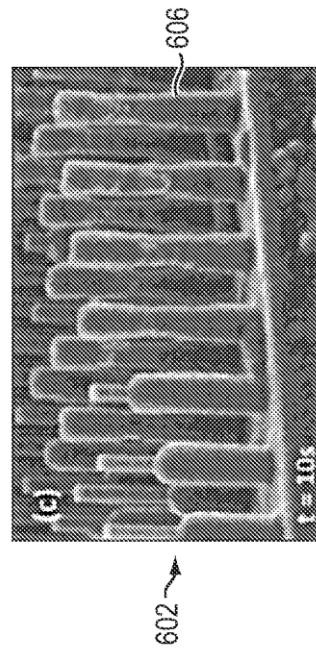


FIG. 6C

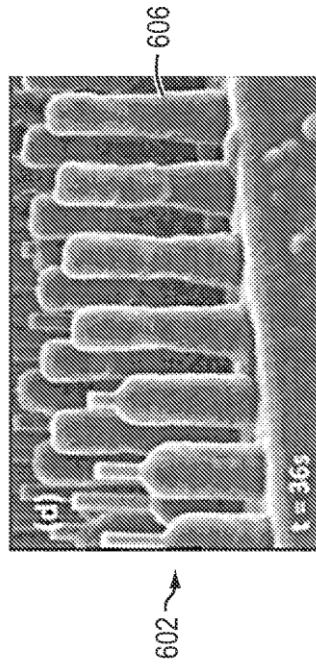


FIG. 6D

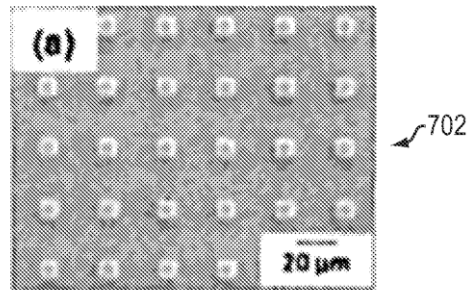


FIG. 7A

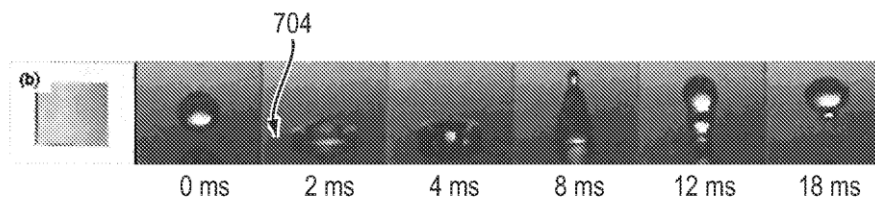


FIG. 7B



FIG. 7B

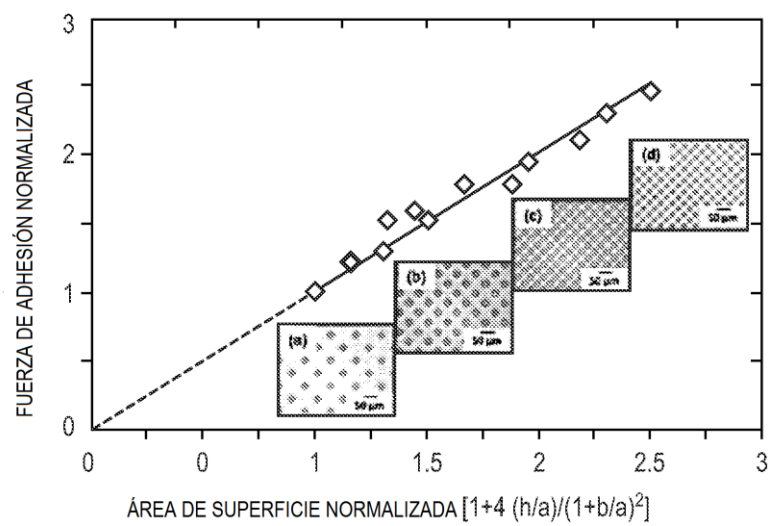


FIG.8

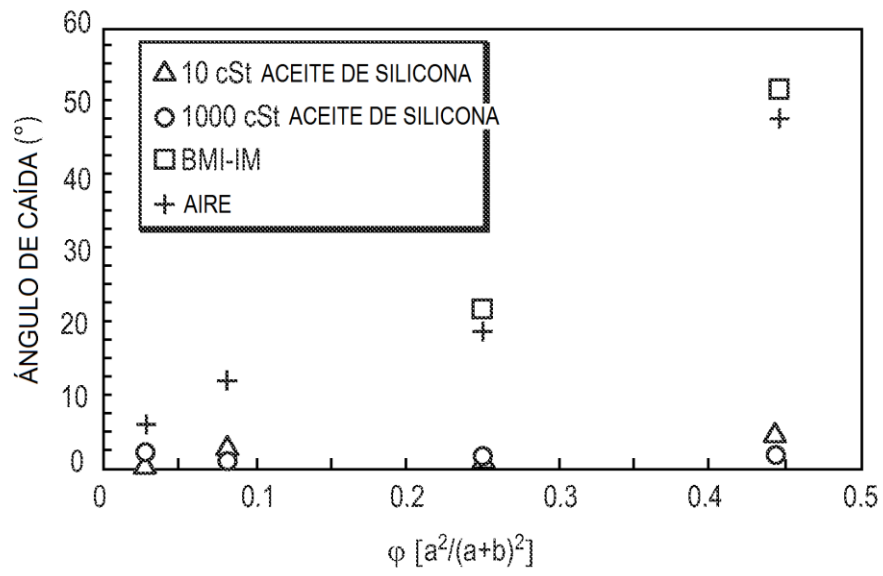


FIG.9

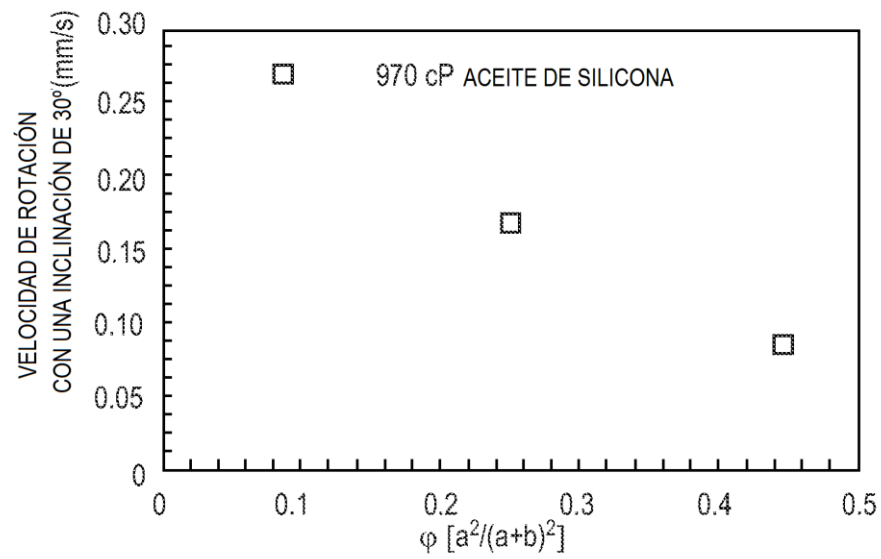


FIG.10

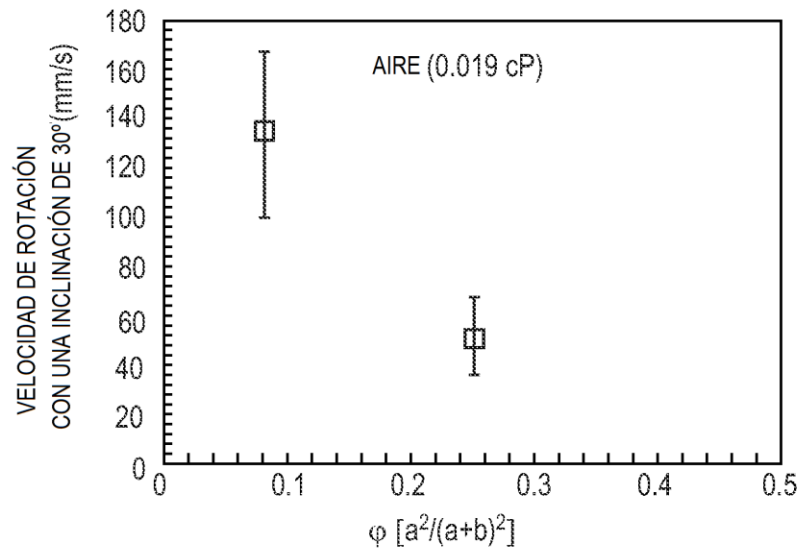


FIG.11

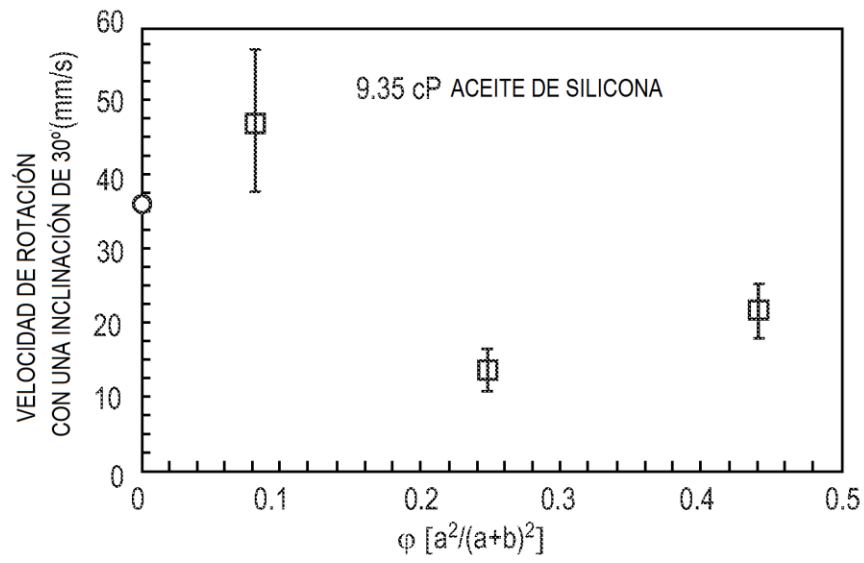


FIG.12

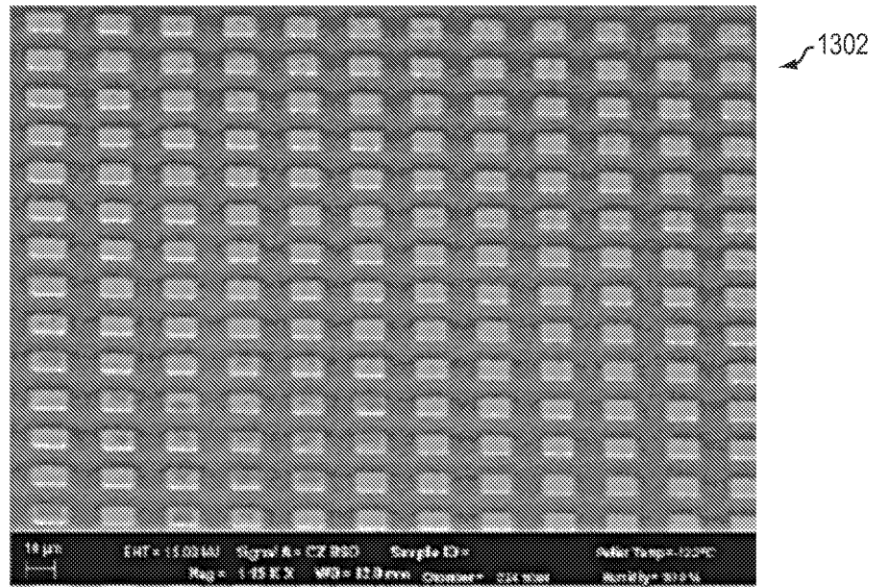


FIG. 13

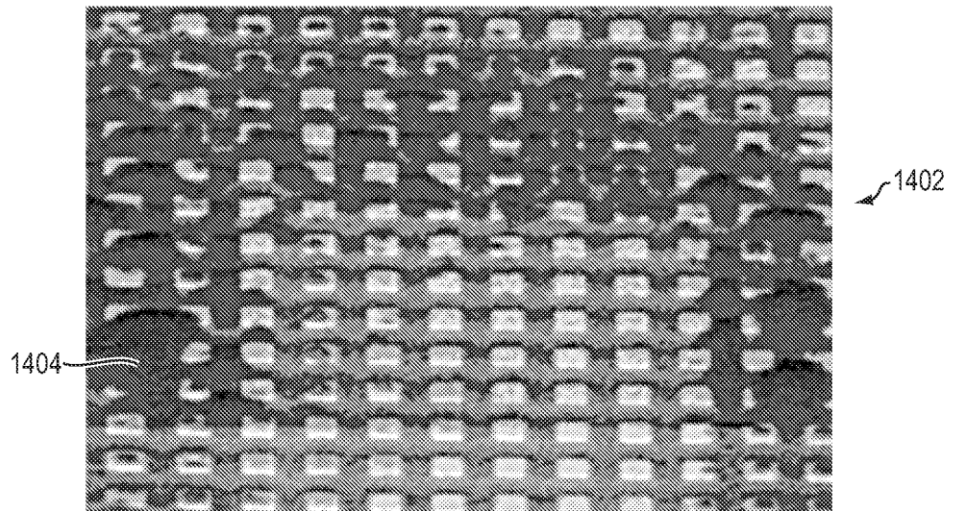
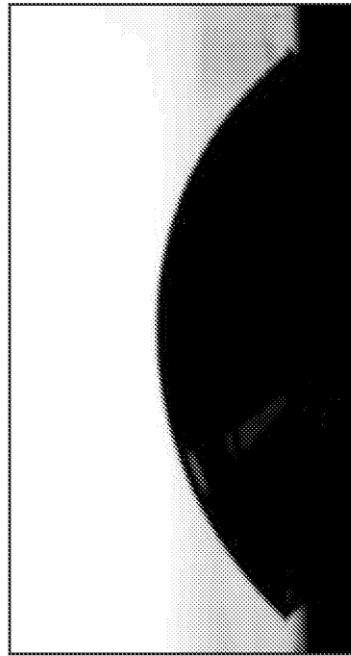


FIG. 14

## EJEMPLOS DE DIFERENTES ESTADOS

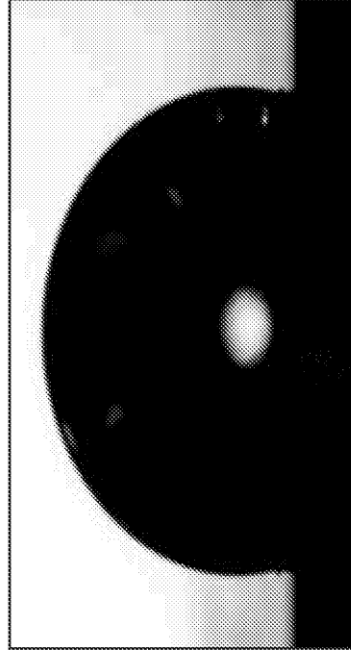
LA GOTITA ES AGUA  
EL LÍQUIDO IMPREGNADO ES ACEITE DE SILICONA  
LA SUPERFICIE ES SILICONA NO TRATADA CON POSTES  
CUADRADOS DE 10µm CON 10µm DE SEPARACIÓN



$$\theta_{OS}(w) \approx 150^\circ$$

ESTADO EMPALADO 1 - EL LÍQUIDO  
NO RESBALA SOBRE LA SUPERFICIE

LA GOTITA ES AGUA  
EL LÍQUIDO IMPREGNADO ES ACEITE DE SILICONA  
LA SUPERFICIE ES SILICONA TRATADA CON OTC CON POSTES  
CUADRADOS DE 10µm CON 10µm DE SEPARACIÓN

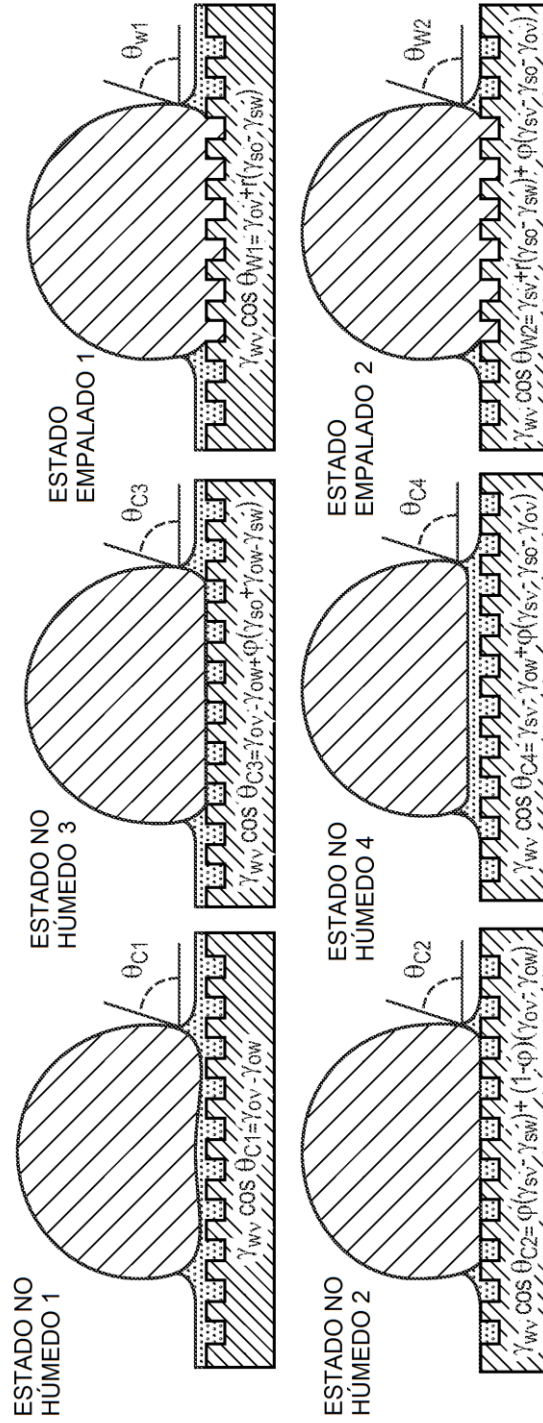


$$\theta_{OS}(w) \approx 0^\circ$$

ESTADO NO HÚMEDO 1 - ÁNGULO DE CAÍDA  $\sim 1^\circ$

FIG. 15

Estados de humectación de una superficie impregnada con líquido



Estado de humectación estable determinado por 4 condiciones de humectación

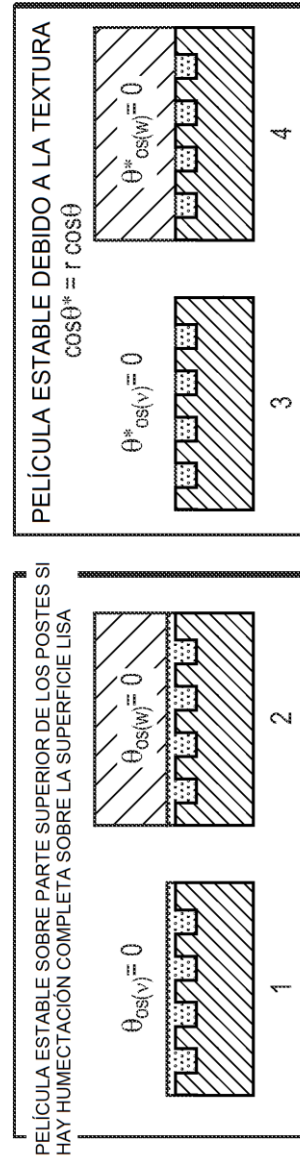


FIG. 16

## ECUACIONES AMPLIADAS PARA MAYOR CLARIDAD

ESTADO NO  
HÚMEDO 1

$$\theta^*_{os(v)} = 0$$

$$\theta^*_{os(w)} = 0$$

$$\theta_{os(v)} = 0$$

$$\theta_{os(w)} = 0$$

ESTADO NO  
HÚMEDO 3

$$\theta^*_{os(v)} = 0$$

$$\theta^*_{os(w)} = 0$$

$$\theta_{os(v)} = 0$$

$$\theta_{os(w)} > 0$$

ESTADO  
EMPALADO 1

$$\theta^*_{os(v)} = 0$$

$$\theta^*_{os(w)} > 0$$

$$\theta_{os(v)} = 0$$

$$\theta_{os(w)} > 0$$

ESTADO NO  
HÚMEDO 2

$$\theta^*_{os(v)} = 0$$

$$\theta^*_{os(w)} = 0$$

$$\theta_{os(v)} > 0$$

$$\theta_{os(w)} > 0$$

ESTADO NO  
HÚMEDO 4

$$\theta^*_{os(v)} = 0$$

$$\theta_{os(v)} > 0$$

$$\theta^*_{os(w)} = 0$$

$$\theta_{os(w)} = 0$$

ESTADO  
EMPALADO 2

$$\theta^*_{os(v)} = 0$$

$$\theta_{os(v)} > 0$$

$$\theta^*_{os(w)} > 0$$

$$\theta_{os(w)} > 0$$

FIG. 17

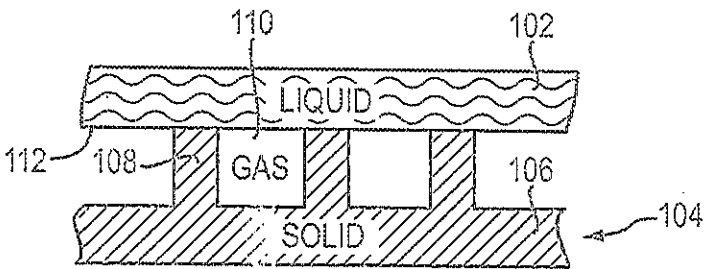


FIG. 1A

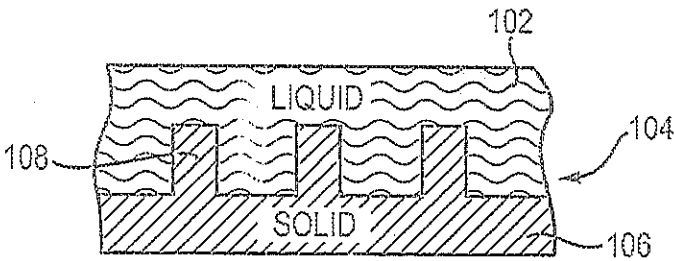


FIG. 1B

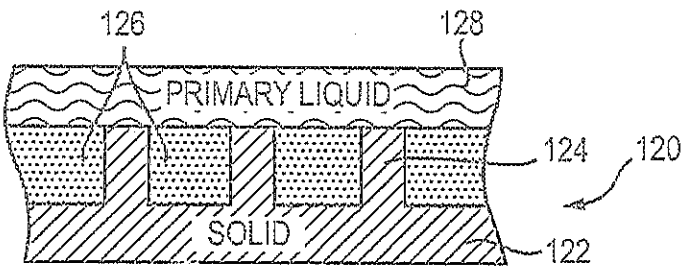


FIG. 1C



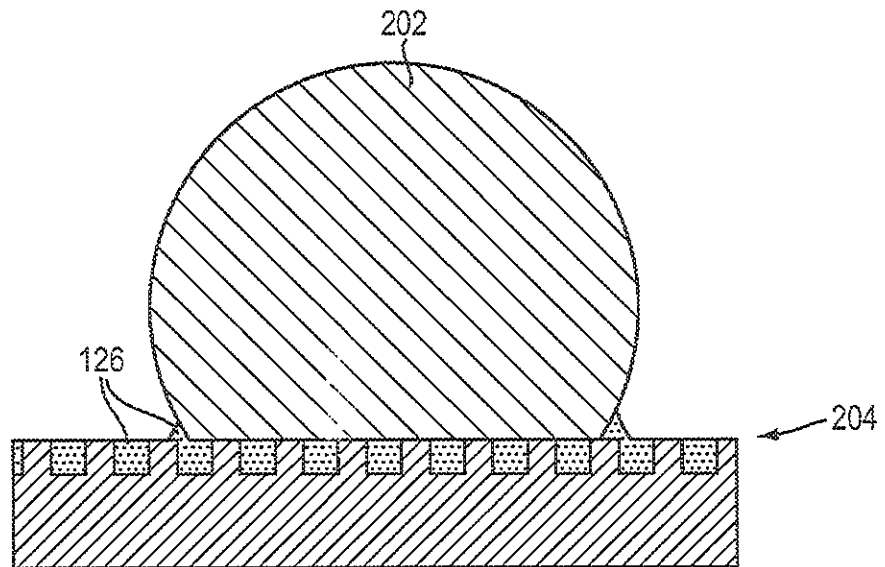


FIG. 2A

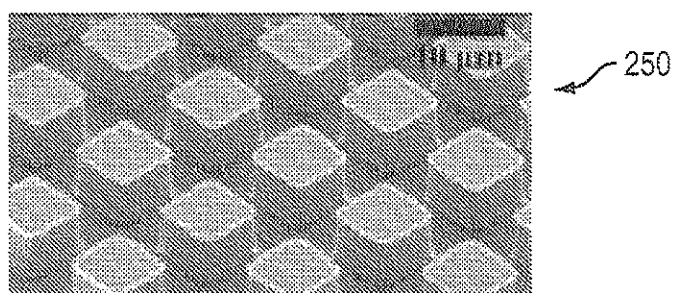
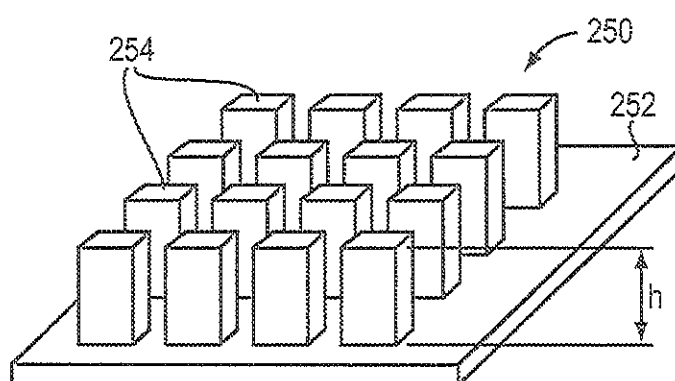
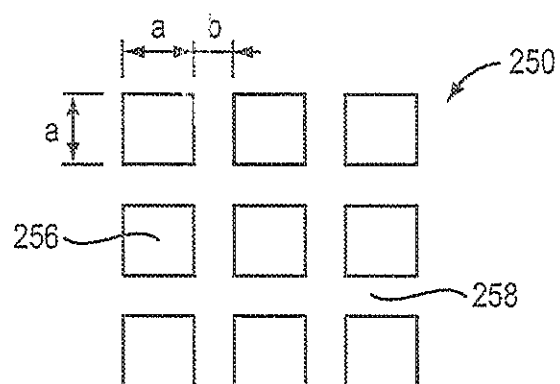


FIG. 2B



3D VIEW

FIG. 2C



TOP VIEW

FIG. 2D

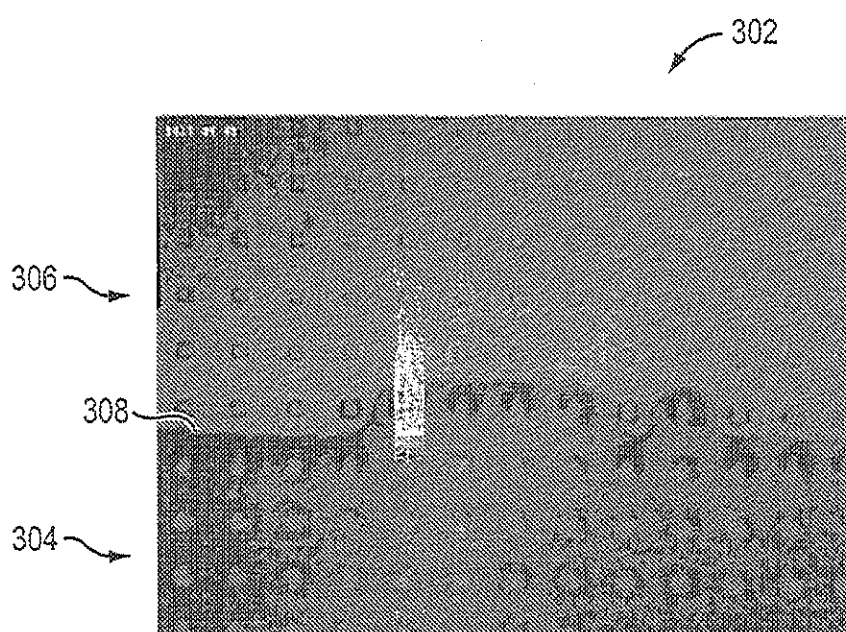


FIG. 3

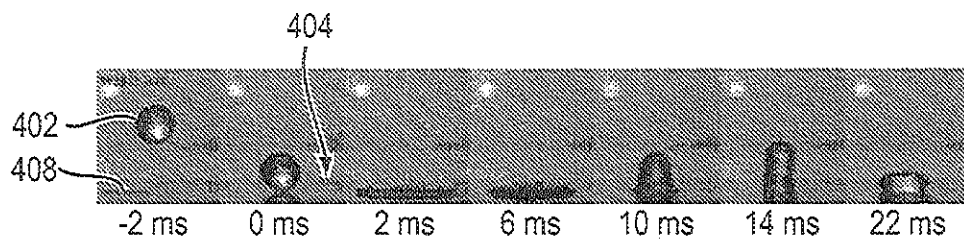


FIG. 4A

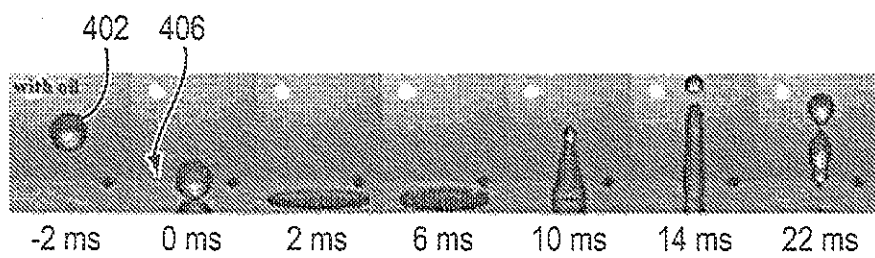


FIG. 4B

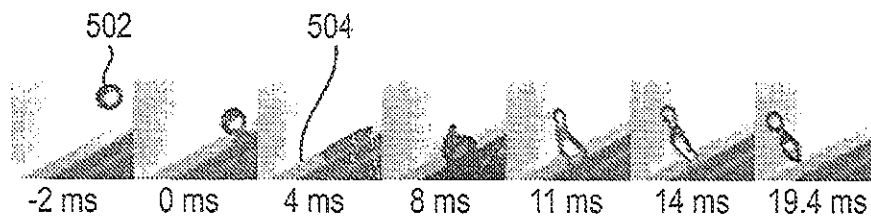


FIG. 5

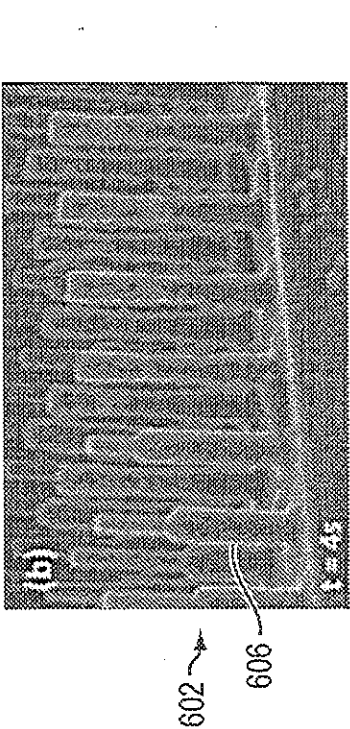


FIG. 6A

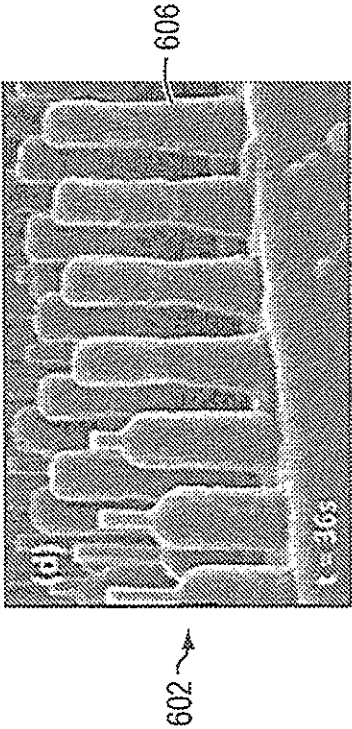


FIG. 6B

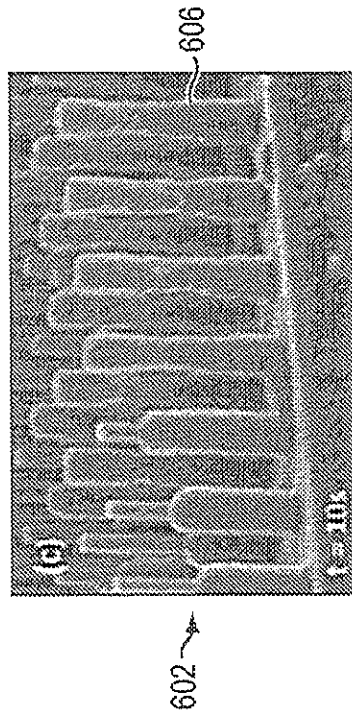


FIG. 6C

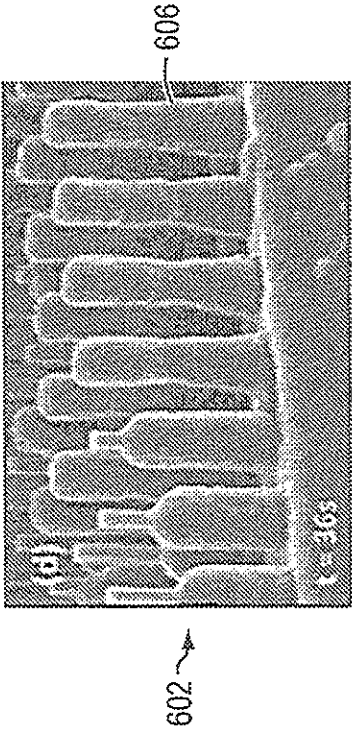


FIG. 6D

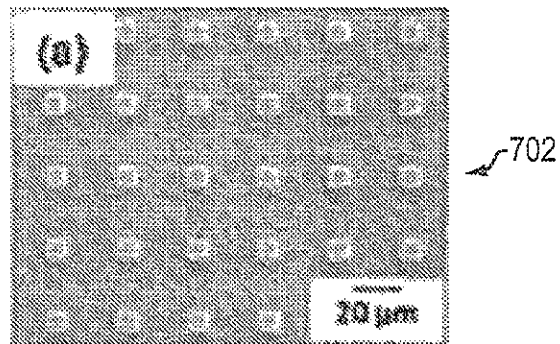


FIG. 7A

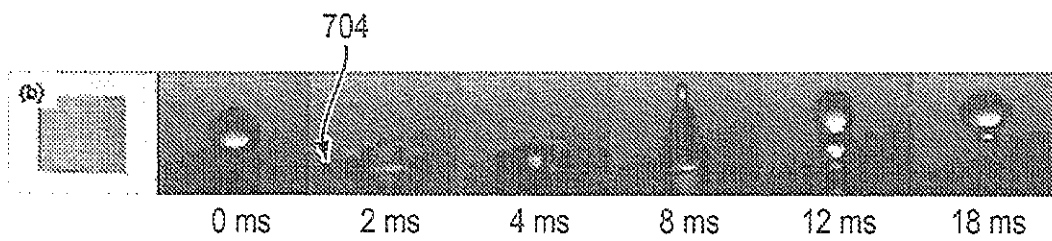


FIG. 7B

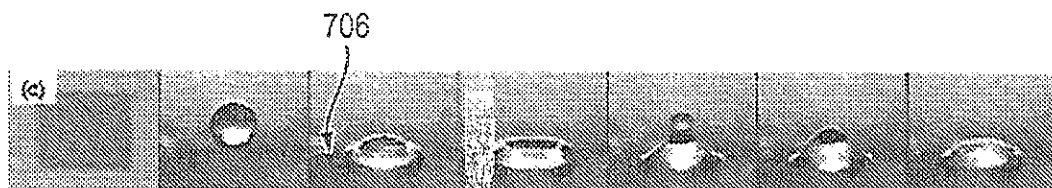


FIG. 7B

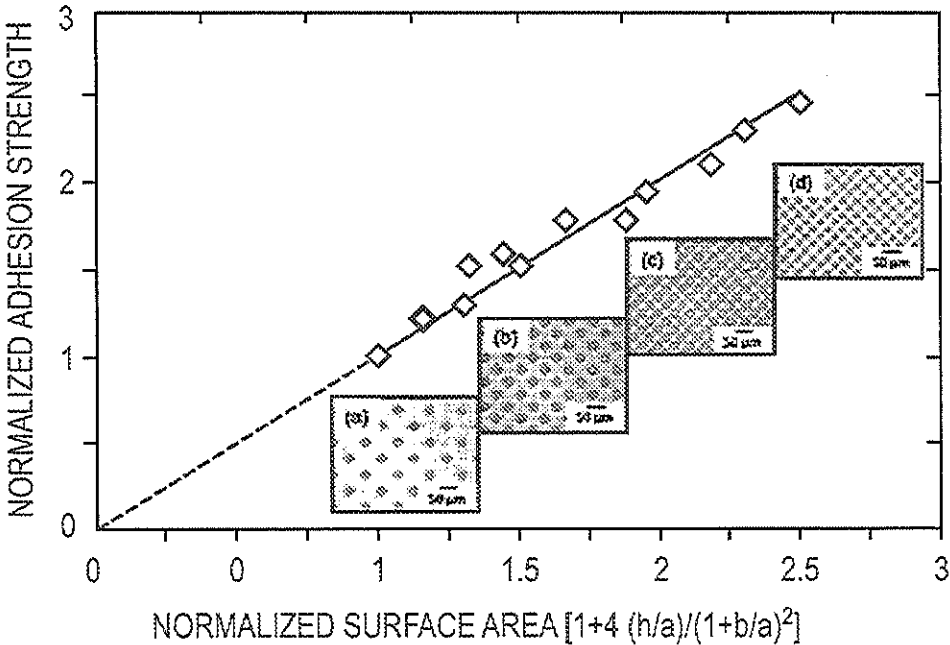


FIG.8

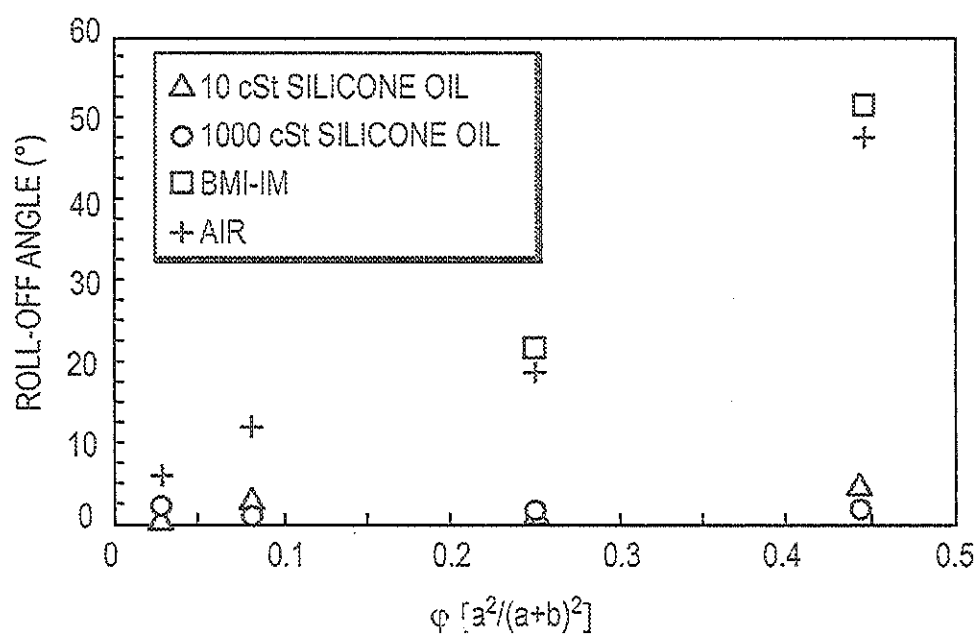


FIG.9

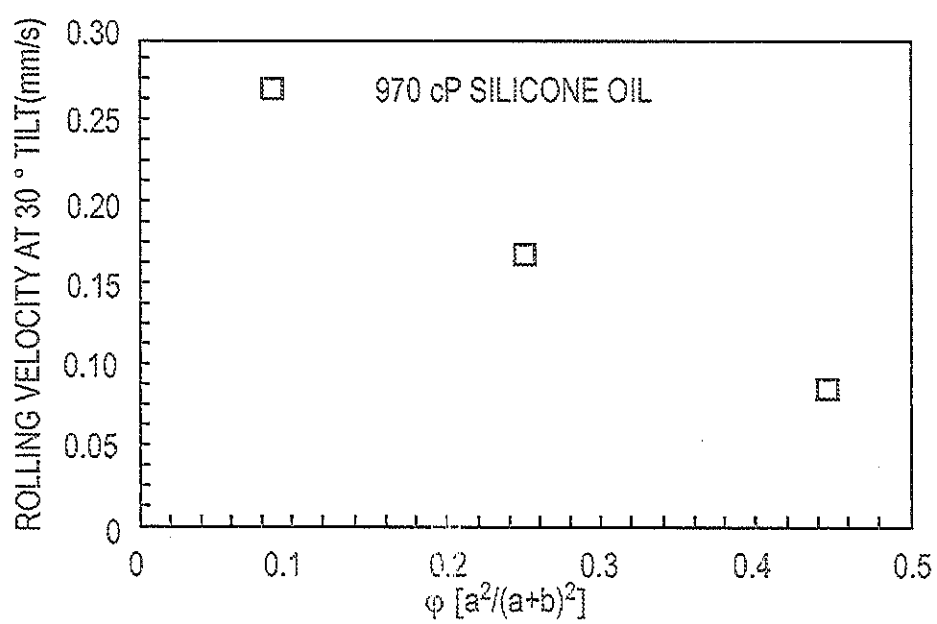


FIG.10

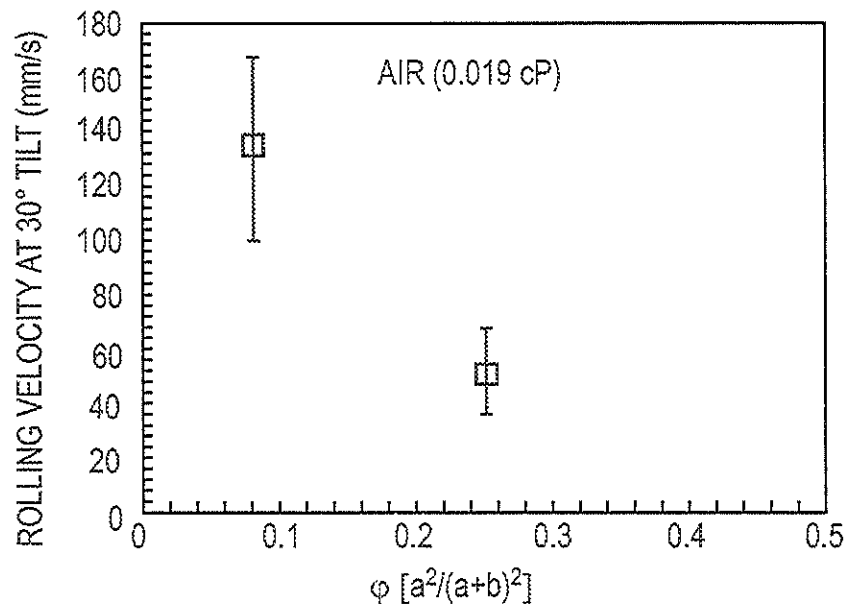


FIG.11

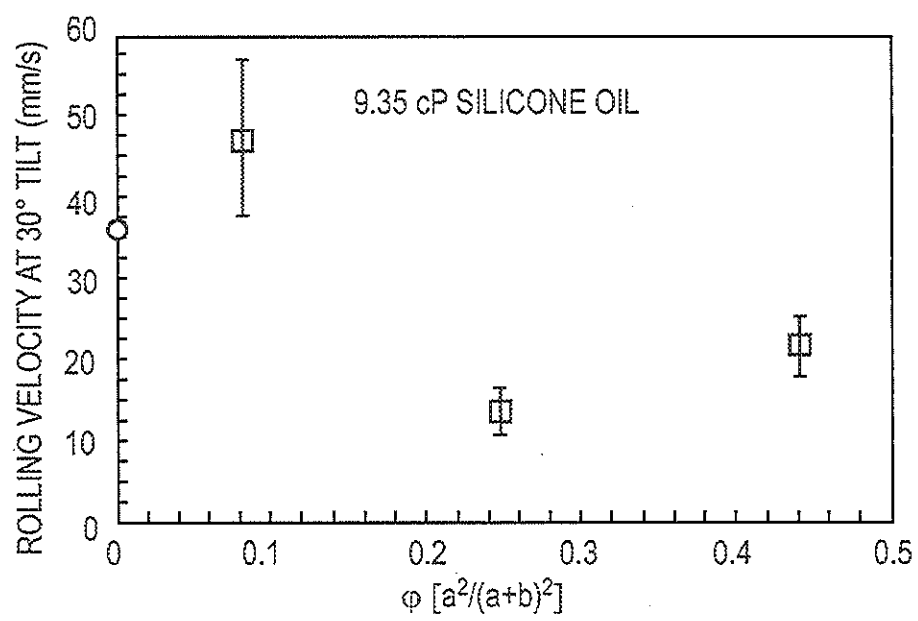


FIG.12

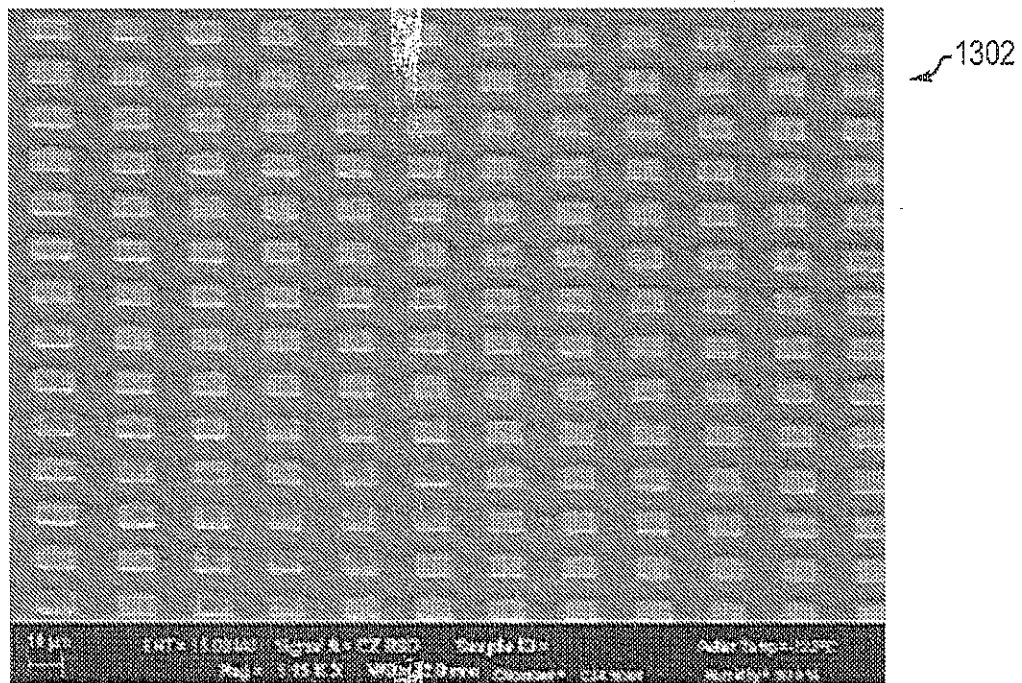


FIG. 13

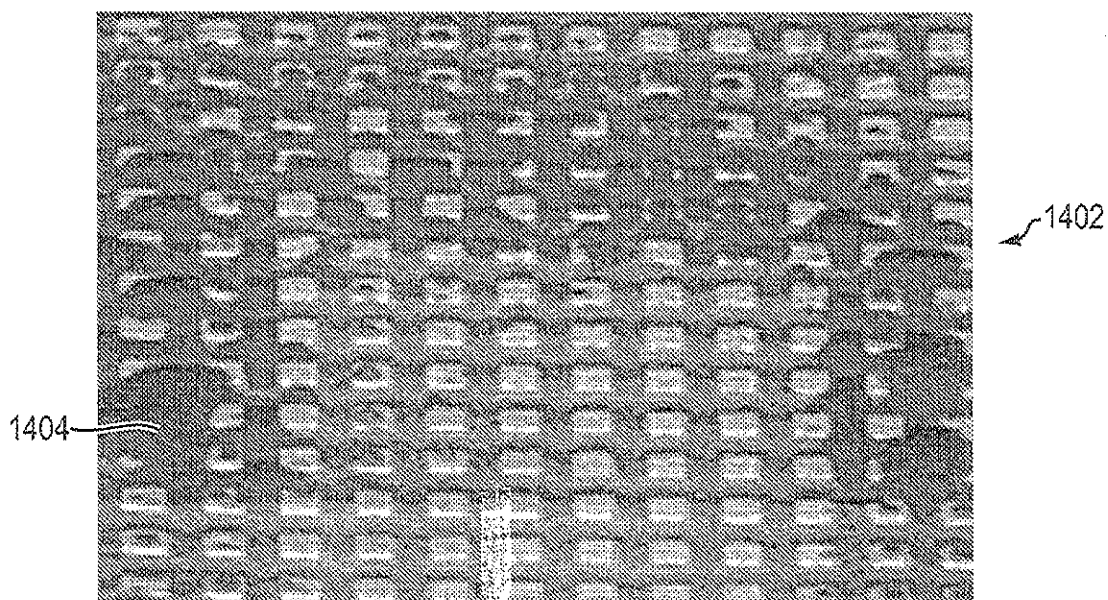


FIG. 14

EXAMPLES OF DIFFERENT STATES

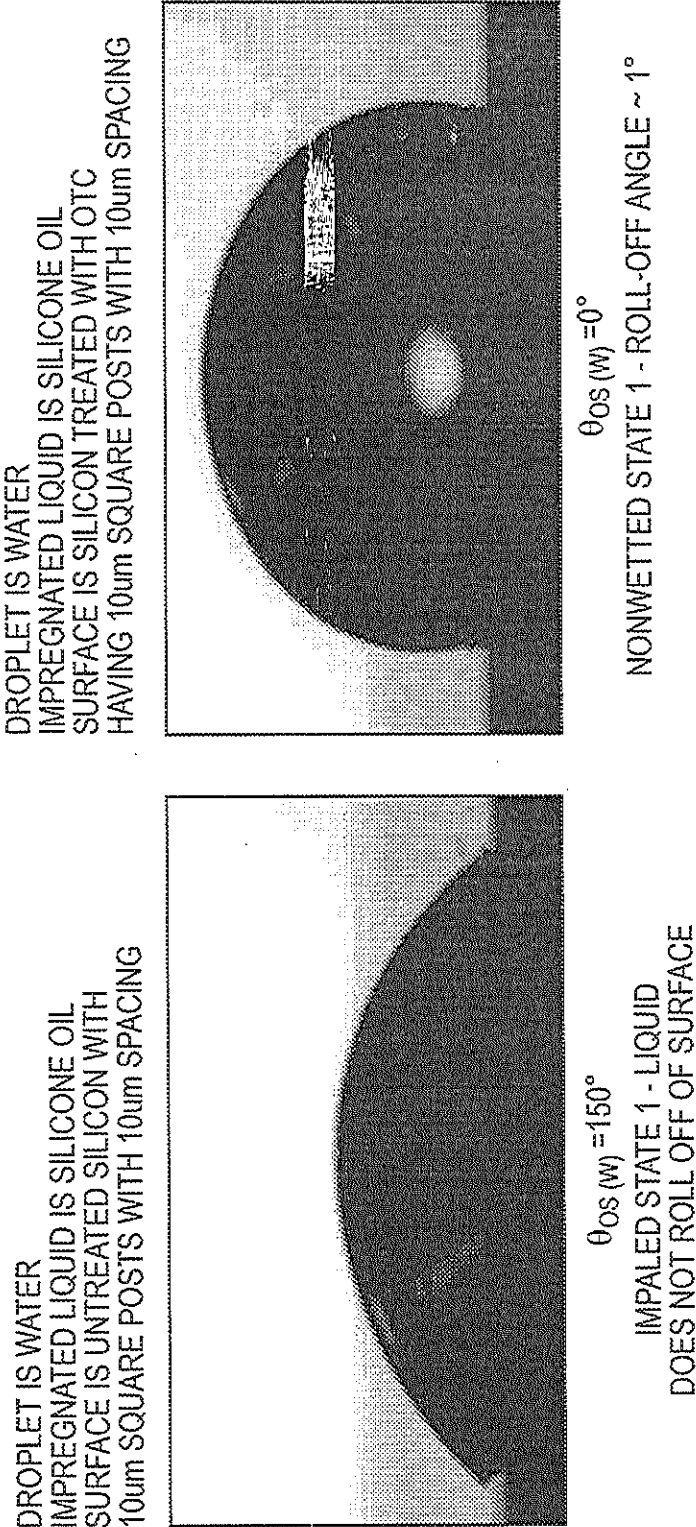
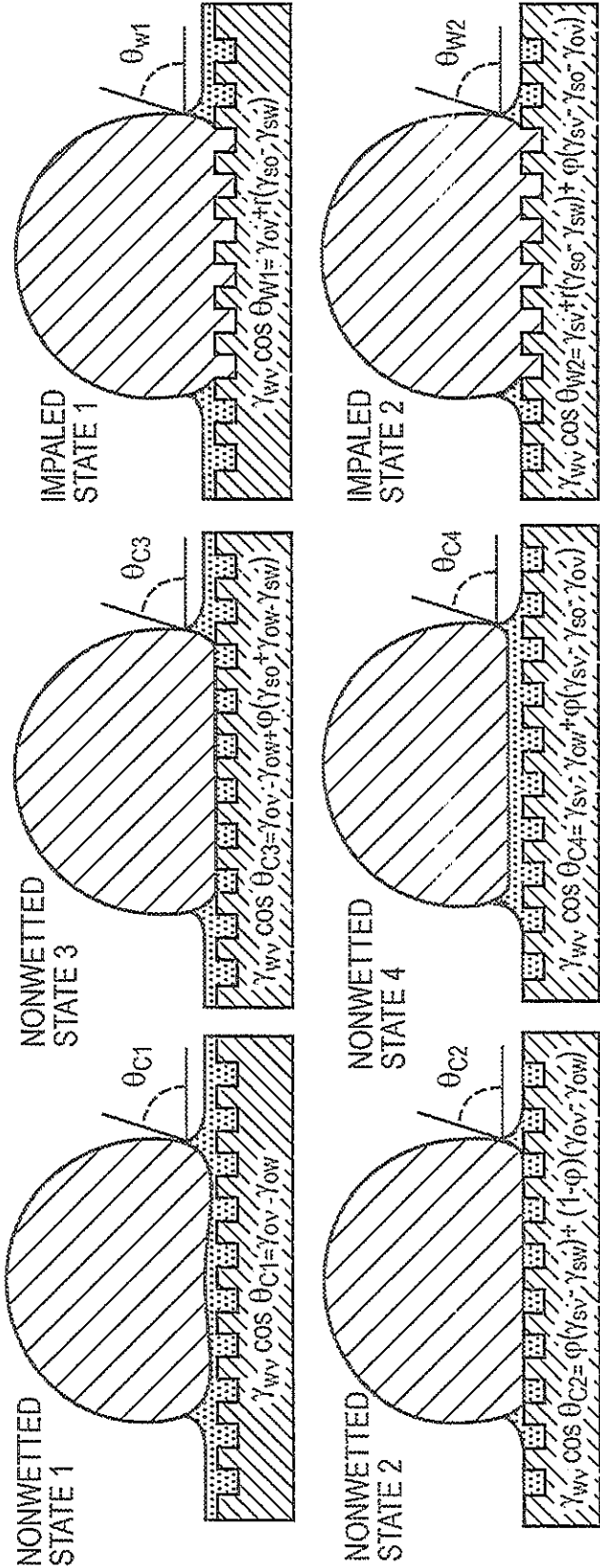


FIG. 15

LIQUID-IMPREGNATED SURFACE WETTING STATES



STABLE WETTING STATE DETERMINED BY 4 WETTING CONDITIONS

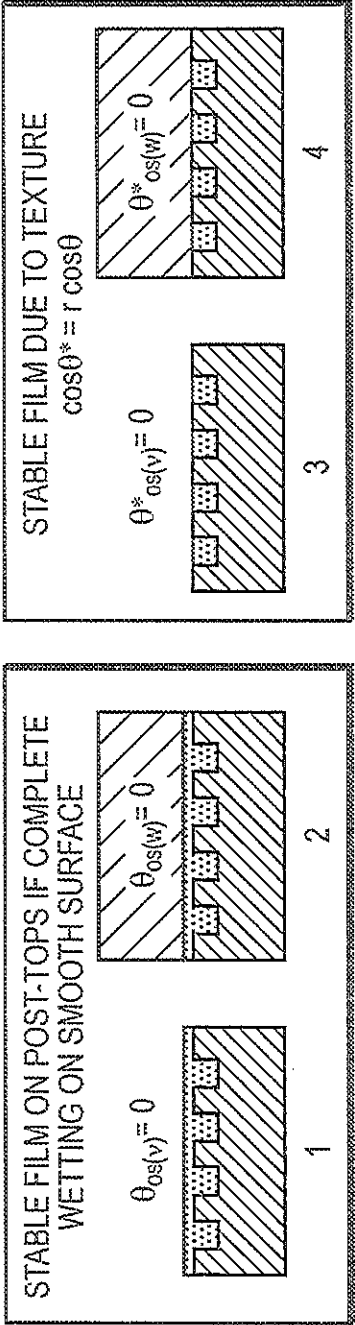


FIG. 16

EQUATIONS ENLARGED FOR CLARITY

|                        |                        |                        |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| NONWETTED<br>STATE 1   | NONWETTED<br>STATE 3   | IMPALED<br>STATE 1     |
| $\theta^*_{os(v)} = 0$ | $\theta^*_{os(v)} = 0$ | $\theta^*_{os(v)} = 0$ |
| $\theta^*_{os(w)} = 0$ | $\theta^*_{os(w)} = 0$ | $\theta^*_{os(w)} > 0$ |
| $\theta_{os(v)} = 0$   | $\theta_{os(v)} = 0$   | $\theta_{os(v)} = 0$   |
| $\theta_{os(w)} = 0$   | $\theta_{os(w)} > 0$   | $\theta_{os(w)} > 0$   |
| NONWETTED<br>STATE 2   | NONWETTED<br>STATE 4   | IMPALED<br>STATE 2     |
| $\theta^*_{os(v)} = 0$ | $\theta^*_{os(v)} = 0$ | $\theta^*_{os(v)} = 0$ |
| $\theta^*_{os(w)} = 0$ | $\theta_{os(v)} > 0$   | $\theta_{os(v)} > 0$   |
| $\theta_{os(v)} > 0$   | $\theta^*_{os(w)} = 0$ | $\theta^*_{os(w)} > 0$ |
| $\theta_{os(w)} > 0$   | $\theta_{os(w)} = 0$   | $\theta_{os(w)} > 0$   |

FIG. 17



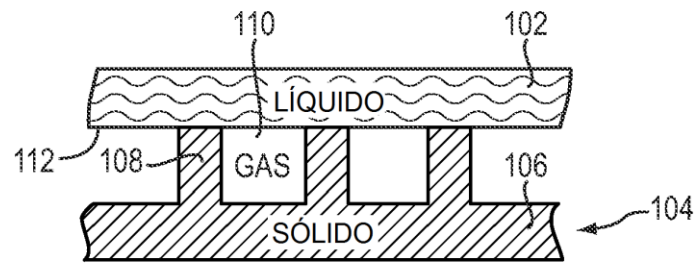


FIG. 1A

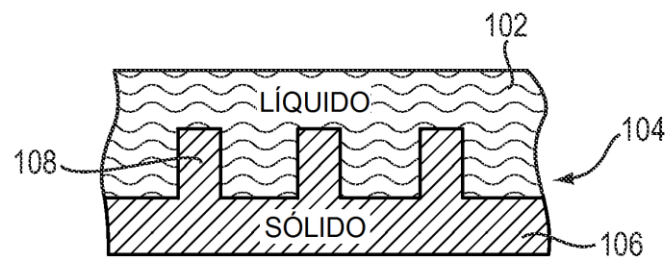


FIG. 1B

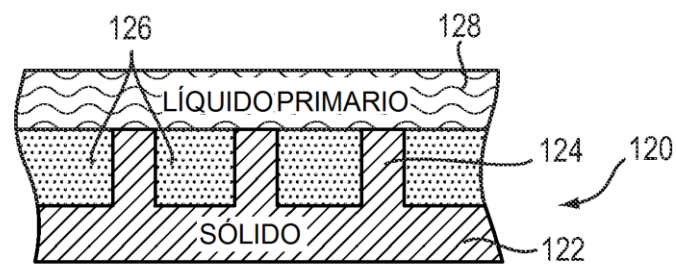


FIG. 1C

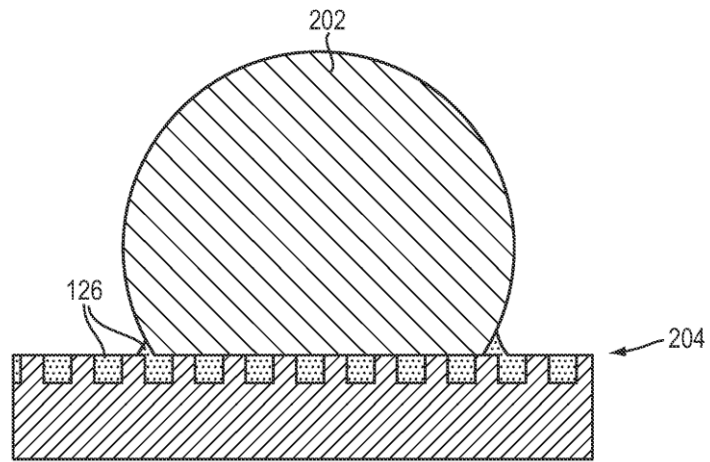


FIG. 2A

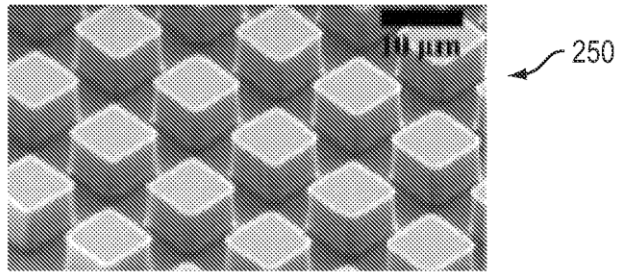


FIG. 2B

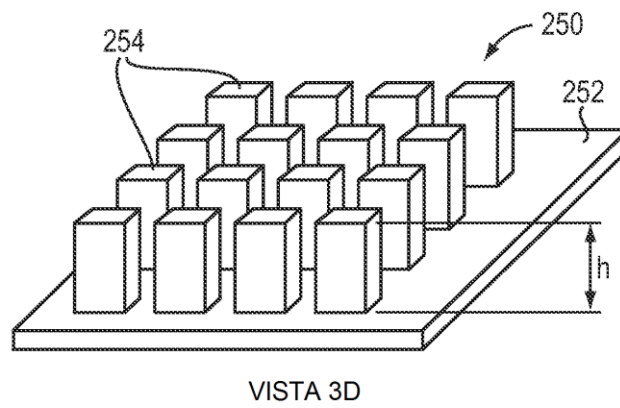


FIG. 2C

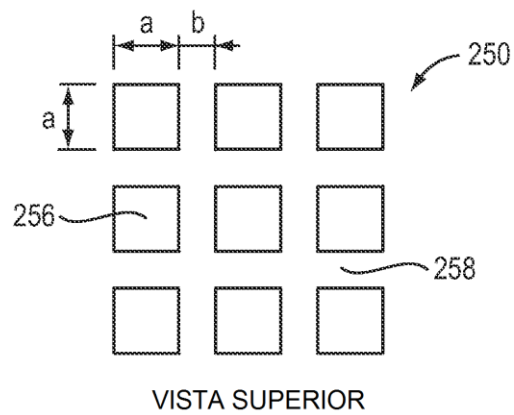


FIG. 2D

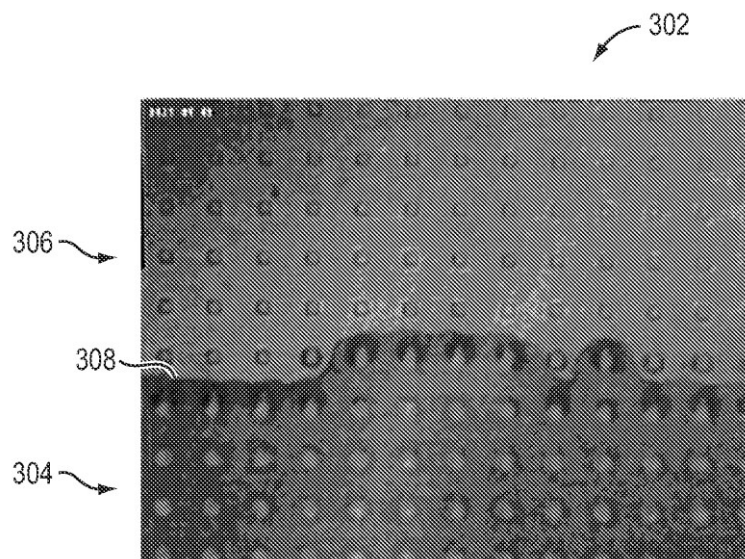


FIG. 3

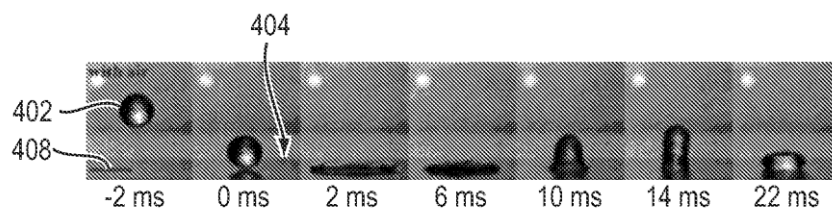


FIG. 4A

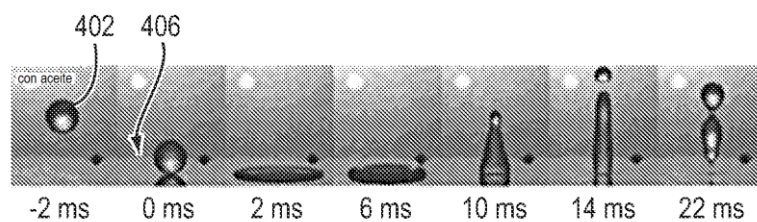


FIG. 4B

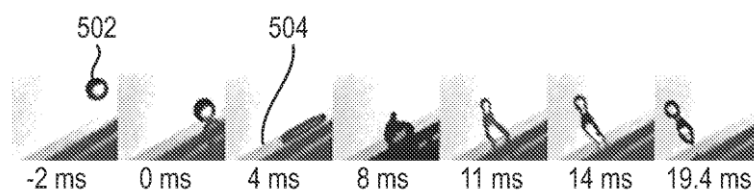


FIG. 5

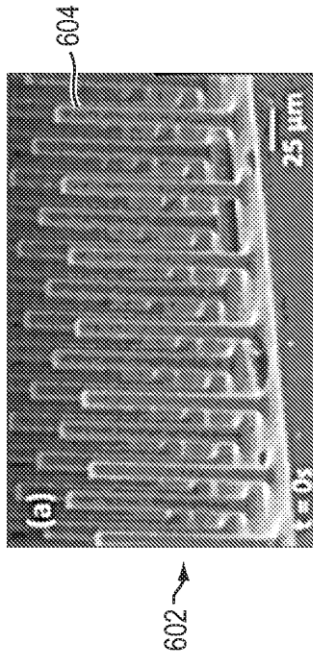


FIG. 6A

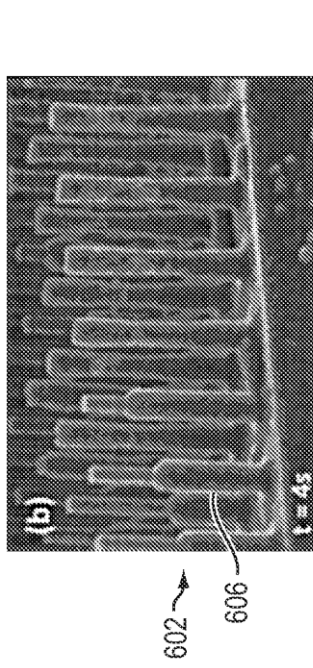


FIG. 6B

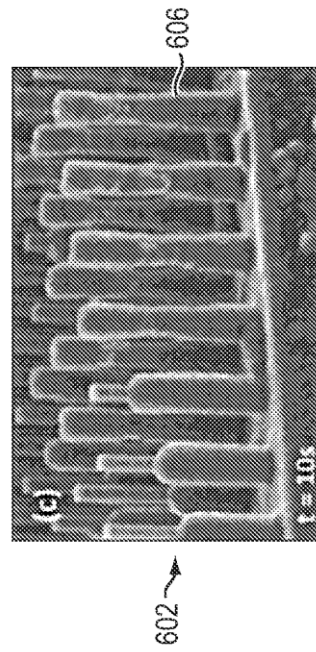


FIG. 6C

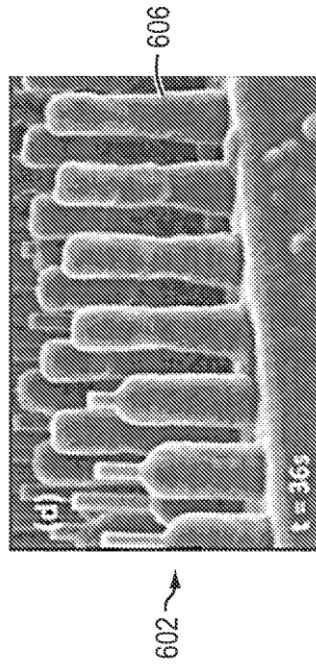


FIG. 6D

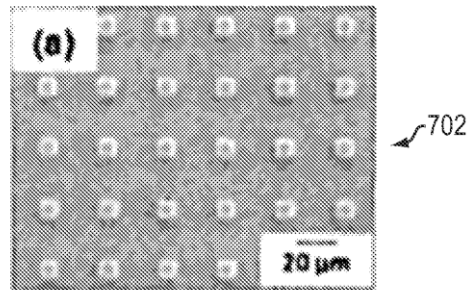


FIG. 7A

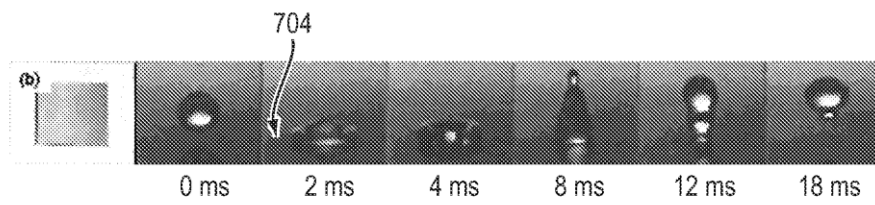


FIG. 7B



FIG. 7B

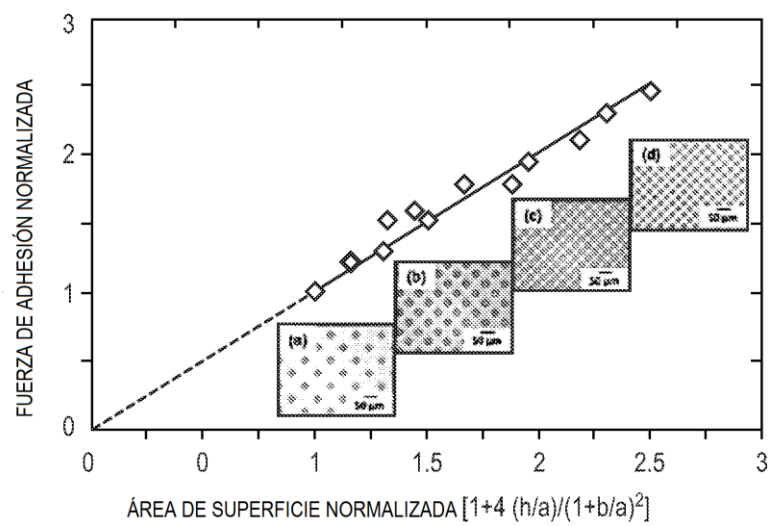


FIG.8

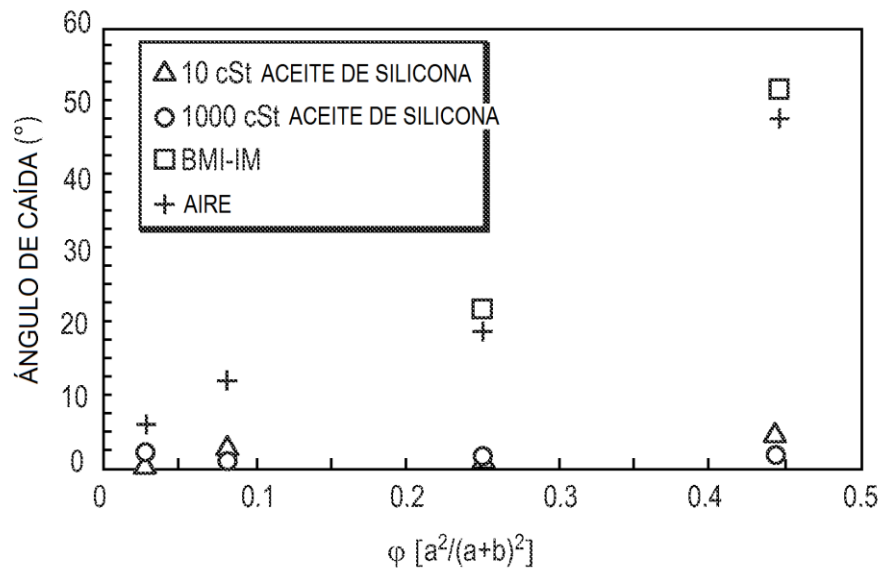


FIG.9

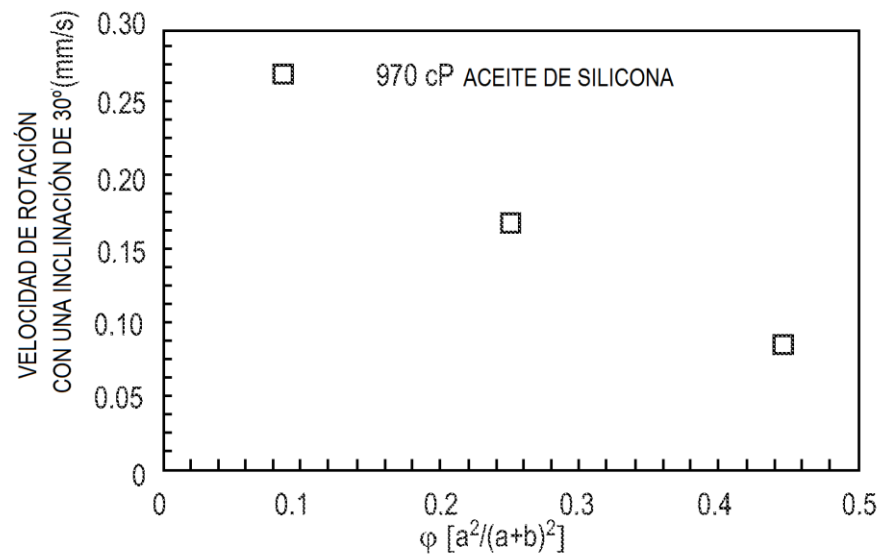


FIG.10

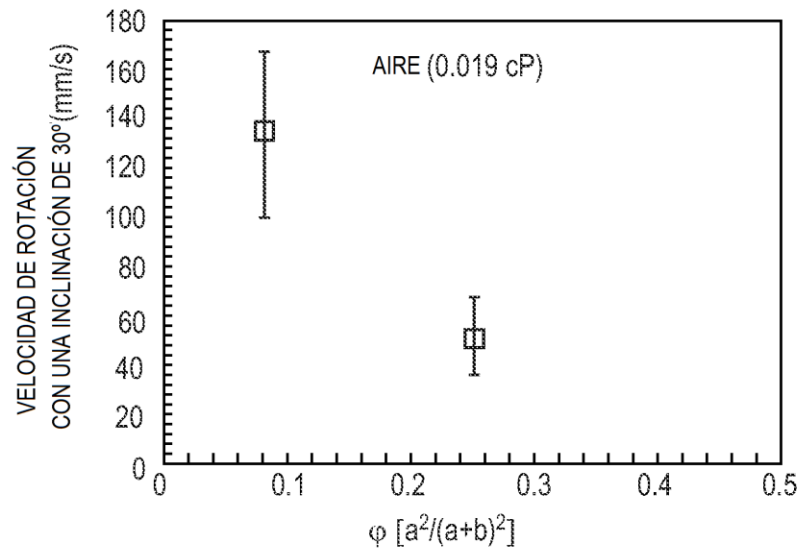


FIG.11

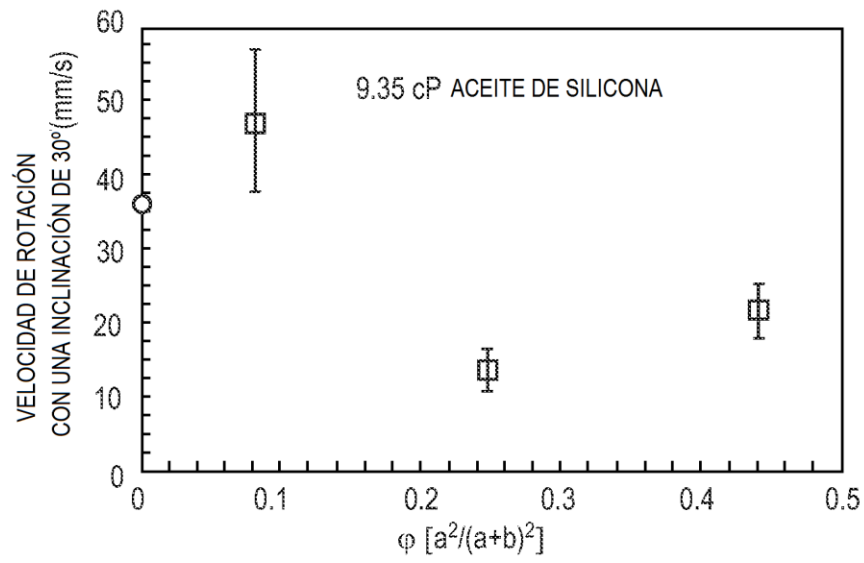


FIG.12

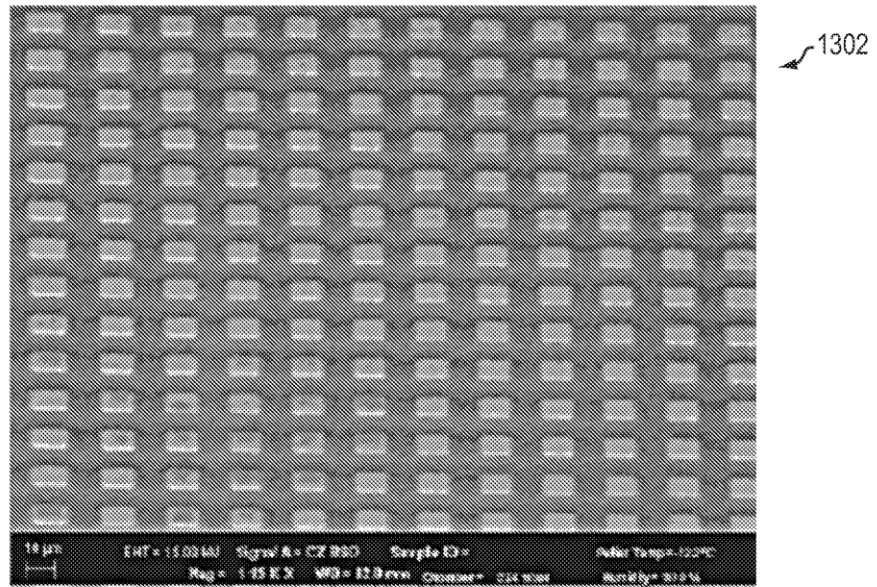


FIG. 13

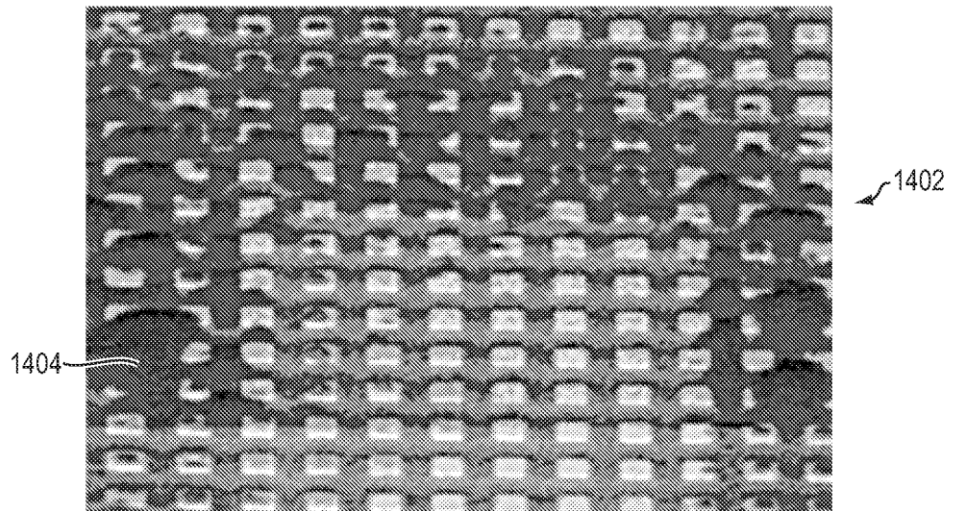
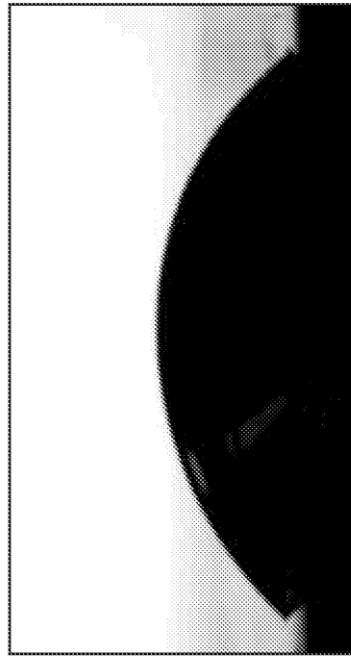


FIG. 14

## EJEMPLOS DE DIFERENTES ESTADOS

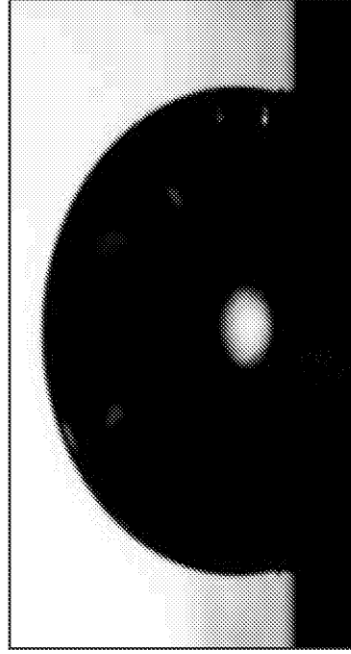
LA GOTITA ES AGUA  
EL LÍQUIDO IMPREGNADO ES ACEITE DE SILICONA  
LA SUPERFICIE ES SILICONA NO TRATADA CON POSTES  
CUADRADOS DE 10µm CON 10µm DE SEPARACIÓN



$$\theta_{OS}(w) \approx 150^\circ$$

ESTADO EMPALADO 1 - EL LÍQUIDO  
NO RESBALA SOBRE LA SUPERFICIE

LA GOTITA ES AGUA  
EL LÍQUIDO IMPREGNADO ES ACEITE DE SILICONA  
LA SUPERFICIE ES SILICONA TRATADA CON OTC CON POSTES  
CUADRADOS DE 10µm CON 10µm DE SEPARACIÓN

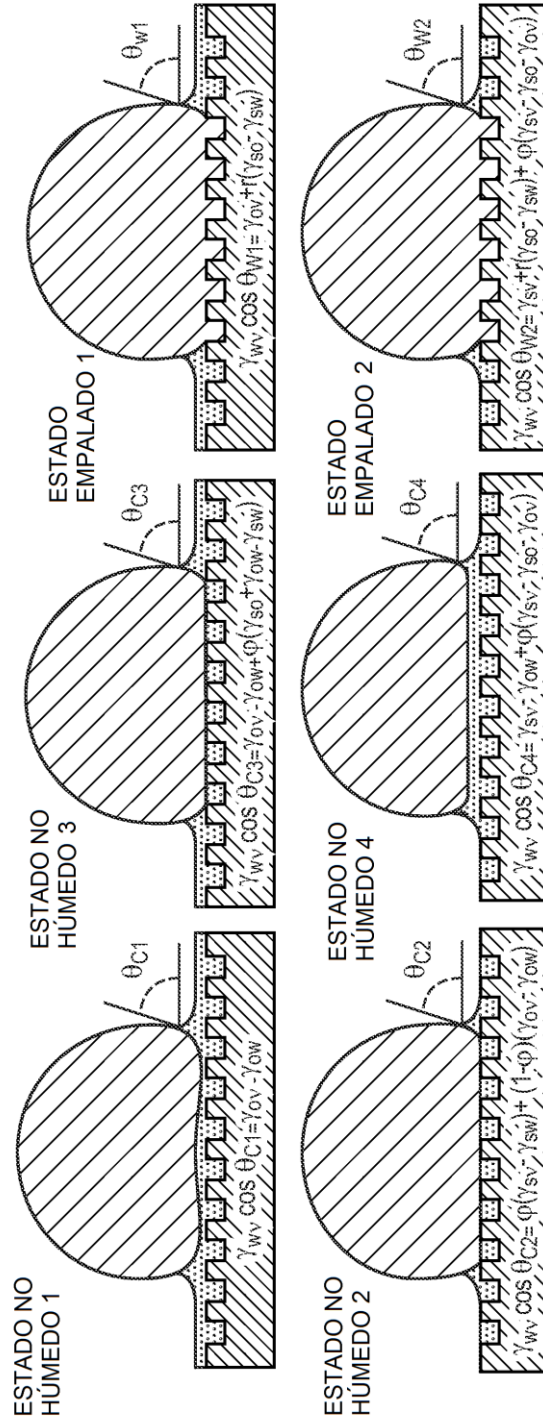


$$\theta_{OS}(w) \approx 0^\circ$$

ESTADO NO HÚMEDO 1 - ÁNGULO DE CAÍDA  $\sim 1^\circ$

FIG. 15

Estados de humectación de una superficie impregnada con líquido



Estado de humectación estable determinado por 4 condiciones de humectación

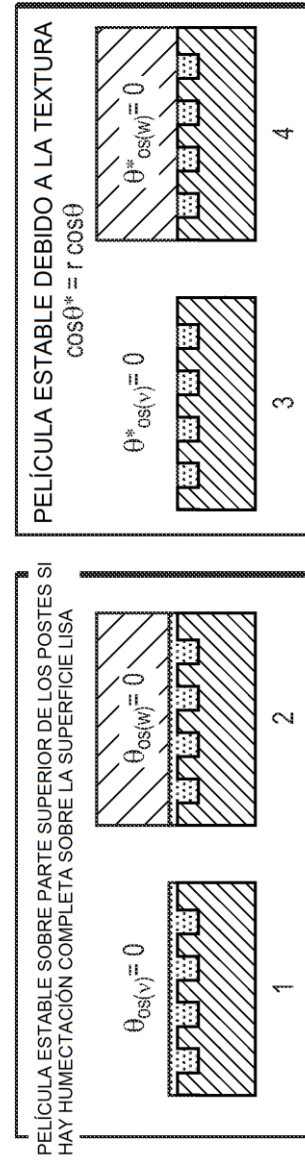


FIG. 16

## ECUACIONES AMPLIADAS PARA MAYOR CLARIDAD

ESTADO NO  
HÚMEDO 1

$$\theta^*_{os(v)} = 0$$

$$\theta^*_{os(w)} = 0$$

$$\theta_{os(v)} = 0$$

$$\theta_{os(w)} = 0$$

ESTADO NO  
HÚMEDO 3

$$\theta^*_{os(v)} = 0$$

$$\theta^*_{os(w)} = 0$$

$$\theta_{os(v)} = 0$$

$$\theta_{os(w)} > 0$$

ESTADO  
EMPALADO 1

$$\theta^*_{os(v)} = 0$$

$$\theta^*_{os(w)} > 0$$

$$\theta_{os(v)} = 0$$

$$\theta_{os(w)} > 0$$

ESTADO NO  
HÚMEDO 2

$$\theta^*_{os(v)} = 0$$

$$\theta^*_{os(w)} = 0$$

$$\theta_{os(v)} > 0$$

$$\theta_{os(w)} > 0$$

ESTADO NO  
HÚMEDO 4

$$\theta^*_{os(v)} = 0$$

$$\theta_{os(v)} > 0$$

$$\theta^*_{os(w)} = 0$$

$$\theta_{os(w)} = 0$$

ESTADO  
EMPALADO 2

$$\theta^*_{os(v)} = 0$$

$$\theta_{os(v)} > 0$$

$$\theta^*_{os(w)} > 0$$

$$\theta_{os(w)} > 0$$

FIG. 17

## ASSIGNMENT BY INVENTORS

**THIS ASSIGNMENT**, made by Rajevee Dhiman, J. David Smith, Kripa K. Varanasi and Ernesto Reza-Garduño Cabello (hereinafter referred to as Assignors), residing at 8 Island Hill Avenue, No. 213, Malden, Massachusetts 02148; 143 Albany Street, Apt. 12, Cambridge, Massachusetts 02139; 31 Fletcher Avenue, Unit 5, Lexington, Massachusetts 02420; 372 Memorial Drive, Cambridge, Massachusetts 02139, respectively;

**WHEREAS**, Assignors have invented certain new and useful improvements in LIQUID-IMPREGNATED SURFACES, METHODS OF MAKING, AND DEVICES INCORPORATING THE SAME set forth in a Patent application for Letters Patent of the United States, filed on November 22, 2011 as U.S. Application No. 13/302,356; and

**WHEREAS**, Massachusetts Institute of Technology, a Corporation organized under and pursuant to the laws of Massachusetts having its principal place of business at 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, Massachusetts 02139-4307 (hereinafter referred to as Assignee), is desirous of acquiring the entire right, title and interest in and to said inventions and said Application for Letters Patent of the United States, and in and to any Letters Patent of the United States to be obtained therefore and thereon.

**NOW, THEREFORE**, in consideration of One Dollar (\$1.00) and other good and sufficient consideration, the receipt of which is hereby acknowledged, Assignors have sold, assigned, transferred and set over, and by these presents do sell, assign, transfer and set over, unto Assignee, its successors, legal representatives and assigns, the entire right, title and interest in and to the above-mentioned inventions and application for Letters Patent, and in and to any and all direct and indirect divisions, continuations and continuations-in-part of said application, and any and all Letters Patent in the United States and all foreign countries which may be granted therefor and thereon, and reissues, reexaminations and extensions of said Letters Patent, and all rights under the International Convention for the Protection of Industrial Property, the same to be held and enjoyed by Assignee, for its own use and benefit and the use and benefit of its successors, legal representatives and assigns, to the full end of the term or terms for which Letters Patent may be granted and/or extended, as fully and entirely as the same would have been held and enjoyed by Assignors, had this sale and assignment not been made.

AND for the same consideration, Assignors hereby represent and warrant to Assignee, its successors, legal representatives and assigns, that, at the time of execution and delivery of these presents, except for any rights, titles and/or interests that have arisen to Assignee under law or that have already been transferred to Assignee, Assignors are the sole and lawful owners of the entire right, title and interest in and to the said inventions and application for Letters Patent above-mentioned, and that the same are unencumbered and that Assignors have good and full right and lawful authority to sell and convey the same in the manner herein set forth.

AND for the same consideration, Assignors hereby covenant and agree to and with Assignee, its successors, legal representatives and assigns, that Assignors will sign all papers and documents, take all lawful oaths and do all acts necessary or required to be done for the procurement, maintenance, enforcement and defense of any Letters Patent and applications for Letters Patent for said inventions, without charge to Assignee, its successors, legal representatives and assigns, whenever counsel of Assignee, or counsel of its successors, legal representatives and assigns, shall advise: that any proceeding in connection with said inventions, or said Patent application for Letters Patent, or any proceeding in connection with any Letters Patent or applications for Letters Patent for said inventions in any country, including but not limited to interference proceedings, is lawful and desirable; or, that any division, continuation or continuation-in-part of any application for Letters Patent, or any reissue, reexamination or extension of any Letters Patent, to be obtained thereon, is lawful and desirable.

AND Assignors hereby request the Commissioner of Patent and Trademarks to issue said Letters Patent of the United States to Assignee, as Assignee of said inventions and the Letters Patent to be issued thereon, for the sole use and benefit of Assignee, its successors, legal representatives and assigns.

AND Assignors hereby grant the following individuals the power to insert on this Assignment any further identification which may be necessary or desirable in order to comply with the rules of the United States Patent and Trademark Office for recordation of this document:

GOODWIN PROCTER LLP

All practitioners at Customer Number 051414

AND Assignors acknowledge an obligation of assignment of this invention to Assignee at the time the invention was made.

Date

1/13/11

Rajeev Dhiman

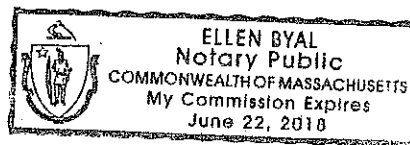
Commonwealth/State of Massachusetts  
County of Middlesex ) ss

On this 13 day of Jan., 2011, before me, the undersigned Notary Public, personally appeared **Rejeev Dhiman**, proved to me through satisfactory evidence of identification, which was/were MIT ID, to be the person whose name is signed on the preceding or attached document, and who swore or affirmed to me that the contents of the document are truthful and accurate to the best of his/her knowledge and belief.

Ellen Byal  
Signature of Notary

(Seal)

My Commission Expires: 06/22/2018



Feb 8 2012  
Date

J. David Smith  
J. David Smith

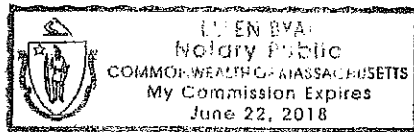
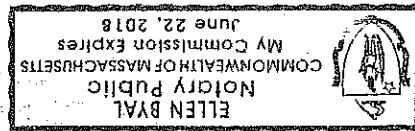
Commonwealth/State of Massachusetts  
County of Middlesex ) ss

On this 8 day of Feb., ~~2011~~ <sup>2012</sup> ~~EB~~, before me, the undersigned Notary Public, personally appeared **J. David Smith**, proved to me through satisfactory evidence of identification, which was/were MIT ID, to be the person whose name is signed on the preceding or attached document, and who swore or affirmed to me that the contents of the document are truthful and accurate to the best of his/her knowledge and belief.

Ellen B. L.  
Signature of Notary

(Seal)

My Commission Expires: 06/22/2018



1/13/12  
Date

Kripa K. Varanasi  
Kripa K. Varanasi

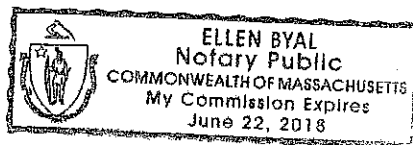
Commonwealth/State of Massachusetts  
County of Middlesex ) ss

On this 13 day of Jan., 2012, before me, the undersigned Notary Public, personally appeared **Kripa K. Varanasi**, proved to me through satisfactory evidence of identification, which was/were MA Driver's License, to be the person whose name is signed on the preceding or attached document, and who swore or affirmed to me that the contents of the document are truthful and accurate to the best of his/her knowledge and belief.

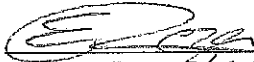
Ellen B. L.  
Signature of Notary

(Seal)

My Commission Expires: 06/22/2018



2/9/2012  
Date

  
Ernesto Reza-Garduño Cabello

Commonwealth/State of Massachusetts  
County of Middlesex ) ss

On this 9<sup>th</sup> day of February, 2012, before me, the undersigned Notary Public, personally appeared Ernesto Reza-Garduño Cabello, proved to me through satisfactory evidence of identification, which was/were U.S. passport, to be the person whose name is signed on the preceding or attached document, and who swore or affirmed to me that the contents of the document are truthful and accurate to the best of his/her knowledge and belief.

Jane Jackson  
Signature of Notary

(Seal)

My Commission Expires: February 15, 2013



**JANE JACKSON**  
Notary Public  
Commonwealth of Massachusetts  
My Commission Expires Feb. 15, 2013

## Cesión de los Inventores

Esta Cesión, hecha por Rêjeev Dhiman, J. David Smith, Kripa K. Varanasi y Ernesto Reza-Garduño Cabello (denominados de aquí en adelante los Cedentes), residentes en 8 Island Hill Avenue, No. 213, Malden, Massachusetts 02148; 143 Albany Street, Apt. 12, Cambridge, Massachusetts 02139; 31 Fletcher Avenue, Unit 5, Lexington, Massachusetts 02420; 372 Memorial Drive, Cambridge, Massachusetts 02139, respectivamente;

CONSIDERANDO QUE, los cedentes han inventado ciertas mejoras nuevas y útiles en SUPERFICIES IMPREGNADAS CON LÍQUIDO, MÉTODOS PARA SU FABRICACIÓN, Y DISPOSITIVOS PARA INCORPORARLAS consignadas en la solicitud de patente de los Estados Unidos, presentada el 22 de noviembre de 2011 como solicitud de patente Estadounidense No. 13/302.356; y

CONSIDERANDO QUE, Massachusetts Institute of Technology, una Corporación organizada bajo y de acuerdo con las leyes de Massachusetts con sus oficinas principales localizadas en 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, Massachusetts 02139-4307 (denominada de aquí en adelante la cesionaria) está interesada en adquirir el derecho , título e interés completos en y para dichas invenciones y dicha solicitud de patente de los Estados Unidos, y cualquier patente de los Estados Unidos obtenida para este y por este invento.

AHORA, POR LO TANTO, en consideración de Un Dólar (\$ 1,00) y otra consideración buena y suficiente, cuyo recibo se reconoce aquí, los Cedentes han vendido, cedido, transferido y entregado, y por el presente de hecho venden, ceden, transfieren y entregan al cesionario, sus sucesores, representantes legales y designados, el derecho, título e interés completos en y de las invenciones y solicitud de patente mencionadas antes, y en y de cualquiera y todas las divisiones directas e indirectas, continuaciones y continuaciones en parte de dicha solicitud, y cualquiera y todas las patentes en los Estados Unidos y todos los países extranjeros que pudieran haber sido otorgadas para la misma, y re-emisiones, reexámenes y extensiones de dichas patentes, y todos los derechos existentes bajo la Convención Internacional para la Protección de la Propiedad Industrial, la misma poseída y disfrutada por los Cesionarios, para su propio uso y beneficio y el uso y beneficio de sus sucesores, representantes legales y designados, hasta el final completo del término o términos para los cuales dichas patentes hayan sido otorgadas y/o extendidas, tan completamente y enteramente como si las mismas fueran poseídas y disfrutadas por los Cedentes, en caso de que esta venta y cesión no se hubieran llevado a cabo.

Y, por la misma consideración, los cedentes por el presente representan y garantizan al Cesionario, sus sucesores, representantes legales y designados, que, al momento de la firma y entrega de los presentes, excepto cualesquier derechos, títulos y/ intereses que le hayan surgido al Cesionario por ley o que ya hayan sido transferidos al Cesionario, los Cedentes son los únicos dueños legales del derecho, título e interés completos de y para dichas invenciones y solicitud de patente antes mencionadas, y que estos están libres de compromisos y que los Cedentes tienen el derecho y la autoridad legal completa para vender y entregar los mismos de la manera establecida aquí.

Y, por la misma consideración, los Cedentes pactan y acuerdan aquí con los Cesionarios, sus sucesores, representantes legales y designados, que los Cedentes firmarán todos los papeles y documentos, darán todas las declaraciones juramentadas y efectuarán todos los actos necesarios o requeridos para procurar, mantener, hacer valer y defender de cualquier patente y solicitudes para la patente de dichas invenciones, sin cargo alguno para el Cesionario, sus sucesores, representantes legales y designados, siempre que el consejo del Cesionario, sus sucesores, representantes legales y designados, indique: que cualquier procedimiento relacionado con dichas invenciones, o dicha solicitud de patente, o cualquier procedimiento relacionado con cualquier patente o solicitudes de patente para dichas invenciones en cualquier país, incluyendo pero sin limitación a procedimientos de interferencia, es legal y deseable; o, que cualquier división, continuación o continuación en parte de cualquier solicitud de patente, o cualquier re-emisión, re-examen o extensión de cualquier Patentes, que se obtenga, es legal y deseable.

Y, los Cedentes solicitan por el presente al Comisionado de Marcas y Patentes emitir dichos títulos de patente de los Estados Unidos a nombre del Cesionario, como Cesionarios de dichas invenciones y de las patentes que se emitan, para el solo uso y beneficio del Cesionario, sus sucesores, representantes legales y designados.

Y los Cedentes otorgan a los siguientes individuos el poder para insertar en este documento de cesión cualquier identificación adicional que pueda ser necesaria o deseable para poder cumplir con las normas de la Oficina de Marcas y Patentes de los Estados Unidos para el registro de este documento:

GOODWIN PROCTER LLP

Todos los practicantes con el Número de Cliente 051414

Y los Cedentes reconocen una obligación de ceder esta invención a los Cesionarios desde el momento en que la invención fue hecha.

1/13/11

(Firmado)

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Rajeev Dhiman

Mancomunidad/Estado de Massachusetts

Condado de Middlesex

)ss

En este día 13 de Enero de 2012, se presentó ante mí, abajo firmante Notario Público, personalmente Rajeev Dhiman, probando ante mí si identificación de manera satisfactoria, que era MIT ID, ser la persona cuya firma aparece en el documento adjunto, y quien juró o afirmó que los contenidos del documento son verdaderos y precisos de acuerdo con su mejor conocimiento y creencia.

(Firmado)

(sello)

\_\_\_\_\_  
Firma del Notario

Mi comisión expira: 06/22/2018

ELLEN BYAL

Notario Público

Mancomunidad de Massachusetts

Mi comisión expira

Junio 22, 2018

.....  
Feb 8, 2012

(Firmado)

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
J. David Smith

Mancomunidad/Estado de Massachusetts

Condado de Middlesex

)ss

En este día 8 de Febrero de 2012, se presentó ante mí, abajo firmante Notario Público, personalmente J. David Smith, probando ante mí si identificación de manera satisfactoria, que era MIT ID, ser la persona cuya firma aparece en el documento adjunto, y quien juró o afirmó que los contenidos del documento son verdaderos y precisos de acuerdo con su mejor conocimiento y creencia.

(Firmado)

(sello)

---

Firma del Notario

Mi comisión expira: 06/22/2018

ELLEN BYAL

Notario Público

Mancomunidad de Massachusetts

Mi comisión expira

Junio 22, 2018

\*\*\*\*\*

1/13/11

(Firmado)

---

Fecha

---

Kripa K. Varanasi

Mancomunidad/Estado de Massachusetts

Condado de Middlesex

)ss

En este día 13 de Enero de 2012, se presentó ante mí, abajo firmante Notario Público, personalmente Kripa K. Varanasi, probando ante mí si identificación de manera satisfactoria, que era Pase de conducción de MA, ser la persona cuya firma aparece en el documento adjunto, y quien juró o afirmó que los contenidos del documento son verdaderos y precisos de acuerdo con su mejor conocimiento y creencia.

(Firmado)

(sello)

---

Firma del Notario

Mi comisión expira: 06/22/2018

ELLEN BYAL

Notario Público

Mancomunidad de Massachusetts

Mi comisión expira

Junio 22, 2018

\*\*\*\*\*

2/9/2012

(Firmado)

---

Fecha

---

Ernesto Reza-Garduño Cabello

Mancomunidad/Estado de Massachusetts

Condado de Middlesex

)ss

En este día 9 de Febrero de 2012, se presentó ante mí, abajo firmante Notario Público, personalmente Ernesto Reza-Garduño Cabello, probando ante mí su identificación de manera satisfactoria, que era el Pasaporte Estadounidense, ser la persona cuya firma aparece en el documento adjunto, y quien juró o afirmó que los contenidos del documento son verdaderos y precisos de acuerdo con su mejor conocimiento y creencia.

(Firmado)

(sello)

---

Firma del Notario

Mi comisión expira: Feb 15, 2013

JANE JACKSON

Notario Público

Mancomunidad de Massachusetts

Mi comisión expira

Febrero 15, 2013

From the INTERNATIONAL BUREAU

**PCT**NOTIFICATION OF THE RECORDING  
OF A CHANGE(PCT Rule 92bis.1 and  
Administrative Instructions, Section 422)

To:

HAULBROOK, William, R.  
Choate, Hall & Stewart LLP  
Two International Place  
Boston, MA 02110  
ETATS-UNIS D'AMERIQUE

|                                                               |                                                                             |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Date of mailing (day/month/year)<br>26 July 2012 (26.07.2012) |                                                                             |
| Applicant's or agent's file reference<br>0492612-0898         | IMPORTANT NOTIFICATION                                                      |
| International application No.<br>PCT/US2011/061898            | International filing date (day/month/year)<br>22 November 2011 (22.11.2011) |

## 1. The following indications appeared on record concerning:

☐ the applicant ☐ the inventor ☒ the agent ☐ the common representative

|                                                                                                                                     |                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Name and Address<br>HAULBROOK, William, R.<br>Goodwin Procter LLP<br>Exchange Place<br>Boston, MA 02109<br>United States of America | State of Nationality<br>State of Residence     |
|                                                                                                                                     | Telephone No.<br>617-570-1013                  |
|                                                                                                                                     | Facsimile No.<br>617-523-1231                  |
|                                                                                                                                     | E-mail address<br>patentbos@goodwinprocter.com |

## 2. The International Bureau hereby notifies the applicant that the following change has been recorded concerning:

☐ the person ☐ the name ☒ the address ☐ the nationality ☐ the residence

|                                                                                                                                                     |                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Name and Address<br>HAULBROOK, William, R.<br>Choate, Hall & Stewart LLP<br>Two International Place<br>Boston, MA 02110<br>United States of America | State of Nationality<br>State of Residence                                    |
|                                                                                                                                                     | Telephone No.<br>617-248-5000                                                 |
|                                                                                                                                                     | Facsimile No.<br>617-502-5002                                                 |
|                                                                                                                                                     | E-mail address<br><input type="checkbox"/> Notifications by e-mail authorized |

## 3. Further observations, if necessary:

## 4. A copy of this notification has been sent to:

- |                                                                                |                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> the receiving Office                       | <input type="checkbox"/> the International Preliminary Examining Authority |
| <input checked="" type="checkbox"/> the International Searching Authority      | <input type="checkbox"/> the designated Offices concerned                  |
| <input type="checkbox"/> the Authority(ies) specified for supplementary search | <input type="checkbox"/> the elected Offices concerned                     |
|                                                                                | <input type="checkbox"/> other:                                            |

|                                                                                               |                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| The International Bureau of WIPO<br>34, chemin des Colombettes<br>1211 Geneva 20, Switzerland | Authorized officer<br><br>Claveri Sebastien                |
| Facsimile No. +41 22 338 70 90                                                                | e-mail pt01.pct@wipo.int<br>Telephone No. +41 22 338 74 01 |

From the INTERNATIONAL BUREAU

**PCT**NOTIFICATION OF THE RECORDING  
OF A CHANGE(PCT Rule 92bis.1 and  
Administrative Instructions, Section 422)

To:

HAULBROOK, William, R.  
Choate, Hall & Stewart LLP  
Two International Place  
Boston, MA 02110  
ETATS-UNIS D'AMERIQUE

|                                                                  |                                                                             |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Date of mailing (day/month/year)<br>29 January 2014 (29.01.2014) |                                                                             |
| Applicant's or agent's file reference<br>0492612-0898            | IMPORTANT NOTIFICATION                                                      |
| International application No.<br>PCT/US2011/061898               | International filing date (day/month/year)<br>22 November 2011 (22.11.2011) |

|                                                                                                                      |                                                                               |                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1. The following indications appeared on record concerning:                                                          |                                                                               |                                                 |
| <input checked="" type="checkbox"/> the applicant                                                                    | <input checked="" type="checkbox"/> the inventor                              | <input type="checkbox"/> the agent              |
| <input type="checkbox"/> the common representative                                                                   |                                                                               |                                                 |
| Name and Address<br>SMITH, J., David<br>143 Albany Sreet, Apt. 12<br>Cambridge, MA 02139<br>United States of America | State of Nationality<br>US                                                    | State of Residence<br>US                        |
|                                                                                                                      | Telephone No.                                                                 |                                                 |
|                                                                                                                      | Facsimile No.                                                                 |                                                 |
|                                                                                                                      | E-mail address                                                                |                                                 |
| 2. The International Bureau hereby notifies the applicant that the following change has been recorded concerning:    |                                                                               |                                                 |
| <input type="checkbox"/> the person                                                                                  | <input type="checkbox"/> the name                                             | <input checked="" type="checkbox"/> the address |
| <input type="checkbox"/> the nationality                                                                             |                                                                               |                                                 |
| <input type="checkbox"/> the residence                                                                               |                                                                               |                                                 |
| Name and Address<br>SMITH, J., David<br>285 3rd Street, Apt. 843<br>Cambridge, MA 02142<br>United States of America  | State of Nationality<br>US                                                    | State of Residence<br>US                        |
|                                                                                                                      | Telephone No.                                                                 |                                                 |
|                                                                                                                      | Facsimile No.                                                                 |                                                 |
|                                                                                                                      | E-mail address<br><input type="checkbox"/> Notifications by e-mail authorized |                                                 |
| 3. Further observations, if necessary:                                                                               |                                                                               |                                                 |
| 4. A copy of this notification has been sent to:                                                                     |                                                                               |                                                 |
| <input checked="" type="checkbox"/> the receiving Office                                                             | <input type="checkbox"/> the International Preliminary Examining Authority    |                                                 |
| <input type="checkbox"/> the International Searching Authority                                                       | <input checked="" type="checkbox"/> the designated Offices concerned          |                                                 |
| <input type="checkbox"/> the Authority(ies) specified for supplementary search                                       | <input type="checkbox"/> the elected Offices concerned                        |                                                 |
|                                                                                                                      | <input type="checkbox"/> other:                                               |                                                 |

|                                                                                               |                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| The International Bureau of WIPO<br>34, chemin des Colombettes<br>1211 Geneva 20, Switzerland | Authorized officer<br><br>Roslik-Milliquet Ana            |
| Facsimile No. +41 22 338 80 40                                                                | e-mail ept.pct@wipo.int<br>Telephone No. +41 22 338 78 78 |



## UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE  
United States Patent and Trademark Office  
Address: COMMISSIONER FOR PATENTS  
P.O. Box 1450  
Alexandria, Virginia 22313-1450  
www.uspto.gov

| APPLICATION<br>NUMBER | FILING or<br>371(c) DATE | GRP ART<br>UNIT | FIL FEE REC'D | ATTY DOCKET NO | TOT CLAIMS | IND CLAIMS |
|-----------------------|--------------------------|-----------------|---------------|----------------|------------|------------|
| 13/302,356            | 11/22/2011               | 3744            | 865           | 0492611-1167   | 29         | 1          |

CONFIRMATION NO. 6674

## CORRECTED FILING RECEIPT



0000000058553017

Date Mailed: 01/14/2013

24280  
CHOATE, HALL & STEWART LLP  
TWO INTERNATIONAL PLACE  
BOSTON, MA 02110

Receipt is acknowledged of this non-provisional patent application. The application will be taken up for examination in due course. Applicant will be notified as to the results of the examination. Any correspondence concerning the application must include the following identification information: the U.S. APPLICATION NUMBER, FILING DATE, NAME OF APPLICANT, and TITLE OF INVENTION. Fees transmitted by check or draft are subject to collection. Please verify the accuracy of the data presented on this receipt. **If an error is noted on this Filing Receipt, please submit a written request for a Filing Receipt Correction. Please provide a copy of this Filing Receipt with the changes noted thereon. If you received a "Notice to File Missing Parts" for this application, please submit any corrections to this Filing Receipt with your reply to the Notice. When the USPTO processes the reply to the Notice, the USPTO will generate another Filing Receipt incorporating the requested corrections**

## Inventor(s)

J. David Smith, Cambridge, MA;  
Rajeev Dhiman, Malden, MA;  
Kripa K. Varanasi, Lexington, MA;  
Ernesto Reza-Garduño Cabello, Cambridge, MA;

## Applicant(s)

J. David Smith, Cambridge, MA;  
Rajeev Dhiman, Malden, MA;  
Kripa K. Varanasi, Lexington, MA;  
Ernesto Reza-Garduño Cabello, Cambridge, MA;

**Power of Attorney:** The patent practitioners associated with Customer Number 24280

**Domestic Priority data as claimed by applicant**

This appln claims benefit of 61/515,395 08/05/2011

**Foreign Applications** for which priority is claimed (You may be eligible to benefit from the **Patent Prosecution Highway** program at the USPTO. Please see <http://www.uspto.gov> for more information.) - None.

*Foreign application information must be provided in an Application Data Sheet in order to constitute a claim to foreign priority. See 37 CFR 1.55 and 1.76.*

**If Required, Foreign Filing License Granted:** 12/06/2011

The country code and number of your priority application, to be used for filing abroad under the Paris Convention, is **US 13/302,356**

**Projected Publication Date:** 02/07/2013

**Non-Publication Request:** No