(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第6157597号
(P6157597)

(45)発行日　平成29年7月5日(2017.7.5)　(24)登録日　平成29年6月16日(2017.6.16)

(51)Int.Cl.		F I		
H01L 29/06	(2006.01)	H01L	29/06	601N
B82B 3/00	(2006.01)	B82B	3/00	
B82Y 40/00	(2011.01)	B82Y	40/00	
H01L 21/336	(2006.01)	H01L	29/78	627C
H01L 29/786	(2006.01)	H01L	29/78	618C

請求項の数 15　(全 21 頁)

(21)出願番号　特願2015-509536(P2015-509536)
(86)(22)出願日　平成25年4月25日(2013.4.25)
(65)公表番号　特表2015-522941(P2015-522941A)
(43)公表日　平成27年8月6日(2015.8.6)
(86)国際出願番号　PCT/IB2013/053266
(87)国際公開番号　WO2013/164741
(87)国際公開日　平成25年11月7日(2013.11.7)
審査請求日　平成28年4月12日(2016.4.12)
(31)優先権主張番号　1207463.9
(32)優先日　平成24年4月30日(2012.4.30)
(33)優先権主張国　英国(GB)

(73)特許権者　390009531
インターナショナル・ビジネス・マシーンズ・コーポレーション
INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES CORPORATION
アメリカ合衆国10504　ニューヨーク州　アーモンク　ニュー　オーチャード　ロード
New Orchard Road, Armonk, New York 10504, United States of America
(74)代理人　100108501
弁理士　上野　剛史

最終頁に続く

(54)【発明の名称】表面にナノ物体を位置付けるための方法および装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

表面にナノ物体（２０）を位置決めするための方法であって、

向かい合った第１の表面（１５）および第２の表面（１７）を含む２つの表面（１５、１７）であって、前記２つの表面のうちの少なくとも１つが、ナノスケールの寸法を有する１つまたは複数の位置決め構造（１６、１６ａ）を示す、前記２つの表面、ならびに

それぞれが前記２つの表面のそれぞれの表面との界面に形成される２つの電気二重層を含み、前記２つの表面の表面電荷が同一符号である、前記２つの表面間の前記ナノ物体のイオン性液体懸濁液（３０）

を設けるステップ（Ｓ１０～Ｓ５０）と、

前記２つの表面の前記電荷により生じるポテンシャル・エネルギ（３１）によって前記懸濁液中のナノ物体（２０）を位置決めし（Ｓ６０）、前記ポテンシャル・エネルギの最小値（３２）を前記第１の表面の方へシフトすることによって、前記ナノ物体の１つまたは複数を前記位置決め構造によって前記第１の表面に堆積させるステップ（Ｓ７０）と

を含む、方法。

【請求項２】

前記ナノ物体を堆積させるステップが、前記表面間の距離（ｄ）を低減し（Ｓ７０）、それによって前記ポテンシャル・エネルギの最小値（３２）を前記第１の表面の方へシフトするステップを含み、前記距離が２００ｎｍ未満、特に１００ｎｍ未満に低減される、請求項１に記載のナノ物体を位置決めするための方法。

【請求項３】
設けられる前記２つの表面が非対称の電荷を有するように設計され、それによって前記２つの表面のそれぞれが同一の電荷符号を示し、前記第２の表面が前記第１の表面よりも多くの電荷を有する、請求項１または２に記載のナノ物体を位置決めするための方法。
【請求項４】
設けられる前記ナノ物体（２０）が、２：１を超える、特に５：１を超えるアスペクト比を有し、
設けられる前記１つまたは複数の位置決め構造が、前記第１の表面の平均面（１５ａ）、または前記第２の表面の平均面（１７ａ）と平行に延在する１つもしくは複数の溝（１６、１６ａ）を備え、
前記ポテンシャル・エネルギによってナノ物体を位置決めするステップが、前記ポテンシャル・エネルギによって前記ナノ物体を配向するステップをさらに含む、
請求項１ないし３のいずれか一項に記載のナノ物体を位置決めするための方法。
【請求項５】
設けられる前記第１の表面（１５）が、基板（１１）上に設けられた、ポリフタルアルデヒドなどのポリマを含む除去可能な材料（１４）の層の表面である、請求項１ないし４のいずれか一項に記載のナノ物体を位置決めするための方法。
【請求項６】
前記方法が、前記表面を設ける前に、熱走査プローブ・リソグラフィ技法によって、前記位置決め構造を前記除去可能な材料の前記層内に生成するステップ（Ｓ４０）をさらに含む、請求項５に記載のナノ物体を位置決めするための方法。
【請求項７】
前記方法が、前記ナノ物体を堆積させた後に、前記除去可能な材料を除去して前記第１の表面に堆積させた１つまたは複数のナノ物体を前記基板に転送するステップ（Ｓ９０）をさらに含む、請求項５または６に記載のナノ物体を位置決めするための方法。
【請求項８】
前記除去可能な材料を除去するステップが、前記除去可能な材料を蒸発させるステップ（Ｓ４０）を含み、前記除去可能な材料がポリマであり、前記ポリマを前記ポリマの天井温度を超える温度で蒸発させる、請求項７に記載のナノ物体を位置決めするための方法。
【請求項９】
前記除去可能な材料を除去した後、前記堆積させたナノ物体の上部に新しい材料の層を設けるステップ（Ｓ１００）と、前記２つの表面および前記イオン性液体懸濁液を設けるステップ（Ｓ２０～Ｓ５０）、ナノ物体を位置決めするステップ（Ｓ６０）、ならびに堆積させるステップ（Ｓ７０）を繰り返すステップとをさらに含み、前記２つの表面が、新しい第１の表面として前記新しい材料の層の表面を備える、請求項７または８に記載のナノ物体を位置決めするための方法。
【請求項１０】
前記表面を設ける前に、前記基板上に前記除去可能な材料を堆積させるステップ（Ｓ２０）をさらに含み、前記除去可能な材料を堆積させるステップが、前記基板上にポリフタルアルデヒド膜をスピン・キャストするステップ（Ｓ２０）を含む、請求項５ないし９のいずれか一項に記載のナノ物体を位置決めするための方法。
【請求項１１】
前記除去可能な材料を堆積させるステップが、前記基板および前記基板上の電極またはパッド（１２）などの１つまたは複数の既存の構造の両方の上に前記除去可能な材料を堆積させるステップ（Ｓ２０）を含む、請求項１０に記載のナノ物体を位置決めするための方法。
【請求項１２】
前記方法が、ナノ物体の前記懸濁液、特に水性の懸濁液を、前記２つの表面間の、２００ｎｍ未満のギャップに引きずり込むステップ、または前記ギャップから引きずり出すステップ、あるいはその両方のステップ（Ｓ８０）をさらに含み、引きずるステップが、毛

細管力または電気泳動力あるいはその両方によって実行される、請求項１ないし１１のいずれか一項に記載のナノ物体を位置決めするための方法。
【請求項１３】
堆積させるステップが、前記表面間の距離（ｄ）を低減し、それによって前記ポテンシャル・エネルギの最小値（３２）を前記第１の表面の方へシフトさせるステップ（Ｓ７０）を含み、前記表面間の距離を低減するステップが、前記第１の表面を前記第２の表面に対して相対的に、前記２つの表面の一方の平均面（１５ａ、１７ａ）に垂直に移動させるステップを含み、前記第２の表面が前記位置決め構造（１６ａ）を備える、請求項１ないし１２のいずれか一項に記載のナノ物体を位置決めするための方法。
【請求項１４】
設けられる前記第２の表面が前記第１の表面に対して傾けられ、堆積させるステップが、前記表面間の距離（ｄ）を低減し、それによって前記ポテンシャル・エネルギの最小値（３２）を前記第１の表面の方へシフトさせるステップ（Ｓ７０）であって、前記距離を低減するステップが、前記第１の表面を前記第２の表面に対して相対的に、前記第１の表面の平均面と平行に移動させる、前記シフトさせるステップを含む、請求項１ないし１２のいずれか一項に記載のナノ物体を位置決めするための方法。
【請求項１５】
第１の表面および第２の表面である向かい合った２つの表面（１５、１７）であって、前記２つの表面のうちの少なくとも１つが、ナノスケールの寸法を有する位置決め構造を有する、前記２つの表面と、
それぞれが前記２つの表面のそれぞれの表面との界面に形成される２つの電気二重層を備え、前記２つの表面の表面電荷が同一符号である、前記２つの表面間のナノ物体（２０）のイオン性液体懸濁液（３０）と、
前記第１の表面または前記第２の表面あるいはその両方に結合され、動作において、前記第１の表面を前記第２の表面に対して相対的に移動させるように構成された位置決め手段（１０２～１０８）と
を備える、請求項１ないし１４のいずれか一項に記載の方法を実施するのに適した装置（１００）。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、一般にナノ物体を位置付けるための方法および装置の分野に関する。
【背景技術】
【０００２】
球体、棒またはワイヤなどの形態のナノ物体（すなわち、１～１００ナノメートルのサイズのナノスケールの物体またはナノ粒子）の制御された合成は、多くの科学研究の領域で様々な応用につながっている。ボトム・アップ合成によって単結晶のナノ粒子が得られ、多成分の構造の作製が可能となる。それらの構造的特性は、トップ・ダウンで作製された粒子と比較して、しばしば粒子の独特のまたは優れた性能をもたらす。基板上の隣接する粒子または他の機能的構造に対する精密な配置および位置合わせが可能な場合は、幅広い応用が、例えば、集積化デバイスにおいて利用可能となる可能性がある。理想的には、精密な配置および位置合わせの両方を、ナノ粒子の径のオーダ、典型的には５～５０ｎｍの配置精度で、高い実装密度で、同時に得ることが望ましく、これまで未解決の課題であった。
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００３】
表面にナノ物体を位置付けるための装置および方法を提供する。
【課題を解決するための手段】
【０００４】

第１の態様によると、本発明は、表面にナノ物体を位置付けるための方法として具現化され、本方法は、

向かい合った第１の表面および第２の表面を含む２つの表面であって、２つの表面のうちの少なくとも１つが、ナノスケールの寸法を有する１つまたは複数の位置決め構造を示す、２つの表面、ならびにそれぞれが２つの表面のそれぞれの表面との界面に形成される２つの電気二重層を含み、２つの表面の表面電荷が同一符号である、２つの表面間のナノ物体のイオン性液体懸濁液を設けるステップと、

２つの表面の電荷により生じるポテンシャル・エネルギによって懸濁液中のナノ物体を位置決めし、ポテンシャル・エネルギの最小値を第１の表面の方へシフトすることによって、ナノ物体の１つまたは複数を位置決め構造によって第１の表面に堆積させるステップと

を含む。

【０００５】

実施形態において、堆積させるステップは、表面間の距離を低減し、それによってポテンシャル・エネルギの最小値を第１の表面の方へシフトするステップを含む。距離は、好ましくは２００ｎｍ未満、より好ましくは１００ｎｍ未満に低減される。

【０００６】

設けられる２つの表面は非対称の電荷を有するように設計され、それによって２つの表面のそれぞれが同一の電荷符号を示し、第２の表面が第１の表面より多くの電荷を有するのが有利である。

【０００７】

設けられるナノ物体は、好ましくは２：１を超える、より好ましくは２：１を超えるアスペクト比を有するのが好ましく、設けられる位置決め構造は、第１の表面の平均面、または第２の表面の平均面と平行に延在する１つもしくは複数の溝を備え、ポテンシャル・エネルギによってナノ物体を位置決めするステップが、ポテンシャル・エネルギによってナノ物体を配向するステップをさらに含む。

【０００８】

実施形態によると、設けられる第１の表面は、基板上に設けられた、好ましくはポリフタルアルデヒドなどのポリマを含む除去可能な材料の層の表面である。

【０００９】

本方法は、２つの表面を設ける前に、好ましくは熱走査プローブ・リソグラフィ技法によって、位置決め構造を除去可能な材料の層内に生成するステップをさらに含むのが好ましい。

【００１０】

好ましい実施形態において、本方法は、ナノ物体を堆積させた後に、除去可能な材料を除去して第１の表面に堆積させた１つまたは複数のナノ物体を基板に転送するステップをさらに含む。

【００１１】

実施形態において、除去可能な材料を除去するステップは、除去可能な材料を蒸発させるステップを含み、除去可能な材料が好ましくはポリマであり、このポリマをこのポリマの天井温度を超える温度で蒸発させる。

【００１２】

本方法は、除去可能な材料を除去した後、堆積させたナノ物体の上部に新しい材料の層を設けるステップと、２つの表面およびイオン性液体懸濁液を設けるステップ、ナノ物体を位置決めするステップ、ならびに堆積させるステップを繰り返すステップとをさらに含み、２つの表面が、新しい第１の表面として新しい材料の層の表面を備えるのが好ましい。

【００１３】

実施形態において、本方法は、表面を設ける前に、基板上に除去可能な材料を堆積させるステップをさらに含み、除去可能な材料を堆積させるステップが、基板上にポリフタル

アルデヒド膜をスピン・キャストする（spin casting）ステップを好ましくは含む。
【００１４】
変形形態において、除去可能な材料を堆積させるステップは、基板および基板上の電極またはパッドなどの１つまたは複数の既存の構造の両方の上に除去可能な材料を堆積させるステップを含む。
【００１５】
本方法は、ナノ物体の懸濁液、例えば水性の懸濁液を、２つの表面間の、好ましくは２００ｎｍ未満のギャップに引きずり込むステップ、またはギャップから引きずり出すステップ、あるいはその両方のステップをさらに含むのが好ましく、引きずるステップが、毛細管力または電気泳動力あるいはその両方によって実行されるのが好ましい。
【００１６】
実施形態によると、ナノ物体を堆積させるステップは、表面間の距離を低減し、それによってポテンシャル・エネルギの最小値を第１の表面の方へシフトさせるステップを含み、表面間の距離を低減するステップが、第１の表面を第２の表面に対して相対的に、２つの表面の一方の平均面に垂直に移動させるステップを含み、第２の表面が位置決め構造の１つまたは複数を好ましくは備える。
【００１７】
設けられる第２の表面が第１の表面に対して傾けられ、ナノ物体を堆積させるステップが、表面間の距離を低減し、それによってポテンシャル・エネルギの最小値を第１の表面の方へシフトさせるステップであって、距離を低減するステップが、第１の表面を第２の表面に対して相対的に、第１の表面の平均面と平行に移動させる、シフトさせるステップを含むことが好ましい。
【００１８】
別の態様によると、本発明は、上記の実施形態のいずれかに記載の方法を実施するのに適した装置として具現化され、本装置は、
第１の表面および第２の表面である向かい合った２つの表面であって、２つの表面のうちの少なくとも１つが、ナノスケールの寸法を有する位置決め構造を有する、２つの表面と、
それぞれが２つの表面のそれぞれの表面との界面に形成される２つの電気二重層を備え、２つの表面の表面電荷が同一符号である、２つの表面間のナノ物体のイオン性液体懸濁液と、
第１の表面または第２の表面あるいはその両方に結合され、動作において、第１の表面を第２の表面に対して相対的に移動させるように構成された位置決め手段と
を備える。
【００１９】
本発明を具現化する方法および装置について、非限定的な例によって、および添付図面を参照して次に説明する。
【図面の簡単な説明】
【００２０】
【図１】実施形態による、ナノ物体を位置決めするための方法のステップを示す概略３Ｄ図である。
【図２】実施形態による、ナノ物体を位置決めするための方法のステップを示す概略３Ｄ図である。
【図３】実施形態による、ナノ物体を位置決めするための方法のステップを示す概略３Ｄ図である。
【図４】実施形態による、ナノ物体を位置決めするための方法のステップを示す概略３Ｄ図である。
【図５】実施形態による、ナノ物体を位置決めするための方法のステップを示す概略３Ｄ図である。
【図６】実施形態による、ナノ物体を位置決めするための方法のステップを示す概略３Ｄ

図である。
【図７】実施形態による、ナノ物体位置決め方法のステップの精密な順序を示す流れ図である。
【図８】実施形態において得ることができるような、ナノ物体実現の例についての概略３Ｄ図である。
【図９】実施形態において得ることができるような、ナノ物体実現の例についての概略３Ｄ図である。
【図１０】実施形態において得ることができるような、ナノ物体実現の例についての概略３Ｄ図である。
【図１１】実施形態による方法を実施するために適した装置の例である。
【図１２】実施形態に関わるような、２つの非対称に帯電した表面間の推定された静電ポテンシャル（上側）、および接近距離の関数としてのポテンシャル障壁（下側）を示す２つのグラフである。
【図１３】図１～６の方法に対する変形形態に関わるようなステップを示す概略３Ｄ図である。
【図１４】図１～６の方法に対する変形形態に関わるようなステップを示す概略３Ｄ図である。
【発明を実施するための形態】
【００２１】
添付図面は、以下の説明を明瞭にするために、コンピュータ援用設計された３Ｄ図となるように意識的に選択されている。実験の画像および結果は、簡潔にするため添付されておらず、それらは、後の科学出版物において公表されるであろう。
【００２２】
本発明者は、（帯電した）ナノ物体を最適なターゲット基板上の所望の位置に精密に配向し、配置することが可能な新しい方法論を考案した。本方法は、閉じ込め表面（confining surface）および液体の電荷にのみ、場合によっては粒子の電荷にも依存し、それによってマイクロメートル長のナノワイヤからＤＮＡおよびタンパク質にまでも及ぶ広範囲の粒子の配置が可能となる。より一般に、粒子は、中性であっても帯電していてもよく、誘電体であっても金属であってもよいなどである。これらの方法は、具体的にはナノワイヤのような高アスペクト比のナノ粒子に有利に適用され、これらの複雑なボトム・アップで得られた物体の機能性を活用する道を開く。これらの粒子は、基板上の既存の構造に位置合わせされ、デバイスの集積化を可能にする。本方法は、並列に機能して、高スループット値を実現することができる。加えて、位置決めステップは、既に組み立てられたアイテムの上部で繰り返され、複雑な３次元（すなわち３Ｄ）の機能回路を構築することができる。
【００２３】
以下の記載は、下記の通り構成される。初めに、一般的な実施形態および高レベルの変形形態について説明する（節１）。次の節は、具体的な実施形態（節２）を扱う。次に、応用について論じる（節３）。装置の具体例は、節４の主題である。最後に、節５において、技術的な実施態様の詳細について扱う。
【００２４】
１．一般的な実施形態および高レベルの変形形態
全体に図１～７を、特に図３を参照して、本発明の態様について初めに説明し、この態様は、表面のナノ物体２０を、所望の位置に、および場合によっては所望の方向で位置決めするための方法に関する。
【００２５】
第１に、２つの表面１５、１７、すなわち、向かい合って配置された第１の表面１５および第２の表面１７を使用する。前記表面の少なくとも一方は、例えば、表面１５は、位置決め構造１６を示す。変形形態において、もう一方の表面１７または両方の表面に、そうした構造が設けられてもよい。前記位置決め構造は、ナノスケールの寸法を有し、すな

わち、少なくとも１つの特徴寸法（例えば、直径または主要長）が１～１００ｎｍである。

【００２６】

第２に、ナノ物体のイオン性液体懸濁液３０を表面１５と１７との間に閉じ込める。このイオン性液体は、例えば、表面１５と１７との間のギャップに引きずり込まれる水性の懸濁液であってもよい。ギャップは、好ましくは２００ｎｍ未満である。液体を引きずるステップは、例えば、毛細管力または電気泳動力あるいはその両方によって実行される。変形形態において、液滴を前記２つの表面間に押し込むことなどができる。

【００２７】

表面および液体は、懸濁液が２つの電気二重層（または、二重層とも呼ばれるＥＤＬ）を備えるように設計されることが重要である。ＥＤＬのそれぞれは、それぞれの表面との界面に形成される。２つの表面－液体界面が関わるため、２つのＥＤＬシステムが生じる。ＥＤＬは、それ自体は知られており、過去数十年間、多くの研究論文の主題であった。ＥＤＬは、物体が液体に接触して配置されたときに、物体（固体または粒子どころか液滴）の表面に現れる。「二重層」は、物体表面に隣接する２つの平行な電荷の層を指す。第１の層は、（正または負いずれかの）表面電荷を指し、この表面電荷が表面と液体間の多くの化学的相互作用のために物体上に直接吸着されるイオンを含む。第２の（拡散）層は、第１の層に反応して発生するイオンを含む。これらのイオンは、電気的に第１の層を遮蔽し、クーロン力によって表面電荷に引きつけられる。第２の層は、第１の層にしっかりと固着されるのではなく、拡散性があり（したがって拡散層と呼ばれる）、第２の層に含まれる自由イオンが電気的引力および熱運動の両方の影響下で液体中を移動する。したがって、第２の層は、液体を指す。

【００２８】

したがって、表面１５、１７にはそれぞれ、表面電荷が現れ、すなわち、それぞれのＥＤＬの「第１の」層が帯電している。表面のそれぞれが同一の電荷符号を示すことが重要でもある。電荷は非対称であり、すなわち、第２の表面１７は、第１の表面１５よりも多くの電荷を有するのが好ましい。その結果、懸濁液中のナノ物体は、懸濁液中の電荷（または少なくとも、エントロピ／電気的効果による懸濁液中の電荷との相互作用）によって安定化され、したがって、また「帯電」しうる。したがって、ナノ物体は、２つの表面のいずれにも堆積しない。実際に、懸濁液中のナノ物体が受けるような、表面の電荷に起因するポテンシャル・エネルギは、典型的にはこの物体の熱エネルギを上回り、したがって、この物体が堆積するのを阻止する。非帯電粒子は、ポテンシャルの構築を担うイオンの雲を乱すことに留意されたい。したがって、誘電性粒子もエントロピ的な理由により力を受ける。したがって、前に言及したように、本方法は、誘電性粒子に対しても機能する。

【００２９】

より詳細には、粒子が受けるようなポテンシャル・エネルギは、帯電した表面および（イオンを含有する）液体のこの帯電した表面に対する反応によって生じる。このポテンシャルが本質的にナノ物体を制御する。イオンの濃度は、ポテンシャルの範囲、すなわち、ポテンシャルがどれくらい遠くまで液体の中に達するかを決定する。ナノ物体の電荷は、帯電した界面活性剤をイオン溶液に加えることによって実現され／改良されえて、イオン溶液が粒子のまわりに自己集合し、電荷を提供する。また、ナノ物体、すなわち、粒子は、粒子表面に帯電した分子を、すなわち金の上にチオールを、またはＳｉＯ$_x$表面にシランを共有結合で付けることによって化学的に修飾されうる。そうした分子の電荷は、例えば、表面の電荷と同じように、水溶液のｐＨを制御することによって修飾されうるなどである。

【００３０】

懸濁液中のナノ物体は、表面の電荷によって生じるポテンシャル・エネルギによって自然に位置が定まる（場合によっては配向する）。このポテンシャル・エネルギは、非平面のプロファイルを有し、その形状が特に位置決め構造によって決定される。推定されたポテンシャル・エネルギの等電位面（contour surface）３１を図３～４に表す。参照記号

３２は、ポテンシャル・エネルギの最小値を示す。

【００３１】

最後に、ポテンシャル・エネルギの最小値３２を第１の表面の方へシフトすることによって、および位置決め構造によって、ナノ物体を第１の表面に堆積させることができる。すなわち、第１の表面（すなわち、電荷がより少ない表面）によって負わされた静電ポテンシャル障壁にナノ物体が打ち勝つことができるようにする力場が印加される。その結果、粒子は、位置決め構造によって、第１の表面に堆積する。粒子は、堆積の前に、および堆積中に粒子の位置および配向を調整する。

【００３２】

ここで、より具体的に図４を参照すると、実施形態において、前記力場を印加するステップは、表面間の距離を低減することによって最も現実的に実現される。それに応じて、図３～４に概略的に示すように、距離ｄは、距離ｄ’に低減され、ここに、ｄ’＜ｄである。以下でより詳細に説明するように、距離を低減することによって、ポテンシャル障壁を低下させることができ、すなわち、ポテンシャルの最小値３２を第１の表面１５の方へシフトすることができる。変形形態において、または距離の低減に加えて、ポテンシャルの最小値をシフトするように表面の（非対称な）電荷を変えてもよい。

【００３３】

多くのパラメータが、粒子が受けるポテンシャルに影響を与える。ポテンシャルの範囲は、溶液中のイオン濃度によって決定される。また、この範囲は、どの分解能まで形態学的特徴がポテンシャルを決定することができるかを決定する。範囲が大きい場合、表面形態（topography）における小さな特徴は、ポテンシャルに反映されない。したがって、範囲が短い場合、ポテンシャルはより高い分解能を有し、配置処理の精度を改善する。最小の範囲は、粒子の転送を保証する表面間の最小の実現可能な離隔距離によって与えられる。したがって、距離ｄは、できる限り小さな値に、例えば２００ｎｍ未満に低減される。ある場合には、この距離は、後で例示するように、１００ｎｍ未満に低減する必要がある場合がある。そうした離隔距離において、液体を引きずるために毛細管力または電気泳動力あるいはその両方を使用することができるのが有利である。

【００３４】

本位置決め方法は、アスペクト比を有するナノ物体２０に適用されるのが好ましい。その場合、位置決め構造は、表面１５の平均面１５ａと平行に延在する溝１６（もしくは任意の細長い構造、またはより一般的に、ナノ物体の対称性を反映する構造）であってもよい。したがって、アスペクト比を有するナノ物体は、ポテンシャル・エネルギによって（すなわち、溝によって）位置を定め、さらに配向する。図３～６または８～１０に示すように、アスペクト比は、典型的には２：１よりも高い。実際、はるかに高いアスペクト比、例えば、５：１よりも高い、またはさらに高いアスペクト比（ナノワイヤ）を考えることができる。実際に、高アスペクト比の粒子は、（図３～４のような）溝形のポテンシャルによって堆積されるので、アスペクト比が高いほど、得られる偏差がよりよく（原理上は最小に）なるということを理解することができる。したがって、本方法は、既知のスキームと異なり、そうした物体に適用された場合に、いっそう有利である。しかし、例えば、ナノ物体の形状に対応した、溝以外の位置決め構造を設けることができる。例えば、位置決め構造は、単純な刻み目であってもよく、または逆に、溝よりも複雑な形状（例えば、「Ｌ」、「Ｕ」もしくは「Ｔ形」など）を有することができる。それどころか、位置決め構造は、画成された幾何学形状中に２つ以上のナノ粒子をトラップするように画成されてもよい。

【００３５】

ここで、より具体的に図１を参照すると、実施形態において、第１の表面１５は、基板１１上に設けられた除去可能な材料１４の層の表面である。除去可能な材料は、典型的には有機レジスト、好ましくはポリフタルアルデヒドなどのポリマである。除去可能な材料による働きによって上流の製造プロセスが容易となり、例えば、走査プローブ・リソグラフィ（すなわちＳＰＬ）の文脈において、構造の選択および寸法に柔軟性がもたらされる

。加えて、これによって、以下で説明するように、堆積された物体を基板に転送し、ナノ物体の追加の「層」を、以前に堆積した物体の上部に堆積させて、設けることが可能となる。

【００３６】

材料１４は、好ましくは適切な刺激（エネルギ的なまたは化学的な修飾事象、プロトン付加など）で解鎖（unzip）することが可能なポリマ鎖を含む。その点で、膜１４は、ポリマ鎖の解鎖反応を誘発するためにナノ・プローブ５２によって刺激されてもよい。ポリマ材料は、例えば、エネルギ的なまたは化学的な修飾事象が解鎖反応を誘発するポリマ鎖を備えることができる。典型的には、第１の化学的修飾または劣化事象を刺激することによって、部分的にまたは全体的に解鎖効果を誘発する。したがって、パターニング・ステップは、典型的にはプローブ５０によって材料の層１４を加熱することによる適正な刺激を含む必要があり、それにより適切な修飾事象がポリマ材料のポリマ鎖に生じる。プローブ５０、５２は、それに応じて設計されるべきであり、例えば、制御された時間、および制御された温度でプローブを加熱することが可能な電気回路に接続される。さらに他の刺激タイプも考えることができる。以前に引き合いに出したように、ポリマ材料は、好ましくはポリ－（フタルアルデヒド）を含む。フタルアルデヒドの重合に対する有機触媒手法は、例えば、アルコールの開始剤が存在する状態での陰イオンの触媒として、二量体の１－ｔｅｒｔ－ブチル－２，２，４，４，４－ペンタキス（ジメチルアミノ）－２Λ^{5}，４Λ^{5}－［２］カテナジ（ホスファゼン）（Ｐ$_{2}$－ｔ－Ｂｕ）ホスファゼン塩基を使用すると好ましい。例えば、結果として得られるポリマ（分子量２７ｋＤａと等価な～２００モノマ単位を含む）は、低い天井温度を持ち、加熱プローブを使用する選択的な熱分解による永久パターンを容易に生成することができるようにする。そうした材料を用いて、プローブ・チップ先端部に印加する刻み込み力を事実上なくして、または小さくして深いパターンを書き込むことができる。これによって、材料の刻み込みまたは変位に起因するパターンのゆがみが最小化される。さらに、ポリマ鎖は、ガラス温度および耐溶剤性などの材料特性を調整する際に実質的な柔軟性を提供する任意長からなることができる。さらなる利点は、水素結合などの二次構造からの安定化を必要とする材料と異なり、分子間力の微調整が必要ではないということである。

【００３７】

変形形態において、材料１４は、分子が分子間（本質的に共有結合でない）結合によって架橋しているポリマ材料を含んでもよい。そうした分子は、加熱したナノ・プローブ５０、５２を用いてポリマ材料をパターニングするとき、都合よく脱離させることができる。前記分子の平均分子量は、脱離特性の向上がもたらされる、好ましくは１００Ｄａ～２０００Ｄａ、より好ましくは１５０Ｄａ～１０００Ｄａの範囲にある。膜は、ファンデルワールス力または水素結合などの分子間結合によって架橋されてもよい。適切に加熱したプローブ５２が膜１４の表面に対して付勢され、膜１４の表面と相互作用するとき、相互作用によって１つまたは複数の分子が脱離する可能性がある。プローブ温度、および表面へのプローブの露光時間は、分子の脱離を最適化するように、適切に調整されうる。

【００３８】

材料１４は、それ自体知られている通常の技法を使用して、例えば、基板上に、材料、例えば、ポリフタルアルデヒド膜をスピン・キャストすることによって基板上に堆積されてもよい。

【００３９】

ここで、図２を参照すると、除去可能な材料１４を使用することによって、例えば、ナノ物体の堆積に先立って、層１４中に位置決め構造を生成することに対する柔軟性が特に提供される。これを実現する好ましい技法は、熱走査プローブ・リソグラフィすなわちｔＳＰＬであり、ＩＢＭチューリッヒ研究所で最近開発された高分解能パターニング技法である。手短に言えば、この技法は、加熱したチップ先端部を使用して、有機レジストを高精度で局所的に除去する。密な線を、例えば、３０ｎｍのピッチで書き込むことができ、三次元の複雑なレリーフ構造を精密に再生することができる。レリーフ構造を１回のパタ

ーニング・ステップで書き込むことができる。２次元のパターンについては、ｔＳＰＬによって、通常の技法と比較して、２０倍速いパターニングが可能となる。熱ＳＰＬ法は、書き込まれる構造を直接生成することができ、同じチップ先端部を撮像モードで使用して、作製後に直ちに検査を行うことができる。その結果、後のステップに使用することができる高分解能のパターンを生成するのに、分のターン・アラウンド・タイムが得られる。例えば、書き込まれた構造を使用して、金のナノロッドを高精度（約１０ｎｍ）で配向し、位置付けることができる。生成されたプロファイルは、書き込みチップ先端部の形状によってのみ制限される。例えば、６０度の開き角度、および約５ｎｍの書き込みチップ先端部の半径に対応する鋭い底縁部を特徴とする溝が書き込まれた。完全性を期して、それぞれがこれらのガイディング構造の７２個を含む３０フィールドが、半日の作業で書き込まれ、これらは、引き続き堆積実験に使用された。

【００４０】

ここで、より具体的に堆積後の最終ステップを示す図５～６を参照すると、除去可能な材料１４をさらに使用して、表面１５上に堆積されたナノ物体を基板１１へ転送することができるのが有利である。このように、ナノ物体２０をいくつかのタイプの基板１１に堆積することができる。除去可能な材料を蒸発させるのが好ましい。この材料は、典型的にはポリマであり、このポリマは、天井温度、例えば１５０°Ｃを上回る温度で蒸発する。

【００４１】

以前引き合いに出したように、一旦材料１４が除去されると、すなわち、一旦物体が基板１１に転送されると、新しい材料の層（必ずしも同じ除去可能な材料ではない）を既に堆積しているナノ物体の上部に設けることができ、複雑なナノ物体の構造物を構築するために上記のステップが繰り返される。このことが、例えば、実施形態による位置決め方法のステップを示す流れ図である図７に示されている。

【００４２】

図７を参照すると、ステップは、典型的には以下の順番で行われうる。

Ｓ１０：基板１１を準備する（図１）。

Ｓ２０：層１２および１４を基板１１（図１）の上部に堆積する。

Ｓ３０：例えば、正確なＳＰＬ位置決め技法を使用して、所望の位置決め構造の位置を定める（図１）。

Ｓ４０：例えば、ｔＳＰＬを使用して、位置決め構造を表面１５上で所望の位置に刻み込む（図２）。

Ｓ５０：カバー１８を表面１５に近接させ、ギャップを、例えば、毛細管力／電気泳動力を使用してイオン性液体３０で充填する（図３）。

Ｓ６０：非対称の電荷が表面１５、１７に施され、電界中でナノ物体が自己配向し、位置を定める（図３）。

Ｓ７０：力が印加され、例えば、表面１５と１７との間の距離ｄが低減され、ナノ物体が第１の表面１５上に堆積する（図４）。

Ｓ８０：堆積後、イオン性液体が除去される（図５）。堆積中および堆積後に、前と同じ技法を用いて、液体を引きずることができることに留意されたい。必要な場合は、残留液を適切に洗い流し乾燥させることができる。

Ｓ９０：層１４を除去して（例えば、蒸発させて）、粒子２０を基板１１の方へ転送する。

Ｓ１００：処理は、場合によってはステップＳ２０に折り返す場合がある。すなわち、新しい材料の層を既に堆積しているナノ物体２０の上部に設けることができる。次いで、上記のステップＳ３０～Ｓ９０の１つまたは複数を繰り返すことができる。したがって、新しい表面が向かい合って配置され、イオン性液体懸濁液が間に閉じ込められる。再び、適切な電荷を施した後、ナノ物体は、電界中で自己配向し、位置を定め（Ｓ６０）、最終的に新しい表面１５、すなわち、新しい材料の層の表面に堆積する（Ｓ７０）。引き続いて、この表面１５を除去することができる（Ｓ９０）、などである。

【００４３】

これまでのところは、位置決め構造は、本質的に受容表面１５上で考えられた。しかし、図１３に示すように、変形形態が可能である。この場合、位置決め構造１６ａを備えるのは第２の表面１７である。すべての場合、そうした位置決め構造は、溝、すなわち適切な最小の等電位線（contour of the electrical potential）を画成するように、カバー１８または層１４あるいはその両方の厚みに掘られた細長いスロットとして設けられるのが有利である。この点で、帯電物体２０と表面１５、１７のそれぞれとの間に生じる斥力エネルギは、指数の減衰率を掛けた距離に逆比例して変化する（遮蔽クーロン・ポテンシャル）。変形形態において、位置決め構造は、より複雑な形状、例えばＵ、Ｌ、Ｔなどが与えられてもよい。

【００４４】

図１３にさらに示すように、表面間の離隔距離の低減は、表面１５を表面１７に対して相対的に、平均面１５ａ、１７ａに垂直に移動させることによって、例えば、第１のまたは第２のあるいはその両方の表面に垂直に力を印加することによって最も簡単に達成される。

【００４５】

図１４は、別の変形形態を示し、表面１７が表面１５に対して傾けられている。その場合、表面１５と１７との間の離隔距離は、表面１５および１７をお互いに対して相対的に、しかし表面１５の平均面１５ａと平行に移動させることによって実現されうる。図１４でわかるように、表面での所与の位置における距離は、表面１５、１７の相対的移動により線形に減少する。これは、ロール・ツー・ロール装置において実施されてもよい。垂直の操作は、この場合不要であり、このことは、多くの利点および後々開発される応用を有する。

【００４６】

図１１は、本方法を実施するのに適した装置の例である。上に列挙した本方法の特徴と矛盾することなく、この装置１００は、少なくとも以下を備える。

－向かい合った２つの表面１５、１７であって、これらの表面の少なくとも１つが位置決め構造１６を有する、２つの表面１５、１７。そうした表面は、前述したように、それぞれの「第１の層」に関連付けられる。

－２つの表面間に閉じ込められ、または引きずられるナノ物体のイオン性液体懸濁液３０。

－特に、表面１５または表面１７あるいはその両方に結合され、すなわち、動作において、第１の表面を第２の表面に対して相対的に移動させる様々な位置決め手段１０２～１０８。

【００４７】

表面は、液体との接触を受けて、自然に帯電する。例えば、表面のグループを乖離するさらなる化学的手段が含まれてもよい（さらなる詳細を次節で示す）。必要な場合、これらの表面電荷は、外部電界によって支持されることさえあってもよい。したがって、電気的制御手段を任意選択で提供することができる。さらなる電界は、帯電した表面の非対称性を支持することができる。デルタＶ／ｄのオーダの、すなわち約０．１Ｖ／１００ｎｍのオーダの電界が典型的には必要である。特に、電気的制御手段を使用して、ポテンシャル・エネルギの最小値を受容表面の方へ移動させるのを支援することができる。さらなる詳細については、節４に示す。

【００４８】

より一般に、この装置１００は、本発明において考えられるような方法に関して本明細書に記載される任意の特徴をさらに備えることができる。

【００４９】

上記の実施形態について、添付図面を参照して簡潔に説明した。好ましい実施形態において、上記の特徴のいくつかの組み合わせが考えられてもよい。詳細な例を次節に示す。

【００５０】

２．具体的な実施形態

本節で論じる具体的な実施形態は、高アスペクト比のナノ物体の配置に特に適している。毛細管に基づく組立体は、三相の接触線における高い密度によって整列した位置決めを妨げる稠密な構成が形成されるため、そうした粒子に対しては機能しない。したがって、前節で論じたようなトラッピング力を使用して、ナノ物体をトラップし、位置決め構造によって決定される好ましい方向にあらかじめ配列するのが好ましい。これらのトラップされたステートから、粒子は、次に、ターゲット表面の方へ近づけられ、最終的に閉じ込め表面に近づくことによって付着接触する。

【００５１】

この配置方策の処理フローを図１～６に示す。手短に言えば、位置決め構造は、埋め込み構造１２よりも典型的にはさらに厚いポリフタルアルデヒド（ＰＰＡ）の薄膜１４（～９０ｎｍ）内に書き込まれる。組立処理については、カバー・スリップ１８の表面を、ＰＰＡ表面１５まで２００ｎｍ未満の距離にまで近づける。毛細管力または電気泳動力あるいはその両方を用いて、ナノワイヤの水性懸濁液を残っているギャップに引きずり込む。粒子は、位置調整され、形成されたポテンシャル最小値３２にトラップされる（図３）。次いで、外部力場が印加され、付着接触が確立されるまで、最小値３２を受容表面１５の方へシフトする（図４）。図３および４に示すステップは、恐らく最も重大なステップであり、後でもっと広範囲に論じる。基板（図５）を乾燥し、洗い流した後、ポリマを、１５０°Ｃを超える温度、すなわちポリマの天井温度で蒸発させる（昇華させる）（図６）。本発明者は、そうした処理によって、ナノ粒子の理想的な横方向位置が器具の分解能限界（～２－３ｎｍ）の範囲内に維持されることを実験的に確認した。その結果、非常に細長いナノ物体を、基板表面１５上の既存の構造１６に対して配置することができる。

【００５２】

上で概説したステップを繰り返して、ナノ物体の第２の層を位置および配向において同様の精度で第１の層の上部に堆積させることができる。このように、異なるタイプの粒子の組立体を実現することができ、各粒子のタイプの機能性を活用することができる。

【００５３】

以下でより詳細に論じるように、機械的な器具を構築することができ、それによってカバー・スリップを真下にある基板と平行に精密に位置合わせすることができ、ナノメートルの精度で近づけることができる。器具は、好ましくは高品質の光学的なアクセスに対して設計され、トラッピング性能をイン・シトゥで調べることができる。その場合、この器具を使用して、表面形態と、湾曲と、閉じ込められたナノ粒子懸濁液による帯電との間の複雑な相互作用を調べることができる。閉じ込めは、カバー・スリップが移動可能なためイン・シトゥで変えることができ、閉じ込め効果を他のパラメータを変えずに調べることができる。

【００５４】

要約すると、本明細書に開示された実施形態は、幾何学的な閉じ込めをトップ・ダウン設計された形態学的な特徴と組み合わせて使用し、低いイオン強度の溶液中で局所的な静電ポテンシャルを操作する。ナノ物体をトラップし、位置合わせする局所的な静電最小値が生成される。第２のステップにおいて、物体を閉じ込め表面に近づけることによって、付着接触させる。位置および配向は、受容基板上の形態学的特徴と一致する形状によってさらに絞り込まれる。配置処理は、ナノ粒子および閉じ込め表面の電荷のみに依存する。（ＤＮＡのような）屈曲性ポリマ上の高アスペクト比のナノワイヤから、場合によっては単一のタンパク質にさえ範囲が及ぶ任意のタイプの帯電物体を使用することができる。下層にある機能構造に精密に位置合わせして配置を行うことができる。いくつかの配置ステップを同様の精度で繰り返すことができる。具体的には、本明細書に記載された方法による高アスペクト比のナノワイヤの配置は、広範囲の科学的および経済的に大きなインパクトのある応用につながり、それらの一部を次節で論じる。

【００５５】

３．応用

前節で論じた方法は、従来の配置方法と比較して以下の独特の特徴を有する。

【００５６】
第１に、配置処理は、トラッピング・ステップと転送ステップとに分離される。これによっていくつかの結果が得られる。細長い、またはより複雑な形状の物体は、物体が基板表面に転送される前に、まず、トラッピング・ポテンシャルによってそれらの平坦な配向に適合することができる。物体に作用する力は、静電ポテンシャルの形状および転送方法によって明確にされる。これによって、脆弱なあらかじめ組み立てられた物体を定められた状態で配置することができる。別のステップによって、捕獲された粒子の特性を分光学的に評価することができる。観察された特性に応じて、粒子を位置付けるべきか、または廃棄すべきかどうかに関する判定を行うことができる。
【００５７】
第２に、受容材料として分解可能なポリマを、およびガイディング表面形態を設計するために走査プローブに基づく方法を使用する。ポリマによって、配置処理を下層にある基板と切り離すことができ、この書き込み方法によって、下層にある特徴に位置合わせすることができる。両方の態様を組み合わせることによって、複数の後続の配置ステップを精密な位置合わせで実現することができる。これらの独特の特徴は、多くの応用に活用することができる。２つの応用例について以下で論じる。
【００５８】
第１の応用は、図１～６または図８に示すように、２つのあらかじめ構造化されたパッド１２の上部にいくつかの半導体または金属のナノワイヤを位置決めすることに関する。それに応じて、本方法によって配置された単一のナノワイヤ２０の電気的特性の測定法を確立することができる。別の実施態様は、ナノワイヤ２０を２つの所定の電極またはパッド両端間に並列におよび高密度に配置することである（図９参照）。そうした組立体は、ＣＭＯＳエレクトロニクスにおいて１４ｎｍのノードに対して現在提案されているＦｉｎＦＥＴの先を行く。実際、（トップ・ダウンで作製された）ナノワイヤ電界効果トランジスタの性能は、平坦なゲートと比較して包み込みゲート（wrapped around gate）の方が静電結合がよいため最先端のＣＭＯＳ技術よりも優れていることが理解できる。両方の実施態様は、基板上にあらかじめ構造化された特徴に対する配置の正確さを実証する。加えて、本位置決め方法のおかげで配置密度の改善を実現することができる。（ほとんどではないにしても）一部の応用において、ワイヤをできるだけ密に配置する必要がある。
【００５９】
第２の応用において、気相－液相－固相成長（vapor-liquid-solid growth）によって成長させた機能ナノワイヤをワイヤの機能性を活用するように位置決めすることができる。機能性は、ヘテロ構造の成長または構築中にドーパント濃度を制御することによって、他の材料に、ナノワイヤの方向に沿って、またはコアシェル構造の形態で径方向に組み込まれてもよい。ナノスケールの寸法によって、格子定数において平面幾何学形状の場合よりもはるかに大きなずれを有する材料の組み合わせが可能となる。これによって、単一のナノワイヤにおいて、電界効果トランジスタ、発光またはハーベスティング・デバイス（harvesting device）などの生成が可能となる。例えば、図１０は、２つの電極両端間に位置付けられた、ゲート酸化膜２０ａおよび金属ゲートのラップ２０ｂを含む軸方向に構造化されたナノワイヤ２０を示す。第２の配置ステップにおいて、金属のナノワイヤ２０ｃは、ゲート金属２０ｂと接触するように位置付けられる。
【００６０】
応用において、内部の機能性が異なるワイヤを、単一の機能を組み合わせてより大きな機能性を実現する作動回路へと組み込むことができる。一例は、電界効果トランジスタのナノワイヤを組み込んで発光ダイオードのナノワイヤを駆動することであろう。したがって、本位置決め方法は、いわゆる「ナノプロセッサ」の作製に取り組むための新しい方法を提供する。
【００６１】
４．装置の例
図１１は、上記のような方法を実施するための可能性のある器具を例示する。カバー・

スリップ１８は、基板１１と油浸／水浸１１１顕微鏡対物レンズ１１０との間のホルダに取り付けられる。基板は、３軸圧電スキャナ１０４、および基板を運動学的ホルダ内に取り付ける３つの圧電ポジショナ１０６によって実現される５自由度の位置決めシステムに取り付けられる。圧電ポジショナ１０６（３０ｎｍの分解能）によって、基板を垂直方向に粗く接近させ平行調整を行う。ギャップ距離の微調整は、圧電スキャナ１０４（１００×１００×１００μｍ）によって行われる。粗調位置決めシステム１０８を使用して、カバー・スリップを基板中のパターニングされた部分に配向することができる。そうした位置決めシステムは、ＳＰＭシステムを改造した構成要素を使用して得ることができる。

【００６２】

カバー・スリップは、光リソグラフィによってパターニングされてもよく、２０－５０μｍだけ隆起した２００－５００μｍ径の中央アイランドを含む。残りの領域の凹部は、２つの表面が１００ｎｍ未満の距離にまで近づくのを妨害するゴミ粒子６０に関する問題を回避するために設けられてもよい。

【００６３】

この器具は、干渉計による距離測定１２０を使用することを特徴としてもよく、それによって、器具の安定性、ならびに液体で充填することによって、および閉じ込め表面に近づくことによって引き起こされる圧力に対する反応をテストすることができる。このように、垂直方向の１ｎｍ未満の機械的安定度および５０ｎｍ未満の接近距離を考えることができる。粒子の位置および運動は、光学的に検出される。金のナノ粒子に対しては、暗視野顕微鏡法を使用してプラズモン反応を活用することができる。半導体の粒子に対しては、散乱光または蛍光を検出することができる。これらの長さスケールでの粒子のブラウン運動は、１ｍｓ未満の露光時間を必要とする。器具の時間分解能が単一粒子の運動を追跡するのに必要十分であるのが最適である。しかし、粒子位置からポテンシャルの形状を求めるためには、位置の統計的測定で十分である。高速度カメラを含む顕微鏡を有利に使用することができ、高忠実度の検出経路が可能となるのが好ましい。

【００６４】

動作において、基板の位置決めは、圧電モータ駆動のｘ－ｙ粗調位置決めシステム１０２、微調圧電ステージ１０４、ならびにサンプルの面およびカバー・スリップ１８を位置合わせする３つの圧電ポジショナ１０６を使用して実行される。カバー・スリップは、ホルダに取り付けられ、垂直方向１０８に手動で移動させることができる。カバー・スリップは、ゴミ粒子、およびサンプルの不完全な平坦性に対応するために、２０～５０μｍの深さを有する凹部１８ａを有する光学的な視野窓の外側がエッチングされる。顕微鏡１１０を用いて、蛍光または光散乱検出を使用して、粒子位置を決定する。基板平面に対するカバー・スリップの配向は、レーザ干渉計１２０を用いて測定される。

【００６５】

変形形態において、本発明による装置（および方法）は、図１１の器具に関して列挙した特徴のいずれか１つまたはいくつかを含むことができる。

【００６６】

５．技術的な実施態様の詳細

５．１表面特性評価および粒子ポテンシャルの決定

流体スリットに現れる、表面および粒子のポテンシャルについてのイン・シトゥの特性評価は、観察される現象を理解するのに有用な場合がある。例えば、電極を器具内に実装して、横方向電界を生成することができる。粒子のゼータ電位は、市販のゼータサイザ（Malvern Instruments）を使用して得ることができる。粒子ポテンシャルがわかると、閉じ込められた（構造化されてない）ナノスリット中の電気泳動／浸透圧流測定において粒子速度から閉じ込め表面のポテンシャルを抽出することができる。最初に、２つの閉じ込めガラス面を使用してガラス面のポテンシャルを求めることができる。この知識を使用して、閉じ込めポリマ表面のポテンシャルをポリマおよびガラス面を使用するシステムにおいて求めることができる。

【００６７】

粒子溶液に対する２つのタイプの安定化方策を特にここで使用することができる。例えば、有機界面活性剤によって安定化されたナノ粒子を使用することができる。このタイプのナノ粒子溶液は、容易に市販入手可能（Nanopartz、米国）であり、例えば、セチル・トリメチルアンモニウム臭化物（ＣＴＡＢ）によって安定化される。また、界面活性剤は、表面に単層／多層が形成されることが期待されるので、ポリマ表面の電荷密度を制御する単純な方法を提供する。ＣＴＡＢにより安定化されたＡｕナノロッドの安定性に関するいくつかの実験結果によって、このことが裏付けられた。ポリマ表面の非特異的な吸着は、観察されなかった。有機安定剤を使用する欠点は、それらが組立後に機能的な性能に影響を及ぼし、したがって、除去が必要になる場合があるということである。有機安定剤は、例えば、有機物が、組み立てられた粒子と表面の電極との間に残る場合、接触問題を引き起こす可能性がある。しかし、金のナノ粒子に関する最初の実験では、これは、観察されなかった。

【００６８】

また、有機分子を避けるために、純粋に静電的に安定化された粒子溶液を使用してもよい。そうした粒子を密に詰め込んだ組立体において導電率が改善されることが示された。イオンによって有機安定剤を交換することができ、広範囲の粒子に対して機能する方法が知られている。

【００６９】

また、両方の安定化方法を溶液中のナノワイヤを安定化するために使用することができる。以下に記載するシミュレーションに供給するために測定値を使用することができる。また、測定値は、トラッピング・ポテンシャルの深さを推定し、ナノ粒子の配置に対する方策の指標となる初期値を与える。

【００７０】

５．２粒子サイズ／電荷、イオン濃度、およびトラップ幾何学形状／閉じ込めに対するトラッピングの振舞い

システムのトラッピング・ポテンシャルは、調査に値する可能性がある。例えば、ｔＳＰＬ方法によって提供される独特のパターニング能力に頼って三次元で高精度の形態学的構造を画成することができる。変形形態において、ナノ・インプリント・リソグラフィ技法を使用して、そうした構造を高スループットで生成することができる。トラッピング・ポテンシャルは、実空間および実時間においてナノ粒子の位置を測定することによって求められてもよい。これは、高い開口数（ＮＡ）の対物レンズを使用し、粒子からの散乱光を検出して光学的に行うことができる。

【００７１】

別の可能性のある関心事は、湾曲により引き起こされるトラッピング・ポテンシャルの観察であり、このトラッピング・ポテンシャルが形態学的に引き起こされる静電最小値とどのように相互作用するかである。モデリング結果を用いたフィードバック・ループにおいて、トラッピング・ポテンシャルを引き起こす表面形態および電荷密度を一緒に最適化することができる。これによって、例えば、高アスペクト比を有するナノ物体の安定したトラッピングが行われる最適条件を見出すことができる。

【００７２】

５．３トラッピング、転送および固着の基本

節５．２および５．４で論じた結果を理解するために、理論的なモデリング作業およびコンピュータ・シミュレーションを、例えば、市販のパッケージＣＯＭＳＯＬ（Ｒ）を使用して実行することができる。これによって、湾曲により引き起こされるトラッピング・ポテンシャルを含むトラッピング・メカニズムを理解することができる。加えて、トラッピング・ポテンシャルに対する外部場の影響を調査することができる。ＣＯＭＳＯＬ（Ｒ）を関連する応用に対して使用する仕方についての一部のレシピは、文献において入手可能である。基本的な考え方は、界面における電荷の中立性および電荷不変の境界条件を使用して、三次元で非線形のポアソン・ボルツマン方程式を解くことである。

【００７３】

５．４転送方法の技術的な実施態様の詳細の確立

ここで、目標は、外部操作によって、トラップされた粒子を転送して基板と付着接触することができるように流体スリットにおける条件を最適化することである。これを実現する方法は、モデリングにおいて得られた結果および節５．３で引き合いに出したシミュレーション作業の恩恵を受けることができる（しかしそれらには依存しない）。粒子と（平坦な）表面との間に作用する力は、よく知られたデルヤーギン、ランダウ、フェルウェイおよびオーバービーク（ＤＬＶＯ）理論によって与えられる。この理論は、非常に小さな離隔距離では、ファンデルワールス引力が静電斥力に優り、したがって、ナノ物体が接触するように引きつけられうることを予測する。しかし、そうした距離に近づくためには、反発静電相互作用を克服する必要がある。そうした転送処理のうまくいった実施態様が過去に示されている。例えば、８０ｎｍの金のナノ粒子のうまくいった転送は、最大１５ｐＮの（計算された）力に相当する、３５０μＷ～１０ｍＷの範囲のレーザ・パワーを使用して実現された。転送を実現する好ましい方法は、このステップのために純粋に静電力も使用することである。これによって、確実にトラッピングおよび配置ステップが粒子の電荷のみに依存し、他の物理的性質には依存しなくなる。以前に論じたように、考え方は、受容ＰＰＡ表面１５およびカバー・スリップ表面１７上の非対称の電荷密度を使用することである。その場合、ポテンシャル最小値を、より低いポテンシャル値を有する側の方へシフトすることができる。

【００７４】

一定の表面ポテンシャルおよび平坦な幾何学形状を仮定して、静電ポテンシャルを解析的に計算することができる。（標準的な表記を使用して）１／３k_BＴ／ｅの表面ポテンシャルを有するｄ＝０に位置する第１の表面と１k_BＴ／ｅの表面ポテンシャルを有するd_S＝２、３、５、および１０κ^{-1}（κ^{-1}はデバイ長である）の第２の表面との間に生じるポテンシャルψを図１２の上部パネルにプロットする。したがって４つのカーブは、１０、５、３、および２κ^{-1}の表面離隔距離に相当する。下側のパネルは、接近距離κｄの関数としてのポテンシャル障壁Δψを示す。

【００７５】

大きな距離に対しては、ポテンシャルは、あるタイプの粒子をトラップするのに十分に強い。表面間の距離が減少すると、図１２の下側パネルでわかるようにポテンシャル障壁が小さくなる。粒子の電荷ｚに応じて、この障壁は、熱エネルギが障壁に打ち勝つために、k_BＴ／（ｚ　ｅ）の数倍にまで低くならなければならない。図１２の計算のために保持されたパラメータを用いると、障壁は、～１．７５κ^{-1}で消滅する。これらの数字を現実の寸法に変換するためには、塩濃度に対する値を代入する必要がある。例えば、トラッピングの実験において得られたパラメータを使用することができる。深いトラッピング・ポテンシャルに対する塩濃度は、０．０７ｍＭ（ミリモル）であることがわかり、これは、１価のイオンに対してκ^{-1}＝３６ｎｍのデバイ長となる。これらの塩濃度では、ポテンシャル障壁は、ｄが～５κ^{-1}＝１８０ｎｍの距離で完全に現れている（図１２参照）。粒子を転送してうまく付着接触させるためには、表面を～７２ｎｍの距離にまで近づけなければならない。これらの計算は、粒子を転送するための条件が幸運にも粒子の安定したトラッピングのための条件と両立性を有することを示す。シラン処理によってカバー・スリップ上の電荷をさらに調整することができる。１２０ｍＶよりも大きなポテンシャルを実現でき、ｐＨ値によって調整することができる。ポリマ上の正確な電荷は、事前にはわからず、節５．１で論じたように、求める必要がある場合がある。この電荷は、その他の方法で推定されてもよい。第１の試みにおいて、ＣＴＡＢ界面活性剤の濃度を使用して、ポリマ上の表面電荷を調整することができる。本発明者が実行した実験において使用したコロイド溶液は、０．１ｍＭのＣＴＡＢ濃度を有していた。比較的高い濃度を使用することによって、毛細管の組立方法を使用する三相の接触線での溶液の安定性が保証される。溶液は、少なくとも０．０１ｍＭ濃度で安定であることが確かめられた。

【００７６】

５．５埋め込まれた構造との位置合わせ

前述したように、正確なＳＰＬのような位置決め技法を使用することができる。

【００７７】

５．６積み重ねられた組立体

以前に言及したように、前の配置ステップで組み立てられたナノ物体上に配置処理を繰り返したい場合がある。ここでの疑問は、第１の層との付着接触がＰＰＡによる後の被覆が可能となるのに十分に安定であるかどうかである。物体の第１の層を被膜する代替の方法は、ＰＰＡ膜をテンプレート表面から浮かせることである。このステップによって、後のステップをまったく同様に行うことができる。配置処理において十分な歩留が達成される場合、積み重ねを数回繰り返すことができる。

【００７８】

第１の応用は、図１～６および８に示すように、第１のステップで２つの電極またはパッド両端間に金属のナノワイヤを位置付けることからなる。その場合、このナノワイヤに対する２つの追加のコンタクトは、第１のワイヤと交差する２つの追加の金属ワイヤを配置し、２つの追加電極に取り付けることによって確立されてもよい。それに応じて、本配置方法を使用して、四点測定を確立することができる。必要な場合は、交差したワイヤの接触抵抗を調べて改善することができる。ここで収集された見識を節５．８で使用することができる。

【００７９】

５．７再使用可能なマスタ方策

次に、配置精度を犠牲にして、ナノ物体の高スループットの配置を実現するために並列配置およびプリント・スキームの設計が望まれる場合がある。一実施態様において、形態学的な特徴を既存のドライ・エッチング法を使用して、カバー・スリップ内にエッチングすることができる。以下のシーケンス、すなわち、トラッピング、付着接触への転送、新しいプリント位置への移動、電気泳動力によるギャップの再充填を実現することができる。これによって、粒子を繰り返し組み立てることで大面積をパターニングすることができる。あるいは、トラッピング・ポテンシャルを引き起こす表面形態を、カバー・スリップ内に（図１３参照）、またはシリコンのマスタ・ウェーハ内に（図１４参照）作製することができる。

【００８０】

図１３の実施形態では、カバー・スリップは、形態学的にトラッピング・ポテンシャルを引き起こすためにパターニングされている。ギャップ距離を減少させることによって堆積した後、テンプレートを異なる位置に配置することができる。ギャップは、距離を増加させることによって、または電気泳動手段を使用することによって、あるいはその両方によって粒子で再充填される。配置を新しい位置で繰り返すことができる。

【００８１】

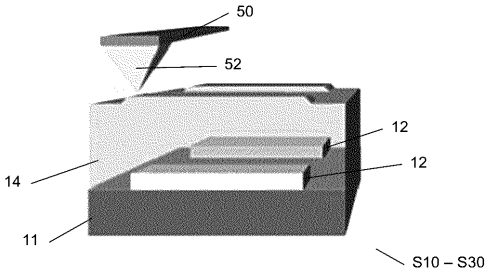
図１４に関して、傾けたカバー・スリップを使用して、シリコン・マスタ・テンプレート内への直接組み立てを実現することができる。マスタ内の粒子は、後のステップで受容表面（図示せず）上にプリントされ、マスタを再使用することができる。

【００８２】

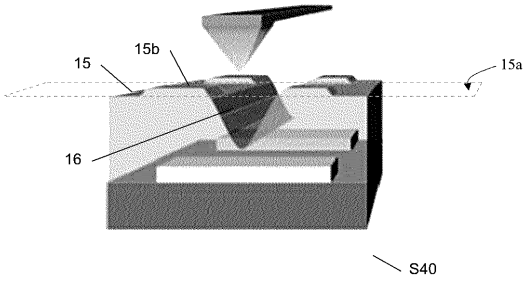
ガイディング・ポテンシャルを同様に成形することができ、基板への転送を同様の手段によって実現することができる。両方の手法は、トラッピングのために使用される形態学的形状が複数回再使用することができるという共通点を有する。第１のケース（図１３）では、構造は、ポテンシャル最小値を形成するために使用されるだけである。粒子は、ポテンシャル最小値を介して対向面上に転送される。第２のケース（図１４）では、粒子は、マスタ・スタンプ内へ組み立てられ、次に、乾燥後、プリント・ステップにおいて受容表面にプリントされる。したがって、トラッピングおよびプリント・ステップは、いずれも上で論じたように連続して、または図１４に示すように傾けたカバー・スリップを表面の端から端までスライドさせることによって行われる。傾けたスリップを使用すると、ギャップがスライド移動中に縮小するので垂直方向移動は不要である。したがって、潜在的に高スループット値で大面積をパターニングすることができる。

【００８３】
５．８：機能回路の組立体
別の例として、図１０のように、十字型に配置され、表面にあらかじめパターニングされた電極に位置合わせされた、積み重ねられた機能性ナノワイヤによる機能回路をパターニングすることができる。回路は、異なる機能性のための異なるタイプのワイヤ、例えば、内蔵ＦＥＴおよび電気的接続のための金属のまたはシリサイド化されたワイヤを備える半導体ワイヤを実装することができる。
【００８４】
本発明は、ある実施形態に関して記載されているが、本発明の範囲から逸脱せずに、様々な変更を行うことができ、均等物に置き換え可能であることは当業者には理解されるであろう。加えて、本発明の範囲から逸脱せずに、具体的な状況または材料を本発明の教示に適合させるために多くの修正を行うことができる。したがって、本発明は、開示された具体的な実施形態に限定されず、本発明は、添付の特許請求の範囲内にある実施形態をすべて含むことが意図されている。その点において、選択された実施形態によっては、添付図面に示された構成要素／ステップがすべて含まれる必要があるわけではない。加えて、明示的に上で論じた以外の多くの変形形態を考えることができる。例えば、他の材料を他の離隔距離と同様に使用することができる。
【符号の説明】
【００８５】
１１　基板
１１０　顕微鏡対物レンズ
１１１　油
１１２　レーザ・ビーム
１１４　顕微鏡対物レンズ位置決め手段
１２　パッド（第１の表面の既存の構造）
１２０　干渉計による距離制御
１４　除去可能な材料（ポリフタルアルデヒド）の層
１５　第１の表面
１５ａ　第１の表面の平均面
１６　位置決め構造（第１の表面の溝）
１６ａ　位置決め構造（第２の表面の溝）
１７　第２の表面
１７ａ　第２の表面の平均面
１８　カバー（カバー・スリップ）
１８ａ　カバー凹部
２０　ナノ物体
３０　イオン性液体懸濁液
３１　ポテンシャル・エネルギ
３２　ポテンシャル・エネルギ最小値
５０　Ｓｐｌカンチレバー
５２　Ｓｐｌプローブ・チップ先端部
６０　ゴミ
１００　装置
１０２　粗調位置決め手段（圧電モータ駆動ｘ－ｙ粗調位置決めシステム）
１０４　微調位置決め圧電ステージ（圧電スキャナ）
１０６　圧電ポジショナ
１０８　粗調（第２の表面）位置決め手段
ｄ　表面間の距離
ｄ’　低減された表面間の距離

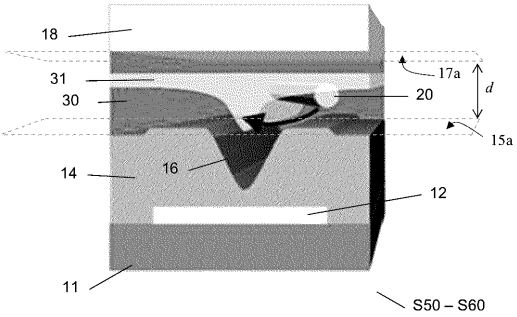
【図１】



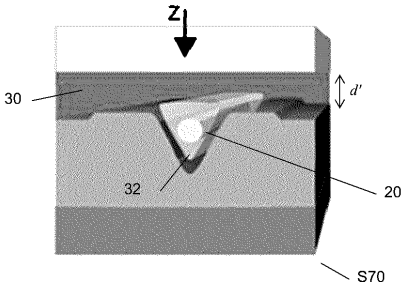
【図２】



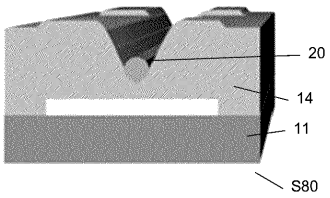
【図３】



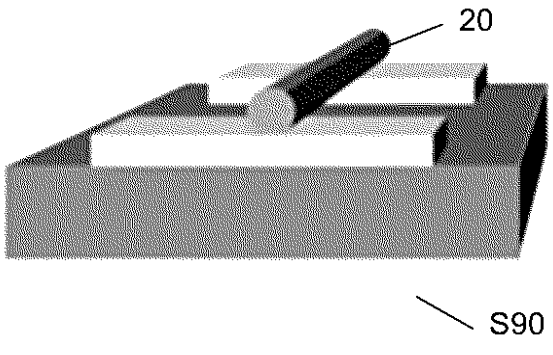
【図４】



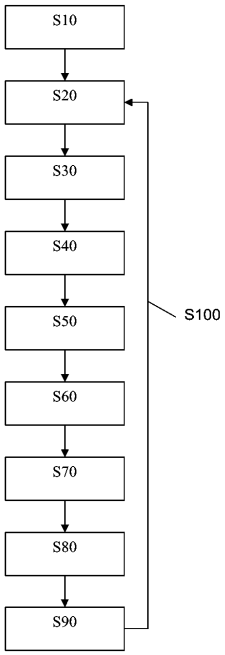
【図５】



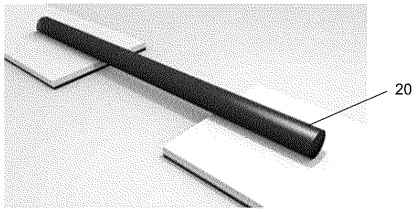
【図６】



【図７】



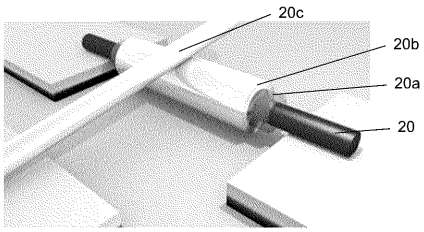
【図８】



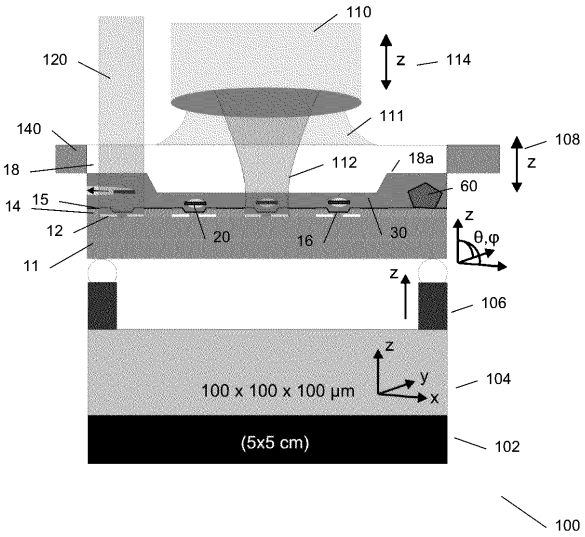
【図９】



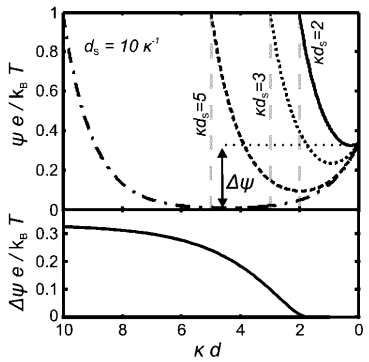
【図１０】



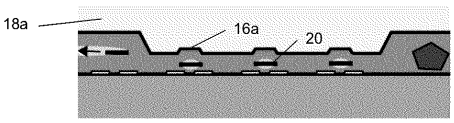
【図１１】



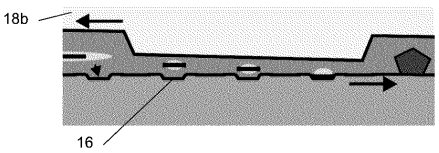
【図１２】



【図１３】



【図１４】



フロントページの続き

(74)代理人 100112690
弁理士 太佐 種一
(72)発明者 ドゥエリク、ウルス、ティー
スイス シーエイチ－８８０３ チューリッヒ リュシュリコン ゾイマーシュトラーセ ４
(72)発明者 ホルツナー、フェリックス
スイス シーエイチ－８８０３ チューリッヒ リュシュリコン ゾイマーシュトラーセ ４
(72)発明者 クノール、アルミン、ダブリュー
スイス シーエイチ－８８０３ チューリッヒ リュシュリコン ゾイマーシュトラーセ ４
(72)発明者 リース、ヴァルター、ハインリッヒ
スイス シーエイチ－８８０３ チューリッヒ リュシュリコン ゾイマーシュトラーセ ４

審査官 小川 将之

(56)参考文献 国際公開第２００６／０８５５５９（WO，Ａ１）
特開２００８－２６００７３（ＪＰ，Ａ）
特開２００３－３３２２６６（ＪＰ，Ａ）
特開２００７－１５８１１７（ＪＰ，Ａ）
特開２００９－２９２６６４（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０１Ｌ ２９／０６
Ｂ８２Ｙ ４０／００
Ｈ０１Ｌ ２１／３３６
Ｈ０１Ｌ ２９／７８６