

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6776267号
(P6776267)

(45) 発行日 令和2年10月28日(2020.10.28)

(24) 登録日 令和2年10月9日(2020.10.9)

(51) Int.Cl.	F 1
B82B 3/00	(2006.01) B82B 3/00
C01G 49/02	(2006.01) C01G 49/02
C01B 33/12	(2006.01) C01B 33/12
B82Y 20/00	(2011.01) B82Y 20/00
B82Y 40/00	(2011.01) B82Y 40/00

請求項の数 10 (全 10 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2017-556563 (P2017-556563)
(86) (22) 出願日	平成28年4月27日 (2016.4.27)
(65) 公表番号	特表2018-525234 (P2018-525234A)
(43) 公表日	平成30年9月6日 (2018.9.6)
(86) 國際出願番号	PCT/US2016/029461
(87) 國際公開番号	W02016/176267
(87) 國際公開日	平成28年11月3日 (2016.11.3)
審査請求日	平成31年2月14日 (2019.2.14)
(31) 優先権主張番号	62/153, 228
(32) 優先日	平成27年4月27日 (2015.4.27)
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国(US)

(73) 特許権者	506115514 ザ リージェンツ オブ ザ ユニバーシティ オブ カリフォルニア アメリカ合衆国、カリフォルニア州 94607-5200, オークランド、フランクリン ストリート 1111, 12番 フロア
(74) 代理人	100094569 弁理士 田中 伸一郎
(74) 代理人	100088694 弁理士 弟子丸 健
(74) 代理人	100103610 弁理士 ▲吉▼田 和彦
(74) 代理人	100084663 弁理士 箱田 篤

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】異方性ナノ構造をベースにした磁気同調可能なフォトニック結晶

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

磁気同調可能なフォトニック結晶を形成する方法であって、

(a) 異方性形状の前駆体ナノ粒子を合成するステップと、

(b) 前記異方性形状の前駆体ナノ粒子をシリカで被覆して複合構造体を形成するステップと、

(c) 化学反応によってステップ(b)で得られた複合構造体中の前記異方性形状の前駆体ナノ粒子を磁性ナノ材料へ変換することにより、前記複合構造体を異方性形状の磁性ナノ粒子へ変換するステップと、

(d) 溶媒中で前記異方性形状の磁性ナノ粒子をフォトニック結晶へ集合させるステップと

を含み、前記異方性形状の前駆体ナノ粒子がオキシ水酸化鉄ナノロッドである、方法。

【請求項2】

前記異方性形状の前駆体ナノ粒子を被覆するステップ(b)が、

(b1) オルトケイ酸テトラエチルを、蒸留水、イソプロパノール、アンモニア、および前記異方性形状の前駆体ナノ粒子の混合物に添加して、前記複合構造体を形成するステップと、

(b2) 前記複合構造体を遠心分離によって単離するステップとを含む、請求項1に記載の方法。

【請求項3】

10

20

前記複合構造体を異方性形状の磁性ナノ粒子へ変換するステップ(c)が、
(c 1)前記複合構造体を加熱するステップと、
(c 2)前記複合構造体を還元剤で還元して前記複合構造体を磁性にするステップと
を含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

(e)前記磁性ナノ粒子を、超音波処理によって再度分散させるステップと、
(f)前記磁性ナノ粒子にサイズ選別を施すステップと、
(g)非分散性の凝集体を遠心分離によって廃棄するステップと
をさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

前記磁性ナノ粒子をフォトニック構造へ集合させるための溶媒が、水、エタノール、グリコール、或いは他の極性溶媒または無極性溶媒である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 6】

前記オキシ水酸化鉄ナノロッドが、
異方性形状の前駆体ナノ粒子の溶液系合成 (solution-based synthesis)
により合成される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

前記オキシ水酸化鉄ナノロッドが、
(h)脱イオン水中に塩化鉄(III)を溶かすステップと、
(i)前記脱イオン水中に溶かした塩化鉄(III)中の鉄カチオン濃度を調整するステップと、
(j)遠心分離後に前記脱イオン水中に溶かした塩化鉄(III)から不溶性沈殿物を廃棄して上澄みを形成するステップと、
(k)前記上澄み液を加熱してオキシ水酸化鉄ナノロッドを形成するステップと
により合成される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

(m)前記オキシ水酸化鉄ナノロッドを遠心分離によって単離するステップをさらに含む、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

(n)前記オキシ水酸化鉄ナノロッドの表面をポリアクリル酸で官能化するステップをさらに含む、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 10】

前記上澄み液の加熱温度が、81から90までの範囲の温度を含む、請求項 7 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、異方性ナノ構造をベースにした磁気同調可能な (magnetically tunable) フォトニック結晶を形成する方法に関するものである。

【背景技術】**【0002】**

コロイド集合体は、物理的周期構造との光相互作用を操ることによって人工構造色をつくり出すために広く研究されてきた。構造色は、オパール、鳥の羽根、および蝶の鱗粉など自然界で容易に見つかり、従来の顔料または染料とは異なって、輝く玉虫色であり、金属的光沢であり、光退色しない。大抵のコロイド集合体方法は、オパールの形成を模倣し、単分散コロイド球から最密充填構造をつくる。しかし、生物系は、プレートおよびロッドなどの異方性モチーフの非最密充填規則的集合体 (non-close-packed ordered assembly) を含むことが多く、したがって強い角度依存および偏光効果を含んだ、より複雑な構造色応答を顕著に示す。コロイド集合体の異方性ビルディングブロックを用いることにより、フォトニック構造を潜在的につくり出すことが期待されるので、ポリスチレンおよび

10

20

30

40

50

ZnSなどの長形粒子を組織することが試みられてきた。とはいえる、集合体方法がむしろ慣習的であり、得られた結晶は、ほぼ最密充填され、球状粒子からのものほど特有のフォトニック応答を示さない。

異方性粒子の重要な利点の一つは、異方性粒子が、形状依存性の物理的性質および化学的性質をしばしば有することであり、それによって、得られる規則格子構造(superstructure)の集合的性質を操るためのより多くの自由度が加わることになる。このため、一般にフォトニック特性の転換によって静的構造変化または動的構造変化を成し遂げる場合応答コロイドフォトニック構造を製造することに特に関心をもたれる可能性がある。しかし、大抵、高品質の異方性ビルディングブロックが入手困難であるため、かつ集合させ、同調させるための有効なメカニズムが欠如しているため、この方向の研究は非常に制限されてきた。10

【発明の概要】

【0003】

磁気同調可能なフォトニック結晶を形成する方法であって、1種または複数の、異方性形状の前駆体ナノ粒子を合成するステップと、1種または複数の異方性前駆体ナノ粒子をシリカで被覆して複合構造体を形成するステップと、化学反応を介して1種または複数の異方性前駆体ナノ粒子を磁性ナノ材料(magnetic nanomaterial)へ変換するステップと、溶媒中で異方性磁性ナノ粒子をフォトニック結晶へ集合させるステップとを含む、方法が開示されている。

例示的な一実施形態によれば、1種または複数の異方性前駆体ナノ粒子は、オキシ水酸化鉄(FeOOH)ナノロッドである。20

【図面の簡単な説明】

【0004】

【図1(a)】典型的なFeOOHナノロッドのTEM画像である。スケールバー200nm。

【図1(b)】このFeOOHナノロッドをシリカで被覆し、次いでH₂中で還元することによって得られた磁性ナノ柱円体のTEM画像である。スケールバー200nm。

【図1(c)】ナノ柱円体の対応する磁気ヒステリシスループを示す図である。

【図2(a)】磁場中のナノ柱円体の自発的配列の略図である。

【図2(b)】強度を変化させた、垂直および平行の磁場中のフォトニック構造の反射スペクトルを示す図である。30

【図2(c)】光の方向に対して方向を変化させた磁場中のフォトニック構造の反射スペクトルを示す図である。

【図2(d)】非理想的な線形ハルバッハ配列中で、扁平なガラス管に封入されたナノ柱円体のフォトニック応答を示すデジタル写真である。スケールバー5mm。

【図3(a)】磁場がない場合の、様々な体積分率のナノ柱円体のコロイド分散液の反射スペクトルを示す図である。

【図3(b)】体積分率勾配を有する、ガラス毛細管内のナノ柱円体分散液のデジタル画像である。

【図3(c)】磁場がある場合とない場合の、フォトニック構造の反射波長の、ナノ柱円体の体積分率に対する依存性を示す図である。40

【図4(a)】典型的なFeOOHナノロッドのTEM画像である。

【図4(b)】このFeOOHナノロッドをシリカで被覆し、次いでH₂中で還元することによって得られた磁性ナノ柱円体のTEM画像である。スケールバー200nm。

【図4(c)】強度を変化させた、垂直および平行の磁場中のフォトニック構造の反射スペクトルを示す図である。

【図4(d)】光の方向に対して方向を変化させた磁場中のフォトニック構造の反射スペクトルを示す図である。

【図4(e)】非理想的な線形ハルバッハ配列中で、扁平なガラス管に封入されたナノ柱円体のフォトニック応答を示すデジタル写真である(スケールバー5mm)。50

【発明を実施するための形態】

【0005】

例示的な一実施形態によれば、非常に均質な異方性コロイド橢円体への特有の合成で有益である集合体が開示されている。均質な磁性橢円体は直接入手できないので、初めに均質なオキシ水酸化鉄(FeOOH)ナノロッド(図1(a))を合成し、次いでそれらをシリカで被覆して複合橢円体を形成し、最後に還元によってFeOOHを磁性金属鉄へ変換することによる、間接的手法がとられた。

例示的な一実施形態によれば、この場合、シリカ被覆は複数の重要な役割を担う可能性がある。第1に、シリカ被覆により、可視スペクトルでフォトニック応答をもたらすのに好適なサイズ範囲まで、FeOOHナノロッドの寸法が増加する。第2に、シリカ被覆により、還元中にナノロッドが崩壊するのを防ぐ保護メカニズムがもたらされる。FeOOHからFeへの変換は、脱水反応および還元反応を含み、いずれも相当な形態学的变化を引き起こす。図1(b)に示すように、ナノロッドは、還元後、大部分で縮み、小片に崩壊する。しかし、シリカ殻内につくられた橢円状空間のおかげで、全体のロッド形状は十分に保持された。最後に、シリカ層は、ナノロッドの強磁性特性にもかかわらず、一定の距離で磁性ナノロッドを分離し、その磁気引力を制限し、その結果そのコロイド分散液が凝集するのを防ぐスペーサとして作用する。

【0006】

球状ビルディングブロックと比較して、異方性ナノ橢円体特有の特徴は、その集合体が、フォトニック応答の、場の方向に対する強い依存性を示すことである。ナノ橢円体を集合させる場合、球状ビルディングブロックの集合体を説明するのに通常考慮される位置秩序に加えて、配向秩序を考慮すべきである。中に埋め込まれた異方性磁性コアのために、ナノ橢円体の配向を、外部磁場によって容易に制御することができる。図2(a)に図示するように、磁場を印加すると、ナノ橢円体は回転し、その長軸を場の方向に平行に配列する。こうした回転は、集合体の、配向秩序を変化させるだけでなく、位置秩序にも作用し、続いてフォトニック特性も左右される。一方で、場の強度は、どの程度までナノ橢円体が配列することが可能かを決定するので、やはり秩序を完成させるのに重要な役割を担うと考えられる。

【0007】

場の強度および場の方向の影響を調べるために、磁場中で、強度および方向を変えながら、ナノ橢円体を集合させた構造のフォトニック特性を調べた。ナノ橢円体の水性分散液を所望の体積分率まで濃縮して、コロイド結晶への自発的な秩序化を可能にした。図2(b)に、入射光の方向に対して平行および垂直の磁場中のフォトニック構造の反射スペクトルを示す。光に対して垂直な磁場により、ナノ橢円体は同様に垂直配向に配列し、その結果、面間隔は主にナノ橢円体の短軸によって決定され、より短い波長の反射ピークをもたらす。場の方向が、光に対して平行に転じると、面間隔はナノ橢円体の長軸によって決定され、より長い波長の反射ピークとなる。一方で場の強度は、両方の試料について、反射波長よりもむしろ反射強度に影響を及ぼすことが分かる。増大した反射強度は、より強い磁場中の、ナノ橢円体のより良好な配向秩序によってもたらされると考えられる。ナノ橢円体内部に埋め込まれた磁性種の量は制限されているため、ナノ橢円体の回転には、回転抵抗を克服する磁気トルクを可能にするほど十分に高い磁場が必要である。場の方向が固定される場合、場の強度を変えることによって反射波長は変わらない。主に、相対的に厚いシリカ被覆によって磁性ナノロッドが有効に分離されているため、ナノ橢円体間の磁気相互作用の、集合体の面間隔に対する寄与は、ほぼないと考えられる。

【0008】

フォトニック特性の同調が場の強度変化による面間隔の制御によってのみ得られる、球状粒子を用いて集合させた従来のコロイド結晶とは異なり、場の方向の同調により、ナノ橢円体の同時回転がもたらされ、それによってさらに集合体の面間隔ならびにそのフォトニック特性が変わることになる。例示的な一実施形態によれば、ナノ橢円体を集合させた構造のフォトニック特性は、回転磁場中で調べられた。図2(c)に示すように、反射ピ

10

20

30

40

50

ークの波長は、場の方向が入射光に対して垂直であるとき最小値に達し、場が入射光に対して垂直から平行へ転じると、徐々にレッドシフトする。こうした反射波長のシフトは、場の方向の変化に直ちに（1秒未満で）応答し、完全に可逆性である。こうした磁気同調の注目すべき特徴は、磁場が入射光に対して平行または垂直のいずれかであるとき、その2つの端点で最大強度に達するということである。場の方向が、これら2つの端点から離れて転じる場合、相対強度は減少し、中間点（平行方向および垂直方向から約45°）で最小値に達し、反射ピークが全体的にU字型プロファイルとなる。これは、最も強い反射を中間の場の強度でのみ得ることができ、反射ピークのプロファイルが反転させたU曲線である、先に報告された1次元フォトニック鎖（photonic chain）と比較すると、大きな違いである。

10

ナノ構円体集合体の配向依存性は、不均一な（inuniform）場の方向を有する磁場中でフォトニックパターンをつくり出すのに直接使用することができる。図2（d）に示すように、磁化の空間的回転パターンを有する、非理想的な線形ハルバッハ配列によってつくれられた複雑な磁場を受ける場合、扁平なガラス管に封入されたナノ構円体分散液は、青色および緑色の縞模様を含んだ色彩豊かなパターンを表す。

【0009】

配向に加えて、フォトニック集合体の面間隔もまたナノ構円体の体積分率によって決定される。体積分率が減少すると、ナノ構円体間の距離が増し、その結果結晶格子の膨張ならびに反射波長のレッドシフトがもたらされる。磁場がない場合の、様々な体積分率のフォトニック集合体の反射スペクトルを記録し、図3（a）に示した。体積分率が32%から10%へ減少すると、反射ピークは425nmから660nmへシフトした。図3（b）の、3000rpmで5分間遠心分離することによって得られた体積分率勾配を有するナノ構円体分散液において、一貫して虹色のような色彩効果が観察された。

20

【0010】

場の方向と体積分率の両方の相乗効果により、フォトニック集合体の光学特性の、広範囲の同調が可能になる。図3（c）に、平行もしくは垂直の磁場中の、または磁場がない場合の、溶液の体積分率に対するピーク位置の変化をプロットする。興味深いことに、黒色の破線で示されたように、それぞれの体積分率に対して、平行および垂直の磁場中のフォトニック集合体のピーク位置の差異は、一定して約105nmのままである。こうしたピーク位置の差異は、ナノ構円体の長軸と短軸の差異によるものであり、それゆえに体積分率と共に変わるものではない。磁場がない場合、ナノ構円体の配向はあまり均一ではない。したがって集合体の面間隔および反射ピーク位置は、常に平行な磁場中および垂直な磁場中での、面間隔および反射ピーク位置の間である。外部磁場が存在しなくとも、ナノ構円体がそれ自体、試料容器表面に沿って配列する傾向がある。その配向は入射角に対して垂直であり、その結果反射ピークは、相対的に低い体積分率であっても垂直な磁場の場合の反射ピークに近づく（図3（c））。体積分率が増加すると、高い体積分率約32%でのピーク位置の一致によって確かめられるように、磁場がない場合のナノ構円体の配向秩序は増し、結果的に磁場によって配列された場合とほぼ同じになる。増した配向秩序は、ナノ構円体それぞれの排除体積がより高い体積分率で減少することによって説明することができる。ナノ構円体により、配向エントロピーが減少するが、並進エントロピーが増大して、大部分のナノ構円体が平行に配列した、エネルギー的に好ましい構造に到達した。

30

【0011】

例示的な実施形態によれば、場の方向を制御することによって回折特性を広く同調させることができる、磁気応答性フォトニック結晶の新規の類が開示されている。主に、場の強度を制御することによって、フォトニック特性のダイナミックな同調が得られる、球状粒子からつくられた従来のコロイド結晶とは対照的に、非常に均質な形状異方性で、かつ磁性異方性のナノ構円体を集合させた新規のコロイド結晶は、場の方向が入射角に対して垂直であるとき、最小波長で回折し、場の方向が入射角に対して平行に転じるとき、最大波長で回折する。場が入射光に対して平行または垂直のいずれかであるとき、回折強度

40

50

は最大値に達し、場の方向がオフ角に転じると、回折強度は減少し、反射ピークにおいて特有のU字型プロファイルを示す。場の方向の変化に応答した回折のシフトは、瞬間的であり、完全に可逆性である。本発明の系によって、形状異方性ナノ構造および磁性異方性ナノ構造の集合体挙動の研究において、より多くの好機が与えられるだけでなく、様々な色彩表現およびディスプレイ用途に、新規の活性光学成分を構築するための新しい基盤がもたらされる。

【0012】

この方法において、原材料は、 FeOOH ナノロッドに限定されず、他の金属水酸化物、例えば Co(OH)_2 、 Ni(OH)_2 、および Fe(OH)_3 まで拡張することができる。¹⁰ ナノ粒子の形態は、橍円体に限定されず、ロッド、プレート、扁平橍円体などに拡張することができる。ナノ粒子をフォトニック構造へ集合させるための溶媒は、限定されるわけではないが、水、エタノール、グリコール、および他の極性溶媒または無極性溶媒であることができる。ナノ橍円体ベースフォトニック構造を製造する典型的な手段は、以下に列挙されている。

【実施例】

【0013】

(例1)

FeOOH ナノロッドの合成

例示的な一実施形態によれば、方法は、 FeOOH ナノロッドの合成から開始した。⁷ 0nm FeOOH ナノロッドの典型的な合成では、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を脱イオン水 40mL に溶かし、 Fe^{3+} 濃度を 0.02M に調整した。不溶性沈殿物を、 11000rpm で3分間遠心分離した後廃棄した。上澄み液を、三つ口フラスコへ加え、磁気攪拌しながら 81° で12時間加熱した。次いで粒子を、遠心分離によって単離し、水で複数回洗浄し、水 7.2mL 中に分散させた。

FeOOH ナノロッドの表面改質

合成されたままの FeOOH ナノロッドの表面を、初めにポリアクリル酸(PAA)で官能化した。典型的には、上記の FeOOH 分散液 3mL およびPAA溶液($7.2\text{mg}/\text{mL}$) 1mL を、超音波処理中の水 16mL に添加した。次いで、混合物を12時間攪拌して、ナノロッドのPAA官能化を施した。その後、溶液中の過剰なPAAを遠心分離によって取り除き、 FeOOH ナノロッドを水 3mL 中に再度分散させた。³⁰

$\text{FeOOH}@SiO}_2$ ナノ橍円体の合成

PAA改質 FeOOH の水性分散液 3mL をイソプロパノール 20mL に添加し、次いで水酸化アンモニウム(約28質量%) 1mL を添加した。^{70nm} FeOOH ナノロッドのシリカ被覆では、オルトケイ酸テトラエチル(TEOS) $400\mu\text{L}$ を、上記混合物に、TEOSの総量が 2.4mL に達するまで30分毎に添加した。さらに1時間反応させた後、 $\text{FeOOH}@SiO}_2$ ナノ橍円体を遠心分離によって単離し、エタノールおよび水で複数回洗浄し、エタノール中に分散させた。

【0014】

$\text{FeOOH}@SiO}_2$ ナノ橍円体の還元

$\text{FeOOH}@SiO}_2$ ナノ橍円体を、 N_2 保護の下 500° まで加熱し、次いでこの温度で純粋な H_2 によって2時間還元して、 $\text{Fe}@SiO}_2$ ナノ橍円体を生成した。⁴⁰

ナノ橍円体のフォトニック構造への集合

還元されたままのナノ橍円体を、超音波処理によって、水中に30分間再度分散させた。分散液を三つ口フラスコへ加え、 100° で2時間還流させた。ナノ橍円体を遠心分離によって単離し、水で複数回洗浄した。次いでサイズ選別を施し、非分散性の凝集体を、 20000rpm で2分間遠心分離することによって廃棄した。初めに、ナノ橍円体の分散液を、凝集が生じ得る体積分率を超える最大の体積分率まで濃縮し、次いで一定量の水を分散液に添加して所望の濃度にした。

【0015】

(例2)

10

20

30

40

50

より高いアスペクト比のナノ構造も合成することができる。110 nm FeOOHナノロッドの典型的な合成では、FeCl₃・6H₂Oを脱イオン水40 mLに溶かし、Fe³⁺濃度を0.1 Mに調整した。CTAB 1 gを溶液に添加した。不溶性沈殿物を、1100 rpmで3分間遠心分離した後廃棄した。上澄み液を三つ口フラスコへ加え、磁気攪拌しながら90°で18時間加熱した。次いで粒子を、遠心分離によって単離し、水で複数回洗浄し、水36 mL中に分散させた。

合成されたままのFeOOHナノロッドを、同様の手順によってPAAで改質した。シリカ被覆では、TEOS 200 μLを、上記混合物に、TEOSの総量が1.2 mLに達するまで30分毎に添加した。さらに1時間反応させた後、FeOOH@SiO₂ナノ構造を遠心分離によって単離し、エタノールおよび水で複数回洗浄し、エタノール中に分散させた。その後、上記の方法と同様に、ナノ構造をH₂によって還元し、水中に再度分散させ、フォトニック構造に集合させた。集合させたままのフォトニック構造は、やはり角度依存特性を示し、非理想的な線形ハルバッハ配列に配置される場合、虹色のようなパターンを表す。

【0016】

しかし、本発明は、前述され、図面で説明された、実施形態および変形例に限定されるわけではない。様々な変更、改変、および均等物は、添付の特許請求の範囲に記載されている本発明の趣旨および範囲から逸脱することなく、当分野の技術者によって実施されることになるであろう。特許請求の範囲内にある、全てのこうした変更、改変、および均等物は、特許請求の範囲に含まれると明確に意図される。

10

20

【図1】

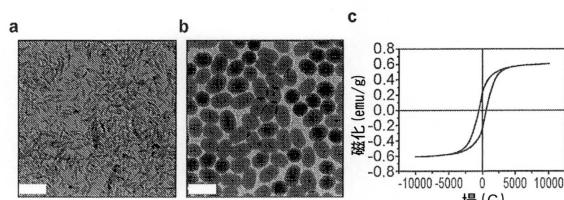


FIG. 1

【図3】

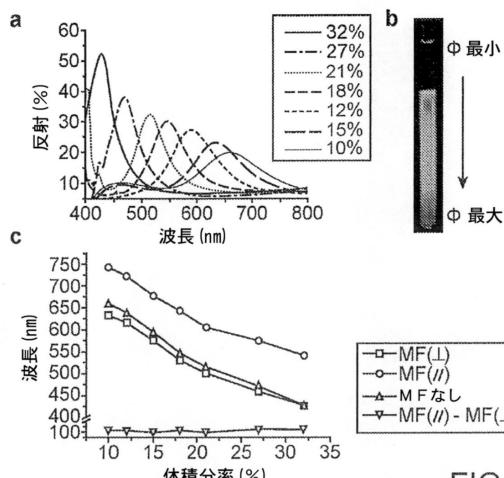


FIG. 3

【図2】

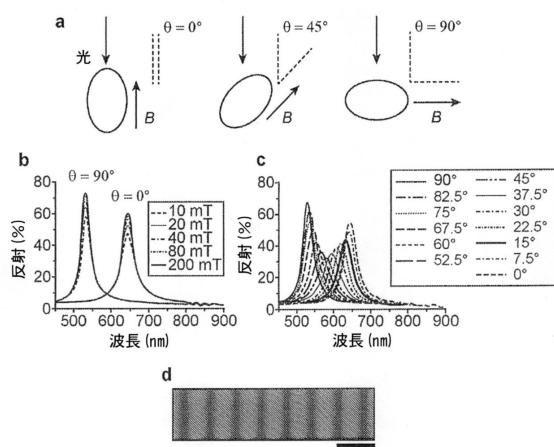


FIG. 2

【図4】

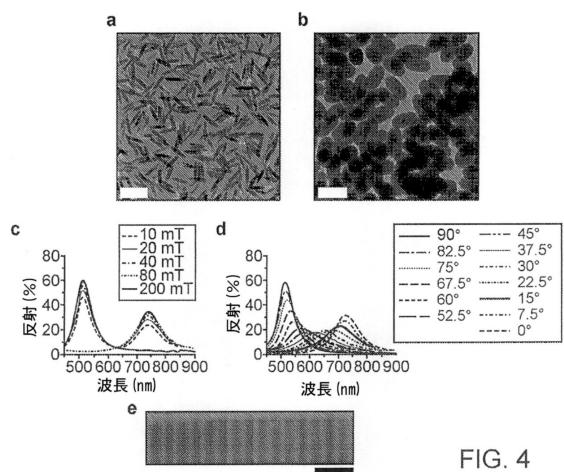


FIG. 4

 フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
 H 01 F 1/00 (2006.01) H 01 F 1/00 181

(74)代理人 100093300
 弁理士 浅井 賢治
 (74)代理人 100119013
 弁理士 山崎 一夫
 (74)代理人 100123777
 弁理士 市川 さつき
 (74)代理人 100111796
 弁理士 服部 博信
 (74)代理人 100123766
 弁理士 松田 七重
 (72)発明者 イン ヤドン
 アメリカ合衆国 カリフォルニア州 92507 リバーサイド ユニバーシティ オフィス ビ
 ルディング 200
 (72)発明者 ワン ミンシェン
 アメリカ合衆国 カリフォルニア州 92507 リバーサイド ユニバーシティ オフィス ビ
 ルディング 200

審査官 右 高 孝幸

(56)参考文献 米国特許第10359678(US, B2)
 米国特許第04096292(US, A)
 米国特許出願公開第2012/0326104(US, A1)
 米国特許出願公開第2013/0105581(US, A1)
 Mingsheng Wang, Le He, Wenjing Xu, Xin Wang, and Yadong Yin, "Magnetic Assembly and Fi
 eld-Tuning of Ellipsoidal-Nanoparticle-Based Colloidal Photonic Crystals", Angewandte
 Chemie International Edition, ドイツ, Wiley Online Library, 2015年 4月29日, vo
 l. 54, pp. 7077-7081
 Jianhui Zhang, Aaron Thurber, Charles Hanna, and Alex Punnoose, "Highly Shape-Selectiv
 e Synthesis, Silica Coating, Self-Assembly, and Magnetic Hydrogen Sensing of Hematite
 Nanoparticles", Langmuir, 米国, ACS Publications, 2009年12月14日, vol. 26 (7)
 , pp. 5273-5278
 Jianping Ge, Howon Lee, Junhoi Kim, Zhenda Lu, Hyoki Kim, James Goebel, Sunghoon Kwon,
 and Yadong Yin, "Magnetochromatic Microspheres: Rotating Photonic Crystals", Journal o
 f the American Chemical Society, 米国, ACS Publications, 2009年 6月15日, vol.
 131, pp. 15687-15694

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
 B 29 C 67 / 24
 B 82 Y 20 / 00, 40 / 00
 C 01 B 33 / 12
 C 01 G 49 / 02
 C 09 K 19 / 54
 G 02 B 1 / 00
 G 02 F 1 / 09, 1 / 13, 1 / 33
 G 06 K 7 / 08, 19 / 02, 19 / 06

H01F 1/00
Google Scholar