

平成 21 年 6 月 17 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19750162
 研究課題名（和文）タンパク超分子を用いた高輝度半導体ナノ粒子の開発・発光特性評価とデバイス応用
 研究課題名（英文）Synthesis, optical characterization and device application of biomineralized high-luminescent semiconductor nanoparticle
 研究代表者
 三浦 篤志（MIURA ATSUSHI）
 奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・研究員
 研究者番号：90379553

研究成果の概要：

発光材料応用に向け、球殻状超分子タンパク質、リステリアフェリチンを利用した CdS ナノ粒子の形成条件の最適化を行い、合成された半導体ナノ粒子の分光特性解析よりフェリチン半導体ナノ粒子の発光効率向上、発光メカニズム・ダイナミクスに関して検討した。また、電荷注入型発光デバイスへの応用検討として、リステリア-CdS ナノ粒子を発光層とする積層デバイスを作製・動作確認を行うと共に、金属酸化物フェリチンナノ粒子での電荷注入メカニズムに関する検討も併せて行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,100,000	0	2,100,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,400,000	390,000	3,790,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：材料化学，機能材料・デバイス

キーワード：フェリチン，半導体ナノ粒子，バイオミネラルリゼーション，走査プローブ顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

新たな無機物ナノ粒子合成手法の一つとして、生物が自身の内外に鉱物（無機化合物）を形成する生体鉱物形成作用，“バイオミネラルリゼーション能”を利用した手法が注目されている。タンパク質“フェリチン”は、生体内においてタンパク内部空孔にバイオミネラルリゼーションにより鉄酸化物ナノパーティクルを形成する事が知られている。1980年代前半にフェリチンをバイオテンプレートとして利用し、内部に低サイズ分散、高収率の金属ナノ粒子を人工的に作製するのに端を発し、タンパク超分子構造をテンプレート

としたナノ粒子の開発、ミネラルリゼーション機構の研究が行われるようになった。当初は主に金属酸化物ナノ粒子の作製に関する研究が行われていたが、最近ではナノ触媒やナノ電子デバイスにおけるデバイス作製の基本パーツへの利用を視野に入れた金属化合物や化合物半導体ナノ粒子の作製も行われている。また、フェリチン以外にもフェリチンと類似構造を持つ小型の球殻状タンパク超分子“リステリアフェリチン”を用いたナノ粒子作製や、内部に空洞を持つタバコモザイクウィルスのロッド状タンパク質を用いたナノロッド作製、さらにはある種の金属にのみ

特異的な親和性を示すポリペプチドモチーフを用いたバイオミネラリゼーションによる無機物ナノ材料の開発が国内外の複数の研究グループにおいて行われている。しかしながら、関連研究のほとんどが無機物ナノ粒子の形成とそのメカニズムに関するものであり、バイオミネラリゼーションによって形成された無機物ナノパーティクルのデバイス開発への応用に関しての研究はほとんど無い。

2. 研究の目的

上述のように、これらの研究のほとんどが材料としての無機物ナノパーティクルの形成とその形成機構の解明に重きを置いた研究であり、フェリチン中でバイオミネラリゼーションによって形成された無機物ナノパーティクルのデバイス開発への応用に関しては、国内外を見渡してもその報告例はごく少ない。さらに、バイオミネラリゼーションによって作製されたナノ粒子の発光材料への応用に関しては、これまで全く報告されていない。発光材料としてのナノ粒子開発という観点からこの超分子タンパク“フェリチン”を捉えると、タンパクが提示するナノメートルサイズの大きさの規制された空間は、発光材料としてのナノパーティクルの特性を決定する粒径をコントロールする上で大きな可能性を秘めていると考えられる。

そこで、本研究では、半導体ナノ微粒子合成にフェリチン内部空孔というナノメートルサイズの規制された空間を半導体ナノ粒子合成の反応場として利用する事により、発光材料として利用可能なサイズのコントロールされた高輝度半導体超微粒子の開発を目指す。

3. 研究の方法

申請者はこれまでの研究において、フェリチンおよびリステリアフェリチン中で形成された種々の金属酸化物(酸化鉄 Fe_2O_3 , 酸化コバルト Co_3O_4 , 酸化インジウム $InOx$ 等), および化合物半導体(セレン化カドミウム $CdSe$, セレン化亜鉛 $ZnSe$)を用いた半導体メモリデバイスの開発を行っており、その過程においてタンパク空孔で形成された CdS ナノ粒子ではナノ粒子からの発光が観測されることを確認している。しかしながらフェリチン CdS ナノ粒子の発光量子収率は $\Phi \sim 0.01$ 以下と非常に低い。発光効率が低すぎるため現状では発光材料としての利用は困難である。これはナノ粒子形成時にタンパク内部の複数の核形成部位から粒子形成が進むため、形成される半導体ナノ粒子が多結晶的になるためであると理解されている。そこで、構成ユニット数24量体のフェリチンに比べサイズの小さなリステリアフェリチン(構成ユニット数: 12量体)(Fig.1)を用いる事で初期核形成部位数を減らし、結晶性の向上による発光効率の向上を試み

る。

	フェリチン	リステリアフェリチン
構造		
構成 サイズ (外径/内径)	24量体 13nm/7nm	12量体 9nm/4.5-5nm

Fig.1 フェリチン, リステリアフェリチンの構造とサイズ

本研究ではタンパク内部のナノサイズの規制された空間を利用し、サイズの均一な高輝度半導体ナノ粒子を作製し、作製されたナノ粒子を発光層とする発光デバイス開発を最終的な目標とする。本研究目標を完遂するために、以下のステップを考える。

1. リステリアフェリチン中での高効率での CdS ナノ粒子合成条件の確率と分光特性の解析と発光効率向上
 2. フェリチン-ナノ粒子埋め込み型発光デバイス開発に向けた、走査プローブ顕微鏡による単一ナノ微粒子への電荷注入特性解析, およびプロトタイプデバイスの作製・評価
- アプローチ 1 ではこれまでに確立されたフェリチンでの粒子形成条件を基に、リステリアフェリチンでの半導体 CdS ナノ粒子形成条件最適化を行う。合成された CdS ナノ粒子の定常状態、及び時間分解分光特性測定を行い、発光メカニズム、ダイナミクスの検討から発光効率向上を試みる。また、照射によるナノ粒子の光エッチングによる粒径減少による CdS ナノ粒子の単結晶化から、発光効率の改善を試みる。

アプローチ 2 では、リステリア- CdS ナノ粒子薄膜を発光層とする積層デバイス構造を作製し、電荷注入による CdS ナノ粒子電荷注入型発光デバイスの作製を試みる。また、積層デバイス構造中のナノ粒子への電荷注入挙動の解明のため、原子観力顕微鏡(AFM)の一種であるケルビンプローブ顕微鏡(KFM)を用い、単一ナノ粒子への電荷注入メカニズムを検討する。測定では CdS ナノ粒子に比べ合成・取り扱いが簡単なコバルト酸化物ナノ粒子内包フェリチンを用いる事で、ナノ粒子への電荷注入メカニズムに関する検討も併せて行い、電圧印加によるナノ粒子への電荷注入挙動の評価を行う。

4. 研究成果

1. ナノ粒子形成条件の確率と形成されたナノ粒子の分光特性

第一ステップとして、リステリアフェリチン中での CdS ナノ粒子形成条件の最適化を行った。反応溶液はミリ Q 水を溶媒とし、酢酸アンモニウム水溶液、アンモニア水溶液、酢酸カドミウム水溶液、リステリアフェリチン溶液、チオ酢酸水溶液を混合する事により

作製した。ここでは酢酸カドミウムおよびチオ酢酸は CdS 形成時の Cd イオン、および S イオンソースとして加えている。これまでの研究より、反応溶液 pH, イオンソース濃度がナノ粒子形成効率に大きく影響する事が知られている。そこで S ソースであるチオ酢酸濃度, 溶液 pH, Cd の溶液中での沈殿阻害剤であるアンモニア溶液濃度, それぞれの条件の異なる反応溶液でのナノ粒子形成を行い, 最適ナノ粒子形成条件を検討したところ表 1 に示すナノ粒子形成最適条件が求められた。

反応試薬	最終濃度
ミリ Q 水	-
CH ₃ COONH ₄ 水溶液	40 mM
NH ₃ 水溶液	75 mM
(CH ₃ COO) ₂ Cd 水溶液	1 mM
リスティアアポフェリチン溶液	0.3 mg/ml
CH ₃ COSH 水溶液	5 mM

反応温度…室温

表 1. CdS ナノ粒子形成の最適溶液条件。

上記条件で作製されたナノ粒子の TEM 像, および EDS 測定結果を Fig.2 に示す。TEM 観察結果より, リスティアフェリチン中にナノ粒子が形成されている事が九人される。像中のナノ粒子サイズを調べたところ, 粒子形成率約 60% の高効率, 平均粒径 4.2 ± 0.4 nm と低サイズ分散でのナノ粒子形成がなされている事がわかる。また EDS での元素分析より Cd および S が確認され, Cd:S 元素比率が 5.2:4.8 とほぼ 1:1 となっており, 形成されたナノ粒子が CdS であることも確認された。

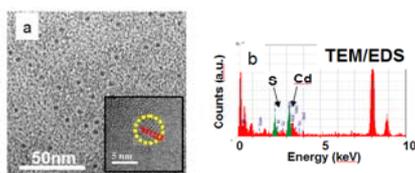


Fig.2 (a) 形成された CdS ナノ粒子の TEM 像と (b) EDS 測定結果。

作製された CdS ナノ粒子の吸収スペクトルを Fig.3 に示す。比較としてナノ粒子を内包しないアポリリスティアフェリチンも同時に測定を行った。吸収スペクトル (Fig.3a) に見られるように, アポリリスティアでは 280 nm に吸収ピークを持つタンパク由来ピークのみ観測されたのに対し (黒線), CdS-リスティアフェリチンでは 360 nm にショルダーと 420 nm にピークを持つスペクトルが観測された (青線)。吸収スペクトル形状は典型的な CdS ナノ粒子のそれと良く一致しており, 新たに観測されたピークが CdS ナノ粒子に由来するものと帰属される。観測された吸収スペクトルより, 吸収ピークのバンド端が 2.76 eV と求められた。これは粒径換算で 3.6 nm に相当する。TEM での平均粒径 4.2 nm から, バンド端は 2.64 eV と予測されるが,

実験的にえられたデータは若干高いエネルギー, すなわち分光特性に寄与する粒子サイズが TEM 観察によって得られた粒径よりも若干小さい事を示している。Fig.3a 内に単一 CdS ナノ粒子の高分解 TEM 像を示す。高分解 TEM 中に CdS 粒子の格子像がはっきりと観測されているが, 粒子端のわずかな部分に異なる結晶格子が確認される。これより, リスティア中において形成された CdS ナノ粒子においても, 内部空孔サイズが大きく粒子形成サイト数の多いフェリチンと同様, 形成されるナノ粒子が, 単結晶ではなく若干の多結晶性を持つ事が示される。これらの結果より, 形成されたナノ粒子は結晶軸の異なる数カ所 (おそらく 2~3 カ所) の結晶から構成されており, 高分解 TEM 像中に見られるようなもっと大きな結晶部分サイズ, 約 3.6 nm,

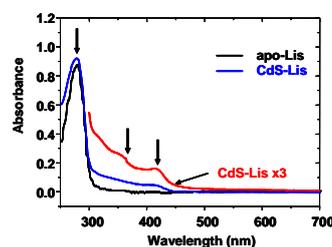
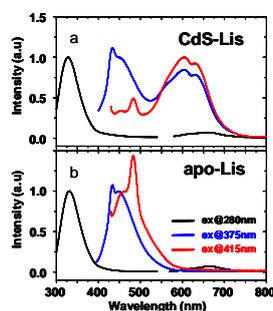


Fig.3 CdS-リスティアフェリチン (青線) およびアポリリスティアフェリチン (黒線) の吸収スペク



トル。タンパク質濃度は共に 1 mg/ml (4.6 μM)。Fig.4 (a) CdS-リスティアフェリチンおよび (b) アポリリスティアフェリチンの蛍光スペクトル。タンパク質濃度は共に 1 mg/ml (4.6 μM)。

次に, 作製された CdS ナノ粒子の蛍光特性を測定した。Fig.4 に CdS-リスティアフェリチン, およびアポリリスティアフェリチンの蛍光スペクトルを示す。タンパクの吸収波長である 280 nm および 360 nm 励起では, CdS ナノ粒子の有無にかかわらず 450 から 500 nm 付近にピークを持つタンパクからの蛍光のみが観測されている。一方, CdS-リスティアではタンパクからの発光に加え, 650 nm 付近にピークを持つ発光が確認された。これらの結果より, 650 nm 付近にピークを持つ発光は CdS に由来するものであると帰属される。観測された 600~700 nm の蛍光は CdS ナノ粒子で典型的に観測されるスペクトルと良く一

致している。一般的にこの発光はCdS ナノ粒子中に存在するトラップ準位からの発光であると理解されており、リステリアフェリチン中で形成された CdS ナノ粒子に関しても、有機溶媒中で合成された CdS ナノ粒子と同様の性質を持つ事が示された。

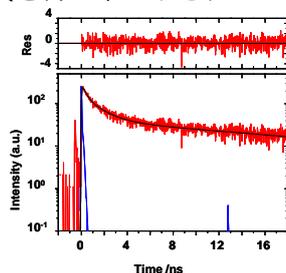


Fig.5 CdS-リステリアフェリチンの蛍光寿命曲線。

CdS-リステリアフェリチンの蛍光寿命測定結果をFig.5に示す。フェムト秒Ti-Sapphireレーザーの倍波、410nmを励起光源とし、時間相関単一格子係数法により測定した。観測波長は発光ピーク波長の600nmで行った。得られた蛍光減衰曲線は、 $\sim 280\text{ps}$ 、 $\sim 1.5\text{ns}$ 、 $\sim 15\text{ns}$ の3成分で解析された。このうち、短寿命の2成分はCdSを内包しないタンパク、およびCdS-リステリアフェリチンのタンパク発光領域で観測される寿命と一致した事より、タンパクからの発光であると帰属される。すなわち、CdSの発光寿命は15nsの非常に長寿命な成分である事が示された。観測された長寿命成分は、これまでに報告されたCdSナノ粒子のトラップ準位からの発光寿命と良く一致しており、このことから観測された長波長域の発光がタンパク中に内包されたCdSナノ粒子のトラップ準位からの発光である事が示された。

2.リステリアフェリチン中で形成された半導体ナノ粒子の発光効率向上

前節での粒子形成条件の最適化と分光特性解析より、タンパク内での粒子形成に寄与する核形成部位の減少による単結晶性の向上がわずかであり、おおきな発光特性の改善が見られない事が示された。そこで、形成後の粒子への光照射による粒径減少による単結晶化、および、CdS以外の半導体ナノ粒子形成を試みた。

Fig.6にキセノンランプからの光を分光器で単色化して取りだした316nm光照射前後のCdS-フェリチンの吸収スペクトルを示す。得られた吸収スペクトルに見られるように、吸収強度の減少は見られたもの、吸収ピークのシフトは観測されなかった。今回の実験では、150Wキセノンランプ光を分光器で単色化しており、316nm高強度は数十mW程度しか得られていない。また、光照射時に蛍光分光計の

光学系を用いている事により、単位面積あたりの光強度も非常に低くなっている。そのため、ナノ粒子の光エッチングが起こっておらず、ナノ粒子径の変化の伴う吸収ピークのシフトが確認されなかったのだと考えられる。現在、現在、キセノンランプに替わりレーザーを光源に用いる事で、より高強度光の照射による光エッチング・粒径コントロールの可能性に関して検討を進めている。

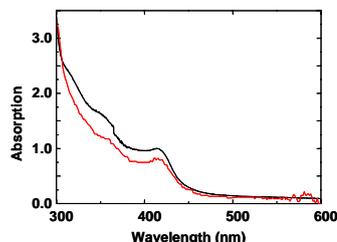


Fig.6 316nm 光照射前(黒)および光照射後(赤)のCdS-リステリアフェリチン吸収スペクトル。

3. フェリチン-ナノ粒子埋め込み型発光デバイス開発に向けた、走査プローブ顕微鏡による単一ナノ微粒子への電荷注入特性解析、およびプロトタイプデバイスの作製・評価

A.CdSナノ粒子埋め込み型発光デバイスのプロトタイプ作製と評価

リステリアタンパク-CdS ナノ粒子複合ナノコンポジットの発光デバイスへの応用検討として、リステリア-CdS ナノ粒子薄膜を発光層とする積層デバイス構造を作製し、電荷注入によるCdSナノ粒子電荷注入型発光デバイスの作製を行った。基板には低抵抗率のn型Si基板(100, 抵抗率: $\sim 0.001\Omega\text{cm}$)を電子輸送層に用いた。熱酸化炉中酸素雰囲気下で酸化薄膜(膜厚: $\sim 10\text{nm}$)を形成させた基板に、1 mg/ml CdS-リステリアフェリチン溶液をキャスト、乾燥させ膜厚約100nmのCdS-リステリアフェリチン薄膜を形成した。このサンプル上に、約50nmの膜厚のポリメタクリル酸メチル薄膜をスピンドコーティングにより作製し、ホール輸送層とした。電極にはプローブ顕微鏡の電極を用いた。電荷注入による発光測定時の透過顕微鏡像と発光像をFig.7に示す。

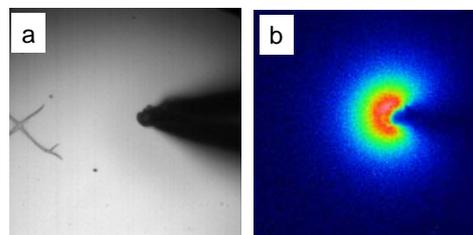


Fig.7 (a)電荷注入時の透過顕微鏡像と(b)発光像。

作製したデバイスに電圧印加を行い、電荷注入による発光観測を試みた。検出器にはCCDを用い、検出器前にフィルターを挿入し測定し

ている。電圧印加時の発光測定の際には波長400nmから700nmを測定するよう、フィルターセットを選択している。基板側に印加する電圧を0Vから負電圧側へ増加させたところ、-4Vを印加したところで、Fig.9bに示されプローブ探針周囲での発光が観測された。電圧値の絶対値の増加に伴い発光強度の上昇が観測されたが、-10V以上では発光が見られなくなった。これはおそらく短絡によりデバイス構造が破壊されてしまったためであると考えられる。

リファレンスとしてCdSナノ粒子を含まないリステリアフェリチンを用いて、同様のデバイス構造を作製し発光観測を行ったが、CdSを含まないデバイスにおいては電圧値を増加させても発光は観測されなかった。このことより、CdS埋め込み型積層デバイスで見られた発光は埋め込まれたCdSに由来すると考えられる。しかしながら、電荷注入による発光は確認されたものの、電荷注入時の発光スペクトル、発光メカニズムに関する測定は行われておらず、今後のさらなる検討が必要である。

B.ケルビンプローブ顕微鏡による単一ナノ粒子への電荷注入特性解析

前節で示したように、CdSナノ粒子埋め込み型積層発光デバイスプロトタイプにおいて、電荷注入によるCdSナノ粒子からと思われる発光が確認された。今後のデバイス構造の最適化に向けて、埋め込まれたナノ粒子への電荷注入メカニズムの理解が必要であると考えられる。

そこで、CdSナノ粒子への電荷注入メカニズムの測定システム構築のため、CdS-リステリアフェリチンに比べ取り扱いが比較的容易であり、デバイス中で電荷注入が確実に可能である事が確かめられているコバルト酸化物ナノ粒子内包フェリチンを用い、ナノ粒子レベルでの空間分解能での電荷注入後の表面電位変化測定が可能なケルビンプローブ顕微鏡(KFM)システム構築を行った。

KFMは従来、試料の表面電位と形状像を同時に非接触で観察する手法である。KFMにより電荷注入前後の電位差を定量的に評価することで、個々のナノ粒子への電荷注入および、印加電圧による変化よりその電荷注入メカニズムの解析が可能である。測定試料には、p型シリコン基板表面SiO₂上に、外殻タンパクを除去したコバルトナノ粒子を吸着させたものを使用した。測定では、形状測定と電位測定と二重にスキャンする事により、非接触での電位測定を行っている。実験的には電圧印加状態の第一のスキャンにより、AFMチップを表面に間欠的に接触させる事で形状測定とナノ粒子への電荷注入を行う。続いて、第一スキャンで得られた形状像を基に、AFM探針を基板に接触しないよう離し、非接触スキャンで基板表面の電位測定を行う。測定の模式図をFig.8に示す。

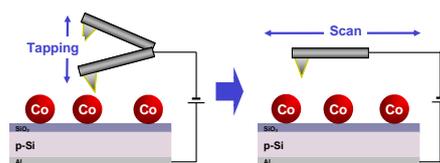


Fig.8 KFM測定の模式図。

Fig.9にKFMでの酸化コバルトナノ粒子への電荷注入特性測定結果を示す。

Fig.11aは電位と同時測定したサンプル表面の形状像を示している。図中の白く見えているドット一つ一つが個々の酸化コバルトナノ粒子を表している。基板への電圧印加前、すなわち電荷注入前には、Fig.9bのようにシリコン基板表面とナノ粒子部分で表面電位の差は見られない。しかしながら、基板に負電圧、或いは正電圧を印加しナノ粒子への電荷注入を行うと、Fig.9cおよび9dのようにナノ粒子部分での表面電位の変化が観測された。負電圧印加時にはナノ粒子部分が周囲に比べて暗く、正電圧印加時にはナノ粒子部分が周囲に比べて明るく見えている。ここでは、高電位が白く、低電位が暗く示されており、これより、負電圧印加時にはナノ粒子へ電子が、正電圧印加時にはナノ粒子へ正孔が注入されている事がわかる。また、電荷注入前後、および逆極性の電圧印加時の電位像の断面図より、電子、及び正孔注入時の電位変化が約25mVである事が示される。これは単一ナノ粒子への単電子注入時の電位変化量に相当する事より、KFM測定によりナノ粒子への単電荷注入挙動が観測された事を示して

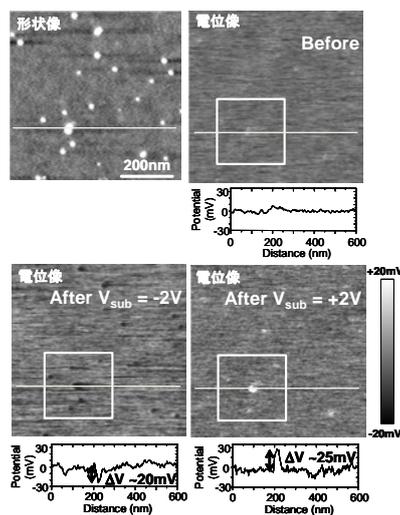


Fig.9 KFMで観測されたSi基板上的酸化コバルトナノ粒子の(a)表面形状像、(b)電圧印加前の表面電位像、(c)-2V印加後の表面形状像、および(d)+2V印加後の表面電位像。a~dは同一領域を観測。

これまでの研究より、フェリチン中で形成

されたナノ粒子が2.1eVのバンドギャップを持ち、価電子帯上端のエネルギーが5.1eV程度であるという事が示されている。観測された印加電圧の極性に依存した電位変化は、Si基板と観測対象である酸化コバルトナノ粒子のエネルギーバンドダイアグラムから、電荷注入メカニズムに関する情報を与える。すなわち、Fig.10に模式的に示されるように、基板に負電圧を印加した際にはSi基板からナノ粒子への電荷注入が起こり、反対に、基板に正電圧を印加した際には基板からナノ粒子への正孔の注入が起こる。KFMで観測されたこの電荷注入挙動は、酸化コバルトフェリチン埋め込みメモリデバイスで観測された電荷の移動と一致しており、電圧印加時の電荷の挙動が観測されている事を示している。

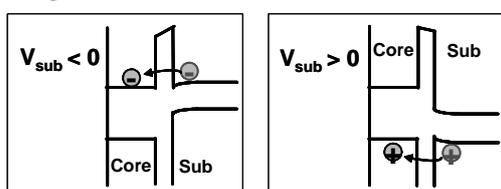


Fig.10 エネルギーバンドダイアグラム：印加電圧極性に依存したナノ粒子への電荷注入ダイアグラム

このほかにも、Siナノ構造への電荷注入挙動に関しての測定も行っており、作製したKFM表面電位測定システムが電荷注入により誘起される微小な電位変化を測定可能である事が示された。そこで、このKFMシステムをもちい、CdS-リステリアフェリチン埋め込み型積層デバイスでの電荷注入挙動の測定を行い、CdSナノ粒子への電荷注入メカニズムを明らかにするとともに、発光時の電荷注入状態の解析からデバイス構造作製・最適化を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

1. Atsushi Miura, Ryota Tanaka, Yukiharu Uraoka, Nozomu Matsukawa, Ichiro Yamashita, Takashi Fuyuki: The Characterization of Single Discrete Bionanodot for Memory devices application, Nanotechnology, 20, 2009, 125702-1, 査読有
2. Yosuke Tojo, Atsushi Miura, Yukiharu Uraoka, Takashi Fuyuki, Ichiro Yamashita: BioNanoDots Flash Memory, Jpn. J. Appl. Phys., 48, 2009, 04C1901-5, 査読有
3. Atsushi Miura, Yukiharu Uraoka, Takashi Fuyuki, Sigeo Yoshii, Ichiro Yamashita: Floating nanodot gate memory fabrication with biomineralized nanodot as charge storage node, J. Appl. Phys., 103, 2008, 074503-1, 査読有
4. Atsushi Miura, Rikako Tsukamoto, Sigeo Yoshii, Ichiro Yamashita, Yukiharu Uraoka, Takashi Fuyuki: Non-volatile flash memory with discrete bionanodot floating gate assembled by protein template, Nanotechnology, 19, 2008, 255201-1, 査読有
5. A. Miura, Y. Uraoka, T. Fuyuki, S. Kumagai, S. Yoshii, N. Matsukawa, I. Yamashita: Bionanodot monolayer array fabrication for nonvolatile memory application, Surface Science, 601, 2007, L81, 査読有
6. K. Iwahori, T. Enomoto, H. Furusho, A. Miura, K. Nishio, Y. Mishima, I. Yamashita: Cadmium Sulfide Nanoparticle Synthesis in Dps Protein from *Listeria innocua*, Chem. Mater., 19, 2007, 3105, 査読有

〔学会発表〕(計4件)

1. A. Miura, K. Iwahori, T. Uwada, Y. Uraoka, T. Fuyuki, I. Yamashita, N. Tamai, H. Masuhara, XXIIInd IUPAC on Photochemistry.
2. 三浦篤志, 岩堀健治, 山下一郎, 鎌田賢司, 玉井尚登, 増原 宏, タンパク鑄型中で形成された半導体ナノ粒子の線形および非線形分光特性, 2008年光化学討論会.
3. 三浦篤志, 岩堀健治, 山下一郎, 鎌田賢司, 玉井尚登, 増原 宏, タンパク質を鑄型に合成された半導体ナノ粒子の分光特性, 2008年秋季第69回応用物理学会学術講演会.
4. 三浦篤志, かご状超分子タンパク質を鑄型に合成した化合物半導体パイオナノドットの分光特性, 第68回応用物理学会学術講演会.

〔図書〕(計2件)

1. 河村秀樹, 三浦篤志, 芝 清隆, 山下一郎, バイオナノプロセス, -溶液中でナノ構造を作るウェット・ナノテクノロジーの薦め-, 第2章.
2. 三浦篤志, 山下一郎, バイオナノプロセス, -溶液中でナノ構造を作るウェット・ナノテクノロジーの薦め-, 第19章.

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

<http://mswebs.naist.jp/LABs/masuhara/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三浦 篤志 (MIURA ATSUSHI)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・研究員

研究者番号：90379553

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし