

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2006～2009  
 課題番号：18510095  
 研究課題名(和文) 表面形態を制御したナノ構造半導体のガスセンサーの特性評価と応用に関する研究

研究課題名(英文) Characterization of Nanostructured Semiconductors with Different Morphologies and Application to Gas Sensors

研究代表者

沈 青 (SHEN QING)  
 電気通信大学・電気通信学部・助教  
 研究者番号：50282926

研究成果の概要：本研究では、周期的なナノ構造を有するポーラスシリコン、ナノ構造を有する酸化物半導体(TiO<sub>2</sub>)薄膜を対象として、その熱伝導率を非接触的に測定できる方法(透過型光音響法と改良型過渡回折格子法)を確立した。ナノ構造の表面形態の違いや表面に吸着した分子や半導体量子ドットおよび金属ナノ粒子により熱拡散率が顕著に変化することを見出した。従来のガス吸着による電気抵抗変化の測定法の代わりに、ガス分子吸着による熱拡散率の変化を利用するガスセンシングへの応用に関する基礎研究を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,600,000	0	2,600,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	330,000	4,030,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 ナノ材料・ナノバイオサイエンス

キーワード：ナノ材料評価、ナノ構造半導体、表面形態、熱拡散率、ガスセンサー

## 1. 研究開始当初の背景

現在、産業界の発展に伴い、大気汚染は大きな社会問題の一つになっている。また、われわれの家庭生活の面においても産業界が送り出す新しい製品により、生活方式が大きく変化した。たとえば、家屋の密閉性の向上により危険ガスが家屋内にとどまるため、ガス爆発やガス中毒などの事故が増加している。このように、社会や家庭環境で可燃性および毒性のある危険ガスと遭遇する機会が増加しており、危険ガスの発生を初期段階で検知し、事故に対する対応を迅速に取ること

が事故対策上最も必要なことになってきた。従って、H<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>などの可燃ガスや毒ガスの検出は重要な課題となっている。しかし、現在の大気環境測定システムやガスの分析機器は、高価であるうえに大きな設置スペースが必要であり、データ取得に手間や時間がかかるなどの問題点がある。また、従来のガスセンサーの研究は、金属酸化物など酸化還元反応を利用した感応膜を用いられているが、動作温度が高く室温検出が難しく、環境センサーとして一般に感度が不十分であった。最近のナノ材料やナノ技術の発展に伴い、これらの問題を解決できる可能性が

現れた。ここで半導体ナノ粒子系は、その物性がサイズに依存することや比表面積が高いなどの特性があり、応用的観点から見るとバルク系に比べて著しい特性の向上が見られる。たとえば、ナノメートルのサイズになると表面での原子数は全体の原子数の数10%になるため、活性化が向上し周りのガス種との反応性が向上する。

本研究では、従来のガス吸着による電気抵抗変化の測定法の代わりに、ガス吸着による熱伝導率の変化を非接触的で迅速に測定することを提案する。半導体のサイズはナノメートルになると、粒子間の境界数や表面に存在する原子の割合は大きいいため、電子とフォノンの粒子間の境界での散乱と表面との相互作用は著しく大きくなる。バルクのものに比べて、ナノ構造半導体の熱伝導率はナノ粒子表面で吸着したガス分子の種類と吸着量によって顕著に変化することが予想できる。熱伝導率の変化の測定には、高感度で迅速・簡便に熱物性を測定できる光熱変換法（光音響法と改良型過渡回折法）を適用する。光熱変換法は光励起後の無輻射遷移緩和によって熱エネルギーが発生する現象（光熱変換現象）を応用して測定する方法であり、半導体を含む様々な試料の熱物性、光吸収、電子物性を非接触・非破壊的に評価することが可能である。現在ではナノポーラス材料の熱伝導率測定技術として周期加熱法の一つである通称3法はあるが、試料表面に金属膜を蒸着し交流電流を流し、金属膜の電気抵抗変化から温度応答を求める方法である。3法と比べて、金属膜の蒸着や交流電流の流しなどの手間が必要なく熱伝導率を非接触的に測定できることが光熱変換法の利点である。

## 2. 研究の目的

本研究では、周期的なナノ構造を有するポーラスシリコン、ナノ構造を有する酸化物半導体( $\text{TiO}_2$ )薄膜を対象にして、そのナノ構造と morphology をコントロールし、光熱変換法を用いて熱伝導率を評価し、表面吸着種による熱伝導率の変化について検討を行い、ガスセンシングへの応用に関する基礎研究を行うことを目的とする。低コスト化、小型化、かつ簡便・迅速な検出が可能なガス検出素子へ応用することを目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) ポーラスシリコン試料の作製と基礎物性評価

Si 単結晶を基板として陽極化成法により pSi 試料を作製した。陽極化成法とは陽極

に Si、陰極に Pt を用いた電気溶解反応である。陽極化成時間、陽極化成電流密度作製条件をパラメータとして変化させることにより、膜の厚さ、比表面積（多孔度）、ナノシリコンのサイズなどを制御した。

### (2) ナノ構造酸化物半導体薄膜の作製と基礎物性評価

#### $\text{TiO}_2$ ナノ粒子集合体薄膜

ナノ粒子を用いたナノ構造  $\text{TiO}_2$  数 nm から数 10 nm の  $\text{TiO}_2$  ナノ粒子、増粘剤であるポリエチレングリコール (PEG) および分散剤であるアセチルアセトン純水を加えて攪拌することによって、 $\text{TiO}_2$  のペーストを調整した。その  $\text{TiO}_2$  ペーストを基板（たとえば導電性ガラス FT0）上に塗布し、450 で熱処理を行い多孔質のナノ構造  $\text{TiO}_2$  薄膜を作製した。

#### $\text{TiO}_2$ 逆オパール薄膜

ポリスチレンラテックス (PSL) (粒径 474nm) 粒子懸濁溶液に、透明導電性ガラス (FT0) を浸漬させ、40 で乾燥させることで FT0 上に PSL による面心立方構造の鋳型を形成した。この鋳型に 2% の  $\text{TiCl}_4$  メタノール溶液を滴下し、30 分程度加水分解させた後 ( $\text{TiCl}_4$ ,  $\text{TiO}_2$ ) 80 での熱処理を行った。以上の  $\text{TiO}_2$  形成の過程を 3 度繰り返した後、450 で熱処理を行うことで PSL の除去と  $\text{TiO}_2$  の結晶化が促進され、FT0 上に  $\text{TiO}_2$  逆オパール構造が形成された。

### (3) 半導体量子ドットや金属ナノ粒子を吸着したポーラスシリコンとナノ構造酸化物半導体薄膜の作製と基礎物性評価

ポーラスシリコンとナノ構造  $\text{TiO}_2$  薄膜の表面に吸着された分子や、ナノ粒子間での熱伝導過程についてのメカニズムを解明するために、CdSe 量子ドットや Au ナノ粒子を吸着させた系を対象とした。CdSe 量子ドットと Au ナノ粒子の物性はよく知られており、今回の試料作製法では粒径を制御できることから、ナノ粒子のモデル材料として選んだ。CdSe 量子ドットの吸着は化学吸着法を適用した。CdSO<sub>4</sub> 水溶液、N(CH<sub>2</sub>COONa)<sub>3</sub> 水溶液、Na<sub>2</sub>SeSO<sub>4</sub> 水溶液を混合して作られる吸着溶液に試料を浸漬させ、恒温槽で 10 に温度を保った状態で吸着を行った。吸着時間をパラメータとして変化させた。また、光化学吸着法により、ナノ構造  $\text{TiO}_2$  薄膜表面に金ナノ粒子を吸着した。

上記の (1) (2) と (3) の試料系に対して、光吸収特性、電子拡散特性、熱的特性（熱拡散率、熱伝導率）など基礎物性や構造評価 (XRD, SEM) を行い、各作製条件

で作製したTiO<sub>2</sub>のナノ構造と基礎物性との関連について検討した。

#### (4) 光熱変換法(光音響法と過渡回折格子法)によるポーラスシリコンとナノ構造酸化半導体薄膜の光吸収特性と熱物性の評価

##### 光音響(PA)法による光吸収スペクトルと熱物性の評価

PA測定系においては、励起光源には300WのXeランプを用いた。分光器により単色化した光はチョッパーで変調され、密封されたセル内の試料に照射される。試料に光が吸収され励起された電子が無輻射緩和過程を経て正孔と再結合する際に、熱エネルギーが発生する。励起光は周期的に変調されているため、試料において発生する熱も周期的になる。その結果、試料表面直上にある空気は膨張・収縮を引き起こす。発生する音響波をマイクロフォンで検出し、信号をプリアンプで増幅した後、ロックインアンプで信号処理を行った。光吸収測定では、光が試料表面に照射され、照射面の温度上昇による光音響信号を検出する“反射型PA測定法”を用いた。

熱物性測定では、照射面と信号検出面が異なる側の面で行われる“透過型PA測定法”を用いた。励起光変調周波数を変化させることによって試料の熱的性質を見積もることができた。光照射によって発生した熱またはキャリアが試料内を拡散し、照射面とは反対側の面で音響波を発生し、これを検出する。

##### 改良型過渡回折格子(TG)法による熱物性の評価

過渡回折格子法では、空間的に縞状に変調されたレーザー光強度分布を固体表面に照射することで、試料表面(界面)に、無輻射緩和過程と熱膨脹過程により縞状の温度分布とGHz周波数の弾性表面波(界面波)を効率よく励起させることができる。それらを、過渡的に形成された回折格子として非接触的に検出する。フェムト秒パルスレーザーとナノ秒パルスレーザーの導入で、発生する熱や音の発生素過程となるキャリア(電子やホール)のダイナミクスをピコ秒から秒までの広い時間分解能で計測できる装置系を構築した。改良型TG法は、従来のTG法と比べて、感度は2-3桁大きくて、多孔質試料でも適用できる。改良型TG法を用いて、ナノ構造TiO<sub>2</sub>薄膜の熱伝導率の評価を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) ポーラスシリコンの光吸収と熱拡散率の評価

PSi作製には、P型Si単結晶基板(抵抗率5~15 $\cdot$ cm、面方位<100>、厚さ525 $\mu$ m)を用いた。基板裏面に白金薄膜をスパッタリングし(膜厚約150nm)基板を陽極、白金電極を陰極にして、電流密度1.4mA/cm<sup>2</sup>、フッ酸濃度47%、室温、暗所で、45分間陽極化成を行った。この後、47%HF:エタノール:水の混合比率が1:3:8の混合液で0分間(試料A)および2分間(試料B)エッチング処理を施した。PAスペクトルを測定した。まず紫外線照射前のPAスペクトルにのみ着目すると、試料A(エッチング処理なし)・B(エッチング処理2分間)ともに、光吸収端がバルクSiのバンドギャップ値である1.1eVよりも高エネルギー側に現れている。このことから、作製した試料のPSi層には量子サイズ効果が出現していると考えられる。PA信号強度のピーク値の比較から、エッチング処理によって光吸収量は増加する。また、試料BはAに比べ光吸収端が高エネルギー側にシフトしていることから、エッチング処理によってPSiの粒径が減少していると考えられる。次に紫外線照射後のスペクトルにも着目すると、試料Aは紫外線照射前後でPA強度に変化が見られないが、試料BではPA強度が大幅に減少している。このことから、エッチング処理を加えたPSiは紫外線照射によって光吸収係数が低下するか、あるいは熱物性が変化すると考えられる。また励起光波長342nm(3.65eV)“透過型PA測定法”でPA信号強度の励起光変調周波数依存性を測定した。変調周波数の増加と共にPA信号強度はある周波数まで減少し、その後増加した。エッチング処理によって、PA信号の極小値に対応する変調周波数 $f_{min}$ は小さくなった(A( $f_{Amin1}$ ):100Hz、B( $f_{Bmin1}$ ):41Hz)。また紫外線照射後の $f_{min}$ は、試料Aではほとんど変わらなかったが、Bは大幅に増加した(A( $f_{Amin2}$ ):105Hz、B( $f_{Bmin2}$ ):115Hz)。 $f_{min}$ よりも小さい周波数の領域でのPA信号は、熱拡散プロセスによる発熱が支配的になっている。均一な試料の場合、 $f_{min}$ における熱拡散長は、試料の厚さの1/5であることが分かっている。今回作製・測定したPSi/Si二層試料を均一な試料と見なして、試料の実効的な熱拡散率 $\kappa_{eff}$ を計算すると、紫外線を照射する前では試料Aは $2.9 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/s、Bは $1.8 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/sとなり、従来の結果と良い一致を示した。試料Aに比べBの方が熱拡散率が小さいことは、エッチング処理によるPSiの粒径の減少が一因と考えられる。また紫外線を照射した後では、試料Aは $3.0 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/s、Bは $3.3 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/sとなった。このことから、エッチング処理によって紫外線照射の影響を受けやすくなり、光化学反応が起きてPSi層の組成が変化し、熱拡散

率の増加に繋がったと考えられる。紫外線照射によるPSi試料の光吸収と熱物性の変化は、化学エッチング処理を行った試料に大きな変化が見られた。これは化学エッチング処理によってPSi粒子表面がSi-H結合で終端化されていたものが、再度光酸化を起こしたことが原因の一つであると考えられる。このことから、PSi試料の表面吸着した分子の違いにより、その熱伝導率が顕著に変化することがわかった。

## (2) CdSe量子ドットを吸着したポーラスシリコンの光吸収と熱物性の評価

反射型PA法によるCdSe未吸着と吸着したPSi試料の光吸収スペクトルを測定した。CdSeを吸着していないPSiでは、エネルギーギャップは1.78 eVと見積もられた。また、CdSeを吸着させた試料はスペクトルの肩の位置を量子閉じ込め効果に基づくCdSe量子ドットの第一励起エネルギーに対応すると仮定した。その値を表1にまとめた。ここでバルクのCdSeのバンドギャップエネルギーは1.74 eVであり、表1の結果はすべてこの値より大きな値となった。これらの結果からCdSeが量子ドット化されていることが示された。また、この第一励起エネルギーの値と有効質量近似を用いてCdSeの平均粒径を見積もった値を表1に示した。

表1 各試料の第一励起エネルギーと平均粒径の値

CdSe 吸着時間(h)	1	2	5	24
第一励起エネルギー(eV)	2.16	2.00	1.93	1.89
平均粒径(nm)	6.0	7.7	9.1	10.3

また、CdSe未吸着と吸着した(平均粒径9.1 nm)PSi試料のPA信号の変調周波数依存性を測定した。PA信号の変調周波数依存性はある周波数 $f_{min}$ において極小値を示し、この値を境に低周波数側を熱拡散が支配的な過程、高周波数側を光励起キャリア拡散によって生じる発熱が支配的な過程とわけることができる。熱拡散過程とは光励起された電子・正孔対が表面で再結合し、発生した熱が試料内部を拡散していく過程である。この熱は信号として光照射面とは反対側の面で検出される。一方で、光励起されたキャリアが試料内部を拡散していき、光照射面とは反対側の面で再結合し熱を発生する。 $f_{min}$ の位置によりこの2つの過程のどちらの寄与が強いかを判断することができる。また、これまでの理論と実験結果より、 $f_{min}$ が小さいほど熱拡散率が小さくなることがわかっている。PA信号の変調周波数依存性の結果から各試料の $f_{min}$ を測定した。これらの結果からまず、CdSe

量子ドットの平均粒径の増加に応じて $f_{min}$ の値が低周波数側にシフトすることが確認された。すなわち、CdSe量子ドットを吸着したPSiの熱拡散率がCdSeの粒径の増加に従い低くなったことを示している。この原因としては、CdSe-PSiもしくはCdSe-CdSe粒子間の界面抵抗により熱拡散が妨げられること、もしくはキャリア拡散による信号の強度が増加したことが原因として考えられる。

また、光励起キャリア拡散過程に伴うPA信号強度がCdSe量子ドットの平均粒径の増加に伴い大きくなった。PA信号の変調周波数依存の結果から、CdSe量子ドットの平均粒径の増加に伴い $f_{min}$ より高周波数側(キャリア拡散に対応する信号)のPA信号強度が増加することが確認された。この原因としては平均粒径の増加とCdSeの吸着量の増加に伴い、光励起キャリアが増加したのでPA信号強度が増加したと考えられる。

## (3) ナノ構造TiO<sub>2</sub>薄膜およびAuナノ粒子を吸着した試料の熱物性の評価

ナノ構造TiO<sub>2</sub>薄膜の表面形態(Morphology)が変化するとき、その熱物性はどのように影響されるかについて検討を行った。過渡回折格子法を用いて、ナノ粒子集合体薄膜と逆オパール薄膜の熱拡散応答を測定した。熱拡散方程式を利用して、過渡回折格子応答の緩和時間から熱拡散率を求めることができる。TiO<sub>2</sub>ナノ粒子集合体薄膜と逆オパール薄膜の熱拡散率はそれぞれ $1.67 \times 10^{-4}$  and  $7.35 \times 10^{-7}$  cm<sup>2</sup>/sとなった。この結果から、ナノ構造TiO<sub>2</sub>薄膜の表面形態はその熱物性に強く影響することがわかった。また、Auナノ粒子吸着によりTG応答の緩和時間が小さくなり、熱拡散率が大きくなることがわかった。

以上の結果より、光熱変換法(光音響法や過渡回折格子法)を用いて、ポーラスシリコンやナノ構造TiO<sub>2</sub>薄膜の表面に吸着したナノ粒子や分子による熱拡散率の変化を非接触的に高感度に検出できることが判明した。さらに、ナノ構造薄膜のMorphologyをコントロールすることによって、その熱物性を制御できることを見出した。今後、各条件で作製ナノ構造の薄膜に対して、ガスを吸着し、ガスの量の変化に伴う熱伝導率変化を測定し、ガスセンシングの検量線やセンシングできるガス濃度の限界を確認する。さらに、ガスセンシング機能とポーラスシリコンやナノ構造酸化物半導体のmorphologyとの関係について検討し、作製条件にfeedbackし、最適なガスセンシング

機能特性のものを発見する。これらの結果に基づいて、小型・簡便で低コストかつ迅速なガスセンサーの作製を試みる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計17件)

- (1) M. Nada, T. Gonda, Q. Shen, H. Shimada, T. Toyoda, and N. Kobayashi: Electric Characteristics of Li<sub>2</sub>O-Doped TiO<sub>2</sub> Nanocrystalline Film and its Application to Dye-Sensitized Solar Cells, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 48, pp. 0255505-1~4 (2009). (査読有)
- (2) T. Toyoda, S. Tsugawa, and Q. Shen: Photoacoustic Spectra of Au Quantum Dots Adsorbed on Nanostructured TiO<sub>2</sub> Electrodes together with the Photoelectrochemical Current Characteristics, *J. Appl. Phys.* Vol. 105, pp. 034314-1~5 (2009). (査読有)
- (3) H. Inoue, K. Katayama, Q. Shen, T. Toyoda, and K. A. Nelson: Terahertz Reflection Response Measurement Using a Phonon Polariton Wave, *J. Appl. Phys.* Vol. 105, pp. 054902-1~4 (2009). (査読有)
- (4) Q. Shen, J. Kobayashi, L. J. Diguna, and T. Toyoda: Effect of ZnS Coating on the Photovoltaic Properties of CdSe Quantum Dot-Sensitized Solar Cells, *J. Appl. Phys.* Vol. 103, p. 084304-1 (2008). (査読有)
- (5) Q. Shen, K. Katayama, T. Sawada, and T. Toyoda: Characterization of Electron Transfer from CdSe Quantum Dots to Nanostructured TiO<sub>2</sub> Electrode Using a Near-Field Heterodyne Transient Grating, *Thin Solid Films* Vol. 516, p. 5927 (2008). (査読有)
- (6) K. Katayama, H. Inoue, H. Sugiya, Q. Shen, T. Toyoda, and K. Nelson: Generation and detection of Tunable Phonon Polaritons Using a Single Transmission Grating, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 92, p. 031906 (2008). (査読有)
- (7) K. Katayama, Q. Shen, T. Toyoda, and K. Nelson: Phonon Polariton Generation and Detection Using Near-Field Heterodyne Transient Grating Method, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 90, p. 171117 (2007). (査読有)
- (8) L. J. Diguna, Q. Shen, A. Sato, K. Katayama, T. Sawada, and T. Toyoda: Optical Absorption and Ultrafast Carrier Dynamics Characterization of CdSe Quantum Dots Deposited on Different Morphologies of Nanostructured TiO<sub>2</sub> Films, *Mater. Sci. Eng. C* Vol. 27, pp. 1514-1520 (2007). (査読有)
- (9) T. Toyoda, T. Uehara, R. Suganuma, S. Tamura, A. Sato, K. Yamamoto, Q. Shen, and N. Kobayashi: Crystal Growth of CdSe Quantum Dots Adsorbed on Nano-particle, Inverse Opal, and Nanotube TiO<sub>2</sub> Photoelectrodes Characterized by Photoacoustic Spectroscopy, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 46, pp. 4616-4621 (2007). (査読有)
- (10) L. J. Diguna, Q. Shen, J. Kobayashi, and T. Toyoda: High Efficiency of CdSe Quantum-Dot-Sensitized TiO<sub>2</sub> Inverse Opal Solar Cells, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 91, 023116 (2007). (査読有)
- (11) Q. Shen, M. Yanai, K. Katayama, T. Sawada, and T. Toyoda: Optical Absorption, Photosensitization, and Ultrafast Carrier Dynamic

Investigations of CdSe Quantum Dots Grafted onto Nanostructured SnO<sub>2</sub> Electrode and Fluorine-Doped Tin Oxide (FTO) Glass, *Chem. Phys. Lett.* Vol. 442, pp. 89-96 (2007). (査読有)

- (12) Q. Shen, M. Inoguchi, T. Toyoda: The Influence of Chemical Post-Etching and UV Irradiation on the Optical Absorption and Thermal Diffusivity of Porous Silicon Studied by Photoacoustic Technique, *Thin Solid Films* Vol. 499, 161-167 (2006). (査読有)
- (13) Q. Shen, T. Sato, M. Hashimoto, C. C. Chen, T. Toyoda: Photoacoustic and Photoelectrochemical Characterization of CdSe-Sensitized TiO<sub>2</sub> Electrodes Composed of Nanotubes and Nanowires, *Thin Solid Films* Vol. 499, 299-305 (2006). (査読有)
- (14) Q. Shen, K. Katayama, T. Sawada, M. Yamaguchi, Y. Kumagai, and T. Toyoda: Photoexcited Hole Dynamics of TiO<sub>2</sub> Nanocrystalline Films characterized using a Lens-Free Heterodyne Detection Transient Grating Technique, *Chem. Phys. Lett.* Vol. 419, 464-468 (2006). (査読有)
- (15) Q. Shen, K. Katayama, T. Sawada, M. Yamaguchi and T. Toyoda: Optical absorption, photoelectrochemical, and ultrafast carrier dynamic investigations of TiO<sub>2</sub> electrodes composed of nanotubes and nanowires sensitized with CdSe quantum dots, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 45 pp. 5569-5574 (2006). (査読有)
- (16) L. J. Diguna, M. Murakami, A. Sato, Y. Kumagai, T. Ishihara, N. Kobayashi, Q. Shen and T. Toyoda: Photoacoustic and photoelectrochemical characterization of inverse opal TiO<sub>2</sub> sensitized with CdSe quantum dots, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 45, pp. 5563-5568 (2006). (査読有)
- (17) M. Yamaguchi, K. Katayama, Q. Shen, T. Toyoda and T. Sawada: Carrier Dynamics in Porous Silicon Studied with a Near-Field Heterodyne Transient Grating Method, *Chem. Phys. Lett.* Vol. 427, pp. 192-196 (2006). (査読有)

〔学会発表〕(計11件)

- 1) 小鹿倉淳、沈 青、豊田太郎：光音響分光法による CdSe 量子ドットを吸着したナノ結晶 Si の熱拡散率評価、第 29 回超音波エレクトロニクスシンポジウム(2008 年 11 月 11 日、仙台)。
- 2) 小鹿倉淳、沈 青、豊田太郎：光音響分光法による CdSe 量子ドットを吸着したナノ結晶 Si の熱拡散率評価、第 29 回日本熱物性シンポジウム(2008 年 10 月 8 日、東京)。
- 3) 沈 青、片山健二、澤田嗣郎、豊田太郎：ナノ構造 TiO<sub>2</sub> 電極に吸着した Au 量子ドットの光音響スペクトルと過渡応答評価、第 29 回日本熱物性シンポジウム(2008 年 10 月 8 日、東京)。
- 4) Lina J. Diguna, 鮎沢康正、沈 青、豊田太郎：CdSe 量子ドットを吸着した TiO<sub>2</sub> 逆オパール電極の光音響スペクトルと反射特性、第 29 回日本熱物性シンポジウム(2008 年 10 月 8 日、東京)。
- 5) 小鹿倉淳、沈 青、豊田太郎：光音響分光法

- による CdSe 量子ドットを吸着したポーラスシリコンの熱物性評価、超音波学会（2008年4月25日、東京）。
- 6) L. J. Diguna, Q. Shen, J. Kobayashi and T. Toyoda: Effects of surface modification on photovoltaic properties of CdSe quantum dot-sensitized TiO<sub>2</sub> inverse opal solar cells, Abstracts of the International PVSEC-17, pp. 136-137 (Dec. 3, 2007, Fukuoka).
  - 7) T. Toyoda, T. Uehada, L. J. Diguna and Q. Shen: Dependence of the photovoltaic properties of CdSe quantum dot-sensitized solar cells on the thickness of TiO<sub>2</sub> electrodes, Abstracts of the International PVSEC-17, pp. 1181-1182 (Dec. 3, 2007, Fukuoka).
  - 8) Q. Shen, K. Katayama, T. Sawada and T. Toyoda: Characterization of carrier dynamics in semiconductor nanomaterials using near-field heterodyne transient grating method, Abstracts of the 2007 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, (Nov. 5, 2007, Kyoto, invited).
  - 9) 加藤侑志、沈 青、豊田太郎：光音響分光法を用いたポーラスシリコンの熱物性評価 その2 -、第54回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、p.1522 (2007年3月27日、東京)。
  - 10) 沈 青、小林純也、Lina J Diguna、豊田太郎：CdSe量子ドット増感したナノ構造TiO<sub>2</sub>電極における光電変換効率の評価、第54回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、p.690 (2007年3月27日、東京)。
  - 11) 佐藤彰、小林純也、沈 青、豊田太郎：ZnSを保護膜とした CdS 量子ドット増感型太陽電池の光電変換特性、第54回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、p.690 (2007年3月27日、東京)。

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 出願年月日：  
 国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 取得年月日：  
 国内外の別：  
 〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

沈 青 (SHEN QING)  
 電気通信大学・電気通信学部・助教  
 研究者番号：50282926

(2) 研究分担者

( )  
 研究者番号：

(3) 連携研究者

( )  
 研究者番号：