

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560066

研究課題名(和文) 量子ドットを用いたナノスケール空間分解能を有する歪測定法の開発

研究課題名(英文) Development of a strain measurement method having nano-scale space resolution using quantum dots

研究代表者

荒居 善雄 (ARAI YOSHIO)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70175959

研究成果の概要(和文)：ナノプローブの押し込みにより量子ドット個々からの発光に対応した微細なピークを持つ発光スペクトルが増強される現象が測定された。ナノプローブの押し込み位置の変化に伴う個々の量子ドットからの発光エネルギーの連なりを描くことにより、個々の量子ドットの位置を同定することが可能である。本研究で開発した円筒形状のナノプローブを用いた場合、発光エネルギーの連なりに極大点が現れることから、直接ナノスケールで量子ドットの位置を測定することが出来た。

研究成果の概要(英文)：An improvement in the estimation of the location of embedded InGaAs/GaAs quantum dots (QDs) by using a domed-apex probe to perform the low-temperature (10 K) photoluminescence (PL) measurement during a nanoprobe scan was established. Fine PL peak from individual QDs was enhanced with the nanoprobe-induced strain. Tracing the PL emissions of single QD with the movement of the probe position in the scan, the locations of some of observed QDs were obtained directly from the scan results, at where the PL peak energies of those QDs achieved maximum values.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	1,800,000	540,000	2,340,000
21年度	900,000	270,000	1,170,000
22年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：材料力学

科研費の分科・細目：機械工学・材料力学

キーワード：半導体量子ドット、ナノスケール歪測定、ナノスケール押し込み、歪ハミルトニアソ、発光強度

1. 研究開始当初の背景

(1)半導体表面に自己組織化を利用して作成される量子ドットは、数ナノメートルの寸法のピラミッド形状であり、量子コンピュータや新原理レーザーの基礎的素子と考えられ

ている。その電子的または光学的特性に及ぼす力学的な効果や、膜形成メカニズムと歪の関係を予測する手法は、量子ドットを用いるナノテクノロジー開発に欠くことの出来ない技術である。

(2)従来、格子歪とエネルギーバンドギャップの関係に関しては、原子間距離に比べて十分大きな材料について、多くの研究が行われてきた。

(3)量子ドットの寸法は数ナノメートルであり、本研究の開発する表面直下ナノスケール領域における歪分布の実験解析手法が確立されれば、測定上の空間分解能が飛躍的に向上される。

2. 研究の目的

本研究では、量子ドットの発光特性を利用したナノスケール空間分解能を有する歪の実験解析手法を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

量子ドットの発光特性を利用したナノスケール空間分解能を有する歪測定法を開発するために、以下の研究を行った。

(1)量子ドットの発光状態(発光波長および発光強度)と圧子押し込み位置の关系到び開口形状の影響の解明

(2)量子ドットの発光特性を利用したナノスケール歪分布解析の測定歪分解能に及ぼす開口形状の影響の評価

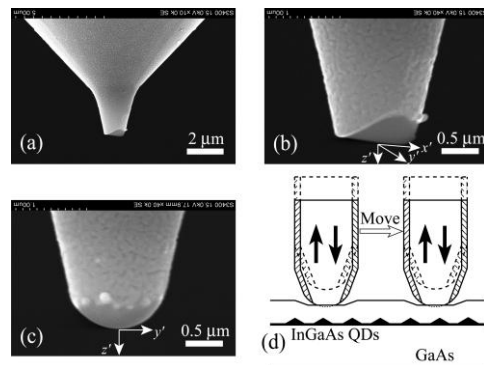
(3)量子ドットの発光特性を利用したナノスケール歪分布解析の測定空間分解能に及ぼす開口形状の影響の評価

材料は、量子ドットの形成可能性と、半導体デバイスへの適用性を考慮して、GaAs中のInGaAs量子ドットを用いた。試験片表面は鏡面研磨した後、化学研磨を施した。量子ドットは表面直下50nmに底面長約20nm、高さ約8nmのピラミッド形状に形成されている。圧子先端形状として、平面形状と円筒形状および両側面円筒形状を取り上げ、同一位置における単調圧子押し込み発光測定試験を実施した。さらに、水平方向に圧子押し込み位置をサブナノメートル単位で制御し、所定の荷重一定の圧子押し込み試験を実施すると同時に、発光特性を測定した。圧子押し込み荷重を測定し、平面形状と円筒形状および両側面円筒形状の圧子によって生じた歪を評価した。

4. 研究成果

試作したナノプローブの先端開口形状を図1に示す。図1(a)から(d)は円筒形状を有

するナノプローブであり、(e)は従来用いていた平面形状を有するナノプローブである。また、図1(d)にスキャン押し込み試験の概念図を示す。図2(a)および(b)には、平面形状を有する場合と円筒形状を有する場合のスキャン押し込み試験において測定された発光エネルギーと押し込み位置の関係を示す。図2の明るさは発光強度を表している。ナノプローブの押し込みにより量子ドット個々からの発光に対応した微細なピークを持つ発光スペクトルが増強される現象が測定された。ナノプローブの押し込み位置の変化に伴う個々の量子ドットからの発光エネルギーの連なりを図2のように描くことにより、個々の量子ドットの位置を同定することが可能である。本研究で開発した円筒形状のナノプローブを用いた場合、図2(a)に示すとおり、発光エネルギーの連なりに極大点が現れることから、直接ナノスケールで量子ドットの位置を測定することが出来た。同定した個々の量子ドットの位置を図3に示す。従来、図2(b)に示す平面形状のナノプローブを用いた場合の発光エネルギーの連なりから発光エネルギーのシミュレーションを併用して逆問題として個々の量子ドットの位置を計算してきたが、本研究の成果によって量子ドットの位置同定精度が向上され、位置同定の為に要する数値計算量が格段に減少した。



(e) 平面形状ナノプローブ
図1 ナノプローブ先端形状

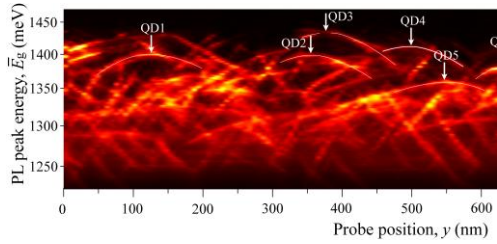


図2 (a) 円筒形状ナノプローブを用いたスキャン試験結果

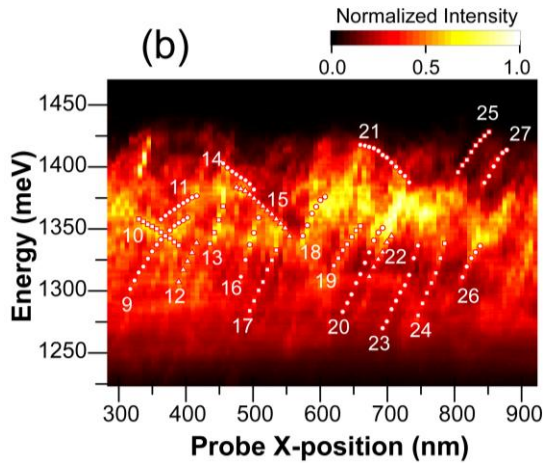


図2 (b) 平面形状ナノプローブを用いたスキャン試験結果

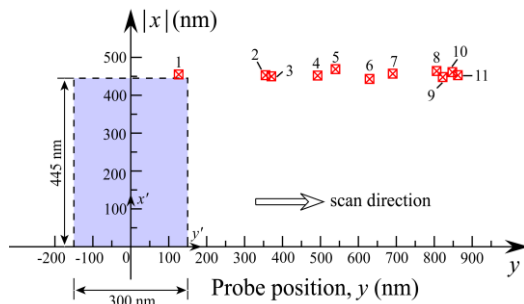


図3 円筒形状ナノプローブを用いた量子ドットの位置同定結果

平面形状のナノプローブを用いる場合や、円筒形状のナノプローブの円筒の軸方向の位置を同定する場合、図4に示すモデルを用いてナノプローブ押し込みにより量子ドットに生じる歪を解析した。解析した歪分布を図5に示す。接触端部で体積歪が急激に減少するとともに、等二軸歪成分とせん断歪成分が端部で極大値を示している。歪解析結果を用いて単位押し込み荷重当たりの発光エネルギー変化と量子ドットの位置の関係を図6のようにシミュレートすることにより、単位押し込み荷重当たりの発光エネルギーの

実測結果から量子ドットの位置を同定する方法の有効性を検討した。その結果を図7に示す。単位押し込み荷重当たりの発光エネルギー変化を用いて量子ドットの位置を精度

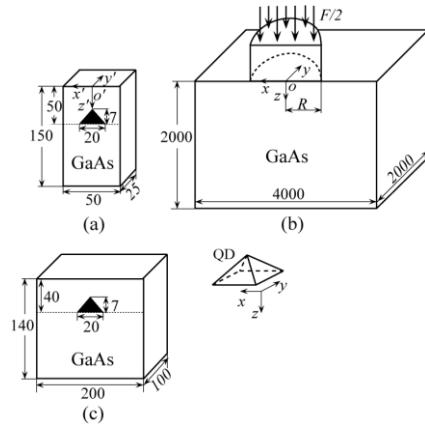


図4 歪解析モデル

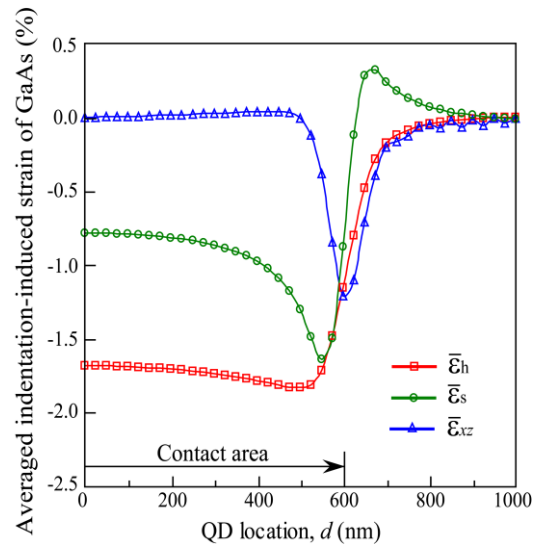


図5 歪分布 (平面形状ナノプローブの場合)

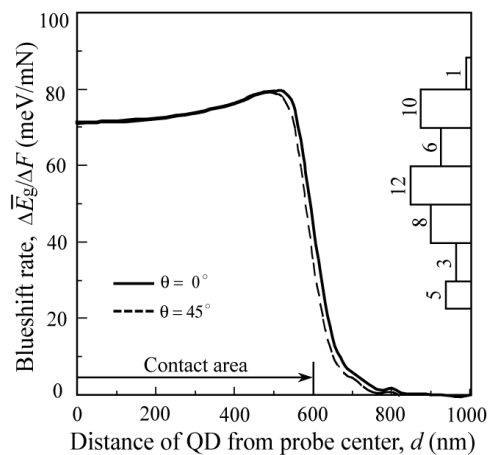


図6 エネルギーバンドギャップ分布の計算結果 (平面形状ナノプローブの場合)

良く同定可能であることが示された。この方法では、押し込みスキャン試験を行う必要が無く、測定時間の大幅な短縮が可能となった。

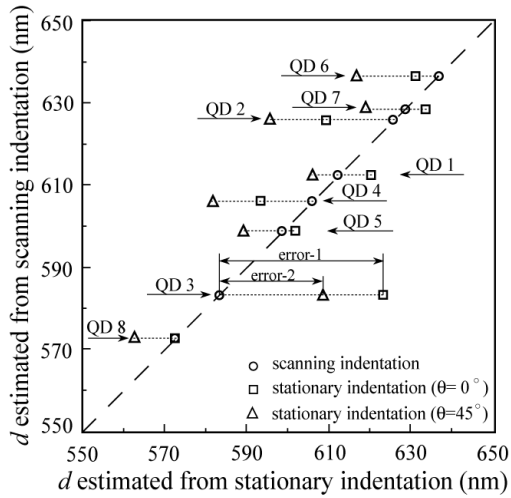


図7 同一位置での押し込みによる位置同定結果とスキャンによる位置同定結果の比較（平面形状ナノプローブの場合）

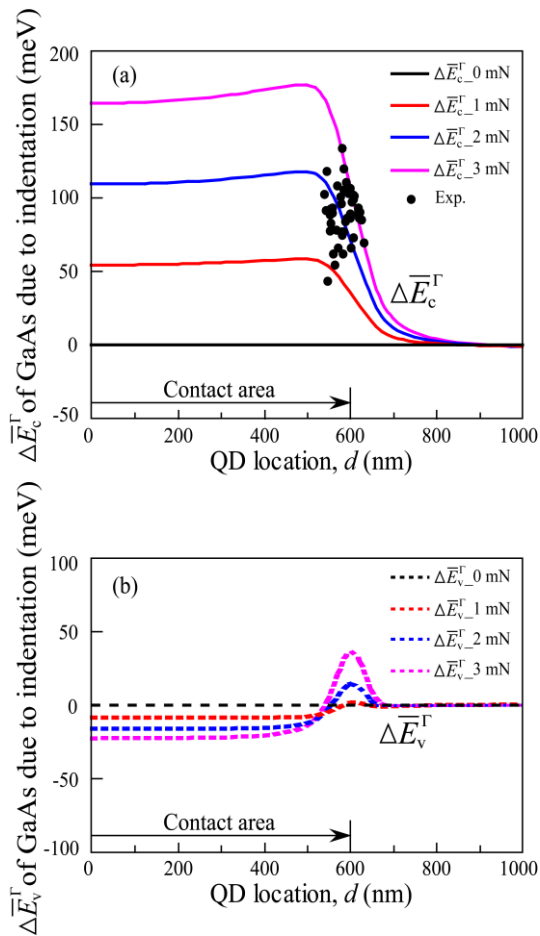


図8 エネルギーバンドシフトと消光現象の関係

ナノプローブの押し込み荷重の増加に伴い発光強度は一旦増加した後に減少し、最終的には発光は停止した。発光停止条件は量子ドットの発光を利用した歪解析の適用条件を支配するのみならず、量子ドットレーザーや量子計算などにとって重要である。発光停止時の押し込み荷重から量子ドットのエネルギーバンドを計算し、図8に示すように、発光停止は接触端部の伝導帯が急激に変化する位置で生じていることを明らかにした。伝導帯の高さを消光条件として、消光荷重と量子ドットの位置の関係を予測し、実験結果と比較して図9に示す。予測結果は実験結果を再現しており、消光現象のメカニズムが伝導帯の傾斜にあることを明らかにした。

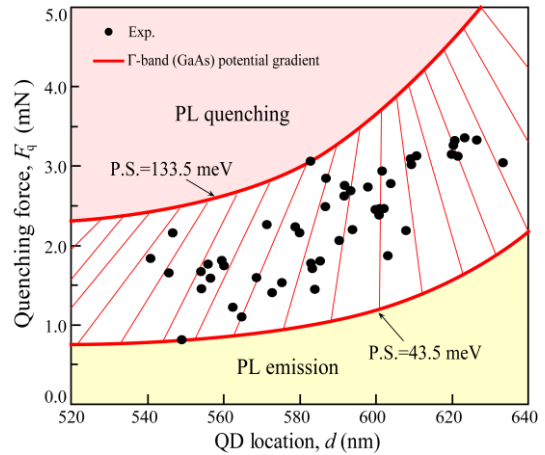


図9 消光荷重と量子ドットの位置の関係

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計14件）

- 1) Lixia Xu, Yoshio Arai, Kazunari Ozasa, Hiroki Kakoi, Yuan-Hua Lianga and Wakako Araki, Mechanism of Photoluminescence Quenching of InGaAs/GaAs Quantum Dots Resulting from Nanoprobe Indentation, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 11, No. 1, pp. 106 - 114, 2011, 査読有.
- 2) Md. Arefin KOWSER, Yoshio ARAI and Wakako ARAKI, Asymptotic Analysis for the Singular Stress Behaviour around an

Interface Edge of Dissimilar Power-Law Hardening Materials Joint, Key Engineering Materials, Vol. 462 - 463, pp. 1290 - 1295, 2011, 査読有.

3) Wakako Araki and Yoshio Arai, Optimum strain state for oxygen diffusion in yttria-stabilised zirconia, Solid State Ionics, Vol. 190, pp. 75 - 81, 2011, 査読有.

4) Wakako Araki, Hiroki Shintaku, Hiroyuki Ohashi, Yoshiki Horiuchi and Yoshio Arai, Temperature Dependence and Fracture Criterion of Mixed Mode I/II Fracture Toughness of Phenolic Resin for Friction Material, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 121, pp. 2301 - 2309, 2011, 査読有.

5) Nurul, Md. Islam, Yoshio Arai and Wakako Araki, Effect of Plastic Strain Range on Prediction of the Onset of Crack Growth for Low-Cycle Fatigue of SUS316NG Studied using Ultrasonic Back-Reflection, J. Solid Mech. Mater. Engng., Vol. 4, No. 3, pp. 376 - 390, 2010, 査読有.

6) Rafiquzzaman MD and Yoshio ARAI, Hybrid Effect on Whisker Orientation Dependence of Composite Strength of Aluminum Cast Alloy Reinforced by Al₂O₃ Whiskers and SiC Particles, J. Solid Mech. Mater. Engng., Vol. 4, No. 2, pp. 303 - 314, 2010, 査読有.

7) Wakako Araki, Kota Uchiki, Yoshio Arai, and Mitsuyuki Tanaka, Effects of Interface Stiffness and Delamination on Resonant Oscillations of Metal Laminates, NDT & E International, Vol. 43, issue 4, pp. 297 - 304, 2010, 査読有.

8) Wakako Araki, Yoshio Arai, Oxygen

Diffusion in Yttria-Stabilized Zirconia Subjected to Uniaxial Stress, Solid State Ionics, Vol. 181, pp. 441 - 446, 2010, 査読有.

9) Md. Arefin KOWSER, Yoshio ARAI and Wakako ARAKI, An Iteration Method For Singular Fields Around An Interface Edge Of Elastic/Power-Law Hardening Materials Joint, J. Solid Mech. Mater. Engng., Vol. 4, No. 7, pp. 1040 - 1050, 2010, 査読有.

10) Lixia Xu, Yoshio Arai, Kazunari Ozasa, Hiroki Kakoi, Yuan-Hua Lianga and Wakako Araki, Estimation of the location of embedded InGaAs/GaAs quantum dots by measuring strain-induced blueshift of photoluminescence, Physica E, Vol. 42, No. 9, pp. 2441 - 2445, 2010, 査読有.

11) Wakako Araki, Yoshio Arai, Molecular Dynamics Study on Oxygen Diffusion in Yttria-Stabilized Zirconia subjected to uniaxial stress in terms of yttria concentration and stress direction, Solid State Ionics, Vol. 181, pp. 1534 - 1541, 2010, 査読有.

12) Kazunari Ozasa, Mizuo Maeda, Masahiko Hara, Hiroki Kakoi, Lixia Xu, Yuan-Hua Liang, and Yoshio Arai, ``Direct - to - indirect transition observed in quantum dot photoluminescence with nanoprobe indentation,`` J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 27, Issue 2, pp. 934 - 938, 2009, 査読有.

13) Arai, Y., Sato, M. and Kawamoto, D., Nondestructive detection of tilted planar flaws on back surface using ultrasonic wave interference, J. Solid Mech. Mater. Engng., Vol. 3 No. 3, pp. 518 - 528, 2009, 査読有.

14) Nurul, Md. Islam and Yoshio Arai, Ultrasonic Back Reflection Evaluation of Crack Growth from PSBs in Low Cycle Fatigue of Stainless Steel under Constant Load Amplitude, Mater. Sci. Engng. A, Vol. 520, Nos. 1-2, pp. 49 - 55, 2009, 査読有.

[学会発表] (計 15 件)

1) Md. Arefin KOWSER, Yoshio ARAI and Wakako ARAKI, Asymptotic Analysis for the Singular Stress Behaviour around an Interface Edge of Dissimilar Power-Law Hardening Materials Joint, Proc. 8th FEOFS 2010 conference, 2010 年 6 月 8 日, マレーシアクアラルンプール市.

2) Lixia Xu, T. Ogawa, Y. Arai, W. Araki, K. Ozasa, M. Maeda and M. Hara, Estimation of the location of embedded InGaAs/GaAs quantum dots by measuring the photoluminescence under nanoprobe indentation, Quantum Dot 2010, 2010 年 4 月 27 日, 英国ノッティンガム市.

3) Md. Arefin Kowser, Yoshio Arai and Wakako Araki, AN ITERATION METHOD FOR SINGULAR FIELDS AROUND AN INTERFACE EDGE OF ELASTIC/POWER-LAW HARDENING MATERIALS JOINT, Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics 2009 at Yokohama, Japan, 2009 年 11 月 14 日, 横浜.

4) Islam, Md. Nurul, Yoshio Arai and Wakako Araki, Dependence of Ultrasonic Back Reflections on In-plane Orientation of Incident Wave in Fatigued Austenitic Stainless Steel, The 13th Asia-Pacific Conf. Non-Destructive Testing, 2009 年 11 月 9 日, 横浜.

5) Lixia Xu, Kazunari Ozasa, H. Kakoi, Y. H. Liang, Yoshio Arai and Wakako Araki, Γ -X crossover in InGaAs/GaAs quantum dots due

to the indentation of a flat cylindrical nanoprobe, Modulated Semiconductor Structures 14, 2009 年 7 月 19 日, 神戸.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒居 善雄 (ARAI YOSHIO)
埼玉大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 70175959

(2) 研究分担者

尾笹 一成 (OZASA KAZUNARI)
理化学研究所・前田バイオ工学研究室・専任
研究員
研究者番号: 10231234

荒木 稚子 (ARAKI WAKAKO)
埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 40359691

(3) 連携研究者