量子ドットの押込み発光特性に及ぼすナノ圧子形状の影響

荒居善雄^{*1}, 小川高廣^{*2}, 尾笹一成^{*3}, Lixia Xu^{*2}, 荒木稚子^{*1}

Effect of Nanoprobe shape on indentation-photoluminescence characteristics of Quantum Dots

Yoshio ARAI^{*4}, Takahiro OGAWA, Kazunari OZASA, Lixia XU and Wakako ARAKI^{*4} Saitama Univ. Graduate School of Science and Engineering
Shimoohkubo 255, Sakura-ku, Saitama, Saitama, 338-8570 Japan

Simultaneous measurement of the nanoprobe indentation force and the photoluminescence of InGaAs/GaAs quantum dots is successfully achieved by introducing a specially designed loadcell into the nanoprobe indentation system. By using this improved system, the emission properties of self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots (QDs) under cylindrical nanoprobe indentation are investigated under low temperature and high vacuum conditions. Energy shifts as large as 100 meV induced by cylindrical nanoprobe indentation are observed in the QDs. Further, the increase in the emission energy of the QDs varies from peak to peak under the same indentation force. In order to clarify this mechanism, simulations are carried out based on a three-dimensional finite element and six-band strain-dependent $k \cdot p$ Hamiltonian. The simulation results are in good agreement with the experimental ones. The results of the cylindrical nanoprobe indentation experiments show that the effect of nanoprobe shape on indentation-photoluminescence characteristics is significant.

Key Words : Quantum Dots, Photoluminescence, Indentation, Probe Shape

1. 結 言

現在、情報通信技術の発達に伴いパソコンやメモリーの応答速度の高速化が求められており、応答速度を上げるために半導体に歪を与える手法がとられている。その歪を測定するには半導体の微小化に伴った歪測定方法の微小化が必要である。そこで、量子ドットを歪測定センサーとして応用することで位置分解能の高い歪測定を可能とすることが本研究の目的である。本報では、量子ドットの発光現象の評価における空間分解能に着目し、ナノ圧子の先端形状として平面および円筒形状を採用し分解能向上の可能性を探った。

2. 研究 方法

試験片はInGaAsの量子ドットを含むGaAs基板であり、面方位は[001]である。半導体量子ドットの大きさは高さ約8[nm]、一辺約20[nm]の四角錐形状である。表面から約50[nm]下に約50[nm]間隔で均一に分布している。超高真空 (10^{-8} Pa)、極低温 (10K) に保ったSTM内にて、レーザ光を半導体表面に照射し、発光させ、半導体表面に石英でできたナノ圧子を押し込み(図1)、半導体に歪を発生させ、そのときの量子ドットの発光波長および発光強度の変化を測定した。シミュレーションでは有限要素法を用い、圧子を半導体に押し込んだ際の歪分布を計算し、圧子の先端形状の違いが量子ドットにかかる歪、エネルギーバンド変化に及ぼす影響を調べた。

Fig.1 Indentation test

3. ナノ圧子先端形状の選定

以前の研究では、量子ドットを押し込む際、先端形状が平面型(図2右)のナノ圧子を使用し、量子ドットの発光

特性の評価を行ってきた⁽¹⁾⁽²⁾。その結果、ナノ圧子を半導体に押し込んだ際、ナノ圧子の接触領域端部に位置する量子ドットの発光が確認されている。本研究では、ナノ圧子と半導体の接触領域を狭めることで空間分解能の向上を達成できると考えた。そこで、押し込み力を制御することで接触領域を制御できる円筒型のナノ圧子(図2左)に着目した。円筒型ナノ圧子の接触領域は、ナノ圧子(石英)、半導体(GaAs)のポアソン比をそれぞれ ν_1 , ν_2 , 縦弾性係数を E_1 , E_2 , 押し込み力を F , ナノ圧子の奥行きを L , 曲率半径を r , 接触長さを b とすると

$$b^2 = \frac{4}{\pi} r \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \frac{F}{L} \quad (1)$$

^{*1} 正員, 埼玉大学(〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255)^{*2} 学生員, 埼玉大学 理工学研究科。^{*3} 非会員, 理化学研究所

E-mail: yarai@mech.saitama-u.co.jp 日本機械学会 [No.09-3] M & M2009 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集 [2009.7.24-26, 札幌]

により b が求められ、このパラメータが空間分解能を示す指標となる。接触面積は $b \times L$ により算出することができる。

次に、ナノ圧子先端を円筒型に加工するため FIB(Focus Ion Beam)を使用し、先端形状の加工を行った。本研究では、ナノ圧子先端が実験の際、荷重によって座屈し、変形しないように曲率半径 $r=650\text{nm}$ 、 $L=1000\text{nm}$ になるように加工した (図3)

Fig.2 Contact area and emitting region

Fig.3 Result of half cylinder shape fabrication

4. 歪解析シミュレーション

有限要素法 (FEM) を使用した歪解析モデルを図4に示す。シミュレーションでは、押し込み力 F に対する量子ドットの歪を計算し、値を以下の式(2), (3)に代入して量子ドットの発光に影響を及ぼす価電子帯、伝導帯のエネルギー変化 (ΔE_v , ΔE_c) を求めた。

$$H_e^* = - \begin{bmatrix} P+Q & -S & R & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2}S & -\sqrt{2}R \\ -S^\dagger & P-Q & 0 & R & \sqrt{2}Q & -\frac{\sqrt{6}}{2}S \\ R^\dagger & 0 & P-Q & S & -\frac{\sqrt{6}}{2}S^\dagger & -\sqrt{2}Q \\ 0 & R^\dagger & S^\dagger & P+Q & \sqrt{2}R^\dagger & \frac{\sqrt{2}}{2}S^\dagger \\ \frac{\sqrt{2}}{2}S^\dagger & \sqrt{2}Q & -\frac{\sqrt{6}}{2}S & \sqrt{2}R & P+\Delta_0 & 0 \\ -\sqrt{2}R^\dagger & -\frac{\sqrt{6}}{2}S^\dagger & -\sqrt{2}Q & \frac{\sqrt{2}}{2}S & 0 & P+\Delta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{3}{2}, \frac{3}{2} \\ \frac{3}{2}, \frac{1}{2} \\ \frac{3}{2}, -\frac{1}{2} \\ \frac{3}{2}, -\frac{3}{2} \\ \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$P = a_v (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}), \quad Q = b \left[\varepsilon_{zz} - \frac{1}{2} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) \right],$$

$$R = \frac{\sqrt{3}}{2} b (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) - id \varepsilon_{xy}, \quad S = -d (\varepsilon_{xz} - i \varepsilon_{yz}),$$

価電子帯の歪によるエネルギー変化は次式から計算した。

$$|H_{strain} - I \Delta E_v| = 0 \quad (2)$$

伝導帯の歪によるエネルギー変化は次式から計算した。

$$\Delta E_c = a_v (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \quad (3)$$

押し込み力 2mN の時の円筒型ナノ圧子のシミュレーション結果を図5, 6, 7, 8に示す。X方向の歪分布は、特に ε_{xz} の変化が顕著であり、Y方向の歪分布は、 ε_{yz} の変化が顕著である結果が得られた。また、X方向、Y方向の $\varepsilon_h = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ 、 $\varepsilon_s = \varepsilon_{zz} - 0.5(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})$ を比較するとX方向では中心部から端部にかけてだらかに推移していくのに対して、Y方向の ε_s は端部において急激に変化している。この特徴が ΔE_v 分布に影響し、X方向の ΔE_v 分布は接触領域で正であり、その変化は小さく、Y方向の ΔE_v 分布も接触領域で正であるが端部でその変化は大きい。そのため、発光に影響を及ぼすホールがその部分に集まりやすく、発光する可能性が高いと考えられる。

Fig.4 FEM

Fig.5 Strain distribution of QD in XZ plane

Fig.6 Strain distribution of QD in YZ plane

Fig.7 Energy transition of QD in XZ way

Fig.8 Energy transition of QD in YZ way

5. 実験結果

円筒型ナノ圧子を用いて量子ドットの押し込み試験を行った。発光エネルギーと押し込み荷重の関係を図9に、単位接触面積当たりの押し込み荷重で整理した結果を図10に示す。過去に行った平面型ナノ圧子の結果を図11に示す。この結果から平面型ナノ圧子よりも接触領域が小さくなる円筒型ナノ圧子においても量子ドットの発光現象を捉えることができた。また、平面型ナノ圧子よりも円筒型ナノ圧子の方が単位接触面積あたりの荷重による発光エネルギーの変化が $4\text{--}6\text{meV} \cdot \text{m}^2/\text{mN}$ 大きいことが分かった。

Fig.9 Result of indentation test

Fig.10 Result of indentation by half cylinder

Fig.11 Result of indentation by plane surface

nano-probe

6. 結 言

本研究では、量子ドットの発光現象の評価における空間分解能に着目し、ナノ圧子の先端形状として平面および円筒形状を採用し分解能向上の可能性を探った。その結果、平面型ナノ圧子よりも円筒型ナノ圧子の方が単位接触面積あたりの荷重による発光エネルギーの変化が大きいこと、円筒型ナノ圧子の接触領域端部で価電子帯の正の変化が大きく、この領域で発光する可能性が高いことが明らかになった。

文 献

- (1) Y. H. Liang et al., Simultaneous measurement of nanoprobe indentation force and photoluminescence of InGaAs/GaAs quantum dots and its simulation, Physica E 36, 1 (2007).
- (2) Y. H. Liang et al., Location of quantum dots identified by microscopic photoluminescence changes during nanoprobe indentation with a horizontal scan, Phys. Rev. B 75, 195318 (2007).