

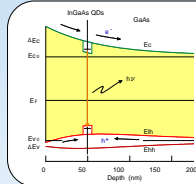
## Strain Measurement using Photoluminescence Characteristics of Quantum Dots due to Nanoscale Indentation of Semiconductor Quantum Dots

荒居善雄(埼玉大), 尾笹一成(理研), Liang Yuanhua (埼玉大院)

Saitama University, 255 shimo-ohkubo, sakura-ku, Saitama, Saitama 338-8570, Japan

The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

### Introduction



半導体量子ドットの発光特性を用いた技術

- 半導体レーザー
  - 高感度光検出器
  - 単電子制御回路
- などが考案されている

半導体内の微小歪の測定技術が重要

従来の研究

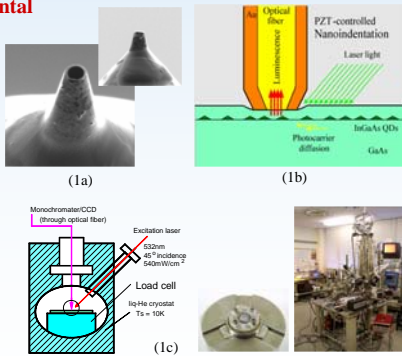
○ナノスケール押込みによる荷重増加に伴い発光が増強する。  
○様々な形状の圧子で押込むことにより歪状態が変化し、荷重増加に伴うエネルギーの増加の仕方が異なる。

発光特性を利用し半導体内の微小歪を測定できる可能性がある

**本研究の目的** ナノスケール押込みにより歪を評価する際に量子ドットの位置を同定する

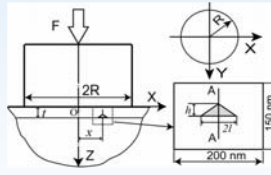
### Method

#### Experimental Set Up



(1a) Probe apex observed by electron microscope ( $d \approx 1 \mu\text{m}$ ).  
(1b) Cross-sectional configuration of nanoprobe and sample.  
(1c) Illustration and picture of nanoprobe PL system and Load cell.

#### Method of analysis

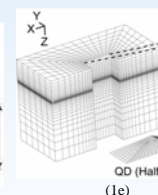


$$v = \frac{c_{12}}{c_{11} + c_{12}}$$

$$E = (1 - 2\nu)(c_{11} + 2c_{12})$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1f)$$

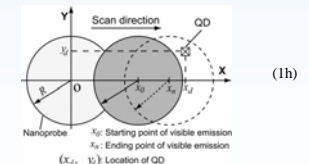
(1d) Contact model with plane indenter (no friction).  
(1e) Mesh of model in our analysis (ABAQUS).  
(1f) Elastic stiffness and deformation potential of each materials.



#### Six-band Hamiltonian

$$H = \begin{pmatrix} E_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_6 \end{pmatrix} \quad (1g)$$

#### Coordinate system of analysis

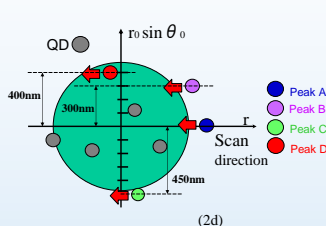
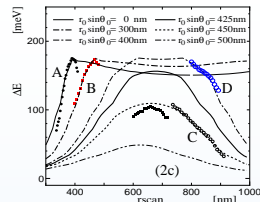
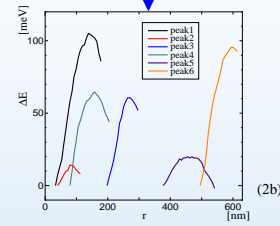
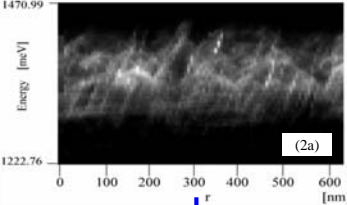


#### Method of identification

$$J = (\delta E_{\max}^{\text{exp}})^{-2} \sum_{k=0}^n \{ \delta E_{\max}^{\text{exp}}(x_k) + \Delta E_0^* - \Delta E^{\text{sim}}[x_k^*, x_d^*, y_d^*] \}^2, \quad \min J$$

### Experiment

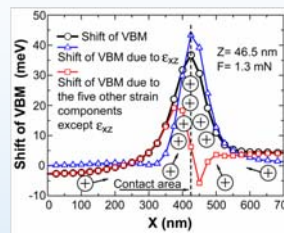
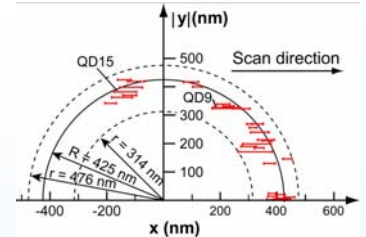
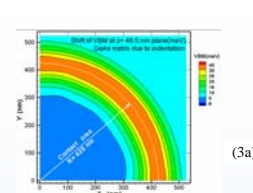
#### Horizontal Scan Test (1.274mN)



(2a) Change of luminous energy and intensity during optical fiber Scan test. (Brightness is intensity)  
(2b) Dependence of emission lines on scanning distance.  
(2c) Comparison of measured  $\Delta E$ - $r$  relations with FEM result.  
(2d) Illustration of location identification of quantum dots observed during scan test.

- 1) 圧子の位置が変化すると変化する距離に伴い、発光エネルギーは放物線のように変化し、最大100meV程度増加した。
- 2) 実験結果(Plot)と解析結果(Line)の比較より、実験中に観察できた発光エネルギーの変化 Peak Aは圧子中心付近、Peak Bは圧子中心から約300nm離れた位置を通ったと予測できた(2c・2d)。
- 3) Scan試験結果から発光している量子ドットが通過した線と圧子の中心からの距離 $r \sin \theta$ が(2d)で示したように予測可能である。

#### Hole concentration due to nanoprobe indentation



(3a) Comparison of identified QD's location and shift of VBM in GaAs matrix due to indentation.  
(3b) Illustration of the holes concentration due to nanoprobe indentation in global model. The shift of VBM are plotted according to the results of GaAs matrix at  $z = 46.5 \text{ nm}$  in the  $x$ - $z$  plane.

- Scan試験結果に対して位置同定計算を行ったところ、QDの発光のほとんどは圧子の端部付近で観察できたことが分かった。
- 解析結果からholeは圧子端部付近に全て集まっており、圧子中心付近では発光は起きにくいという結果と一致した。

### Conclusion

•  $x$ 方向、 $y$ 方向、エネルギー方向の3つの変数を持つ、最小2乗法を用いた位置同定方法を提案した。

$$j = \left[ \sum_{i=0}^n \{ \delta E^{\text{exp}}(x_i) + \Delta E_0^* - \Delta E^{\text{sim}}(x_i; x_d^*, y_d^*) \}^2 / (\delta E_{\max}^{\text{exp}})^2 \right]$$

- 圧子半径・荷重測定に伴う誤差の影響を考慮した時、30nm以上の精度で位置同定が可能なが分かった。また、人為的誤差の影響は経験により誤差を無視出来ることが分かった。
- Scan試験結果に対して位置同定計算を行ったところ、QDの発光のほとんどは圧子の端部付近で観察できたことが分かった。
- 解析結果から価電子帯は圧子端部付近で極大値を取り、holeは圧子端部付近に全て集まり、発光が強くなることが分かった。