ナノスケール押込み発光現象における量子ドットの歪、エネルギー バンドおよび位置同定

荒居 善雄, Liang Yuan-Hua 埼玉大学 理工学研究科 人間支援・生産科学部門

Key Words: Quantum dots, Nanoscale indentation, Location identification, Contact mechanics

1. 緒 言

半導体量子ドットの発光状態(光のエネルギーと強度)の歪 依存性を利用することにより、半導体表面近傍のナノスケール の局所的な歪を測定できる可能性がある。従来の研究で、押込 み荷重の増加に伴い、半導体量子ドットの発光強度が増減する ことが見出されている⁽¹⁻³⁾。本研究では、InGaAs/GaAs ヘ テロ構造(量子ドット)を持つ半導体に平面状の光ファイバー プローブによる押込み発光測定試験を荷重測定と同時に行った ^(4,5)。発生する歪を弾性接触理論により、歪がバンドギャップに 及ぼす影響を歪ハミルトニアンにより、それぞれ計算した。さ らに、ナノスケール押込みによる歪測定法の開発に資するため に、ナノプローブと量子ドットの距離を変化させ量子ドットの 位置を同定する方法を、実験及び解析的に検討した。

2. 試験片および試験方法

試験に供した半導体ヘテロ構造の試験片は、図1に示すよう にGaAsの表面直下約50nmに底面長約20nm,高さ約7nmの InGaAs量子ドットが約50nmの間隔で分布する。押込み試験 は、超高真空(10^{-7} Pa),極低温(約5K)において、石英ファイ バー圧子を用いて行った。押込むと同時に発光(スペクトル)測 定を行い、光の波長と強度を記録した。押込み荷重は、試料の直 下に薄肉円筒型ロードセルを置き、円板の歪を測定することに より実測した。圧子の制御はピエゾ素子(圧電素子)で行った。 平面状圧子先端の直径 d_0 は約850nmである。



Fig. 1 Configuration of optical fiber indentation test

3. 解析方法

有限要素法を用いて、圧子と基板の接触解析を行った。解析モ デルを図2に示す。圧子と基板の接触の条件は摩擦なしとした。



Fig. 2 Contact model with plane indenter

Table. 1 Elastic stiffness				
	GaAs	$\mathrm{In}_{0.5}\mathrm{Ga}_{0.5}\mathrm{As}$		
$c_{11}[Pa]$	11.81×10^{10}	10.1×10^{10}		
$c_{12}[Pa]$	$5.32{ imes}10^{10}$	$4.93{ imes}10^{10}$		

結晶格子の歪により、電子(正孔)のエネルギー準位が変化する。価電子帯におけるその大きさは次に示すハミルトニアン行列の固有値として表される。ここで、上添え字の[†]は複素共役、 $i = \sqrt{-1}$ を表す。伝導帯での歪による電子のエネルギー変化は $\Delta E_c = a_c(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})$ で表される。量子ドットからの発光のエネルギーは、励起された電子がドット内で再結合する際に失うエネルギーに等しく、発光の強度は、再結合する電子の数に比例する。各材料の歪ポテンシャルを表2に示す。

$$P = a_v(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \tag{1}$$

$$Q = -\frac{b}{2}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} - 2\varepsilon_{zz})$$
(2)

$$R = \frac{\sqrt{3}}{2}b(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) - id\varepsilon_{xy} \tag{3}$$

$$S = -d(\varepsilon_{zx} - i\varepsilon_{yz}) \tag{4}$$

 $-H_{strain} =$

(

P+Q	-S	R	0	$\frac{1}{\sqrt{2}}S$	$-\sqrt{2}R$]
$-S^{\dagger}$	P-Q	0	R	$\sqrt{2}Q$	$-\sqrt{\frac{3}{2}}S$
R^{\dagger}	0	P-Q	S	$-\sqrt{\frac{3}{2}}S^{\dagger}$	$-\sqrt{2}Q$
0	R^{\dagger}	S^{\dagger}	P+Q	$\sqrt{2}R^{\dagger}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}S^{\dagger}$
$\frac{1}{\sqrt{2}}S^{\dagger}$	$\sqrt{2}Q$	$-\sqrt{\frac{3}{2}}S$	$\sqrt{2}R$	$P + \Delta_0$	0
$-\sqrt{2}R^{\dagger}$	$-\sqrt{\frac{3}{2}}S^{\dagger}$	$-\sqrt{2}Q$	$\frac{1}{\sqrt{2}}S$	0	$P + \Delta_0$

Table.2	Deformation	potentials	[unit:eV
---------	-------------	------------	----------

	GaAs	$\mathrm{In}_{0.5}\mathrm{Ga}_{0.5}\mathrm{As}$
a_c	-7.63	-6.06
a_v	-1.00	-0.93
b	-1.77	-1.81
d	-3.10	-3.21
Δ_0	0.33	0.35

4. 実験結果および考察



Fig. 3 Coordinate system in our work.



Fig. 4 Change of luminous energy and intensity during optical fiber scan test

図3に実験と解析に用いた座標系を示す。実験開始時の圧子中 心位置を原点とし、試験片に x-y 座標を固定し、scan の方向を x 軸、垂直な方向に y 軸を置いた。実験中のある量子ドットか らの発光を観察し始めた位置を x_0 、発光を観察できなくなった 位置を x_n とした。また、未知数であるドットの位置を x_d 、 y_d とした。図4に等荷重 (F=1.3mN)条件下で圧子を x 方向に動 かした時の発光測定結果を示す。横軸に圧子の移動距離、縦軸 に発光エネルギー、明暗で発光強度を表した。押込み試験の場 合、エネルギー変化は押込み荷重と線形の関係を示したのに対 して、等荷重の scan 試験では移動距離の変化によって非線形な 変化を示した。

次に位置同定方法について示す。実験時の圧子位置の変化量 とエネルギー変化量の形状 $(\mathbf{x}-\Delta E^{exp}(x_i))$ を変えることなく解 析結果と比較するため、エネルギー方向、 \mathbf{x} 方向、 \mathbf{y} 方向に変 数を持つ最小 2 乗法を基にした式を以下に示す。次式の j が最 小になる x'_d 、 y'_d 、 ΔE_{const} を決定する。

$$j = \sum_{i=0}^{n} \{ \Delta E^{exp}(x_i) + \Delta E_{const} - \Delta E^{sim}(x + x'_d, y'_d) \}^2$$
(5)

各量子ドットの位置は $x_d = x_0 - x'_d$, $|y_d| = |y'_d|$ で決定出来る。 圧子の接触断面が円であるため、y 座標の符号はy 方向 scan を 行って判別する。







indentation (F=1.3mN).

scan 試験時の圧子の位置変化に伴う発光エネルギー変化 (31 個) に対して位置同定計算を行い、圧子中心に対する量子ドットの 相対位置を図6に示す。原点が圧子中心を、破線が圧子端部を 表し、各実験結果は細線で示した。細線の始点と終点は発光を 観察し始めた点と観察できなくなった点を示してる。この結果 から、量子ドットの発光を観察した位置はほとんどが圧子の端 部付近 (382nm ≤ r ≤ 508nm) となっており、圧子中心部では 強度の大きな発光は観察できなかったことが位置同定の結果か ら分かった。図7に先端半径 R₀ = 425nmの圧子で1.3mN 押 込んだ時の GaAs の価電子帯の変化の分布図を示す。端部付近 に ΔE_{lh} が大きくなる円環状の領域が発生し、Hole のポテン シャルの谷間が形成されていることがわかる。伝導帯の分布は 半径方向に大きくは変化しないため接触面外で励起した電子は 圧子中心部まで均等に伝播するが、価電子帯は端部付近で最も 深く分布していることから Hole は端部付近でほとんどが電子 と再結合してしまい、中心部での発光は起きにくい状況になっ ていると考えられる。この結果を図6の位置同定結果と比較す ると、端部付近で多くの発光を観察でき、中心部では観察され なかった結果と一致した。

文献

 Ozasa, K., Nomura, S. and Aoyagi, Y., Supperlattices and Microstructures, Vol.30, No.4, pp. 169, 2001.
Ozasa, K., Aoyagi, Y., Yamane, A. and Arai, Y., Appl. Phys. Lett., Vol. 83, No. 11, pp. 2247, 2003.

(3) Ozasa, K., Aoyagi, Y., Hara, M., Maeda, M., Yamane, A. and Arai, Y., Physica E, Vol. 21, pp. 265 -269, 2004.

(4) LIANG, Y., ARAI, Y., OZASA, K., OHASHI, M. and TSUCHIDA, E., Physica E, Vol. 36, pp. 1 - 11 (2007. 1).

(5) Liang, Y., Ohashi, M., Arai, Y. and Ozasa, K., Phys. Rev. B 75, 195318, pp. 1 - 10, 2007.

(6) Ozasa, K., Maeda, M., Hara, M., Ohashi, M., Liang, Y., Kakoi, H. and Arai, Y., Physica E 40, pp. 1920, 2008.

(7) Ozasa, K., Maeda, M., Hara, M., Kakoi, H., Xu, L., Liang, Y. and Arai, Y., J. Vac. Sci. Technol. B 27 (2), pp. 934, 2009.