

量子井戸構造半導体のフォトルミネッセンス特性

江崎美由紀, 本村 麻子, 桐原 夏紀, 斉藤ゆう子, 今井 元

日本女子大学理学研究科 数理・物性構造科学専攻

(2010年11月20日受理)

要 旨 我々は, InGaAs/InP 量子井戸構造半導体のフォトルミネッセンス (PL) スペクトルから, 井戸内での電子の振る舞いについて検討を行ってきた。これまでに, 励起光の2種類の偏波方向 (TE 波・TM 波) について, 入射角を変化させて PL スペクトルを観測することで, 励起光の偏波依存性を確認している¹⁾。今回は, 励起光の偏波方向による PL ピーク波長シフトの振る舞いの違いから, ヘビーホール (HH) バンドとライトホール (LH) バンドの縮退の度合いを推定した。また, 無歪みのエネルギーに対する PL ピークエネルギーを計算することで, 歪みの割合を見積もった。

キーワード: 量子井戸構造, フォトルミネッセンス, InGaAs/InP

1. はじめに

量子構造の半導体がデバイスの性能を向上させると考えられ, 様々な研究が行われている²⁻⁶⁾。光通信システムに用いられる半導体光デバイスには, 様々な偏波を有する信号光に対して, 偏波に依存せずに動作する半導体素子が求められている。半導体においては, 井戸層に歪みをかけることで価電子帯の HH バンドと LH バンドが分裂する。この特徴を利用し, 量子井戸構造での HH と LH の第1準位を一致させ, 偏波無依存の素子実現が提案されている。このように, 量子井戸構造半導体では歪みを制御することが重要であるが, 結晶成長後の井戸層の歪みとその特性を評価する容易な方法は存在していない。

本研究では, 励起光の偏波方向を TM 波, TE 波としたときの PL スペクトルを観測し, これまでに励起光の偏波依存性を確認している¹⁾。本稿では励起光の偏波依存性を用いて, 歪みによって変化する HH と LH の量子準位の関係について解析を行い, 歪みの割合や HH と LH の縮退の度合いを測定することで, 試料の量子準位の縮退評価を行った。

2. 測 定

2.1 試 料

測定には7種類の試料を用いた。図1に試料の構造図

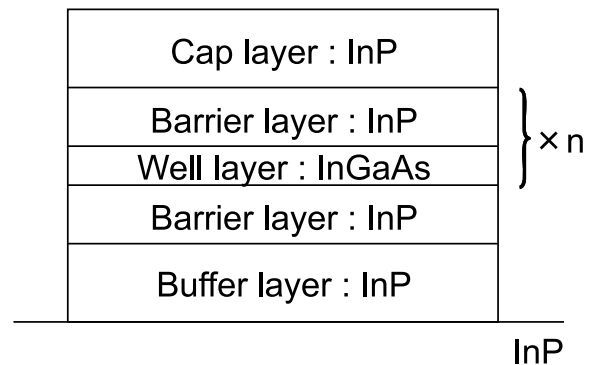


Fig. 1. Schematic structure of samples

Table 1. Parameters of samples

	Cap	Barrier	Well	Buffer	n
Sample #1	10 nm	10 nm	15 nm	500 nm	20
Sample #2	40 nm		6 nm	90 nm	6
Sample #3				190 nm	
Sample #4					
Sample #5	100 nm	5 nm	5 nm	100 nm	11
Sample #6		10 nm			
Sample #7					

を示す。試料はすべて InP 基板上の多重量子井戸構造であり, 井戸層に InGaAs, バリア層に InP を用いている。また, すべての層がアンドープ n 型である。各層の厚みと周期を表1に示す。

Contribution No.: MP 10-2

Table 2. Parameters of samples

	Compositions	$\Delta a/a$ [%]	E_g [eV]
Sample #1	In _{0.546} Ga _{0.454} As	0.2	0.74
Sample #2	In _{0.65} Ga _{0.35} As	1.6	0.634
Sample #3	In _{0.42} Ga _{0.58} As	-1.56	0.878
Sample #4	In _{0.44} Ga _{0.56} As	-1.24	0.86
Sample #5	In _{0.58} Ga _{0.42} As	0.68	0.704
Sample #6	In _{0.63} Ga _{0.37} As	1.38	0.66
Sample #7	In _{0.52} Ga _{0.48} As	-0.18	0.78

試料は表 2 に示すように設計されており、 $\Delta a/a$ は格子不整合の割合を示すパラメータである。正のときが圧縮歪み、負のときが引っ張り歪みに対応している。なお、 Δa が InGaAs と InP の格子定数の差、 a が InP の格子定数を示している。また、表中の E_g は各組成における無歪みの場合のエネルギーギャップを示している。これらの値は、InP と In_{1-x}Ga_xAs における伝導帯と価電子帯の電子親和力を用いて求めた⁷⁾。

2.2 フォトルミネッセンス (PL) 測定

図 2 に測定系を示す。井戸層のみを励起するために、励起光には波長 $1.06\ \mu\text{m}$ の YAG レーザ (CrystaLaser, IRCL-1W-1064) を用いた。単一偏波 (TM 波) を有しているので、レーザを 90° 回転させることで偏波方向を変化させた (TE 波)。励起パワーは 1W である。

励起光の TM 波、TE 波の各偏波方向について、試料に対して励起光源の入射角 (θ) を変化させて照射した。このように測定する理由は、励起光の有する偏光成分の割合に変化を与えるためである。回折格子型分光器 (Jobin Yvon, Triax 320) によって PL 光を分光、PbS 受光器で受光し、PL 発光スペクトルを観測した。また、励起強度を弱めるときは、吸収型 ND フィルタ (50%, 10%) を励起光と試料の間に設置し、同様の測定を行っ

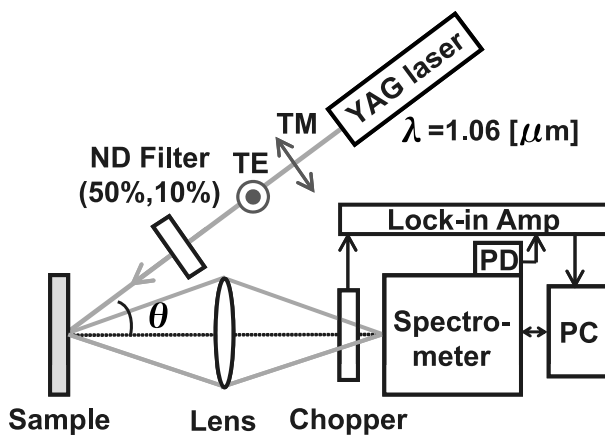


Fig. 2. Experimental set-up

た。

2.3 試料の透過測定

YAG レーザによる励起によって生じる各試料の光吸収量を推定するため、光の透過実験を行い、吸収係数を求めた。各試料の吸収係数を表 3 に示す。なお、井戸層のみで光吸収が生じていると仮定した。

Table 3. Absorption coefficient of samples

	Absorption coefficient [cm^{-1}]
Sample #1	5.0×10^4
Sample #2	4.4×10^5
Sample #3	1.6×10^5
Sample #4	2.9×10^5
Sample #5	2.9×10^5
Sample #6	2.9×10^5
Sample #7	2.8×10^5

3. 結果

3.1 発光スペクトル

励起光の偏波方向、TM 波、TE 波について、入射角を 70° にして観測した発光スペクトルを図 3 に示す。試料は Sample #6 である。励起光の偏波方向の違いによって、PL ピーク波長に差がみられる。

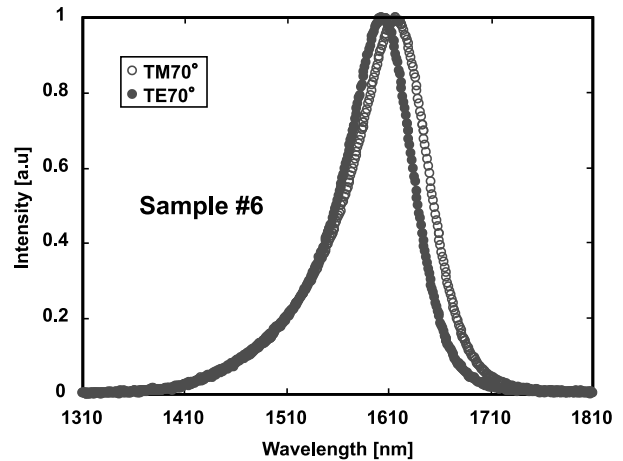


Fig. 3. PL spectrum of Sample #6

3.2 解析

PL 測定において、入射角の変化に伴い、井戸層で吸収される励起光の量も変化する。そこで、図 4 に示すような無限多重反射を考え、屈折角 θ_i を用いて、吸収される光の総量を算出する以下の式を求めた。

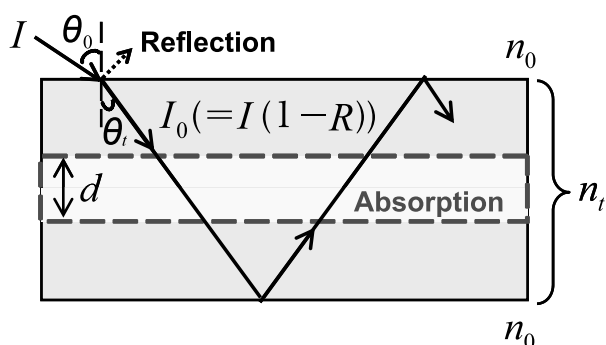


Fig. 4. Absorption process in the sample

$$\frac{I_0 \left[1 - \exp \left(-\frac{\alpha d}{\cos \theta_t} \right) \right] \left[1 - R^n \cdot \exp \left(-\frac{n \alpha d}{\cos \theta_t} \right) \right]}{1 - R \cdot \exp \left(-\frac{\alpha d}{\cos \theta_t} \right)} \quad (1)$$

数回反射するとパワーが小さくなる。

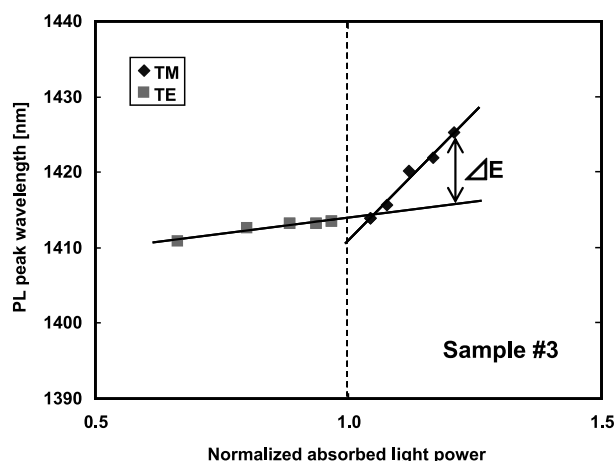
つまり、 $n \rightarrow \infty$ のとき、(1) 式は、

$$\frac{I_0 \left[1 - \exp \left(-\frac{\alpha d}{\cos \theta_t} \right) \right]}{1 - R \cdot \exp \left(-\frac{\alpha d}{\cos \theta_t} \right)} \quad (2)$$

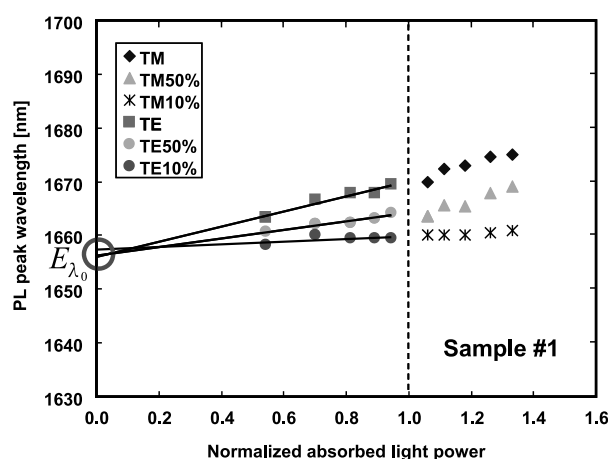
吸収係数 α には、表 3 に示す値を用いて計算を行った。

吸収パワーの割合に対するピーク波長の関係を図 5 に示す。(a) が Sample #3, (b) が Sample #1 の解析結果である。ここで、横軸の示す吸収パワーの割合とは、(2) 式を用いて求めた角度ごとの吸収パワーを垂直入射（入射角 0° ）時の吸収パワーで規格化したものである。よって図中の破線が垂直入射を示している。これを基準に、TE 波で励起した場合、入射角 θ が大きくなるにつれ反射率も増加するため、吸収パワーの割合が減少するが、TM 波で励起した場合は、入射角 θ が大きくなるにつれ吸収パワーの割合も増加する。

図 5 から、吸収パワーの割合が増加するにしたがって PL ピーク波長が長波長側へとシフトしていることがわかる。これは、吸収されるパワーの割合がウエハの温度上昇に対応しているためである。図 5 (b) に示すように、ND フィルタを用いて励起強度を 50%, 10% と弱めるほど、PL ピーク波長が短波長側を示すことから裏付けられる。



(a)



(b)

Fig. 5. PL peak wavelength versus the normalized calculated absorbed light power.

(a) is for the sample #3

(b) is for the sample #1

TE 波による励起

TE 波による励起は HH が主として影響しているという報告がある^{8,9)}。これに基づいて考えれば、吸収パワーの割合が 0 のときに図中の外挿線が示す波長が、ウエハの温度上昇を含まない PL 波長であり、電子側と HH の第 1 準位間のエネルギーに対応するはずである。また、このエネルギーは各試料固有のものであり、励起強度を弱めたとしても変わらないはずである。図 5 (b) より、TE 波照射時の吸収パワーの割合に対する PL ピーク波長シフトを示す外挿線は、励起強度の強さ（フィルタの有無）に関係なく切片がだいたい一致していることがわかる。他の試料でも同様の傾向を確認しており、我々は PL ピーク波長がウエハの温度のみに依存し、電子側と HH の第 1 準位間の再結合によるものであると推定した。

TM 波による励起

TE 波は試料に対して平行に偏光した成分のみからなっている。したがって入射角 θ を変えても、平行成分だけであり、垂直成分がないため、HH バンドと LH バンドで吸収される比が一定である。一方で TM 波は試料に対して平行、垂直に偏光した 2 成分からなっており、入射角 θ が大きくなるにつれて垂直成分の割合が増えるため、LH バンドで吸収される割合が増える。したがって、TM 波による励起は、LH バンドによる影響が大きいと考えた⁸⁾。量子井戸構造半導体では、無歪みの場合、HH と LH の第 1 準位が離れているが、少しずつ歪ませることで第 1 準位を一致（縮退）させ、さらに歪みを加えることで準位を離すことが可能である。HH と LH で縮退していない場合、電子側と HH の第 1 準位間エネルギーよりも電子側と LH の第 1 準位間のエネルギーの方が大きいので、LH で励起されたキャリアの緩和時間が長くなり、ウエハの温度が上昇すると推定している。したがって、TE 波を励起光とした場合に比べ、TM 波を励起光とした場合の PL ピーク波長シフトの傾きが大きくなる。図 5 (a) のように、励起光源を TM 波としたときの外挿線の傾きが、励起光源を TE 波としたときの外挿線の傾きよりも大きいのはこのためだと考えている。また、縮退している状態ではその効果はないので、励起光の偏光方向によらず、PL ピーク波長は一樣な傾きを示すはずである。図 5 (b) では、外挿線の傾きに大きな差はみられない。このように、励起光の偏波方向による、吸収パワーの割合に対する PL ピーク波長シフトの傾きを比較することで、HH と LH の縮退状況を推定することを考えた。

4. 評価

4.1 歪みの割合

各試料について歪みの度合いを推定するために、以下のように歪みの割合を示すパラメータを定義する。

$$\frac{(E_{e1} - E_{hh1}) - E_{\lambda_0}}{E_{e1} - E_{hh1}} \times 100 [\%] \quad (3)$$

ここで、引っ張り歪み量子井戸構造では、LH バンドが価電子帯の上端となる。このことから、(3) 式の値は正のときに引っ張り歪み、負のときに圧縮歪みに対応している。 $E_{e1} - E_{hh1}$ は、無歪みの場合の、電子側と HH の第 1 準位間のエネルギー差を示している。電子側、HH、LH の各エネルギーは、真空準位を基準とした電子親和力⁷⁾の違いから障壁の高さとエネルギーギャップを求め（表 2）、表 1 に示した井戸幅を用いて、計算より求めたものである。また、 E_{λ_0} は、図 5 (b) に示した、ウエハの温度上

昇を含まない、歪み効果を含んだ電子側と HH の第 1 準位間のエネルギーである。したがって、計算より求めた無歪みの場合のエネルギーと解析結果より得られる歪みを含んだエネルギーとの差が歪み量に対応すると考え、これらを用いて歪みの割合を示すパラメータとした。

図 6 に格子不整合の割合と歪みの割合の関係を示す。格子不整合の割合から、設計した値が圧縮歪みから引っ張り歪みに向かって、Sample #2, #6, #5, #1, #7, #4, #3 という順番で並ぶのに対し、歪みの割合でも並び順がほぼ対応していることがわかる。しかし、予想よりも PL ピーク波長が長波長側で観測されたため、すべての試料において歪みの割合が引っ張り歪みを示した。我々は、PL ピーク波長に他の効果が混在していると考え、不純物による影響などを推定している。これについては今後検討を行う。

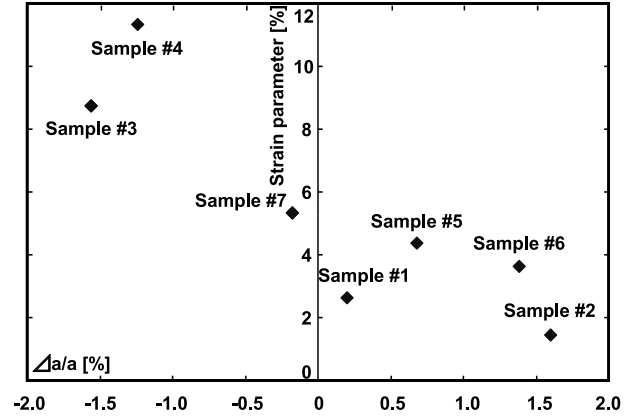
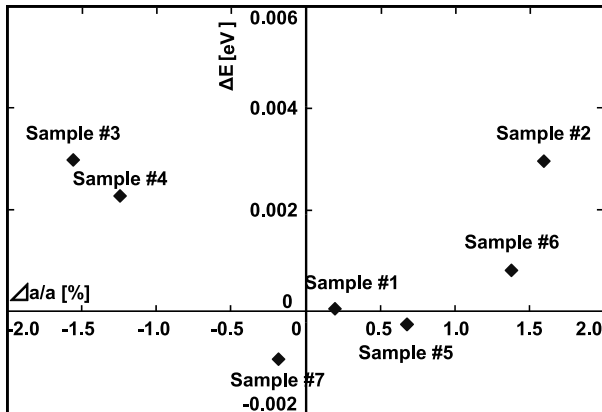


Fig. 6. Strain parameter versus the lattice mismatch

4.2 縮退の度合い： $\angle E$

前述のとおり、HH と LH で縮退していれば、偏波方向によらず外挿線の傾きが等しくなると考え、HH と LH の量子準位の差を示すパラメータとして $\angle E$ を定義する。

図 7 に $\Delta a/a$ （格子不整合の割合）と $\angle E$ の関係を示す。Sample #1 は、 $\angle E$ がほとんど 0 であることから、HH と LH が縮退していると考えている。また、圧縮歪み、引っ張り歪みに関わらず $\Delta a/a$ の値が大きいほど $\angle E$ が大きい、 $\Delta a/a$ の値が小さくなっていくにつれ、 $\angle E$ が 0 に近づいていくことがわかる。我々は、この関係がバンド構造における歪みの効果に対応していると考えており、 $\Delta a/a$ が 0.2~1.0% のときに HH と LH の第 1 準位が縮退していると推定している。今後は歪みの小さい試料を中心にサンプル数を増やし、さらなる検討を進める。

Fig. 7. ΔE versus the lattice mismatch

5. ま と め

InGaAs/InP 量子井戸構造半導体を用いて, TM 波, TE 波の各励起光に対して, 入射角を変化させて PL スペクトルを観測した。半導体中に吸収される光パワーを計算し, 吸収パワーに対する PL ピーク波長の関係から解析を行った。

計算より求めた無歪みの場合のエネルギーと, TE 波を励起光としたときの PL ピーク波長を用いて, 歪みの割合を推定した。解析結果より得た PL エネルギーが, 他の効果を含んだエネルギーであると考えられ, さらなる検討が必要であることがわかった。

励起光の偏波方向による PL ピークシフトの振る舞いの違いから, 量子準位の縮退の度合いについて解析を行っ

た。PL スペクトルの励起光の偏波依存性から, HH と LH の縮退状況を推定できることを示した。

謝 辞

本研究において多大な助言を頂きました東京大学荒川泰彦教授に深く感謝いたします。そして, 試料を提供してくださった(株)富士通研究所の皆様にも心より感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 本村麻子, 今井 元: 日本女子大学紀要, 理学部, 第15号, pp.9-12 (2007)
- 2) Y. Arakawa, and H. Sakaki: *Jpn. Appl. Phys. Lett.*, **40**, pp.939-941 (1982)
- 3) C. Setiangung, H. Shimizu, Y. Ikenaga, K. Kumada, and A. Kasukawa: *IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electron.*, **9**, pp.1209-1213 (2003)
- 4) T. Akiyama, M. Ekawa, M. Sugawara, H. Sudo, K. Kawaguchi, A. Kuramata, H. Ebe, K. Morito, H. Imai, and Y. Arakawa: *Optical Fiber Communication Conference Post-deadline Papers*, p.12 (2004)
- 5) K. Otsubo, N. Hatori, M. Ishida, S. Okumura, T. Akiyama, Y. Nakata, H. Ebe, M. Sugawara, and Y. Arakawa: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, pp.L1124-L1126 (2004)
- 6) D. Bimberg: *J. Phys. D-Appl. Phys.*, **38**, pp.2055-2058 (2005)
- 7) M. Sugawara, N. Okazaki, T. Fujii, and S. Yamazaki: *Phys. Rev. B*, **48**, pp.8102-8118 (1993)
- 8) M. Yamanishi, and I. Suemune: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23**, pp.L35-L36 (1984)
- 9) M. Asada, A. Kameyama, and Y. Suematsu: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-20**, pp.745-753 (1984)

Photoluminescence of the Quantum Well Structures

Miyuki Esaki, Asako Motomura, Natsuki Kiriwara, Yuko Saito and Hajime Imai
The Graduate School of Science, Division of Mathematical and
Material Structure Science, Japan Women's University

(Received November 20, 2010)

Abstract: We have measured photoluminescence (PL) spectrum peak of InGaAs/InP quantum well structures by changing the incident angle for both TE and TM polarized excitation light. We have already examined the difference in the behavior of the PL peak shift between TE mode excitation and TM mode excitation. In this report, we have evaluated the strain in the well layer using this difference. First, we have calculated the quantum levels and compared the PL peak wavelength. The difference between these values is considered to correspond to the strain. Furthermore, we have estimated the degeneracy of first quantum levels of light holes (LH) and heavy holes (HH).

Key words: Quantum-well, Photoluminescence, InGaAs/InP