

原 著

量子ドット構造半導体の光励起発光スペクトルの考察

福田 綾子, 本村 麻子, 桐原 夏紀, 斉藤ゆう子, 江崎美由紀, 今井 元
日本女子大学理学研究科 数理・物性構造科学専攻

(2011年10月11日受理)

要 旨 我々は, InGaAs/InP 量子井戸構造半導体と InAs/InGaAsP/InP 量子ドット構造半導体について, フォトルミネッセンス (PL) 測定より得られるピーク波長を用いて解析を行ってきた。これまでに量子井戸構造では, ピーク波長シフトは試料の温度上昇が影響していると考えてきたが, 量子ドット構造では, 試料の温度上昇だけでなく, 別の現象が影響していると考えた。我々はこれを, 異なるサイズのドットが存在するためにバンドフィリングに似た現象が起き, 発光に影響を与えていると推定した。そこで試料の温度を外部から制御し, 励起条件を変化させることで, 発光現象についてより詳細な検討を行った。

キーワード : InGaAs/InP 量子井戸構造半導体, InAs/InGaAsP/InP 量子ドット構造半導体, フォトルミネッセンス

1. はじめに

量子構造半導体は発光効率を上げ, デバイスの性能を向上させると考えられ, 研究が行われている。特に, 様々な偏波を持つ信号光を伝送する光通信システムにおいては, 偏波方向に依存せず動作する半導体素子が求められている。そこで, 半導体に歪みをかけることで価電子帯の HH バンドと LH バンドを一致させ, 偏波無依存を実現させることが提案されている。そのためには, 半導体の歪みの割合と量子準位の縮退を評価する必要がある。

これまでに量子井戸構造では, 励起光の偏波方向を p 偏光, s 偏光としたときの PL スペクトルを観測し, 歪みの割合と量子準位の縮退を評価する方法を確立している²⁾。量子ドット構造においても同様に励起光の偏波方向を変えて PL スペクトルを観測したところ, 量子井戸構造とは異なる傾向が現れた。量子井戸構造では, 温度上昇が PL ピークシフトに影響していると考えてきたが, 量子ドット構造では温度上昇だけではなく, 別の現象が影響していると考えた。量子ドット構造では, 異なるサイズのドットが存在している。そのためドット同士が電子的に結合し, バルクのバンドフィリングに似た現象が起きていると考えた。

本研究では, このバンドフィリングに似た現象をより詳細に検討するために, 試料の温度を制御し, 様々な励起条件のもとで PL スペクトルを解析した。

2. 試 料

測定には 5 種類の InGaAs/InP 量子井戸構造半導体と 5 種類の量子ドット構造半導体を用いた。図 1 に試料の

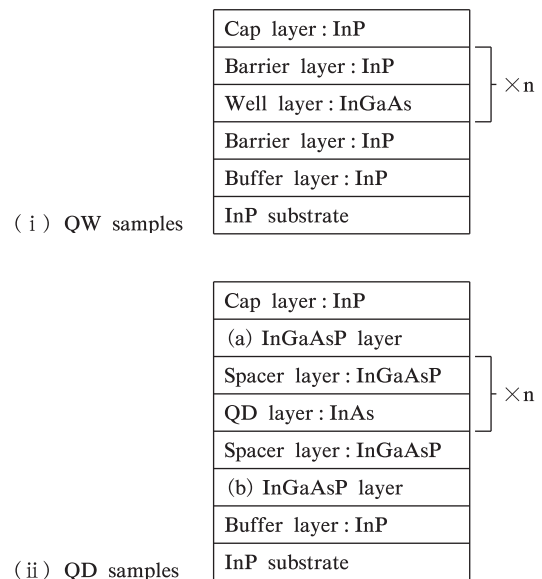


Fig. 1. Schematic structures of samples

構造図を示す。ドットの標準サイズは約 $30\text{ nm} \times 40\text{ nm} \times 6\text{ nm}$ であるがばらつきがある。試料はすべて InP 基板上の多重量子構造である。また、すべての層がアンドープの n 型である。

各層の厚みと周期を表 1 に示す。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。なお、 Δa が井戸層、ドット層と InP の格子定数の差、 a が InP の格子定数を示している。

Table 1. Parameters of samples
(i) QW samples

	Cap	Barrier	Well	Buffer	n
Sample #1	40 nm	10 nm	6 nm	90 nm	6
Sample #2					
Sample #3	100 nm	5 nm	5 nm	100 nm	10
Sample #4					
Sample #5		10 nm			

(ii) QD samples

	Cap	(a)	Spacer	QD	(b)	Buffer	n
Sample #1	20 nm	20 nm	20 nm	0.6 nm	40 nm	100 nm	7
Sample #2							
Sample #3							
Sample #4		10 nm	30 nm				
Sample #5							

Table 2. Sample structure
(i) QW samples

	Compositions	$\Delta a/a$ [%]
Sample #1	In _{0.65} Ga _{0.35} As	1.6
Sample #2	In _{0.42} Ga _{0.585} As	-1.56
Sample #3	In _{0.58} Ga _{0.42} As	0.68
Sample #4	In _{0.63} Ga _{0.37} As	1.38
Sample #5	In _{0.52} Ga _{0.48} As	-0.18

(ii) QD samples

	Compositions	$\Delta a/a$ [%]
Sample #1	In _{0.85} Ga _{0.15} As _{0.33} P _{0.67}	0
Sample #2	In _{0.81} Ga _{0.19} As _{0.35} P _{0.65}	-0.4
Sample #3	In _{0.78} Ga _{0.22} As _{0.37} P _{0.63}	-0.8
Sample #4	In _{0.85} Ga _{0.15} As _{0.33} P _{0.67}	0
Sample #5	In _{0.81} Ga _{0.19} As _{0.35} P _{0.65}	-0.4

3. フォトルミネッセンス (PL) 測定

図 2 に測定系を示す。励起光源には波長 $1.06\mu\text{m}$ の YAG レーザ (CrystaLaser, IRCL-1W-1064) を用いた。p 偏光の単一偏波を有しているため、レーザを 90° 回転させることで偏波方向を s 偏光に変化させた。励起パワーは 1W である。

p 偏光, s 偏光それぞれの励起光について、試料に対し

て入射角 (θ) を 30° , 50° , 70° に変化させて照射し、励起光の有する偏光成分の割合に変化を与えた。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、励起光源と試料の間に吸収型 ND フィルタ (50% , 10%) を設置し、励起強度を変化させた。試料の温度はペルチェ素子によって変化させ、熱電対で測定した。

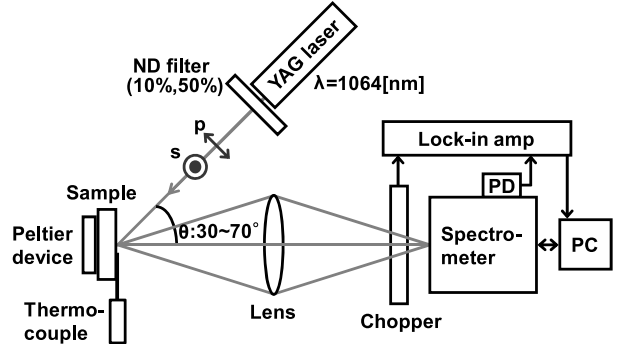


Fig. 2. Experimental set-up

4. 結果と解析

4.1 発光スペクトル

図 3 に室温で量子ドット構造を測定したときの PL スペクトルを示す。ピーク波長は $1,664\text{ nm}$ である。温度や励起条件を変化させるとピーク波長がシフトし、その傾向は偏波方向によって異なる。

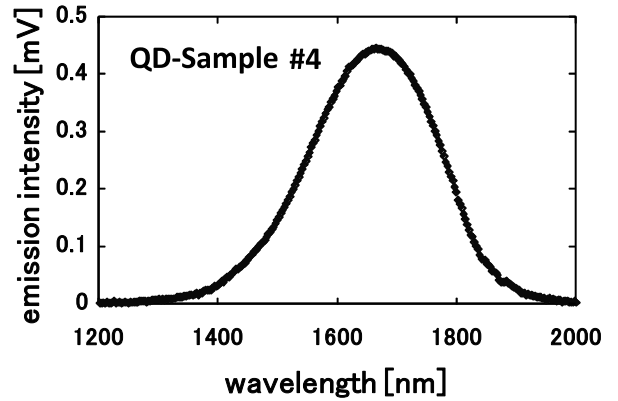
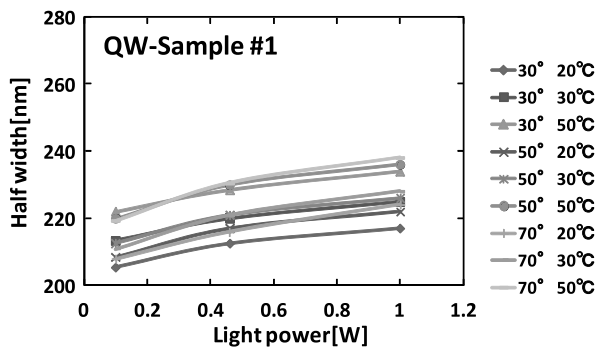


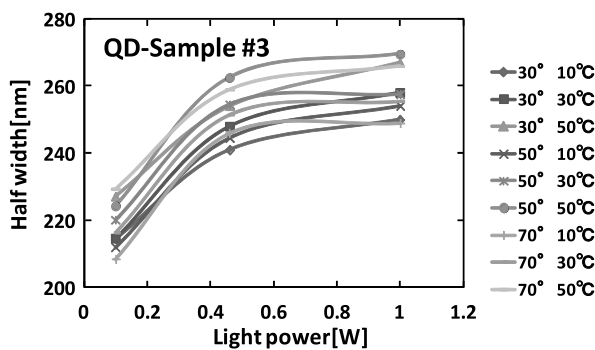
Fig. 3. A typical spectrum at room temperature

4.2 半値幅

図 4 に p 偏光で励起したときの PL スペクトルの半値幅と吸収パワーの関係を示す。量子井戸構造では半値幅が狭く、吸収パワーを上げてあまり広がらないが、量子ドット構造では半値幅が広く、吸収パワーを上げるとさらに広くなり、やがて飽和して一定となった。また p 偏光, s 偏光ともに同様の傾向がみられた。



(a) QW structure



(b) QD structure

Fig. 4. Spectrum half width versus light power.
Excitation light is p-polarized.

量子ドット構造で半値幅が広がっているのは、ドットのサイズが不均一であるために量子準位の値が幅を持ち、そのためピーク波長の異なるスペクトルが重なり、半値幅が広がったと考えられる。

また量子ドットが近接しているためにドット同士が電子的に結合し、連続準位のバルクのように振舞っていると考えられる。そのためバルクのバンドフィリングに似た現象が起き、吸収パワーを上げると広がりを持った量子準位の低い方から電子が溜まっていき、より高いエネルギーでも発光が起きるため、半値幅が広がったと考えられる。

図5にドットのサイズが±10%までばらついているときの量子準位の広がりを示す。ばらつきを考えても準位間でのオーバーラップは存在しないと考えられる。そのためYAGレーザの波長では電子を第2準位まで励起させることはないと考えられる。しかし、第1準位がドットのばらつきによって広がっているため、エネルギーの低い大きなサイズのドットから電子が溜まっていくと考えられる。

しかし、量子準位の広がりには限界があるので、ある程度電子が溜まると飽和し、半値幅の広がりが一定になったと考えた。

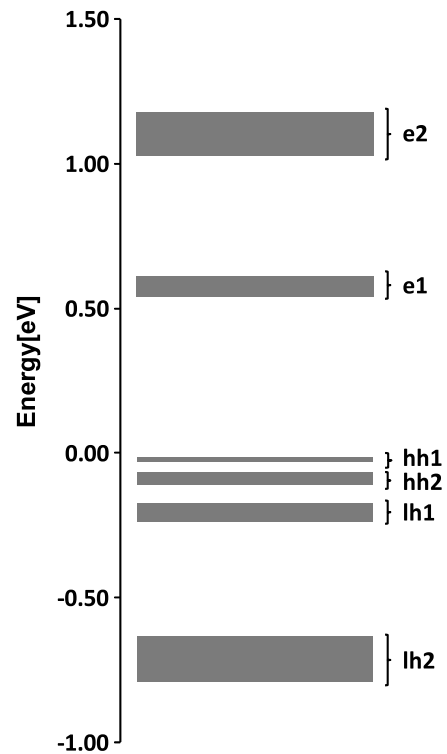


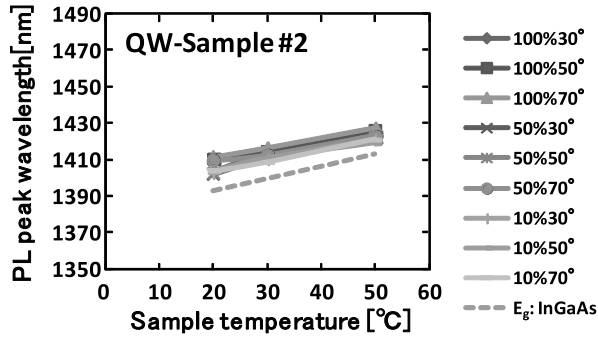
Fig. 5. Distribution of quantum levels due to the ±10% variation in the size of dots.

4.3 温度とピーク波長の関係

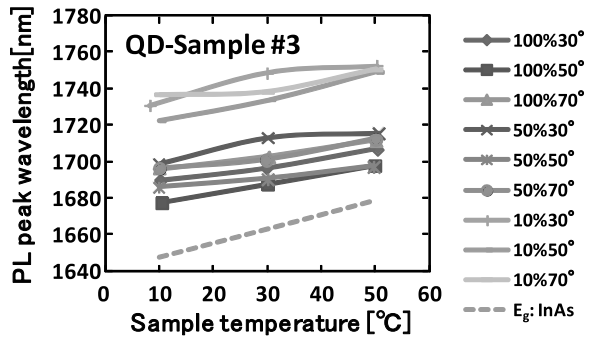
試料の温度上昇とピーク波長シフトの関係を確認するために、励起条件を一定にし、温度を上昇させたときのピーク波長との関係を調べた。図6にp偏光で励起したときのピーク波長と試料温度の関係を示す。図中の点線は、井戸層、ドット層に用いられるInGaAsとInAsのバンドギャップエネルギー(E_g)の温度依存性を示した傾向線である。 E_g の温度依存性は以下の近似式(1)式を使い、温度変化係数 a はInGaAsに4.2を、InAsに3.5を用いた。量子井戸構造、量子ドット構造共に試料の温度上昇によってピーク波長は長波長側にシフトし、その傾きは井戸層、ドット層であるInGaAs, InAsの E_g の温度依存性とだいたい同じ傾向だった。また、p偏光、s偏光ともに同じような傾向が現れた。量子井戸構造、量子ドット構造ともに、励起条件が一定ならば温度上昇によってピーク波長は長波長側にシフトすることを確認した。

$$\frac{dE_g}{dt} = -a \times 10^{-4} \left[\frac{\text{eV}}{\text{K}} \right] \quad (1)$$

a : 温度変化係数



(a) QW structure



(b) QD structure

Fig. 6. λ_{peak} versus sample temperature.
Excitation light is p-polarized.

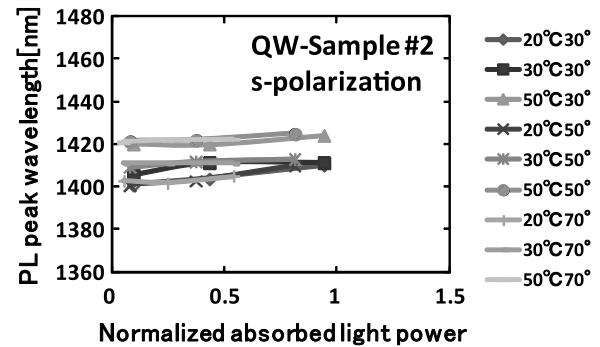
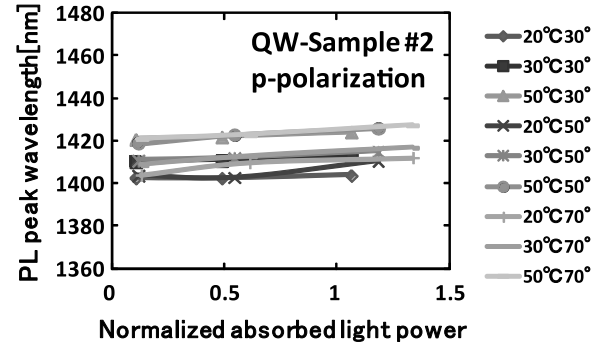
4.4 吸収パワーとピーク波長の関係

試料の温度を一定にしたときのピーク波長と吸収パワーの割合の関係を図7に示す。横軸の吸収パワーの割合は垂直入射したときを1として規格化した値である。温度を一定にすると、量子井戸構造では吸収パワーを変えてもピーク波長はあまり変わらないが、量子ドット構造では吸収パワーが上がるとピーク波長は短波長側にシフトし、やがて飽和して一定となった。

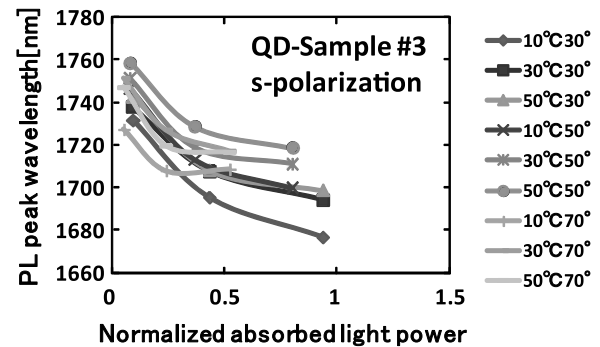
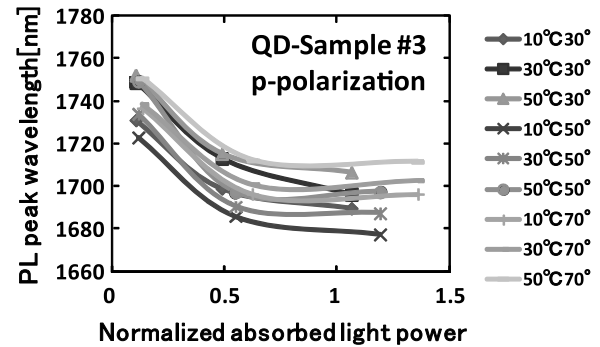
量子ドット構造で吸収パワーを上げるとピーク波長が短波長側にシフトしているのは、半値幅を比較した際に見られたバンドフィリングに似た現象が現れたためと考えられる。吸収パワーを上げると図5のように広がりを持った量子準位の低い方から電子が溜まっていき、エネルギーが高くなったので、発光波長が短波長側にシフトしたと考えられる。しかし、発光は第1準位だけで起きていると考えられるので、ある程度電子が溜まると飽和し、ピーク波長は一定になったと考えられる。

またs偏光による励起ではp偏光による励起よりもピークシフトの傾きが大きく現れ、飽和している部分を除いて傾きを比較すると、1.2~2.1倍となった。これはp偏光よりs偏光の方がバンドフィリングに似た現象が強く現れていると考えられる。s偏光励起による発光は主に

hhが影響し、p偏光励起による発光はhhとlhの両方が影響するとの報告がある^{3, 4)}。このことがバンドフィリングに似た現象の偏波方向による違いと関係していると考えられるが、今後詳しく検討する必要がある。



(a) QW structure



(b) QD structure

Fig. 7. λ_{peak} versus normalized absorbed light power

5. ま と め

InGaAs/InP 量子井戸構造半導体と InAs/InGaAsP/InP 量子ドット構造半導体を用いて, PL 測定より得られるピーク波長を用いて解析を行った。

PL スペクトルの半値幅を比較したところ, 量子井戸構造より量子ドット構造の方が半値幅は広く, 吸収パワーが大きくなるとさらに広がっていたことから, 量子ドット構造ではバンドフィリングに似た現象が表れていると考えた。

ピーク波長と試料温度の関係を調べ, 量子井戸構造, 量子ドット構造ともに, 試料の温度上昇に依存してピーク波長が長波長側にシフトすることを確認した。

温度を一定にし, ピーク波長と吸収パワーの関係を調べたところ, 量子ドット構造ではバンドフィリングに似た現象が現れ, 吸収パワーが上がるとピーク波長は短波長側にシフトした。またその現象は p 偏光よりも s 偏光

に強く現れた。

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) 江崎美由紀, 本村麻子, 桐原夏紀, 斉藤ゆう子, 今井 元: 日本女子大学紀要, 理学部, 第19号, pp.13-18 (2011)
- 3) M. Yamanishi, and I. Suemune: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23**, pp.L35-L36 (1984)
- 4) M. Asada, A. Kameyama, and Y. Suematsu: *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-20, pp.745-753 (1984)

Photoluminescence Spectra of Quantum Dots Structures

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

(Received October 11, 2011)

Abstract: We measured photoluminescence (PL) spectra of InGaAs/InP quantum well structures and InAs/InGaAsP/InP quantum dots structures. We examined the relationship between the sample temperature and the PL peak wavelength. The polarization of the excitation light was changed from the p-polarization to the s-polarization. We compared relations of a shift of the PL peak wavelength to the excitation light power with p-polarization or s-polarization excitation. The PL peak wavelength moved to the shorter wave length side with the increase in the excitation light intensity. We consider that the phenomenon like the band filling occurred and it affects the emission.

Key words: InGaAs/InP quantum well structure, InAs/InGaAsP/InP quantum dots structure, Photoluminescence