

多重量子井戸における励起子ダイナミクスの電界効果

三好正毅*, 青柳克信, 瀬川勇三郎,
難波 進, 佐野直克**

Effect of Electric Field on Dynamics of Excitons in a Multi-Quantum-Well Structure

Tadaki MIYOSHI, Yoshinobu AOYAGI, Yusaburo SEGAWA,
Susumu NAMBA, and Naokatsu SANŌ

The decay time of luminescence emitted from a multi-quantum well has been measured at 20 K by using a CW mode-locked Kr laser and a synchroscan-streak camera. The decay time is found to increase when an electric field is applied. The decay time depends on the wavelength of luminescence; this dependence changes with the electric field.

1. はじめに

量子井戸の光学的性質の電界効果の研究は、物理的および実用的見地（光双安定素子、光変調器等）から重要である。Mendez ほか¹⁾は、量子井戸層に垂直に電界を印加すると、井戸に閉じ込められた励起子からの発光の強度が低下するのを見出した。彼らは、この低下は電界による電子と正孔の空間的分離に起因すると考えた。このような分離が起こると電子-正孔間の空間的重なりが減少し、励起子の寿命が増加すると予想される。電界による励起子寿命の増加はすでに実験的に観測されている^{2),3)}。

ここでは、前報³⁾に引き続き、電界効果の観測波長依存性について述べる。前報では楕型のショットキー障壁を用いて電界を印加したが、今回は p-i-n ダイオード構造の試料に半透明のオーミック電極を用いて電界を印加した。こうすることによって、電界が空間的に均一になり、また、印加電圧から電界の大きさを見積ることができる。

2. 実験方法

試料は Fig. 1 に示すような構造をしており、分子線エピタキシ法によってドナー密度約 10^{18} cm^{-3} の GaAs 基板上に作製した。MQW (多重量子井戸) は厚さ 10 nm

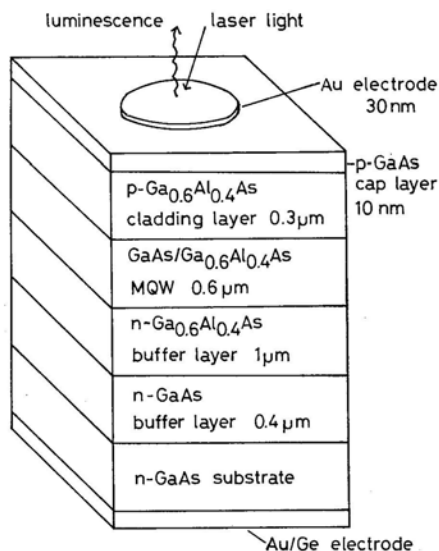


Fig. 1 Structure of the sample used in the experiment. Sample size is $2 \times 2 \text{ mm}^2$.

の GaAs 井戸層と 10 nm の $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ 障壁層とを交互に 30 層成長させたものである。バッファー層はドナー (Si) 密度 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の n 形であり、クラッド層とキャップ層はアクセプタ (Be) 密度 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の p 形である。井戸層とバリア層には不純物をドーピングしていない。電圧はオーミック電極を用いて p 形 GaAs キャップ層と n 形 GaAs 基板に加えた。電流-電圧特性は整流性を示し、降伏電圧は温度 300 K および 20 K において

* 山口大学工業短期大学部

** 関西学院大学理学部

約-6 V であった。試料は温度可変クライオスタットにとり付け、測定は 20 K において行った。

励起源として CW モードロック Kr レーザー (波長 $\lambda=647.1$ nm, パルス持続時間=200 ps, 繰り返し=82 MHz) を用いた。レーザー光は直径約 0.5 mm のスポットに集光して試料に照射した。レーザー光の平均パワーは 3 mW である。試料からの発光は 25 cm 分光器で分光し、シンクロスキャンストリークカメラで測定した。

3. 実験結果と検討

電圧を印加しないとき、温度 20 K において、ピーク波長 799.6 nm の発光バンドを観測した。量子井戸構造においては自由励起子発光が支配的になるので⁴⁾、この発光バンドは GaAs 量子井戸中の励起子の再結合に起因すると考えられる。電圧を印加するとピーク波長は長波長側にシフトし、 $V=-4$ V のとき 805.6 nm になる。また、ピーク強度が低下する。この結果は Mendez ほか¹⁾の結果と定性的に一致する。

Fig. 2 に発光減衰時間の観測波長依存性を、印加電圧をパラメータとして示した。なお、電界は、 $E=(V_b-V)/d$ から計算した。 V_b は作りつけ電圧で 1 V、 d は多重量子井戸領域の厚さで 600 nm である。 $V=0$ V に

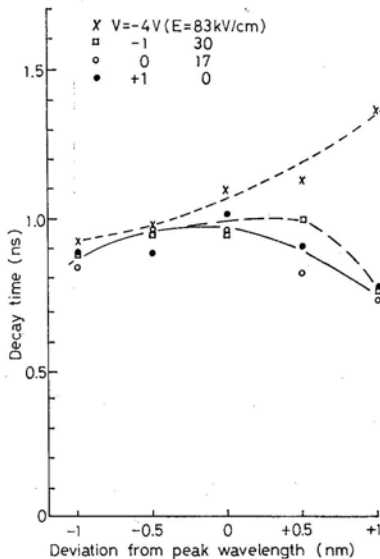


Fig. 2 Decay time of luminescence from a multi-quantum-well structure at 20 K as a function of wavelength for various external voltages. The excitation source is a CW mode-locked Kr laser ($\lambda=647.1$ nm).

おける発光減衰時間はピーク波長で最も長くなるが、逆バイアス電圧を加えると長波長側における減衰時間が長くなる。この結果は前報³⁾で述べた結果とは異なっている。前報においては、 $V=0$ V の場合でも長波長側で発光減衰時間が長くなるのを観測した。この波長依存性は量子井戸界面の不均一によるものとして説明されている。すなわち、量子井戸界面が均一でなく場所によって変動していると、井戸幅が場所によって変化する。すると、量子井戸におけるエネルギー準位が空間的に変動し、局所的エネルギー準位が生じる。励起子がこれらの準位を通過して緩和してから発光するのが長波長側の発光であるので、このバンド内緩和に要する時間だけ発光減衰時間が長くなる。電界を印加すると長波長側で発光減衰時間がさらに長くなる。これは、上記バンド内緩和において、井戸幅の変動によって生じる局所的エネルギー準位が電界の影響を受けるので、長波長側で電界の影響が大きくなると考えられる。この説明が妥当であるとすれば、前報³⁾との違いは、試料中の量子井戸界面の変動の大きさと作りつけ電圧の大きさの違いによるものと考えられる。つまり、本報告で用いた試料においては上記両者の大きさが小さいため、 $V=0$ V で局所的エネルギー準位間のエネルギー間隔が小さくなる。その結果、励起子のバンド内緩和時間が短くなり、長波長側での発光減衰時間が長くなる。 $V=0$ V のときにはピーク波長において発光減衰時間が最も長くなるが、これは次のようにして説明できる。励起子の密度が低くなると励起子発光バンドのスペクトル幅が狭くなることが観測されている⁵⁾。パルス光で励起した後、励起子密度は減少してゆくの、スペクトル幅は狭くなる。したがって、ピークの短波長

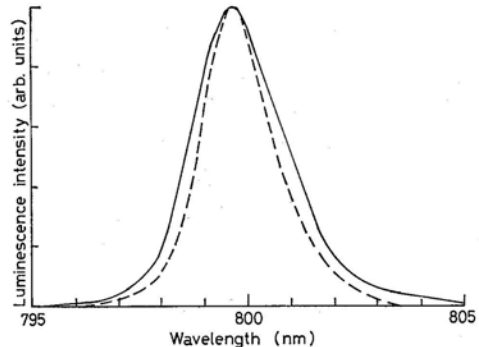


Fig. 3 Time-resolved photoluminescence spectra observed at 20 K for zero bias voltage. The solid curve is the spectrum for delay time $t=0$ ns and the dashed curve is that for $t=0.77$ ns. Peak intensities are normalized.

側と長波長側での減衰時間はピークでの値に比べて短くなる。Fig. 3 に $V=0\text{ V}$ のときの時間分解スペクトルを示す。0.77 ns 後の発光バンドの半値全幅は 2.36 nm から 1.94 nm に減少している。

4. ま と め

多重量子井戸において、電界印加による発光減衰時間の増大を観測した。外部電圧を印加しないときは発光ピーク波長において減衰時間が最も長くなるが、電圧を印加すると長波長側で減衰時間が長くなる。この結果は、量子井戸界面の変動と試料内部の作りつけ電圧を考慮すれば説明できる。

参 照 文 献

- 1) Mendez, E. E., Bastard, G., Chang, L. L., and Esaki, L.: *Phys. Rev.*, **B26**, 7101 (1982).
- 2) Pollard, H. J., Schultheis, L., Kuhl, J., Göbel, E. O., and Tu, C. W.: *Phys. Rev. Lett.*, **55**, 2610 (1985).
- 3) 三好正毅, 青柳克信, 山田 篤, 瀬川勇三郎, 難波進, 佐野直克: レーザー科学研究, No. 8, p. 103 (1986).
- 4) Weisbuch, C., Miller, R. C., Dingle, R., Gossard, A. C., and Wiegmann, W.: *Solid State Commun.*, **37**, 219 (1981).
- 5) Naganuma, M., Song, J. J., Kim, Y. B., Mase-link, W. T., Morkoç, H., and Vreeland, T., Jr.: *J. Appl. Phys.*, **60**, 1740 (1986).