

GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs 量子井戸での担体のダイナミクス

三好正毅*, 青柳克信, 瀬川勇三郎,
難波 進, 布下正宏**

Carrier Dynamics in GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs Quantum Well

Tadaki MIYOSHI, Yoshinobu AOYAGI, Yusaburo SEGAWA,
Susumu NAMBA, and Masahiro NUNOSHITA

Time characteristics of luminescence from quantum well have been examined using time-correlated single photon counting method. The decay time of the luminescence from single quantum well is shorter than that of bulk samples. The rapid decay is considered to reflect the enhancement of recombination due to localization of carriers. The decay time of the luminescence from multi quantum well is longer than that of the single quantum well and depends on wavelength. This dependence is explained by assuming the well size fluctuation.

1. はじめに

GaAlAs-GaAs ヘテロ接合より成る単一量子井戸構造において, GaAs 層の厚さを数 100Å 以下にすると, 電子(または正孔)は, ヘテロ接合によって形成されるポテンシャル井戸(量子井戸)に閉じこめられる。閉じこめられた電子は二次元的にふるまうため, 状態密度は階段型になる。この段階型状態密度を反映して, 発光の半値幅が狭くなること, 量子井戸レーザーのしきい値電流が低下することなどの特徴が現われる。量子井戸については多くの研究が行われているが^{1),2)}, 担体の動的挙動に関してはあまり調べられていないので, 発光の時間変化の測定を行った。

2. 実 験

試料として, 分子線エピタキシー法により, GaAs 基板上に Ga_{0.7}Al_{0.3}As(1~2 μm)/GaAs(100Å)/Ga_{0.7}Al_{0.3}As(0.3 μm) の順に成長させた単一量子井戸構造のものを主として用い, 比較のために, GaAs(100Å) と Ga_{0.6}Al_{0.4}As(200Å) を交互に 50 層成長させた多重量子井戸構造のものも用いた。

発光の時間変化の測定には時間相関単一光子計数法³⁾を用いた。この方法では, 一つの励起パルスに対して, ただ一つの光子しか検出しないようにしておき, 試料が励起されてから光子が検出されるまでの時間を測定す

る。このような測定を数万回くりかえし, 統計的な平均として光子数の時間に対する確率分布, つまり光強度の時間変化を得る。Fig. 1 に実験装置を示す。cw モード同期 Kr レーザー(波長, 568.2 nm, パルス幅 200 ps, パルス間隔 12 ns) からのビームを二つに分け, 一方は試料(温度15K)の励起に用い, 試料からの発光を分光した後, 光電子増倍管に入れる。光電子増倍管の出力パルスを増幅, 弁別し, 時間-振幅変換器(TAC)の

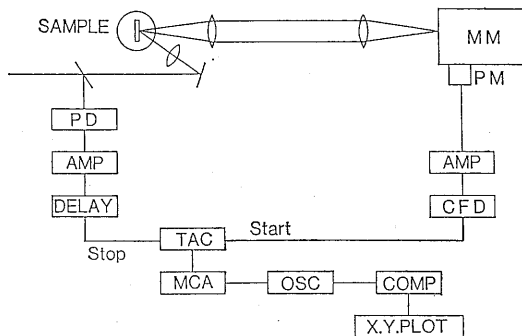


Fig. 1 Experimental set-up for the time-correlated single photon counting method.

MM: 75 cm double monochromator, PM: Photomultiplier, Hamamatsu R 1564 UX-01, CFD: Constant fraction discriminator, TAC: Time to pulse height converter, MCA: Multi-channel analyzer, OSC: Digital storage oscilloscope, COMP: Computer, PD: Photo detector.

* 山口大学工業短期学部

** 三菱電機中央研究所

スタートパルスとして用いる。もう一方のレーザービームは PIN フォトダイオードで受け、増幅、遅延の後、TAC のストップパルスとして用いる。TAC はスタートパルスとストップパルスの時間間隔をパルス高さに変換する装置で、TAC の出力パルスを多重チャンネル分析器 (MCA) に蓄積する。数多くの励起パルスに対する結果を集めると、Fig. 3 に示すような発光の時間変化の曲線が得られる。発光スペクトルの測定はロックインアンプを用いて行った。

3. 実験結果と検討

Fig. 2 (a) に単一量子井戸試料の発光スペクトルを示す。励起源は cw モード同期 Kr レーザーで、励起ピーク強度は数十 W/cm^2 である。668 nm のピークは $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ からの発光、809 nm のピークは GaAs 量子井戸からの発光である。

Fig. 3 に発光の時間変化を示す。 $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ からの発光は減衰が遅いが、GaAs 量子井戸からの発光は減衰がはやく、また減衰時間は発光の波長に依存しない。III-V 化合物 (バルク) の発光の減衰時間は通常 1 ns 程度⁹⁾であるので、 $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ の場合はそれと同程度であるが、量子井戸の場合はバルクに比べてかなり短い。量子井戸においては、電子、正孔が閉じこめられて波動関数の重なりが大きくなり、再結合が起こりやすくなるため、発光の減衰時間がバルクよりも短くなると考えられる⁹⁾。Fig. 2 (a) に示すように、 $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ 層と GaAs 層とは層の厚さが 30 倍違うにもかかわらず、発光強度はほぼ同じであるが、この結果は、GaAs 量子井戸層では再結合が起こりやすくなっているという考えで説明できる。

Fig. 3 の時間変化は次のような発光過程を考えるこ

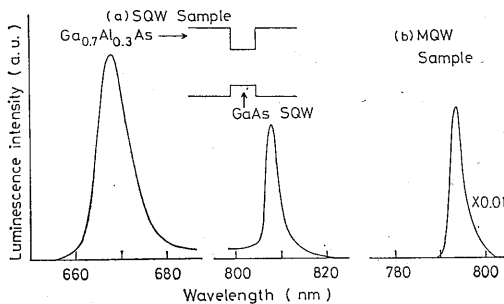


Fig. 2 Photoluminescence spectra of quantum well samples at 15 K under cw mode-locked Kr laser excitation ($\lambda=568.2$ nm). Thickness of well is 100\AA . (a) Single quantum well (SQW), (b) multi quantum well (MQW).

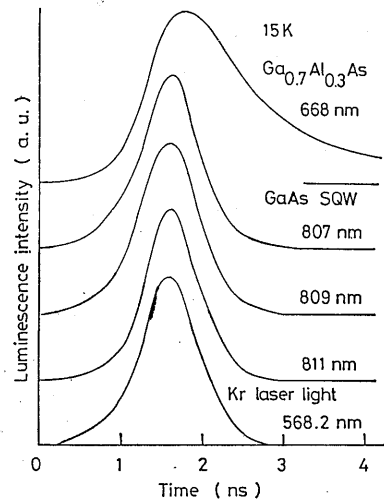


Fig. 3 Time behavior of luminescence from single quantum well (SQW) sample at 15 K.

とによって解析できる。レーザー光は $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ 中と GaAs 量子井戸中に電子 (および正孔) を生成する。生成された電子は $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ 中では寿命 τ_G 、GaAs 中では寿命 τ_Q で放射再結合して減衰する。 $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ 中の電子の一部は量子井戸に捕獲時間 τ_t で捕まる。また、 $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ からの発光の一部は量子井戸に吸収されて電子を生成する。 τ_t の値はこの再吸収過程も含んだものである。

レート方程式は以下ようになる。

$$dn_G/dt = G(t) - n_G/\tau_G - n_G/\tau_t \dots\dots(1)$$

$$dn_Q/dt = G(t) - n_Q/\tau_Q + n_G/\tau_t \dots\dots(2)$$

ここで、 $G(t)$ は電子の生成速度、 n_G は $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ 中の電子密度、 n_Q は GaAs 量子井戸中の電子密度である。(1)、(2) 式の解を数値計算によって求めると Fig. 4

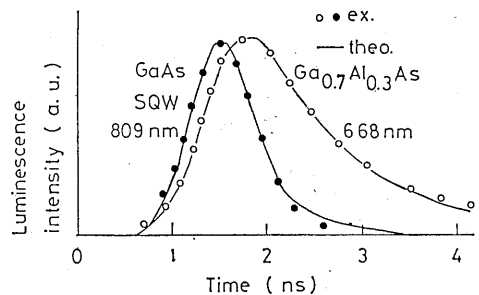


Fig. 4 Comparison of numerical results with experimental results. The open circles correspond to the $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ luminescence and the full circles correspond to the luminescence from GaAs single quantum well (SQW).

Table 1 Carrier lifetime and trapping time.

	Present results $L_z=100\text{\AA}$	Göbel <i>et al.</i> ⁵⁾	
		$L_z=140\text{\AA}$	$L_z=50\text{\AA}$
τ_G	2 ns	1 ns	1 ns
τ_Q	0.1	1	0.35
τ_t	2	0.1	0.05

L_z : well thickness

の実線のようになる。実験結果は丸印で示したものである。 τ の値を Table 1 に示すような値にすると理論と実験はよく一致する。

ところで、Göbel ら⁵⁾ は、最近 GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs ($x=0.18$ および 0.21) 単一および二重量子井戸において発光の時間変化を測定した。彼らは、Ga_{1-x}Al_xAs からの発光は急激に減衰し、量子井戸からの発光はゆるやかに減衰するのを観測した。この結果は、われわれの結果とは逆の傾向である。彼らは、実験結果の解析において、量子井戸への直接励起 ((2) 式の $G(t)$) を無視した。彼らの用いた試料は表面の Ga_{1-x}Al_xAs 層の厚さが $1\mu\text{m}$ と比較的厚い (われわれの試料は $0.3\mu\text{m}$) ためである。吸収係数として $3\times 10^4\text{cm}^{-1}$ を仮定すると、Ga_{1-x}Al_xAs 層の透過率は、厚さ $1\mu\text{m}$ のとき 5%、厚さ $0.3\mu\text{m}$ のとき 41% となる。彼らは、 τ の値を Table 1 に示すような値に選んだとき、理論と実験とのよい一致を得た。Ga_{1-x}Al_xAs からの発光がはやい減衰を示すのは、Ga_{1-x}Al_xAs 中の電子が短い時間に量子井戸に捕まるためであるとして説明できる。一方、われわれの場合は、量子井戸への励起は直接励起が主であり、Ga_{1-x}Al_xAs から量子井戸へ移行する電子は少ないので、Ga_{1-x}Al_xAs からの発光はゆっくり減衰すると解釈できる。

Göbel ら⁵⁾ とわれわれの τ の値を比較すると、 τ_G の値はほぼ同じであるが、 τ_Q と τ_t の値は異なっている。 τ_Q の値は井戸の幅 L_z によって変化し、Göbel ら⁵⁾ の結果は $L_z=140\text{\AA}$ (二重量子井戸) のとき 1 ns、 $L_z=50\text{\AA}$ のとき 0.35 ns である。また、GaAs/Ga_{0.6}Al_{0.4}As 多重量子井戸 (60層) の場合は、 $L_z=112.8\text{\AA}$ のとき 0.8 ns、 $L_z=51.6\text{\AA}$ のとき 0.5 ns である⁶⁾。文献 5) と 6) の場合はほぼ一致しているが、われわれの結果はこれらに比べてかなり小さい。現在のところ、このくい違いの原因はよくわからない。次に τ_t の値は Ga_{1-x}Al_xAs のバンドギャップエネルギー E_g に関係していると考えられる。われわれの場合は $E_g=1.86\text{eV}$ で $\tau_t=2\text{ns}$ 、Göbel ら⁵⁾ の $L_z=140\text{\AA}$ の試料では $E_g=1.78\text{eV}$ で $\tau_t=0.1\text{ns}$ 、 $L_z=50\text{\AA}$ の試料では $E_g=1.72\text{eV}$

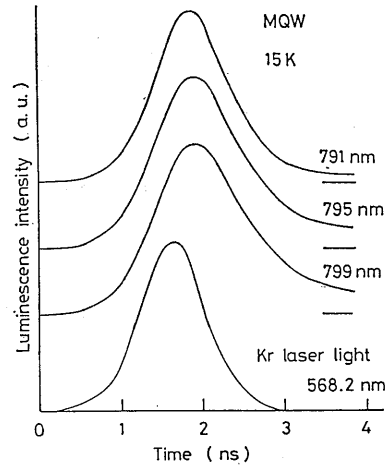


Fig. 5 Time behavior of luminescence from multi quantum well (MQW) sample at 15 K.

で $\tau_t=0.05\text{ns}$ である (励起用レーザーの光子エネルギーは 2.18eV と 2.17eV でほとんど変わらない)。したがって、 E_g が大きくなるほど τ_t も大きくなっている。これは、励起された Ga_{1-x}Al_xAs 中の電子の初期エネルギーの違い、Ga_{1-x}Al_xAs-GaAs 界面状態の違いなどによると考えられる。

比較のために測定した多重量子井戸の発光スペクトルを Fig. 2 (b) に示す。ピーク位置は単一量子井戸の場合よりもやや短波長側にずれている。これは、Ga_{1-x}Al_xAs 層の E_g が大きいこと、井戸の幅が 100\AA よりも少し狭くなっているなどのためであると考えられる。Fig. 5 に多重量子井戸からの発光の時間変化を示す。減衰時間は単一量子井戸の場合よりも長く $\tau_Q=0.3\sim 0.4\text{ns}$ であり、また、発光の波長に依存する。このような波長依存性は GaAs/AlAs 多重量子井戸においても観測されており⁷⁾、多重量子井戸に特有のものと思われる。多重量子井戸の場合には井戸の間に幅のばらつきがあると考えられ、このばらつきによって減衰時間の波長依存性が生じると考えられる。狭い量子井戸では、電子を閉じこめる効果が大きいため再結合が起こりやすくなり、減衰時間が短くなる⁵⁾。また、電子のエネルギーは井戸の幅が狭いほど高くなるので、発光波長は短波長側にくる^{8),9)}。したがって、短波長側では発光の減衰時間が短くなり、長波長側では長くなる。

4. ま と め

GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs 量子井戸からの発光の時間変化を測定した。単一量子井戸からの発光の減衰時間はバルクの場合に比べて短い。これは、担体の閉じこめによって

再結合が起こりやすくなるためであると考えられる。多重量子井戸からの発光の減衰時間は波長に依存する。これは、井戸の幅にばらつきがあることによると考えられる。

参考文献

- 1) 岡本 紘, 堀越佳治, 岩村英俊: 応用物理, **52**, 843 (1983).
- 2) Miller, R.C., Kleinman, D.A., Nordland, W. A., Jr., and Gossard, A.C.: *Phys. Rev. B*, **22**, 863 (1980).
- 3) 櫛田孝司, 木下修一: 応用物理, **52**, 920 (1983).
- 4) Acket, G.A., Nijman, W., and 't Lam, H.: *J. Appl. Phys.*, **45**, 3033 (1974).
- 5) Göbel, E.O., Jung, H., Kuhl, J., and Ploog, K.: *Phys. Rev. Lett.*, **51**, 1588 (1983).
- 6) Christen, J., Bimberg, D., Steckenborn, A., and Weimann, G.: *Appl. Phys. Lett.*, **44**, 84 (1984).
- 7) Masumoto, Y., Shionoya, S., and Kawaguchi, H.: *Phys. Rev. B*, **29**, 2324 (1984).
- 8) Ishibashi, T., Suzuki, Y., and Okamoto, H.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20**, L 623 (1981).
- 9) Goldstein, L., Horikoshi, Y., Tarucha, S., and Okamoto, H.: *ibid.*, **22**, 1489 (1983).