

GaAs に格子整合した InGaAsN/GaAs 量子井戸構造の タイプ-II ポテンシャル構造の分光学的検証

柳沼隆太^A、橋本淳^A、山田隆史^B、石塚貴司^C、中山正昭^A
阪市大院工^A、住友電工伝送デバイス研^B、住友電工半導体技術研^C

Spectroscopic verification of the type-II potential structure in an InGaAsN/GaAs quantum well lattice-matched to GaAs

R. Yaginuma^A, J. Hashimoto^A, T. Yamada^B, T. Ishizuka^C, M. Nakayama^A
*Dept. of Appl. Phys., Osaka City Univ.^A, Transmission Devices R&D Lab.^B
and Semiconductor technologies R&D Lab,^C Sumitomo Electric Industries, Ltd.*

We have investigated the band alignment of an InGaAsN/GaAs quantum well lattice-matched to GaAs from the viewpoint of the applied-voltage (electric-field-strength) dependence of the fundamental-edge transition measured with electroreflectance (ER) spectra. The sample structure is a *p-i-n* diode in which an $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}_{0.95}\text{N}_{0.05}/\text{GaAs}$ multiple quantum well (MQW) is embedded as *i*-layer. It is found that the optical transition energy is split with an increase in electric field strength: The electric-field dependence corresponds to $\pm eFD/2$, where F is the electric field strength and D is the period of the MQW. This behavior is peculiar to the *Type-II* band alignment because the spatial separation of the electron and hole envelope functions leads to an oblique transition in real space, which causes the electrostatic potential difference of $\pm eFD/2$ between the adjacent layers. Furthermore, we calculated the squared overlap integral of the electron and hole envelope functions, which corresponds to the transition probability, in the type-II potential as a function of electric field strength in order to explain the ER intensity.

1. はじめに

III - V 族窒素混晶半導体の一つである InGaAsN は、電子親和力の大きな窒素の混晶化により、非常に大きなバンドギャップエネルギーのネガティブボウイング特性を示すことが知られている[1]。このため、近赤外領域の光エレクトロニクス用半導体材料として注目を集めている。

InGaAsN/GaAs 量子井戸構造の場合、N 混晶化により InGaAsN 層の伝導帯ポテンシャルが深くなるため、GaAs 格子整合に近い条件ではタイプ-II ポテンシャル構造になる可能性

が以前より指摘されている[2,3]。ポテンシャル構造がタイプ-II 構造をとるか、タイプ-I 構造をとるかということは、デバイス応用において大きな問題である。しかしながら、GaAs との格子整合条件に近い InGaAsN/GaAs 量子井戸構造のポテンシャル構造に関しては、未だ明確な報告がなされていない。尚、In 濃度高く格子不整合歪みが大きい InGaAsN/GaAs 量子井戸では、タイプ-I 構造であることが自明のこととなっている。

本研究では、GaAs 格子整合条件の InGaAsN/GaAs 多重量子井戸 (MQW) を試料

とし、ポテンシャル構造が Type II をとるか Type I をとるかを分光学的に検証することを目的としている。ポテンシャル構造の検証方法として、光学遷移エネルギーに対するバイアス電圧（電場）効果の測定を提案する。ポテンシャル構造がタイプ-I の場合、光学遷移エネルギーの電場依存性は、量子閉じ込めシユタルク効果（Quantum Confined Stark Effect: QCSE）によって、電子と正孔のサブバンドエネルギー（量子閉じ込めエネルギー）が若干の低エネルギーシフトを示す。一方、タイプ-II 構造の場合、図 1 に示すように電子と正孔が空間的に分離しているために、光学遷移エネルギーの電場依存性は、次式に示すように静電ポテンシャルの影響を直接的に受ける。

$$E_{\text{Type-II}}(F) = E_g + \Delta E_e(F) + \Delta E_h(F) \pm eFD/2 \quad (1)$$

ここで、右辺の第 4 項 ($\pm eFD/2$) が静電ポテンシャル項であり、 $D/2$ (D は多重量子井戸構造の 1 周期の長さ) は電子と正孔の波動関数の平均距離に相当する。 $\Delta E_e(F)$ と $\Delta E_h(F)$ は、電子と正孔のサブバンドエネルギーであり、タイプ-I と同様に QCSE により電場依存性を示すが、その大きさは静電ポテンシャル項の変化よりも圧倒的に小さい。従って、タイプ-II ポテンシャル構造の場合、図 2 に示したように、電子・正孔空間分離による静電ポテンシャル ($\pm eFD/2$) によってバンド間遷移エネルギーが分裂し、電場強度に対し線形的な依存性を示すことが予測できる。

更に二つのポテンシャル構造では、QCSE による電子・正孔包絡波動関数の重なり積分、つまり遷移振動子強度の電場依存性という点においても異なる振る舞いを示すことが予測できる。図 1 に示すように、タイプ-I 構造では、電子・正孔包絡波動関数は QCSE により

互いに離れるように非対称化するため、重なり積分（遷移確率に相当する）は電場の増加に伴い減少する。一方、タイプ-II 構造では、 $-1/2$ 遷移に寄与する電子・正孔包絡波動関数は離れるように非対称化するが、 $+1/2$ 遷移では互いに近づくように非対称化する。このために、 $+1/2$ 遷移の重なり積分が電場の増強によって増加するという、タイプ-II 構造特有の振る舞いが予測できる。以上の事は GaAs/AlAs タイプ-II 超格子において実証されている[4]。上記の概念が、ポテンシャル構造の実験的検証における根拠である。

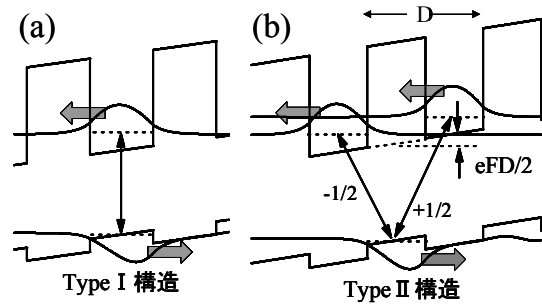


図 1 (a)Type I 及び(b)Type II ポテンシャル構造の模式図（電場印加条件）

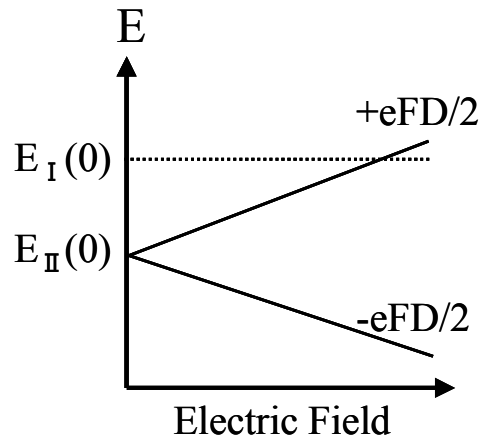


図 2 Type I (点線)、Type II (実線) 構造における遷移エネルギーの電場強度依存性の概略図。

2. 試料構造と実験方法

本研究で用いた試料は、MOVPE 法により

作製された 20 周期の $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$ (5 nm) / GaAs (5 nm) MQW ($x=0.15, y=0.05$) を p - i - n 構造に埋め込んだものである (i が MQW 層)。この試料において、発光 (PL) スペクトル及び電場変調反射 (ER) スペクトルの電場強度依存性の系統的な測定を行った。

ER 分光では、試料に DC バイアスを印加し、微小な AC バイアスを重畳して電場変調を行い、反射光の変調成分をロックインアンプにより検出した。

3. 実験結果と考察

まずは比較的簡便な PL 分光法を用いた実験結果について述べる。図 3 は、10K における PL スペクトルの電場強度依存性である (上から順に電場強度が増加)。ここで、図中の破線は、ER スペクトルより見積もったバンド端位置を示している。電場の増強に伴う発光強度の低下は、 p - i - n 構造特有のキャリアのスウィープアウトによるものである。発光ピークエネルギーに着目すると、若干の高エネルギーシフトが観測でき、タイプ-II 構造の傾向が見られるが、明確な電場依存性とは言えない。この原因としては、ストークスシフトを有する局在キャリアからの発光であるため、バンド端の情報を直接観測できていないことが考えられる。このように、簡便な PL 分光法では、ポテンシャル構造の判別が困難である。

図 4 は、ER スペクトルの電場強度依存性をイメージマップにまとめたものである。ER 信号の強度は、右側にグレイスケールで示している。最低エネルギー遷移の信号に注目すると、電場強度の増加に伴い高エネルギー側と低エネルギー側に分裂する挙動が観測できる。この結果は、上で述べたタイプ-II 構造に特有の静電ポテンシャル項による分裂に起因した

ものである。さらに信号強度の変化に着目すると、高エネルギーシフトする信号は電場強度の増大に伴い強度が増加し、一方、低エネルギーシフトする信号は強度が弱くなる傾向が観測できる。この結果もタイプ-II 構造の特徴を明確に反映している。以上の結果から、本研究で用いた MQW 試料のポテンシャル構造が、タイプ-II であると結論できる。

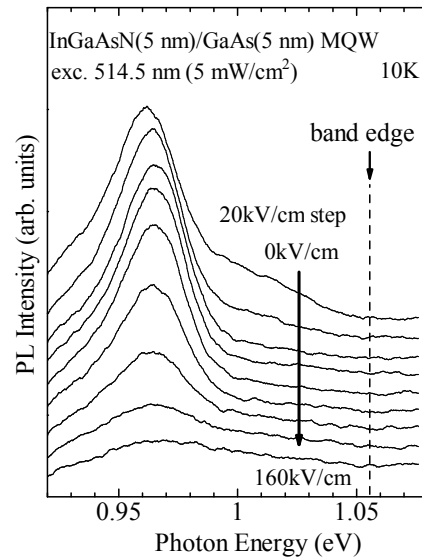


図 3 発光スペクトルの電場依存性の測定結果

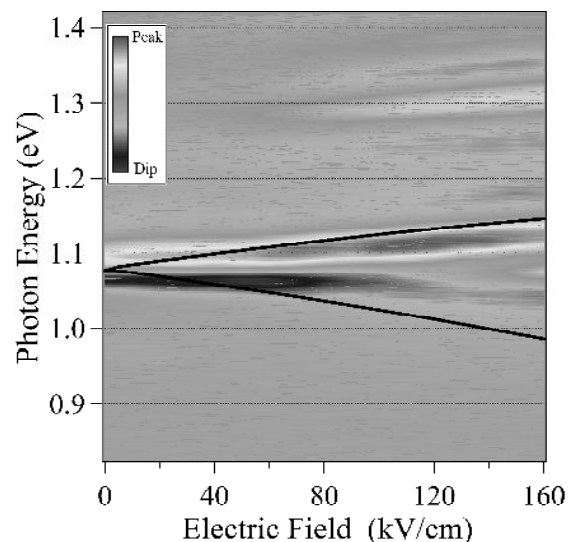


図 4 電場変調反射スペクトルの電場強度依存性のイメージマップ

最後に、ER スペクトルから得られた遷移エネルギーと信号強度の電場強度依存性に関して、理論的側面から考察する。遷移エネルギーの電場強度依存性については、Airy 関数を用いた伝達行列 (Transfer Matrix; TM) 法[5]に基づいてサブバンドエネルギー [(1)式の $\Delta E_c(F)$ と $\Delta E_v(F)$] の計算を行った。尚、この TM 法では、QCSE も自動的に含まれる。その計算結果を、図 4 の実線で示しており、実験結果と計算結果はほぼ一致している。

ER 信号強度の変化については、光学遷移確率 (遷移振動子強度) が電子・正孔包絡波動関数の重なり積分の二乗に比例すると仮定し、TM 法により電子・正孔包絡波動関数を計算した。図 5 は、電子・正孔包絡波動関数の重なり積分の 2 乗値と $\pm 1/2$ 遷移の ER 信号強度の電場依存性を示している。実験結果は計算結果の振る舞いとよく一致しており、ER 信号強度の変化がタイプ-II ポテンシャル構造を反映しているということが定量的に説明できる。

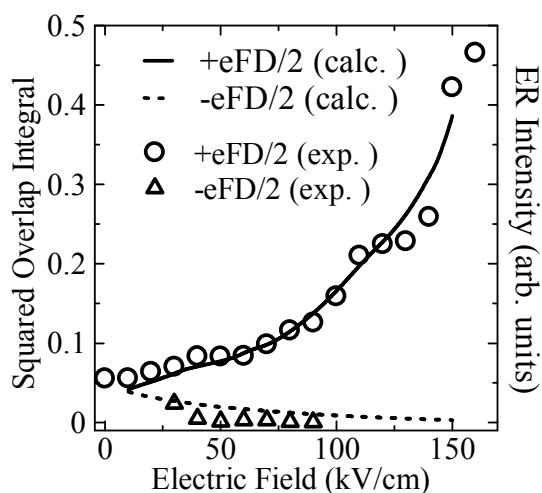


図 5 ER 信号強度と電子・正孔包絡波動関数の重なり積分値の電場強度依存性

4. まとめ

本研究では、GaAs 格子整合条件の $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}_{0.95}\text{N}_{0.05}/\text{GaAs}$ MQW におけるポテンシャル構造の分光学的検証を行った。ER スペクトルの電場強度依存性の系統的な測定により、電場強度の増加に伴う光学遷移エネルギーの高エネルギー側と低エネルギー側への分裂構造 (+1/2 遷移と -1/2 遷移) を観測した。また、+1/2 遷移信号の強度が、電場強度の増大に伴い強くなるという結果が得られた。以上の結果は、タイプ-II ポテンシャル構造特有の現象である。さらに、上記の実験結果を、タイプ-II ポテンシャル構造を前提とした TM 法による計算結果により定量的に説明した。以上より、GaAs 格子整合条件の $\text{InGaAsN}/\text{GaAs}$ 量子井戸が、タイプ-II ポテンシャル構造を有すると結論できる。

参考文献

- [1] F. Höhnsdorf, J. Koch, C. Agert and W. Stolz, *J. Crystal Growth* **195**, 391 (1998)
- [2] M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Watahiki and Y. Yazawa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, 1273 (1996)
- [3] T. Miyamoto, K. Takeuchi, F. Koyama, and K. Iga, *IEEE Photonics Tech. Lett.* **9**, 1448 (1997)
- [4] M. Nakayama, *J. Lumin.* **87-89**, 15 (2000)
- [5] D. C. Hutchings, *Appl. Phys. Lett.* **55** (1989) 1082.