GaAs/Al_xGa_{1-x}As 超格子におけるワニエ・シュタルク局在状態間 共鳴結合条件での光電流双安定性動作

長谷川 尊之、中山 正昭 大阪市立大学大学院工学研究科電子情報系専攻

Photocurrent-bistability operation in a GaAs/Al_xGa_{1-x}As superlattice under resonant-coupling conditions of Wannier-Stark-localization states

Takayuki Hasegawa and Masaaki Nakayama Department of Applied Physics, Graduate School of Engineering, Osaka City University

We have investigated effects of the resonant coupling between the Wannier-Stark-localization states on photocurrent properties in a GaAs (6.8 nm)/Al_{0.1}Ga_{0.9}As (4.0 nm) superlattice. The resonant-coupling profiles were confirmed with electroreflectance spectroscopy and analyzed by the calculating eigenstates with a transfer-matrix method. It is found that the photocurrent-voltage characteristics exhibit peak structures, which results in negative differential resistance, owing to the changes of the optical-transition probabilities under the resonant-coupling conditions between the first and second quantized electron states. Utilizing these negative differential resistance properties, we have demonstrated photocurrent-bistability operations of a self-electro-optic effect device.

1. <u>はじめに</u>

半導体超格子 (SL) における電子特性及び 光学特性に対する電場効果は、ワニエ・シュタル ク (WS) 局在を中心としてこれまで盛んに研究 されてきた[1-2]。WS 局在条件における光学遷 移は、シュタルク階段遷移と呼ばれ、遷移エネル ギーが電場強度に対して、線形かつ放射状に広 がるという特徴を持つ($E_m = E_0 \pm meFD$, m=1, 2, 3, …: Fは電場強度、Dは超格子周期、mはシュ タルク階段指数)。この特性は、Miller らにより考 案されていた self-electro-optic effect device (SEED) [3] に応用され、より多機能な動作が実 証されている[4]。SEED が動作するためには、光 電流 (PC)-電圧 (V) 特性に負性微分抵抗が 不可欠である。現在考案されている SL ベースの SEED では、この要求はシュタルク階段遷移エネ ルギーの電場 (印加電圧) によるエネルギーシ フトで満たしている。

WS 局在条件での代表的な量子力学現象として、WS 局在状態間の波動関数共鳴結合が知られている[2,5,6]。共鳴結合はエネルギー反交差を引き起こし、関連するシュタルク階段遷移のエネルギー及び振動子強度が大きく変化する。そのため、励起光エネルギーを、共鳴結合が生じるエネルギー領域に調節することで、PC-V 特性

に負性微分抵抗が現れることが期待できる。 Schneider らは、この方法を用いて、負性微分抵 抗特性を実証したが[7]、共鳴結合を利用した SEED 動作は、これまでに実証されていない。

本研究は GaAs /Al_xGa_{1-x}As SL を試料とし、 WS 局在状態間共鳴結合による PC 特性の変化 を、SEED の観点から明らかにすることを目的とし た。PC分光法、及び、シュタルク階段遷移に対し て 極 め て 高 感 度 な 電 場 変 調 反 射 (Electroreflectance; ER) 分光法[2]を用い、電場 に対する様々なバンド間光学遷移と共鳴結合を 検出した。更に、共鳴結合が生じる電場強度を 明確にするために、Airy 関数を用いた伝達行列 (Transfer Matrix; TM) 法[6]により、固有エネル ギーの電場強度依存性を計算した。その結果、 共鳴結合条件において、100 µW 近傍の入射光 強度に対するSEEDのPC 双安定性を実証した。

2. 試料作製と実験方法

試料は、分子線エピタキシー法を用いて作製 した 70 周期の GaAs (6.8 nm)/Al_{0.1}Ga_{0.9}As (4.0 nm) SL を *p-i-n* 構造に埋め込んだものである (*i* が SL 層)。内部電場 F は、 $F=(V_b-V_a)/L$ の式から 見積もった。ここで、 V_b は *p-n* 接合による拡散電 位 (この試料では 1.5 V)、 V_a は逆方向バイアス電 圧、L はノンドープ層の長さである。 PC スペクトルの測定において、プローブ光は 100 W のハロゲンランプを分光器 (スペクトル分 解能 ~5 Å) で単色化したものを用いた。また、 ER 分光を行うために、試料には DC バイアスに 微小なACバイアスを重畳し、DCバイアスを中心 に電場変調した。反射光の変調成分は、ロックイ ンアンプにより検出した。尚、PC スペクトルと ER スペクトルは、同時に測定した。PC-V 特性及び PC 双安定性の測定では、励起光源として、温度 コントロールしたレーザーダイオードを用い、その 強度は、駆動電流の制御により連続的に変化さ せた。実験はすべて 10 K で行った。

3. <u>実験結果と考察</u>

まず、研究に用いた SL 試料におけるミニバン ド構造と共鳴結合を明確にするために、TM 法に より計算した電子固有エネルギーの電場強度依 存性について述べる。計算モデルとして、半無 限の Alo3Gao7As で挟み込んだ 11 周期の GaAs (6.9 nm)/Al_{0.12}Ga_{0.88}As (4.3 nm) SL を用いた。 層 厚及び混晶比は、計算結果を観測した遷移エネ ルギーに合わせるように、作製条件の値からわ ずかに変化させている。ゼロ電場条件におけるミ ニバンドエネルギーは、有効質量近似に基づい た Kronig-Penney (KP) 型方程式を用いて計算 した。TM 及び KP 計算では、バンド非放物線性 を考慮した同じバンドパラメータを用いた。図1(a) は、モデル化した SL における電子固有エネルギ ーの電場強度依存性の計算結果である。ここで、 図 1(a)中の横線は、伝導帯のポテンシャル障壁 の高さを表し、F=0 kV/cm での縦線は、KP モデ ルで計算した n=1 (E1)、n=2 (E2)、n=3 (E3) ミニ バンドのエネルギーを示している。図 1(a)から、 n>2 の電子ミニバンドは、ポテンシャル障壁上に 位置していることがわかる。図中の丸括弧内の数 字 m は、モデル化した SL における中心量子井 戸 (QW) から m 周期離れた QW に属する電子 の固有エネルギーを示している。図 1(a)から、異 なるWS 局在状態間の様々な共鳴結合が、反交 差現象として明確に現れている。正孔状態の固 有エネルギーの電場強度依存性は、低いポテン シャル障壁に起因して、非常に複雑化している ため、本研究では正孔状態間の共鳴結合を配 慮することができない。しかしながら、正孔状態 間の共鳴結合は、本研究で共鳴結合を議論する



電場領域よりも低電場 (~20 kV/cm) で主に生じ るために、解析に影響はない。図 1(b)は、F=0kV/cm において測定した ER スペクトルを示して いる。図中の Hn_en_h (Ln_en_h) の表記において、H は重い正孔 (HH) 励起子、L は軽い正孔 (LH) 励起子、整数は量子数を表している。また、 $\Gamma \ge \pi$ は、それぞれミニバンド分散の「点 ($k_z=0$) $\ge \pi$ 点 (ミニブリルアンゾーン端: $k_z=\pi/D$) での光学遷移 を意味し、矢印はその計算結果である。ER スペ クトルから、ポテンシャル障壁上の状態も含めた ミニバンドの「点とπ点での光学遷移が明確に観 測されている。

図 2 は、PC スペクトルの電場強度依存性の測 定結果を示している。最低電場強度(~2.6 kV/cm)において、H11(Г)とL11(Г)で示された 2 つのピークは、それぞれミニバンドのГ点におけ る *n*=1 HH 励起子、及び、LH 励起子遷移を示し ている。電場強度の増加に伴って、~1.568 eV 及 び~1.582 eV に、新たなピーク構造が現れる。こ れらのピークは、WS 局在状態での E1(0)状態と 正孔状態間の光学遷移である H11(0)遷移及び L11(0)遷移に起因する。これらの遷移の PC 強度 は、電場強度に対して非常に大きく変化している。



図2 光電流スペクトルの電場強度依存性の測定結果

具体的には、~39 kV/cm で極小値をとり、~60 kV/cm で極大値をとる。電場強度の増加による 遷移エネルギーの低エネルギーシフトは、量子 閉じ込めシュタルク効果に起因する。

観測された PC 強度の電場強度依存性の起源 を明らかにするために、PC スペクトルと同時に測 定した ER スペクトルに注目した。図 3 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 レースケールで示している。10 kV/cm 近傍の電 場強度で観測されている振動構造は、ミニバンド 状態に起因した Franz-Keldysh (FK) 振動による ものである。電場強度の増加に伴って、包絡関 数の局在化を反映して FK 振動は消滅し、 H11(0)遷移及び L11(0)遷移に起因した ER 信号 が、それぞれ、~1.568 eV 及び~1.582 eV に現れ



図 3 電场変調反射スペクトルの電场強度依存性 のイメージマップ

る。注目すべきことに、これらの信号強度の電場 強度依存性は、PCスペクトルから観測されたもの と同様な振る舞いをしている。また、~42 kV/cmと ~75 kV/cm で反交差現象が観測されている。ここ で、50~70 kV/cm 近傍で観測されている H11(0) 遷移の低エネルギー側の ER 信号は、界面テラ スに起因するものである。共鳴結合と PC 強度の 変化との関係を以下で議論する。

図 1(a)から、E1(0)-E2(-2)及び E1(0)-E2(-1)の E1-E2 結合が、それぞれ 43 kV/cm と76 kV/cm で生じることが期待される。更に、E1(0)-E3(-4)及 び E1(0)-E3(-3)の E1-E3 結合も期待される。しか しながら、E3 状態がポテンシャル障壁よりもはる かに高エネルギー側に位置しているために [図 1(a)に示している]、そのエネルギーには不確定 性が大きい。更に、E1(0)-E3(-4)及び E1(0)-E3(-3)共鳴の結合強度は、距離が離れた QW間での共鳴であるために、E1-E2のものに比 べて相対的に弱い。それ故、ここでは、E1-E2 結 合のみを考慮する。E1-E2 結合は、E1(0)状態の 包絡波動関数の結合 QW 間での非局在化、更 には、結合及び反結合状態の形成を引き起こす。 そのため、H11(0)及び L11(0)遷移の遷移確率は 大きく低下する。PC スペクトルの測定において、 プローブ光のエネルギー分解能 (~1 meV) は、 図3に示されている結合及び反結合状態間の分 裂エネルギーよりも小さい。この事実は、PC 強度 が共鳴結合に対して敏感に影響を受けることを 意味する。つまり、共鳴結合条件において、光学 遷移確率の減少を反映し、H11(0)及び L11(0)遷 移のPC 強度が減少する。

以上の理由から、図2に示されているPCスペ クトルの電場強度依存性を説明できる。具体的 には、H11(0)及びL11(0)遷移によるPC強度は、 共鳴結合に起因して、~40 kV/cm と~70 kV/cm で減少する。言い換えると、50~60 kV/cmの電場 領域でのH11(0)及びL11(0)遷移のPC強度の増 加は、光学遷移が共鳴結合の影響を受けないこ とを反映している。

図 2 及び図 3 から、励起光エネルギーを H11(0) 及び L11(0)遷移エネルギーへと調節す ることで、PC-V 特性に負性微分抵抗が現れるこ とが期待できる。図 4 は、H11(0)遷移エネルギー 近傍の励起光エネルギーで測定した PC-V 特性



図 4 (a) 1.566 eV 及び(b) 1.562 eV の励起光エネルギ ーにおける光電流-電圧特性の測定結果

である。励起光強度は~100 μW に固定した (励 起密度は~60 mW/cm²)。 すべての PC-V 特性に おいて、上述した共鳴結合に起因する負性微分 抵抗特性が観測された。即ち、1.566 eV 及び 1.562 eV での負性微分抵抗は、それぞれ E1(0)-E2(-2)結合とE1(0)-E2(-1)結合に起因する。 尚、図 4(b)の~6 kV/cm でのピーク構造は、1.562 eV の励起光エネルギーが、ミニバンド状態での H11(Γ)遷移エネルギーに相当することから、ミニ バンドからWS 局在状態への移行過程によるもの であると考えられる。

上記の負性微分抵抗に由来する SEED 動作 を実証するために、SL に負荷抵抗 (4.0 MΩ) を 接続し、逆方向バイアス (14.0 V) を印加した (Resistor-biased SEED)。図5は、PC-V 特性の測 定で用いた励起光エネルギーにおいて測定した、 PC 強度の入射光強度依存性を示す。図中の白 丸及び黒丸は、それぞれ入射光強度を増加させ る過程と減少させる過程での PC 強度を示してい る。どちらの励起光エネルギーにおいても PC 双 安定性が明確に実証された。1.566 eV での測定 結果では、1.562 eV でのものと比べ、高いスイッ チング動作が現れており、この動作はシュタルク 階段遷移エネルギーのシフトを用いた従来の SEED の on/off 比と同程度である[4]。

4. <u>まとめ</u>

GaAs (6.8 nm)/Al_{0.1}Ga_{0.9}As (4.0 nm) SL を試 料とし、WS 局在状態間の共鳴結合による PC 特 性の変化を SEED の観点から詳細に研究した。



図 5 (a) 1.566 eV 及び(b) 1.562 eV の励起光エネル ギーにおける光電流値の入射光強度依存性の測 定結果:光電流双安定性の発現

ER 分光法を駆使することで、第2 近接 QW 及び 第1 近接 QW 間での n=1 と n=2 電子状態間の 共鳴結合を、明確に検出した。H11(0)遷移近傍 での励起光エネルギーにおいて測定した PC-V 特性から、共鳴結合条件において、波動関数の 非局在化による光学遷移確率の減少に起因した 負性微分抵抗特性が観測された。この負性微分 抵抗特性を用いることで、100 µW 程度の入射光 強度に対して、SEED の PC 双安定性動作を実 証した。以上の結果は、WS 局在状態間の共鳴 結合が、オプトエレクトロニクス応用に繋がるとい うことを示している。

参考文献

[1] E. E. Mendez, F. Agulló-Rueda, and J. M. Hong, Phys. Rev. Lett. **60**, 2426 (1988).

[2] For a review, M. Nakayama, Optical Properties of Low-Dimensional Materials, (World Scientific, Singapore), Chap. 3, p. 197 (1995).

[3] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wirgman, T. H. Wood, C. A. Burrus, Appl. Phys. Lett. 45, 13 (1985).

[4] K. Kawashima, K. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Sigeta, and K. Kobayashi, Jpn. J. Appl. Phys. **30**, 1542 (1991).

[5] M. Nakayama, I. Tanaka, H. Nishimura, K. Kawashima, K. Fujiwara, Phys. Rev. B **44**, 5935 (1991).

[6] M. Nakayama, M. Ando, I. Tanaka, and H. Nishimura, Phys. Rev. B **51**, 4236 (1995).

[7] H. Schneider and K. Ploog, Appl. Phys. Lett. 58, 1994 (1991).