

GaAs/AlAs 超格子におけるミニバンド換算有効質量の 電場強度依存性

川端 哲矢、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

Electric-field-strength dependence of reduced effective masses of minibands in a GaAs/AlAs superlattice

Department of Applied Physics, Graduate School of Engineering, Osaka City University

Tetsuya Kawabata and Masaaki Nakayama

We have investigated the electric-field-strength dependence of reduced effective masses of minibands in a $(\text{GaAs})_{12}/(\text{AlAs})_2$ superlattice by using electroreflectance spectroscopy. Frantz-Keldysh (FK) oscillations appear in the energy regions of the optical transitions between the $n=1$ electron and heavy-hole minibands at the mini-Brillouin-zone center (Γ point) and the mini-Brillouin-zone edge (π point). Analyzing the FK oscillations, we evaluate the reduced effective masses from the profiles of the FK oscillations. It is found that the reduced effective masses tend to be heavier at a given electric field strength. Considering the electric-field-strength dependence of eigenstates calculated using a transfer-matrix method, we conclude that the increase of the reduced effective masses originates from the weak localization of envelope functions.

1. はじめに

ミニバンドを形成している半導体超格子に電場を印加すると、静電ポテンシャル差のため量子井戸間の波動関数共鳴トンネル条件が破れ、ミニバンド状態が破綻する。この場合、電子・正孔波動関数は、隣接する井戸にある程度の振幅を持ちながら局在化する。このようなブロッホ電子の振る舞いは、ワニエ・シュタルク(WS)局在状態と呼ばれる。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 ($E_m = E_0 \pm meFD$, $m=1, 2, 3, \dots$: F は電場強度、 D は超格子周期、 m はシュタルク階段指数)。また、WS 局在状態に達しない電場領域では、ミニバンド状態を反映して、状態密度特異点 (ミニブリルアンゾーンの $k_z=0$ (Γ 点) と $k_z=\pi/D$ (π 点): D は超格子周期) での光学遷

移とバンド構造に対する電場効果であるフランツ・ケルディッシュ(FK)振動が状態密度特異点を起点として観測されることが知られている[1]。そしてFK振動の解析から、ミニバンド換算有効質量を求めることができる[1]。本研究の目的は、GaAs/AlAs 超格子を試料として、ミニバンド状態から WS 局在状態への移行過程における FK 振動のプロファイルに着目し、ミニバンド換算有効質量の電場依存性を明らかにすることである。光学遷移の測定には電場変調反射(ER)分光法を用い、高感度に多様なバンド間遷移を検出した。

2. 試料作製と実験方法

本研究では、試料として、分子線エピタキシー法を用いて作製した 100 周期の $(\text{GaAs})_{12}/(\text{AlAs})_2$ 超格子を $p-i-n$ 構造に埋め込んだものを用いた(i が超格子層)。尚、添

字は、モノレイヤー(2.83Å)単位の層厚を示している。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 1.66 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。ER 分光の測定ではプローブ光として W 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、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を行った。反射光の変調成分は、ロックインアンプにより検出した。実験は 77 K で行った。

3. 実験結果と考察

図 1 は、 p - i - n 構造に埋め込まれた $(\text{GaAs})_{12}/(\text{AlAs})_2$ 超格子の 77K における電場強度 14kV/cm での ER スペクトルである。図中の H11 (Γ)、H11 (π) は第 1 量子状態の電子ミニバンドと重い正孔ミニバンド間の Γ 点と π 点における光学遷移を意味する。 Γ 点遷移から高エネルギー側に、そして、 π 点遷移から低エネルギー側に振動するスペクトル構造が、それぞれの状態密度特異点を起点とする FK 振動に相当する。

図 2 は、電場強度 0 kV/cm から 150 kV/cm までの 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。右側のグレイスケールは、ER 信号強度を示している。75kV/cm 以上の高電場領域では、電場強度の増大に伴って、線形かつ放射状に広がる光学遷移 (即ち、シュタルク階段遷移) が明確に観測されている。30kV/cm 以下の低電場領域では、ミニバンド間遷移である H11(Γ)、H11(π) 遷移と、それらを起点とする FK 振動が観測されている。また 30 kV/cm から 75 kV/cm までの電場強度領域では、超格子のミニバンド状態を反映した FK 振動と WS 局在状態を反映したシュタルク階段遷移の共存が観測されている[2]。

本研究では、FK 振動のみが観測されてい

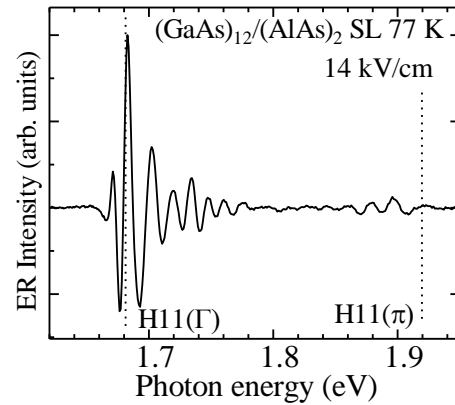


図 1: 電場強度 $F=14$ kV/cm で測定した ER スペクトル。

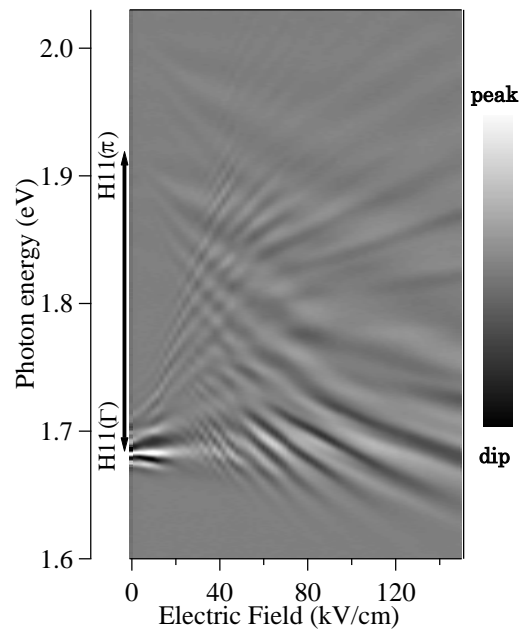


図 2: 電場強度が 0 kV/cm から 150 kV/cm までの ER スペクトルのイメージマップ。

る 30 kV/cm 以下の ER スペクトルに着目してその解析を行う。FK 振動は、電場強度(F)とミニバンド換算有効質量(μ)を含む次の式で表される[3]。

$$E_j = E_0 \pm \hbar\theta \left[\frac{3\pi}{4} \left(j - \frac{1}{2} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

$$\hbar\theta = \left[\frac{(eF\hbar)^2}{2\mu} \right]^{1/3} \quad (2)$$

ここで、 E_0 は特異点の遷移エネルギー、 E_j は特異点の遷移を基準に j 番目の振動のピークもしくはディップのエネルギーを意味している。(1)式より、ER スペクトルにおける FK 振動のピークおよびディップのエネルギーと j の関係から、 $\hbar\theta$ を求めることができる。(2)式より $\hbar\theta$ は、電場強度とミニバンド換算有効質量によって決定され、電場強度が既知ならば、ミニバンド換算有効質量を算出することができる。

図 3 は、 $F=14 \text{ kV/cm}$ での ER スペクトルの FK 振動と次数(j)の対応を表している。H11(Γ)と H11(π)遷移エネルギーに関して、それぞれ、 Γ 点からは高エネルギー側に、 π 点からは低エネルギー側に、観測された振動構造に次数(j)を振った。図 4 は、FK 振動のピークおよびディップエネルギーと次数(j)の関係を表式(1)に従ってプロットし、それをフィッティングした結果を示している。このフィッティング関数の傾きが $\hbar\theta$ に対応している。よって、(2)式より $F=14 \text{ kV/cm}$ での FK 振動の場合、 Γ 点と π 点におけるミニバンド換算有効質量はそれぞれ $0.07m_0$ 、 $-0.04m_0$ と算出される。

図 5 は、FK 振動のみが観測された電場強度領域での Γ 点および π 点におけるミニバンド換算有効質量の電場強度依存性の結果である。矢印は、 $(\text{GaAs})_{12}/(\text{AlAs})_2$ 超格子のミニバンドエネルギー分散関係から計算した Γ 点と π 点におけるミニバンド換算有効質量の値である。この結果の特徴として、 Γ 点と π 点の両方に関して、ミニバンド換算有効質量は 18 kV/cm までほぼ一定であり、それ以上では増大の振る舞いが生じている。以下では伝達行列法[4]を用いて、電場印加条件下での電子の包絡波動関数を計算することで実験結果の物理的意味を考察する。

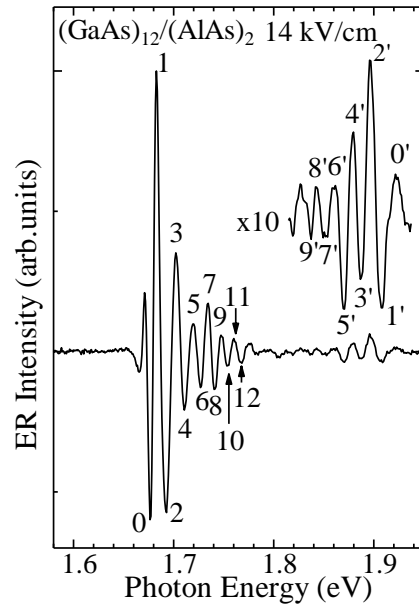


図 3: $F=14 \text{ kV/cm}$ での ER スペクトルの FK 振動プロファイル。

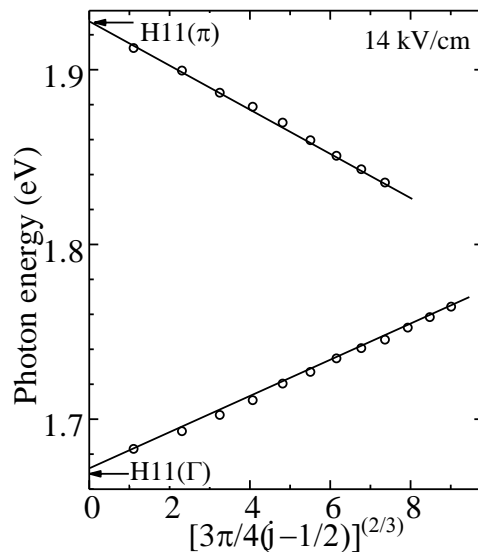


図 4: FK 振動のピークおよびディップエネルギーと次数(j)の関係。直線は、(1)式に基づくフィッティング結果を示している。

図 6 は、0 から 60 kV/cm の電場強度領域で計算した電子の包絡波動関数である。特徴として 18 kV/cm を越えた電場強度で電子の波動関数が局在化傾向を示すことがわか

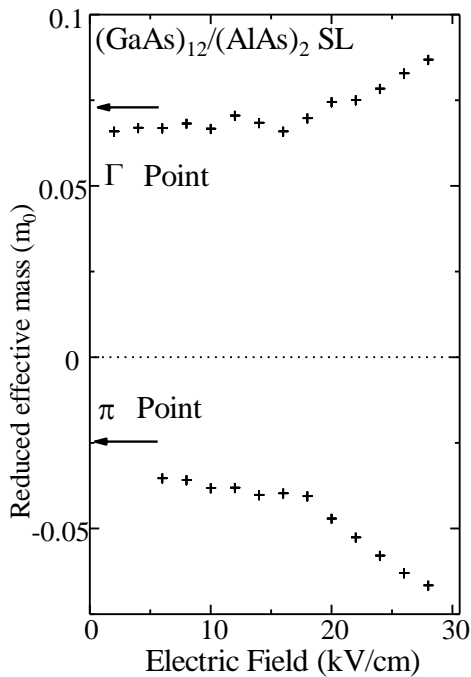


図 5 : ミニバンド換算有効質量の電場強度依存性。

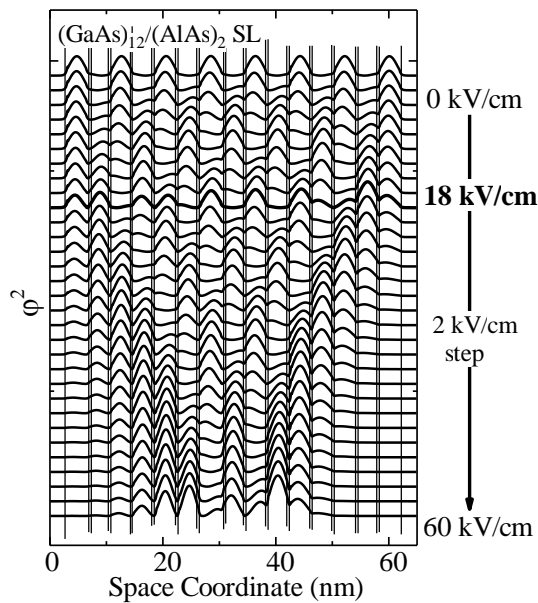


図 6 : 伝達行列法を用いて計算した電子の包絡波動関数の電場強度依存性。

電子の包絡波動関数の弱い局在過程を反映したものであると結論付けられる。

4. まとめ

(GaAs)₁₂/(AlAs)₂ 超格子を試料として、電場変調反射スペクトルに現れる FK 振動を解析することにより、ミニバンド分散関係における Γ 点と π 点のミニバンド換算有効質量の電場強度依存性を実験的に明らかにした。具体的には、ある電場強度（本研究では 18kV/cm）までは、無電場条件のミニバンド換算有効質量を維持するものの、その電場強度を越えると、ミニバンド換算有効質量が増加する傾向を示すという結果が得られた。また、電場印加条件下での超格子の電子の包絡波動関数を伝達行列法で計算し、ミニバンド換算有効質量が増加し始める電場強度付近で、電子の波動関数の弱局在化が生じることが示唆された。したがって、ミニバンド換算有効質量の増加は、電子の包絡波動関数の弱局在化過程を反映したものであると結論できる。

- [1] M. Nakayama, T. Nakanishi, K. Okajima, M. Ando and H. Nishimura, *Solid State Commun.* **102**, 803 (1997)
- [2] N. Linder, K.H. Schmidt, W. Geisselbrecht, G. H. Dohler, H. T. Grahn, K. Ploog, H. Schneider, *Phys. Rev. B* **52**, 17352 (1995).
- [3] D. E. Aspnes and A. A. Studna, *Phys. Rev. B* **7**, 4605 (1973).
- [4] I. Tanaka, M. Nakayama, H. Nishimura, K. Kawashima, K. Fujiwara, *Phys. Rev. B* **46**, 7656 (1992).

る。したがって、図 5 に示した電場強度増大に伴う Γ 点と π 点のミニバンド換算有効質量の増大は、18 kV/cm 以上の電場強度での