GaAs/AlAs 超格子における Franz-Keldysh 振動 に基づくミニバンド有効質量の解析

平尾 岳義、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

Analysis of miniband effective masses from Franz-Keldysh oscillations in GaAs/AlAs superlattices

Takeyoshi Hirao, Takayuki Hasegawa and Masaaki Nakayama Department of Applied Physics, Graduate school of Engineering Osaka City University

We have investigated miniband effective masses in GaAs/AlAs superlattices with photoreflectance spectroscopy. It is found that Frantz-Keldysh oscillations appear in the energy regions of the optical transitions at the mini-Brillouin-zone center (Γ point) and the mini-Brillouin-zone edge (π point). Analyzing the Franz-Keldysh-oscillation profiles, we have succeeded to evaluate the reduced effective masses of the miniband at the Γ point and the π point. As a result, it is revealed that the miniband mass at the π point is smaller than that at the Γ point and that the miniband effective mass depends on the miniband width.

1.<u>はじめに</u>

障壁層の薄い半導体超格子(SL)では、量 子井戸間の波動関数の共鳴結合により超格 子周期(D)で定義されるミニブリルアンゾ ーン内 ($0 \leq k_z \leq \pi/D; k_z$ は積層方向の波数ベ クトル)にミニバンドが形成される。ミニバ ンド構造は、結晶成長段階における超格子 の構成要素(半導体の種類、層厚、周期、歪 み)の選択によりかなりの自由度で制御可 能であるので、ミニバンド構造を評価する ことは、物性と素子応用の両面において重 要であると言える。しかし、ミニバンド有 効質量についてはこれまで限られた研究し か報告されていない[1]。本研究では、様々 なミニバンド幅を持つGaAs/AlAs SLを試料 として、バンド間遷移を極めて高感度に検 出できる光変調反射(photoreflectance; PR)分 光法[2-5]を用いてFranz-Keldysh(FK)振動を 検出し、その振動構造からミニバンド有効 質量の解析を行った。

なお、FK 振動の解析では Aspnes & Studna の理論[6,7]を適用した。

2. 試料作製と実験方法

試料は、(001) GaAs基板上に、分子線エピ タキシー (MBE) 法により作製された (GaAs)₁₀/(AlAs)₁ SL (182 周期)、 (GaAs)₁₂/(AlAs)₃ SL (120 周期) および (GaAs)₁₂/(AlAs)₄ SL (112 周期)を用いた。な お、それぞれの超格子における有効質量近 似に基づいて計算された第1電子ミニバン ド幅と第1重い正孔のミニバンド幅の和は それぞれ、400 meV、185 meV、76 meVであ る。

PRスペクトルの測定において、照射光は 100 Wのハロゲンランプを分光器 (分解 能:5Å)により単色化した光を用いた。ま た励起光にはスタビライザーにより安定化 し、チョッパーにより周期化されたAr⁺レー ザー(514 nm)光を用いた。反射光はSiフォト ダイオードで受光し、その変調成分は、ロ ックインアンプにより検出した。すべての 測定は 77 Kで行った。

3. <u>実験結果と考察</u>

ミニバンド構造の計算を有効質量近似に 基づいておこなうと、ミニバンドエネルギ ー分散関係は Kronig-Penney 型方程式で表 される。計算で用いた有効質量とバンドオ フセット比は、文献[3]から引用した。

図1はKronig-Penney型方程式より計算し た(GaAs)₁₂/(AlAs)₃ SLにおけるミニバンド エネルギー分散関係である。図中のH n_en_h (Ln_en_h)の表記において、Hは重い正孔遷移、 Lは軽い正孔遷移、 n_e 、 n_h はそれぞれ電子、 重い正孔(軽い正孔)の量子数を表す。また、 $\Gamma \ge \pi$ は、それぞれミニバンドエネルギー分 散の Γ 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ている。

図2は、(GaAs)₁₂/(AlAs)₃ SLのPRスペクトルを示している。なお、挿入図はGaAs基板のエネルギー領域における測定結果である。また、光学遷移の同定は、有効質量近似に基づく計算結果より行った。光変調反射スペクトルにおいて、ミニバンド特異点(Γ点とπ点)での光学遷移が明確に観測された。またH11(Γ)遷移の高エネルギー側および、H11(π)遷移の低エネルギー側に2組の振動構造が観測された。この振動構造が、本研究で最も重要となるFK振動である。

Aspnes & Studna の理論[6,7]によると、FK 振動のピークエネルギーは次の(1),(2)式に よって表される。

$$E_{\nu} = E_0 \pm \hbar \theta \left[\frac{3\pi}{4} \left(\nu - \frac{1}{2} \right) \right]^{2/3}$$
(1)

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

ここでEoは遷移エネルギー、Fは内部電場





強度、μはその電場方向の換算有効質量を 表す。なお、今回の試料の内部電場は、超 格子表面のフェルミレベルピニングなど によって生じる表面空乏層による自然発 生的な内部電場である。

図 3 は(GaAs)₁₂/(AlAs)₃ SLにおけるFK振 動のピークとディップのエネルギーを(1)式 のFK振動理論に基づいてプロットした図 である。

図3における傾きが(2)式の*ħθ*に相当し、 内部電場強度Fと換算有効質量µの2つのパ ラメーターが含まれる。Γ点、π点の換算有 効質量の導出方法について以下に述べる。 まず、GaAs基板からのFK振動に着目し、既 に知られているGaAsの換算有効質量(0.056 m₀)を用いて内部電場を見積もった。次に GaAs基板にかかる電場が超格子のミニバ ンド状態にも適用できると仮定し、超格子 のFK振動からΓ点、π点におけるミニバンド 換算有効質量を見積もった。なお、この仮 定は試料がアンドープであるために、表面 空乏層の長さは数um程度であり、超格子の 総膜厚(~0.6 µm)より十分に長いので妥当 な仮定である。ここで得られた結果は、内 部電場強度が 3.9 kV/cm、Γ点ミニバンド換 算有効質量は 6.3×10⁻² m₀、π点ミニバンド 換算有効質量は-1.1×10⁻² moである。

図4はFK 振動の解析から得られた各超 格子における換算有効質量のミニバンド幅 依存性である。ここで、点線はバルク GaAs の換算有効質量を表している。この図より、 「点ミニバンド換算有効質量は、GaAs 基板 結晶の換算有効質量とほぼ一致し、π点ミニ バンド換算有効質量はΓ点ミニバンド換算 有効質量に比べて小さいこと、および、ミ ニバンド換算有効質量にミニバンド幅依存 性が存在することを示している。

表1は 測定に用いた各超格子における 「 点ミニバンド換算有効質量の実験値と計算 値の比較を表し、表2は測定に用いた各超



格子における π点ミニバンド換算有効質量 の実験値と計算値の比較を表す。なおミニ バンド換算有効質量の計算値は、有効質量 の一般的な定義式

$$m^* = \frac{\hbar^2}{\left(\frac{\partial^2 E}{\partial k^2}\right)} \tag{3}$$

	$\Delta E_1 + \Delta H H_1 \text{ (meV)}$	実験値	計算値	
(GaAs) ₁₀ /(AlAs) ₁ SL	400	$4.6 \times 10^{-2} m_0$	$3.7 \times 10^{-2} m_0$	
(GaAs) ₁₂ /(AlAs) ₃ SL	185	$6.3 \times 10^{-2} m_0$	$5.2 \times 10^{-2} m_0$	
(GaAs) ₁₂ /(AlAs) ₄ SL	76	$7.2 \times 10^{-2} m_0$	$5.8 \times 10^{-2} m_0$	

表 1: Γ点ミニバンド換算有効質量の実験値と計算値の比較

表 2: π点ミニバンド換算有効質量の実験値と計算値の比較

	$\Delta E_1 + \Delta H H_1 \text{ (meV)}$	実験値	計算値
(GaAs) ₁₀ /(AlAs) ₁ SL	400	$-8.0 \times 10^{-3} m_0$	$-7.5 \times 10^{-3} m_0$
(GaAs) ₁₂ /(AlAs) ₃ SL	185	$-1.1 \times 10^{-2} m_0$	$-3.8 \times 10^{-2} m_0$
(GaAs) ₁₂ /(AlAs) ₄ SL	76	$-1.0 \times 10^{-2} m_0$	$-4.6 \times 10^{-2} m_0$

を用いてミニバンド分散関係のΓ点、π点に おける曲率より導出した。表1表2より、 実験値は計算値とほぼ一致することが分か る。

4.<u>まとめ</u>

ミニバンド幅が異なる 3 種類の GaAs/AlAs 超格子を試料として、ミニバン ド分散関係におけるΓ点(ミニブリルアンゾ ーン中央)とπ点(ミニブリルアンゾーン端) のミニバンド換算有効質量を光変調反射ス ペクトルに現れる FK 振動に基づいて系統 的に解析した。その結果、Γ点ミニバンド換 算有効質量はバルク GaAs における換算有 効質量とほぼ一致し、π点ミニバンド換算有 効質量はΓ点ミニバンド換算有効質量と比 べて小さいこと、ならびに、ミニバンド換 算有効質量に明確なミニバンド幅依存性が 存在することが明らかとなった。また、こ れらの実験結果は、有効質量近似に基づく 計算結果とほぼ一致した。以上の成果は光 変調反射スペクトルに現れる FK 振動の解 析から、ミニバンド換算有効質量を定量的 に評価できることを明確に示している。以 上の結果は、これまで十分に解明されてい なかった超格子のミニバンド有効質量が PR スペクトルに現れる FK 振動の解析から 評価できることを明確に示している。

参考文献

- M. Nakayama, T. Nakanishi, K. Okajima, M. Ando, and H. Nishimura, Solid State Commun. **102**, 803 (1997).
- [2] S. H. Pan, H. Shen, Z. Hang, F. H. Pollak, W. Zhuang, Q. Xu, A. P. Roth, R. A. Masut, C. Lacelle, and D. Morris, Phys. Rev. B 38 3375 (1988).
- [3] M. Nakayama, T. Doguchi, and H. Nishimura, J. Appl. Phys. 72, 2372 (1992).
- [4] C. Parks, A. K. Ramdas, M. R. Melloch, and L. R. Ram-Mohan, Phys. Rev. B 48, 5413 (1993).
- [5] M. Nakayama, R. Sugie, H. Ohta, and S. Nakashima, Jpn. J. Appl. Phys. 34, suppl. 34-1, 80 (1995).
- [6] D. E. Aspnes, Phys. Rev. 153, 972 (1967).
- [7] D. E. Aspnes and A. A. Stunda, Phys. Rev. B 7, 4605 (1973).