

最近の技術から

フォトリフレクタンス法による半導体超格子の評価

松岡 俊匡・谷口 研二・浜口 智尋

大阪大学工学部電子工学教室 〒565 吹田市山田丘 2-1

1. はじめに

電界を結晶表面に印加すると誘電関数が増加し、反射率 R が変化する。この変化分 ΔR と反射率 R との比 $\Delta R/R$ のスペクトルを測定することで、結晶のエネルギー帯構造に関する情報を得ることができる¹⁾。フォトリフレクタンス (PR) 法は、この低電界変調分光法の一つであり、試料にレーザー光を照射することにより非接触、非破壊で表面電界を変調し、反射率変化を測定するものである。非接触、非破壊で精度のよい測定ができるため、PR 法は超格子系に対しても用いられるようになってきている²⁾。本稿では、PR 法の概要と、GaAs/AlAs 超格子に適用した結果を述べる。

2. フォトリフレクタンス法の概要

PR 法においては、光学定数は次のようなメカニズムで変調される：(1) バンドギャップ以上のフォトンエネルギーをもつレーザー光は、試料表面付近に電子・正孔対を生成させる。(2) 生成した電子は基板のほうへドリフトし、正孔は表面単位を占める電子と再結合する。(3) チョップされたレーザー光は、この過程を経て表面電界を変調し、試料の反射率を変化させる。

PR 法の測定装置はいろいろ工夫されているが^{2,3)}、ここではわれわれの用いた装置について述べる。測定装置を図1に示す。 $\Delta R/R$ を測定するために、反射光による光電子増倍管の出力が一定になるように、サーボ機構で光電子増倍管に加わる高電圧を制御しながら、反射率変化分 $\Delta R/R$ をロックインアンプで増幅している。プローブ光は、Xe ランプからの光を分光することで得ている。反射光は、レーザー光 (Ar イオンレーザー、488 nm) をカットするフィルターを通して、光電子増倍管で検出される。

Aspnes によれば、 $\Delta R/R$ の理論式は

$$\frac{\Delta R}{R} = \sum_j \frac{p}{j} \operatorname{Re}[C_j \exp(i\theta_j) (E - E_{oj} + i\Gamma_j)^{-m_j}] \quad (1)$$

と表される¹⁾。ここで、 p は臨界点の数、 E はフォトンエネルギー、 C_j 、 θ_j 、 E_{oj} 、 Γ_j は、 j 番目の臨界点での振幅、位相、遷移エネルギー、ブロードニング・パラメータである。 m_j は臨界点の型によって異なり、1, 2, 3 次元の臨界点に対して、それぞれ $m_j=3.5, 3, 2.5$ となる。各臨界点でのパラメータは、上の理論式を PR 法で得られたスペクトルにフィッティングすることにより得られる。

3. GaAs/AlAs 超格子のバンドギャップの評価

図2は 200 K における (GaAs)₈/(AlAs)₈ 超格子に対する PR スペクトルおよび解析結果である。白丸は PR 法で得られたスペクトル、実線は理論式を実験結果にフィッティングしたものである。超格子中の電子の波動関数は界面に垂直な方向にも広がっているので、 m_j は3次元の臨界点のものを用いている。図2中の矢印は、フィッティングにより得られた遷移エネルギーを示している。この試料では、メインピークよりも低エネルギー側に弱い構造が観測されている。PR 法は直接遷移の臨界点に対して強い構造を示すため、この構造は遷移確率の小さ

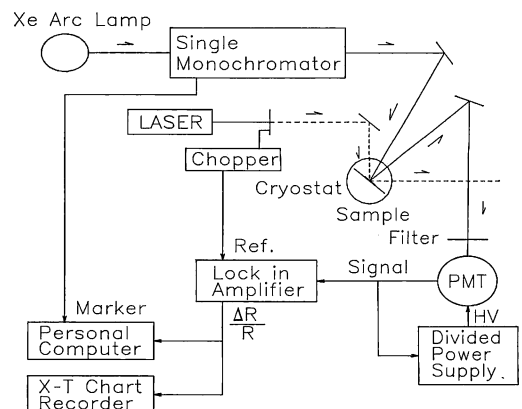


図1 フォトリフレクタンス法の実験装置

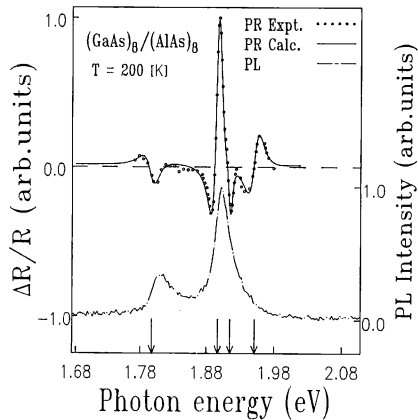


図 2 200 K での $(\text{GaAs})_8/(\text{AlAs})_8$ 超格子の PR スペクトル

い直接遷移を示していると考えられる。図 2 では、高エネルギー側にも構造が見られるが、これは折り返し効果により、超格子のバンド構造が複雑なものであることを示唆する。図 2 の一点鎖線は、 $(\text{GaAs})_8/(\text{AlAs})_8$ 超格子の 200 K でのフォトルミネッセンス (PL) のスペクトルを示している。PL のピークエネルギーと PR 法で得られた遷移エネルギーがよく一致していることがわかる。また、PR 法では PL 法と比べて鋭いスペクトルが得られることがわかる。

GaAs/AlAs 超格子では、界面に垂直な方向の X 点における AlAs の伝導帯 (価電子帯不連続値のために、GaAs の X 点での伝導帯よりも低エネルギー側にある。) が Γ 点に折り返され、その結果、超格子のブリルアン領域の Γ 点には、電子が AlAs 層に閉じ込められた状態 (X_2 -like 状態) が存在する。価電子帯の頂上では、電子の波動関数が GaAs 層で密であるので、 X_2 -like 伝導帯と価電子帯との遷移確率は小さい。このような遷移確率の小さい直接遷移を擬直接遷移という。図 2 の低エネルギー側の PR スペクトルの弱い構造は、この擬直接遷移であると考えられる。PR スペクトルのメインピークに関しては、遷移確率の大きい直接遷移を表しており、この遷移は GaAs 層で波動関数が密になっている伝導帯 (Γ -like 状態) と価電子帯との遷移と考えられる。

図 3 は、200 K における $(\text{GaAs})_n/(\text{AlAs})_n$ 超格子の PR 法および PL 法から得られた遷移エネルギーを層数 n の関数として表したものである。丸印は PR 法から得られた遷移エネルギーであり、白丸がメインピークおよび高エネルギー側の臨界点の遷移エネルギーである。黒

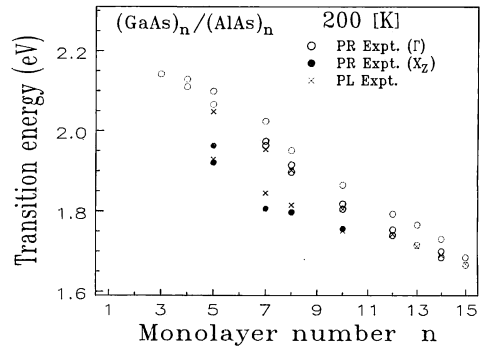


図 3 200 K での $(\text{GaAs})_n/(\text{AlAs})_n$ 超格子の遷移エネルギーの n 依存性

丸は低エネルギー側の弱い構造を示す臨界点の遷移エネルギーである。×印は PL 法から得られた遷移エネルギーを示す。この図より、200 K においては、 $n=12$ 付近で直接許容遷移 (価電子帯から Γ -like 伝導帯への遷移) と擬直接遷移 (価電子帯から X_2 -like 伝導帯への遷移) の交差がおけるといえる。このような傾向は、第 2 近接相互作用を綿密に取り入れた経験的強結合近似法により理論的に説明されている⁴⁾。

4. む す び

PR 法は、非接触、非破壊で、室温でも精度のよい測定が可能であり、超格子や量子井戸などの評価に用いられつつある。また、超格子や量子井戸における低電界変調分光の理論の研究もなされている⁵⁾。今後さらに PR 法の研究が進み、広範囲に応用されることが期待される。

文 献

- 1) D.E. Aspnes: "Third-derivative modulation spectroscopy with low-field electroreflectance," *Surface Sci.*, **37** (1973) 418.
- 2) N. Bottka, D.K. Gaskill, R.S. Sillmon, R. Henry and R. Glosser: "Modulation spectroscopy as a tool for electronic material characterization," *J. Electron. Matter.*, **17** (1988) 161.
- 3) J.L. Shay: "Photoreflectance line shape at the fundamental edge in ultrapure GaAs," *Phys. Rev.*, **B2** (1970) 803.
- 4) J.B. Xia and Y.C. Chang: "Electronic structures and optical properties of short-period GaAs/AlAs superlattices," *Phys. Rev.*, **B42** (1990) 1781.
- 5) O.J. Glembocki and B.V. Shanabrook: "Electromodulation spectroscopy of confined systems," *Superlattices Microstruct.*, **5** (1989) 603.

(1990年8月31日受理)