

N型 InP 薄膜／InGaAs の低温電界変調反射分光

菅原光司 佐藤知行 酒井政道

埼玉大学大学院理工学研究科 さいたま市桜区下大久保 255 〒338-8570

Low-temperature electroreflectance studies on

n - type InP thin films grown on InGaAs

K. SUGAWARA, T. SATOU and M. SAKAI

Department of Functional Materials Science, Saitama University

We have carried out low-temperature electroreflectance measurements of N-type InP thin films grown on 3.0 μm -thick InGaAs. The energy positions of ER features observed in 0.5 μm -thick InP are higher and those in 1.0 μm -thick InP are lower than energy gap of each film. In addition, the ER features in the 0.5 μm -thick InP show red shift with increasing reverse bias voltage, indicating an unusual field dependency in contrast with the Franz-Keldysh effect observed in bulk InP.

1. はじめに

半導体の帶間遷移に対する Franz-Keldysh 効果 (FK 効果) は、1958 年に発見されて以来、その測定技術と理論的理解がバルク結晶を用いた研究によって進展し、1980 年代の量子井戸構造や超格子構造の研究を経て、最近では中間的なサイズの薄膜[1,2]や一次元系[3-5]における FK 効果が注目されている。

我々は、現在、1 μm 前後の厚さを有する N 型 InP 薄膜の Electroreflectance (ER) 測定を行っており、その Franz-Keldysh(FK) 振動に対する膜厚依存性を調査している。量子閉じ込め効果が無い状態での中間的厚さの薄膜効果を議論するために、格子定数が InP に一致し、エネルギーギャップが InP より小さい InGaAs 上に InP 薄膜を成長させた。

前回の光物性研究会では主に室温での報告を行ったので[6]、今回は低温に注目して調査

し、ER スペクトルの膜厚依存性、バイアス依存性、温度依存性、また PL スペクトルの調査をしたので報告する。

2. 測定試料と実験方法

測定に用いた N 型 InP／InGaAs の構造・キャリア濃度を表 1 に示す。これらは、有機金属気相成長法によって厚さ 400 μm の InP 基板上に InP バッファ層 ($\sim 1 \mu\text{m}$)、その上に InGaAs 層 (3.0 μm)、最上層に InP 層 (0.5、1.0、1.5 μm) が成長したものである。これらの結晶は株昭和電工より提供された。

ER 測定用試料では、裏面に In を真空蒸着し 450 °C で 3 分間焼成してオーム性電極を、表面には Au を室温で真空蒸着した。

ER スペクトル測定では、試料にバイアス電圧 (-5~1.5 V) を印加し、そこへファンクションジェネレータから出力した矩形波交流電圧

表 1 測定試料の構造パラメータとキャリア濃度

測定試料	InP 層		InGaAs 層	
	厚さ(μm)	キャリア濃度 (×10 ¹⁵ cm ⁻³)	厚さ(μm)	キャリア濃度 (×10 ¹⁵ cm ⁻³)
薄膜 A	0.5	1~2	3.0	10~20
薄膜 B	1.0	< 1.0	3.0	< 1.0
薄膜 C	1.5	< 1.0	3.0	< 1.0

(周波数 600 Hz、変調電圧 400 mV)を重畠して電場変調する。プローブ光はハロゲンランプ光を分光器(焦点距離 0.5 m)によって単色化したもの用いた。反射光を Si フォトダイオードで検出し、電場変調信号はロックインアンプによって検出した。測定は室温、低温共にクライオスタット内で行った。また、これらの試料での X 線回折測定と Photoluminescence(PL)測定を行った。

膜厚 0.5 μm の試料を薄膜 A、1.0 μm のものを薄膜 B、1.5 μm のものを薄膜 C とする。

3. 実験結果と考察

薄膜 A、B、C それぞれの試料(Au/N-InP/InGaAs)について電流-電圧特性を測定した。4 K での薄膜 A の電流-電圧特性を図 1 に示す。それぞれの薄膜はショットキ接合に特有の特性を示した。

PL 測定(図 2)では、4 K における薄膜 A で 1.40 eV、薄膜 B,C で 1.42 eV において最も大きい発光ピークが確認された。そこで本研究では、ここで 4 K においてそれぞれの試料のエネルギーギャップが 1.40 eV (A)、1.42 eV (B,C) であると仮定する。

図 2 には各膜厚の 50 K におけるバイアス 0 V での ER スペクトルを示す。図 2 では膜厚 1.0、1.5 μm の試料では複雑な振動が複数確認できるのに対し、0.5 μm 厚の試料では 1.4 eV 付近の振動構造のみ観測できた。

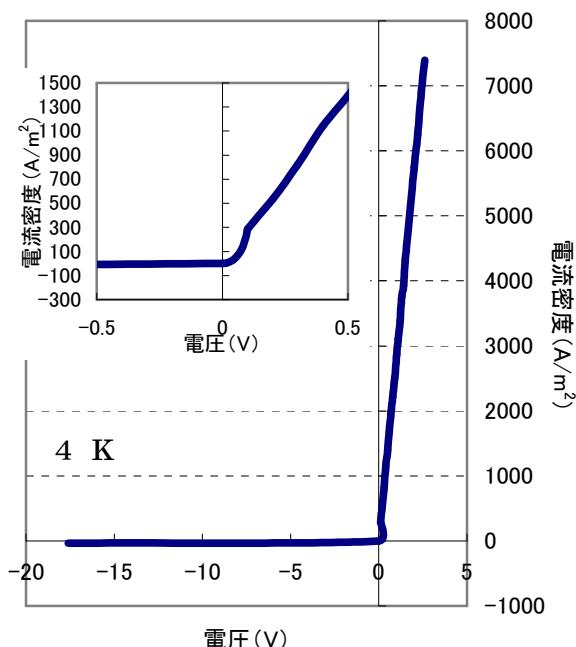


図 1 4 K における 0.5 μm 厚での N 型 InP/InGaAs の電流-電圧特性。左上図は同図の原点付近の拡大図。

薄膜 A においては E_g (A) より高エネルギー側での振動が観測され、薄膜 B、C ではそれぞれ E_g (BC) より低エネルギー側での振動が観測された。このように薄膜 A において、他の 2 つの試料 (薄膜 B、薄膜 C) と比べて異なる形状のスペクトルが室温、低温共に観測された。また、InP 1.0 μm 厚の薄膜 B 試料において、1.38 eV 付近にピークが観測された。このピークは薄膜 A、C では確認されなかった。

これらそれぞれの特徴について調査するためにそれぞれの試料における温度依存性、バイアス依存性を測定した。薄膜 A 試料の

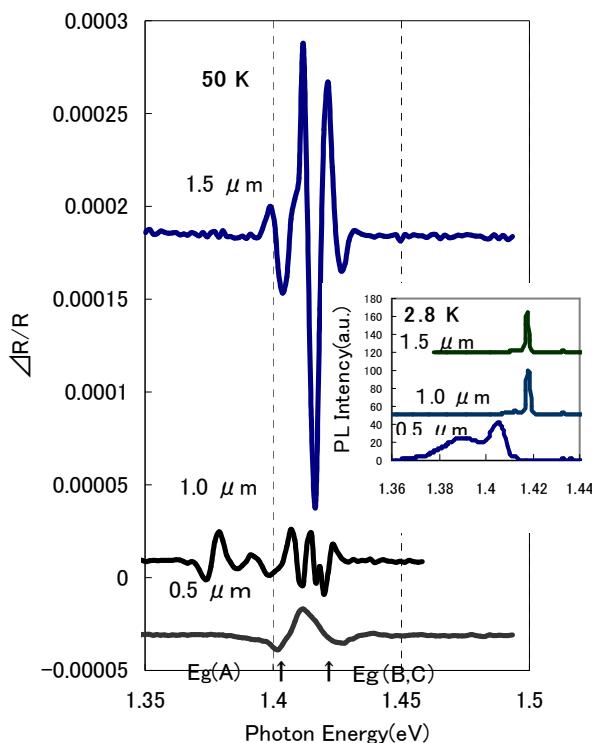


図2 50 Kにおける各膜厚のN型InP/InGaAsのバイアス0VでのERスペクトル。右中図は各膜厚の2.8 KでのPLスペクトル。

25 Kにおけるバイアス依存性を図3に示す。図3から、ERスペクトルのピーク位置が逆バイアスの増加(順バイアスの減少)とともになって低エネルギー側にシフトしていることが確認された。このことは矢印で示したピークを始め、図3中のほぼ全てのピークにおいて見られる特徴である。また、その振動周期は逆バイアスの増加とともに小さくなっていた。

薄膜Bにおいてほぼ同条件の測定を行った。その測定結果を図4に示す。複数見られるピークの内、 $E_g(B,C)$ 付近のピークには一部逆方向バイアス増加に伴って低エネルギー側へシフトしているものと、逆バイアスに依存しないものが確認でき、薄膜Aとは異なった振る舞いを示した。また、 $E_g(B,C)$ より低い1.38 eV付近に見られたピークは、逆バイアスの増加に伴って高エネルギー側へシフトする振る舞いを示した。振動は全体として逆バイアス増加

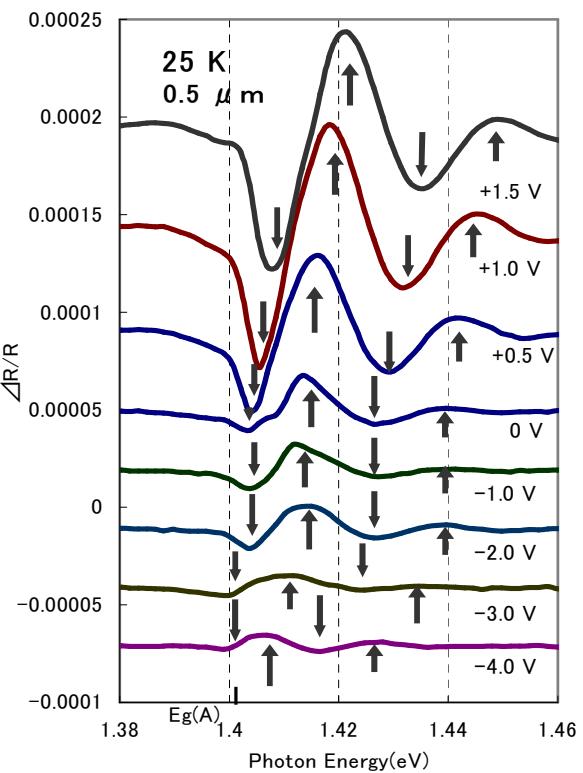


図3 25 Kにおける0.5 μm厚N型InP/InGaAsのERスペクトルのバイアス電圧依存性。逆バイアス電圧をマイナス、順バイアス電圧をプラスとしている。

に伴ってその振動周期は小さくなっていた。この点では0.5 μm厚の試料と特徴が類似している。

薄膜CでのERスペクトルのバイアス依存性も調査した。振る舞いとしては薄膜Aとは異なったものであり、比較的薄膜Bに近いものであった。

薄膜B試料のERスペクトルから得られたピークの温度依存性を図5に示す。図5では図4中の1.38 eV付近のピークをピーク(1.38)、1.42 eV付近のピークをピーク(1.42)としている。両ピーク共に温度の低下に伴ってそのエネルギー位置が高くなっていることが確認できた。また、その変化の様子も類似している。ピーク(1.42)が $E_g(B,C)$ 付近であることからエネルギーギャップ由来のものであると考えられ、ピーク(1.38)がその変化と類似し

ていることからピーク（1.38）も InP 薄膜由来のものであると推測できる。

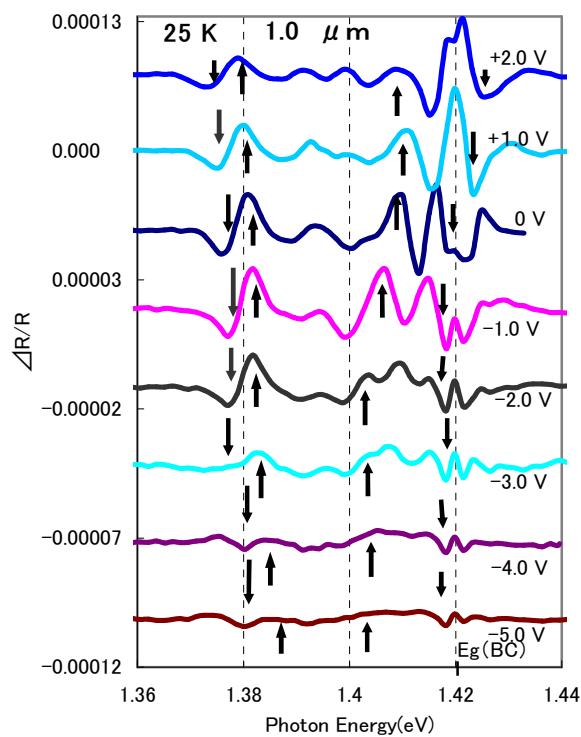


図 4 25 K における $1.0 \mu\text{m}$ 厚 N型 InP /InGaAs での ER スペクトルバイアス依存性。

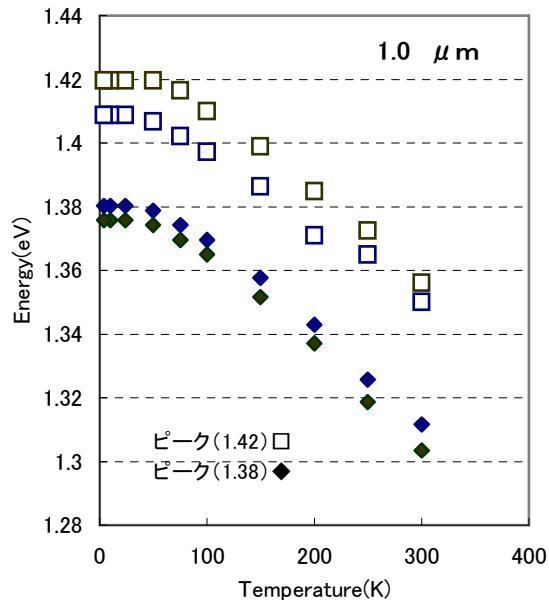


図 5 薄膜 B ($1.0 \mu\text{m}$) における 0 V バイアスでの ER スペクトルの温度依存性。

4. 結論

厚さが 0.5 、 1.0 、 $1.5 \mu\text{m}$ の N型 InP 薄膜の電場変調スペクトルを室温から低温にかけて測定し、それぞれの温度依存性、バイアス依存性、そして InP 膜厚依存性を調査した。

$1.0 \mu\text{m}$ 厚試料において $Eg(B, C)$ より 40 meV 低エネルギー側で振動が観測された。この振動は薄膜 A、C では確認されていない。また、温度依存性が InP とほぼ同じであったことから InGaAs ではなく InP 由来のものであると考えられる。その原因としてバンドー不純物準位間遷移が考えられる[7]。

$0.5 \mu\text{m}$ 厚の ER スペクトルでは、 $Eg(A)$ より高エネルギー側で振動構造が観測された。また、そのバイアス依存性において、薄膜 A が他の 2 つの薄膜とは異なった振る舞い、すなわち、ER 構造が逆バイアス電圧の増加とともに低エネルギー側に移動するという現象が観測された。この原因については膜厚の効果と共に、キャリア濃度の違い（表 1）によるものである可能性も考えられ、現在検討中である。

参考文献

- [1] H. J. Kolbe, C. Agert, W. Stolz, and G. Weiser, Phys. Rev. B 59 (1999) 14896.
- [2] H. J. Kolbe, C. Agert, W. Stolz, and G. Weiser, Physica E 6 (2000) 173.
- [3] S. Hughes and D. S. Citrin, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 4228.
- [4] T. G. Pedersen and T. B. Lynge, Phys. Rev. B 65 (2002) 085201-1.
- [5] M. Sakai and M. Yamaguchi, Physica E, 21 (2004) 367.
- [6] 菅原ら, 第 16 回光物性研究会論文集 (2006) 279.
- [7] M. Sakai and M. Takeuchi, Physica E, 376/377 (2006) 897.