



Title	超平坦ヘテロ界面を持つIII-V 化合物半導体量子井 戸構造
Author(s)	下村, 哲
Citation	大阪大学低温センターだより. 1997, 97, p. 1-8
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/7805
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

超平坦ヘテロ界面をもつⅢ—Ⅴ 化合物半導体量子井戸構造

基礎工学部 下 村 哲 (内線6456)
shimomura@mp.es.osaka-u.ac.jp

基礎工学部物性物理工学科の4回生6名が冷水研究室で卒業研究をすることになってはじめて研究室へ来た4月下旬の昼下がり……

生徒：先生。こんにちは。ここ冷水研究室に配属が決まった4回生6名です。

先生：こんにちは。よろしく。

(簡単な自己紹介が終わって)。

生徒：冷水研で研究している内容を紹介してもらえませんか。冷水教授は出張なので。

先生：いいよ。この研究室では、Ⅲ—Ⅴ化合物半導体の研究をしているんだ。実際に試料を自分で作って、自分で測定して、新しい性質をもった半導体材料を手に入れようというわけだ。この研究室の中心的なテーマのひとつ、非常に平坦な界面をもった量子井戸の話をしよう。

生徒：先生。半導体って、Si(シリコン)とかGe(ゲルマニウム)でしょ。Ⅲ—Ⅴ化合物半導体ってなんですか。

先生：化学で周期表って、習っただろう。その周期表でⅢb族の元素にAl(アルミニウム)、Ga(ガリウム)、In(インジウム)、Ⅴb族の元素にP(リン)、As(ひ素)、Sb(アンチモン)がある。このⅢ族の元素とⅤ族の元素を1:1でまぜて結晶にしたものがⅢ—Ⅴ化合物半導体だ。GaAsやInPがⅢ—Ⅴ化合物半導体の代表だ。

生徒：半導体って、SiやGeだけではないんですね。

先生：そのとおり。SiやGeはⅣ族の元素で、半導体はダイヤモンド構造をした結晶だ。Ⅲ—Ⅴ化合物半導体も図1のように、結晶の構造はダイヤモンド構造に似ているんだ。Ⅲ族原子とⅤ族原子が隣り合って並んでいるが、Ⅲ族元素とⅤ族元素の区別をなくすとダイヤモンド構造とまったく同じだ。

生徒：Ⅲ—Ⅴ化合物半導体は、実際、役にたっているのですか。

先生：オーディオ装置の表示パネルに赤や黄色や緑色に美しく輝く光素子がついているだろう。この光素子は、発光ダイオードといって、Ⅲ—Ⅴ化合物半導体を材料に作られるんだ。Ⅲ—Ⅴ化合物半導体は、半導体レーザーにも使われているし、衛星放送、携帯電話の増幅に使う高速のトランジスタにも使われているんだ。Ⅲ—Ⅴ化合物半導体を使うと、発光素子や高速の電子素子を作ることができるのが特徴なんだ。Siは、発光素子にはむかないんだ。

生徒：他に、特徴はないんですか。

先生：実は、びっくりするような特徴がある。まず、III-V化合物半導体は、二つの種類を混ぜて中間の性質をもつものを作ることができるし、くっつけて新しい性質をもった半導体材料にすることができるんだ。たとえば、AlAsとGaAsを x 対 $1-x$ の割合で混ぜて作った結晶 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ では、Al組成 x を増やすことによって発光する光の波長を赤外から赤色の領域まで変えることができる。

生徒：半導体は、どのようにして光るんですか。

先生：図2のバンド図を用いるとわかりやすいんだ。縦軸は電子のもっているエネルギーで横軸は空間すなわち位置を表している。電子はあるエネルギーまでエネルギーの低い方から順番につまっている。これを価電子帯と呼んでいる。その上は、エネルギーギャップといって、電子は、そのエネルギーをもつことを許されていない。さらにその上には伝導帯と呼ぶエネルギー領域があり、電子は連続的にエネルギーをもつことを許されている。価電子帯の電子がひとつぬけると穴があいて正の電荷もった粒子のように振る舞う。これを正孔という。

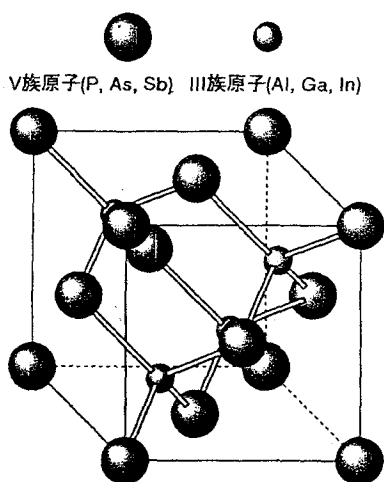


図1 半導体レーザーや高速のトランジスタに使われるIII-V化合物半導体の結晶構造。

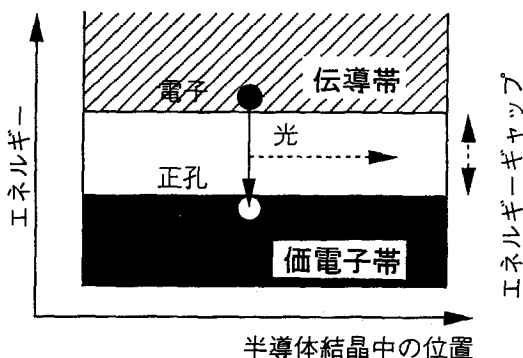


図2 半導体のバンド図と電子と正孔の結合による発光過程。

生徒：それは、習いました。

先生：ぬけた電子は、半導体がもつ固有のエネルギー（エネルギーギャップ）だけ高いエネルギーをもつことになる。電子と正孔が結びついて消滅したとき、つまり、この穴に電子が落ちたときにエネルギーギャップ分のエネルギーが光として放出されるというわけだ。

生徒：それで、半導体をくっつける話は？

先生：図3を見て欲しい。これは2.3 nmから11.5 nmまでの5種類の厚さのGaAs層を $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ で挟んだ多層構造でこのような構造を量子井戸構造と我々は呼んでいる。原子の並びかたを変えず原子の種類だけが層状になっている。

生徒：どんないいことがあるの。

先生：まず、非常に良く光る。電子は下へ、正孔は上へと行くので、電子と正孔はGaAs層に閉じ込められてしまう。電子と正孔は空間的には同じ場所にいるため、結びつきやすくなるからなんだ。

そして、もうひとつ、電子も正孔も薄い井戸の中で量子化されたエネルギーをもち、この量子化された準位の性質を利用して、いろいろなことができるんだ。実際、この量子井戸を光らせると井戸の厚さが薄くなるほど短い波長の光が出るんだ。図4は図3の量子井戸のフォトルミネッセンススペクトルだ。アルゴンレーザーで電子と正孔を作って量子井戸を光らせたときのスペクトルだ。それぞれの厚さに応じて、光っているのが一目瞭然だろう。

生徒：GaAs層の厚さが薄くなるとどうして、発光波長が短くなるのですか。

先生：電子や正孔がGaAs層に閉じ込められるのはわかったと思うけれど、GaAs層が非常に薄いと電子や正孔の波としての性質が顕われてくる。GaAsの厚さがこのように非常に薄くなると、波長の短い(波の半波長とその層の厚さと同じ)電子や正孔だけがその層にすることができる。電子や正孔の波長が短いと、量子力学で習ったと思うけれど、電子や正孔の運動エネルギーが大きくなる。図3のように層の厚さに応じて量子準位ができるわけだ。その結果、電子と正孔が結合して発光したとき、この量子準位(運動エネルギー)分だけエネルギーの高い光(波長の短い光)が出てくるわけだ。

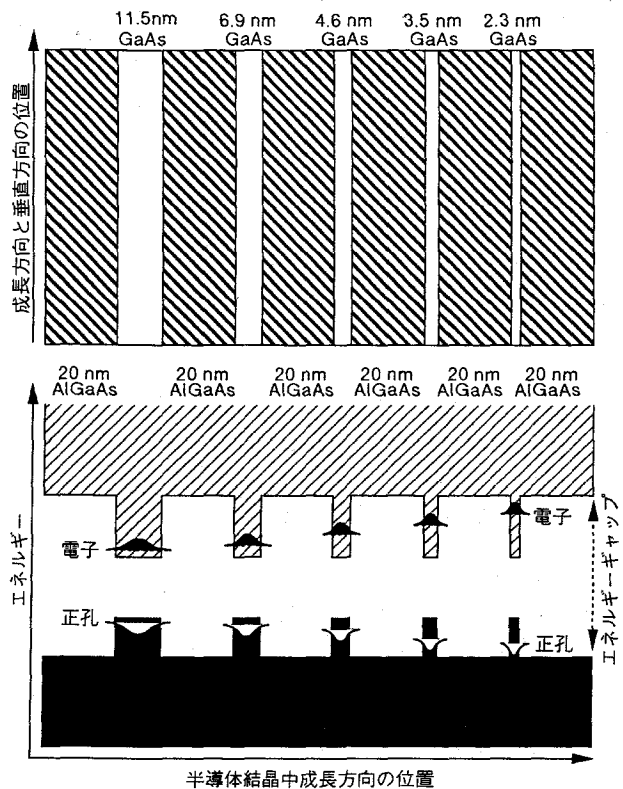


図3 量子井戸構造とバンド図。

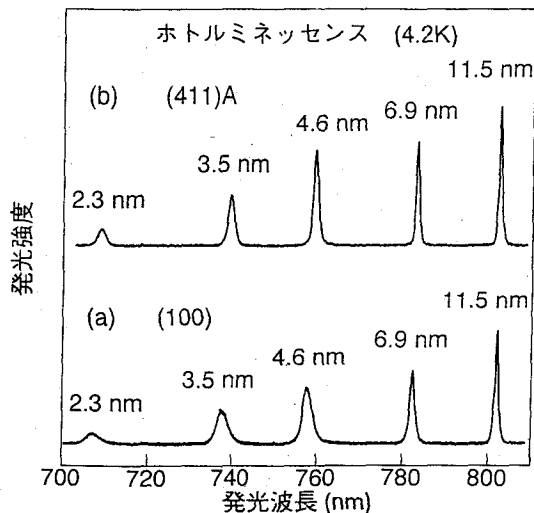


図4 量子井戸からのフォトルミネッセンススペクトル。

生徒：量子力学で習ったポテンシャル井戸の問題と同じなのですね。このような量子井戸構造は、どの

ようにして作るのですか。

先生：2階の実験室にある分子線結晶成長装置(図5(a))で作るんだ。断面は、こんな具合に(図5(b))になっている。ルツボの中のAl、Ga、In、As等の高純度金属材料が加熱されて蒸発する。蒸発した原子は、0.3-0.6 mmの厚さの半導体単結晶基板(例えばGaAs単結晶)表面に到達する。基板は、500℃から700℃に熱せられていて、結晶成長するのに最適になっているんだ。シャッターによってGaとAs、AlとAsと材料を選んで同時に成長したり、交互に成長したりして、混ぜたり多層構造にしたりすることができる。

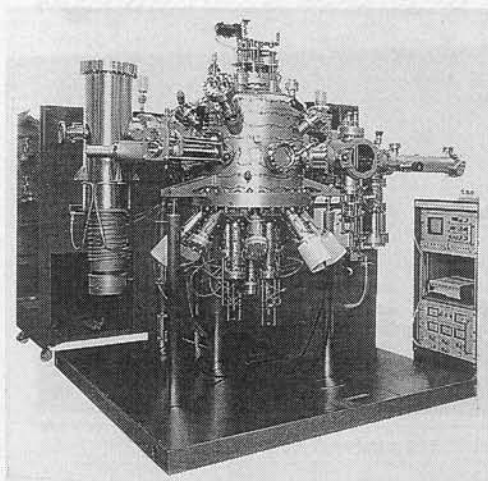


図5 (a)実際に使われている分子線結晶成長装置。

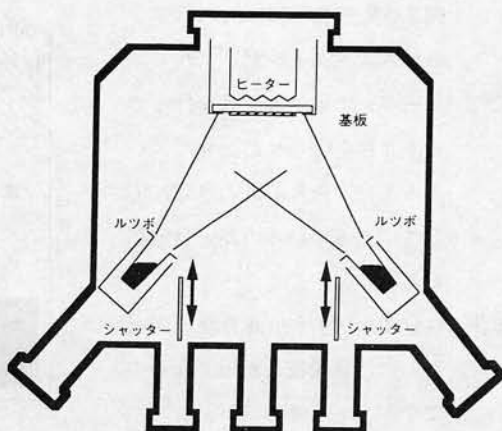


図5 (b)分子線結晶成長装置の断面模式図。

生徒：学生実験でやった蒸着とあまりかわりませんね。

先生：原理的には、まったく違いがないかな。ただ、成長中に不純物を取り込まないためにさまざまな高純度材料がルツボやヒーターにつかわれている。また成長室の真空度は、 10^{-11} Torr(台(圧力で比べると大気圧の100兆分の1)に保たれている。

生徒：大量に液体窒素を使うってききましたけど。

先生：そのとおり。一日に600ℓ使うこともあるんだ。君たちに期待しているんだ。

生徒：窒素くみですね。先輩に聞きました。重たい100ℓの窒素ボトルを押して一日に5往復もしたことがあるって。覚悟しています。なぜそのように大量に使うのですか。

先生：基板表面から見える壁を冷やして、壁からの放出ガスおさえているんだ。蒸発源や基板のヒーターの輻射熱で成長室の壁が熱せられてガスが出るから冷やすことは重要なんだ。これらは、みんな半導体の不純物となって取り込まれて試料の品質を悪くするんだ。Ⅲ-V化合物半導体というのは、とってもデリケートなんだ。

生徒：GaAs層の厚さが非常に薄いのですが、膜厚は、こんなに精度良く制御できるのですか。

先生：結晶の成長速度は、 $1\text{ }\mu\text{m/h}$ で正確にコントロールできる。この成長速度は、1秒間に1原子層(厚さ0.3 nm)成長する速度だから、1秒単位でシャッターを開閉して、1原子層単位で膜厚を

制御することが可能なんだ。

生徒：原子層単位で膜厚を制御できるということはこれ以上のすごい構造はありませんね。

先生：ところがことはそんなに簡単ではないんだ。厚さを原子層単位で制御できるといってもどの部分の厚さも同じというわけにはいかない。たとえば、たたみ一畳の底面をもつ箱にビー玉を敷き詰めていくことを考えるとわかると思うけども8層敷き詰めて上を平らにするのは、一個一個丁寧に並べていけば可能だけれど、ばらばらと入れて揺すったりしただけでは平らに並べられないだろう。あるところは一段多かったり、あるところは一段少なかったりする。

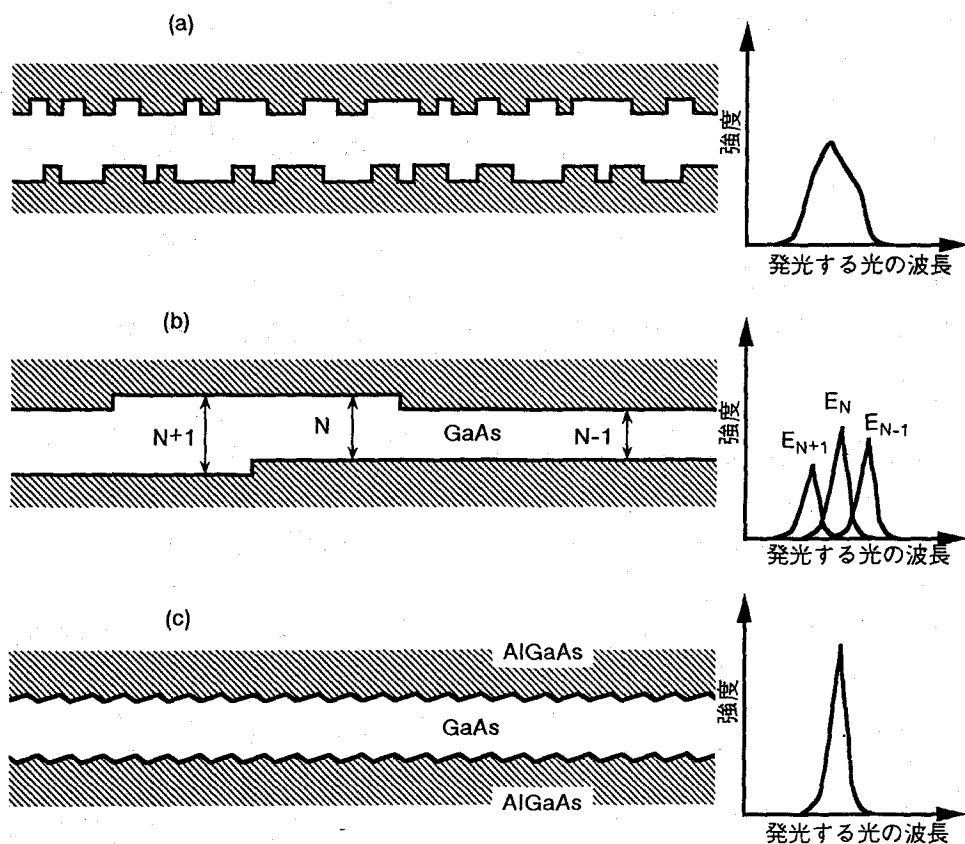


図6 量子井戸界面のもしき図。(a)従来の(100)基板上に連続成長して作製した量子井戸。(b)従来の(100)基板上に界面で2分の成長中断をして作製した量子井戸。(c)(411)A基板上に連続成長して作製した量子井戸。

生徒：それはそうですね。

先生：結晶成長では、ずっと(100)GaAs基板が使われてきたんだが、(100)GaAs基板では、ビー玉を積み重ねるのと同じで図6(a)のような界面ができる。界面に0.3 nm(1原子層の厚さ)の原子ステップがたくさん存在しているため、場所によってGaAs層の平均的な厚さが揺らいで、発光半値幅が広がってしまう。成長中断という、成長を止めている間に(100)面上で原子を動かして原子平坦な界面を作製する方法があるけれど、原子平坦な領域は $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 以内で、図に示すように厚さが場所によって1原子層づつ凸凹するために、発光スペクトルには3本の幅の狭いピーク

が現れる。(図6(b))。これでは部分的には平坦な界面ができてはいるけれど、巨視的に見ればかえって凸凹がひどくなっている。ビー玉とたたみ一畳のたとえでいくとたたみ一畳の広さは、III-V 化合物半導体では、80 nm×40 nmにすぎないから、これは、これですごいことなんだけれど、1cm角にわたって平らにするのは、不可能ってことになる。そこで、我々は、従来用いられてきたこの(100)結晶面を表面にもつ結晶基板から19.5度傾けた特殊な(411)A基板を用いることにより、GaAsと $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ が形成する界面を巨視的領域で実効的に原子平坦にすることができたんだ。

生徒：III-V 化合物半導体は、立方体と同じ対称性だから面の方向は、3次元の直交座標系の面の方向と同じなのは、わかるけれど(411)の次の“A”は何ですか。

先生：これは、裏表の記号で表をA、裏をBと表しているんだ。III-V 化合物半導体の結晶構造図、図1を見てもらうとIII族原子が結合の手を三つ出した方向と一つ手を出した方向に裏表があるのがわかるだろう。III族原子が一つ手を出した方向がA面だ。

生徒：(411)A面だと何故平坦になるのですか。

先生：(411)A上に作製した量子井戸の界面は、図6

(c)に示したように、非常に小さな細波の様な界面からできているため、電子と正孔が感じる界面は、実効的に原子平坦と同等のものとなっていると考えている。このように小さな細波になるには、(411)A面が成長しているとき非常に安定であること、(411)A表面上で原子が良く動けることが重要だ。発光ピークの半値幅は、(100)基板のものと比べて半分となり、成長中断したものと同等であることがわかった。実際、図4のフォトルミネッセンススペクトルを見れば半値幅の違いは明らかだ。そして、発光ピークがただ一本であることは、平坦な界面がどこまでも続いていることを示している。

生徒：このような平坦な界面ができるとどんなことができますか。

先生：いま、共鳴トンネルダイオードへの応用を研究中だ。

生徒：どんな素子なのですか。

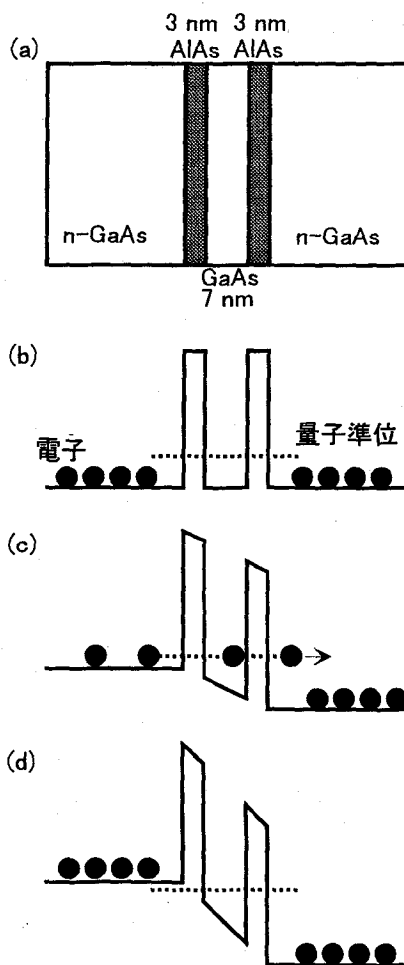


図7 二重障壁共鳴トンネルダイオードの構造(a)。電圧をかけていないときのバンド図(b)。左側にマイナスの電圧をかけていくと電子が量子準位と共鳴して電流がながれる(c)。さらに電圧をかけると左側のn-GaAsの電子は共鳴準位より上にあがって電流は流れなくなる(d)。

先生：この素子は、n型の半導体で囲まれた薄い二重の障壁からなる量子井戸構造、図7(a)で、量子井戸には量子準位ができている図7(b)。これに、電圧を加えていき、マイナス側の電子が量子準位のエネルギーと一致すると共鳴的に電流が流れ(図7(c))、さらに電圧がかかって共鳴する電子がいなくなると急に電流が流れなくなる(図7(d))。図8は、(411)A GaAs基板上に超平坦なヘテロ界面を有した二重障壁トンネルダイオードの電流電圧特性だ。

生徒：界面が平坦だとどこが違うのですか。

先生：この素子の性能を表す指標の一つにピーク電流(密度)(J_p)と谷電流(密度)(J_v)の比がある。図8の中に示したのがピーク電流と谷電流だ。この比を温度に対してプロットすると図9になる。(411)A基板上に作製したダイオードは(100)基板上のダイオードよりもピーク電流と谷電流の比が大きいだらう。

生徒：何故この比が大事なのですか。

先生：このトンネルダイオードと抵抗と電池を使って二つの電圧状態を作ることができる。その時の二つの状態の電圧の差を大きくとることができるからだ。この電圧の差は、電流と抵抗の積だから。(411)A基板上のトンネルダイオードのピーク電流と谷電流の比が大きくなったのは谷電流が小さくなったからなんだ。

生徒：なぜ、谷電流が小さくなったのですか。

先生：この素子は、電子の波動性を使っている。図9 ピーク電流(密度)と谷電流(密度)の比の温度変化。

電流は電子波の透過率と速度と電荷の積をすべての電子について足しあわせたものだ。十分電圧がかかって共鳴する電子がない状態では透過率はほとんどないので電流もほとんど流れない。この理想的な状態では、面にそった方向の運動量は保存しているんだ。ところが散乱があると面に沿った方向の運動は散乱されて別の方

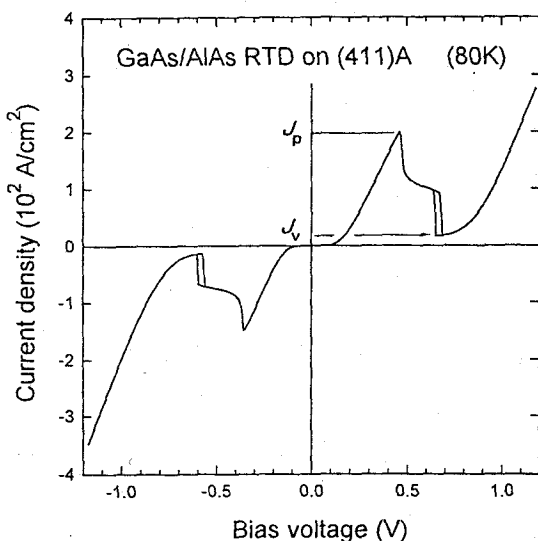
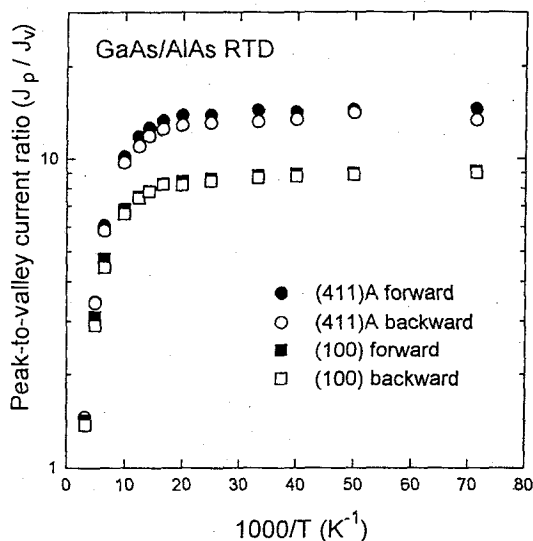


図8 (411)A GaAs基板上に作製した二重障壁共鳴トンネルダイオードの電流-電圧特性。徐々に量子準位と共鳴する電子が増え、電流が増加する。ある電圧を超えると共鳴する電子がなくなって電流が急激に減少する。



向をむく。すなわち、電子のいなかった状態に電子が散乱されて電流が流れ、谷電流が増加するんだ。

生徒：うーん、ちっともイメージがわきませんね。

先生：散乱にもいろいろあって光学フォノンによる散乱、不純物による散乱、電子-電子散乱があるが、界面に凸凹があっても、電子は反射されて運動の面内の成分の方向が変わってしまう。そのかわった方向では、電流が流れてもいいわけだ。(411)A GaAs基板を使って減少した電流は界面の凹凸が減ったためだと考えられる。界面の散乱がどのくらい影響するか定量的な計算をしたいと思っていたんだけど、君たち量子力学は得意かな？

生徒：……………

(おわり)

この研究には、大量の液体窒素が必要で低温センターには、大変お世話になっております。ありがとうございます。また、われわれが液体窒素を100ℓのベッセルに何回も汲むので液体窒素の待ち時間が長くなり多方面にご迷惑をおかけしております。この場を借りまして深くお詫びいたします。

参考文献

1. S.Shimomura, A.Wakejima, A.Adachi, Y.Okamoto, N.Sano, K.Murase, and S.Hiyamizu, "Extremely flat interfaces in GaAs/AlGaAs quantum wells grown on GaAs (411)A substrates by molecular beam epitaxy", Jpn. J. Appl. Phys. **23**, L1728-L1731 (1993).
2. S.Hiyamizu, S.Shimomura, A.Wakajima, and S.Kaneko, A.Adachi, Y. Okamoto, N.Sano, "Extremely high uniformity of interfaces in GaAs/AlGaAs quantum wells grown on (411)A GaAs substrates by MBE", J. Vac. Sci. Technol. B12, 1043-1046, (1994).
3. S.Shimomura, K.Shinohara, K.Kasahara, T.Motokawa, A.Adachi, Y.Okamoto, N.Sano, and S.Hiyamizu, "GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As resonant tunneling diodes with atomically flat interfaces grown on (411)A GaAs substrates by molecular beam epitaxy", Solid-State Electron. **40**, 417-420 (1996).
4. K.Shinohara, K.Kasahara, S.Shimomura, A.Adachi, N.Sano, and S.Hiyamizu, "GaAs/AlAs resonant tunneling diodes with super-flat interfaces grown on (411)A GaAs substrates by MBE", to be published in J. Cryst. Growth.