

TR-o-0021

98

GaAs/AlGaAs および InGaAs/AlGaAs
量子井戸構造におけるサブバンド間遷移

尺田 幸男 土屋 博 片浜 久

1990. 2. 20

ATR光電波通信研究所

概要

現在、光を使った通信としては光ファイバーを使った有線システムが主流になっていて、さらに光の超高速性・並列性といった特性を生かした並列空間情報処理が次世代の情報処理通信技術として注目を集めている。通信デバイス研究室ではその要素技術として半導体光素子の研究を進めて来た。

量子井戸構造の伝導帯においては電子のサブバンド準位が生じる。そのサブバンド間遷移の緩和時間は数～十ピコ秒（ 10^{-12} 乗）であるので、これを利用して高速の光素子が可能であると考えられる。また、サブバンド間遷移の光学非線形性を利用した新しい並列光素子も可能であると考えられる。さらにサブバンド間遷移を用いた素子は、その量子井戸構造を設計すれば動作波長が数～十 μm の領域において自由に決定できるという他の赤外域光素子にない利点がある。

このような量子井戸構造をMBE成長法で作製し、赤外吸収測定法でサブバンド間吸収を測定した。まず、GaAs/AlGaAs量子井戸構造について井戸構造・ドーピング・測定温度の依存性を調べた。つぎに、可視光と赤外光の光-光変調器を狙ってArイオン・レーザー照射時のサブバンド間吸収変化を調べた。さらに動作波長の短波長化を目的としてInGaAs/AlGaAs歪量子井戸構造におけるサブバンド間吸収の構造依存性を調べ歪の影響についても考察を行なった。サブバンド間遷移の非線形性の増大化の一つの方法として非対称形量子井戸にすることがあるが、その遷移エネルギーと遷移行列要素の計算を行なった。

GaAs / AlGaAs および InGaAs / AlGaAs
量子井戸構造におけるサブバンド間遷移

尺田 幸男 土屋 博* 片浜 久
* : 現在 三洋電機に所属

目次

1 . 序	1 頁
2 . サブバンド間遷移の原理	3 頁
3 . 実験システム	6 頁
4 . GaAs / AlGaAs 量子井戸におけるサブバンド間遷移	11 頁
5 . 光照射によるサブバンド間遷移の変化	19 頁
6 . InGaAs / AlGaAs 量子井戸におけるサブバンド間遷移	23 頁
7 . 非対称形量子井戸におけるサブバンド間遷移	34 頁
8 . まとめ	40 頁

第1章 序

現在、光を用いた通信では光ファイバーによる有線通信が最も発達している。それは、主に光ファイバーを同軸ケーブルと比べた時の次の利点があるからである。

- 低損失、広帯域なため遠距離・高速の通信が可能。
- 細径、軽量、曲げやすいため場所を取らない。
- 電磁誘導を受けない。漏話が少ない。
- 材料がガラスなので資源として豊富である。

このため光ファイバーに適した光素子として半導体レーザー・発光ダイオード・フォトダイオード等が精力的に研究され、光の本来持っている高速度・局所性・非干渉性を求められ、並列情報処理システムが待たれている。

一方、半導体光素子作製技術として分子線エピタキシー (molecular beam epitaxy 略してMBE) 法・有機金属気相成長法 (metal-organic chemical vapor phase deposition 略してMOCVD) 法が、半導体材料に対して一原子的な高精度で厚み・組成が制御できる。それらは、量子井戸構造の活性層を電子の波長の周りで構成し、その結果、従来ない高効率的な光素子が得られる。我々はこの量子井戸構造の顕著な特徴を評価し、MBE法で製作した。

サブバンド間遷移とはこの場合、電子がサブバンド間遷移したとき、そのエネルギーが量子化される。また、量子井戸構造が主として量子井戸のサブバンド間遷移による吸収を示す。量子井戸におけるサブバンド間遷移は、通常の値よりも赤外線領域で顕著な吸収を示す。量子井戸構造のサブバンド間遷移は、通常の値よりも赤外線領域で顕著な吸収を示す。量子井戸構造のサブバンド間遷移は、通常の値よりも赤外線領域で顕著な吸収を示す。

- 光吸収の形で検出される。
- 共鳴吸収なので遷移エネルギーの光のみを吸収する。
- 緩和時間がバンド間遷移に比べ小さいため (数~十数 p s e c) 高速動作の素子が期待できる。2)-6)
- 振動子強度・双極子モーメントが大きいので、大きな光非線形性を示す可能性がある。
- GaAs / AlGaAs系の多重量子井戸 (multiple quantum wells 略してMQW) 構造でのサブバンド間遷移による吸収波長は数~数十 μm で特に $10\mu\text{m}$ 近くで観測されている。
- MQW構造の井戸幅・障壁高さ・ドーピング領域・ドーピング濃度等を変えることによって吸収波長・吸収強度を広い範囲で自由に設計できる。

これらの特徴によってサブバンド間遷移を利用した光素子は将来の情報処理システムの中の一つの重要な基盤技術になる可能性がある。

サブバンド間遷移に関する研究状況を概説する。まず、Si基板上に金属-絶縁膜-半導体構造における反転層の二次元電子の作るサブバンド準位間の発光過程7) が報告された。GaAs系の半導体において、サブバンド間遷移はラマン散乱8) , 光電圧測定9) 等の測定法があるが、フーリエ変換式の赤外分光計 (Fourier transform infrared spectrometer 略してFTIR分光計) を使ってMQW構造の試料の赤外吸収を測定1) する方法が最もよく使われる。具体的な光素子としては検知器としての研究が進んでいて、B. F. Levine等は水銀カドミウム・テルライドに取って代わる赤外検知素子を目指し、サブバンド間吸収の高S/N化・高速化・高感度・広帯域化を追及している10)-20)。材料

に関してGaAs / AlGaAs MQW構造が多いが、InP基板に格子整合したInGaAs / InAlAs MQW(6,14,21,22,49), GaAs基板上的InGaAs / AlGaAs 歪MQW(23)などがあり、主に短波長化が目的である。また、Si基板上的GaAs / AlGaAs MQW構造におけるサブバンド吸収(24)もある。サブバンド間吸収の基礎的な特性を調べた例として、温度依存性(25,26)、吸収エネルギーからのバンドオフセットの評価(23,27)がある。サブバンド間遷移と電界・光との相互作用としてシュタルク・シフトの観測(28)、電界をかけた時の大きな2次の非線形感受率の観測(58)、アンドープMQW試料にレーザ光を照射した時のエキシトンが関与したサブバンド間吸収変化(29)、サブバンド遷移エネルギーに相当する赤外光の吸収飽和現象(30)、金属グレーティングを使っての $\sim 9 \text{ meV}$ の発光の観測(31)、等の報告がある。試料構造としてはMQW構造がほとんどであるが、単一量子井戸構造での測定もある(32,33)。サブバンド間遷移に関する計算としては、エネルギー・バンドの非放物線性のサブバンド間吸収への影響(34)、ドーピングで井戸内に蓄積された電子の相互作用がサブバンド間吸収のエネルギーを変えること(35,36,57)、サブバンド間遷移の緩和時間と吸収飽和の計算(37)、量子井戸に電界がかかった時のサブバンド間遷移の状態とその非線形吸収定数の計算(38,39)、電界印加でできた非対称量子井戸での二次高調波の発生(40)、階段状量子井戸における光学双安定性の可能性(41)、サブバンド間遷移と共鳴トネル現象とを利用した赤外線レーザーの提案(42,43,44)がある。

本報告ではまずサブバンド間遷移の原理を第2章で簡単に述べ、第3章ではMBE成長と吸収測定のおける構造のバリエーションについて述べる。第4章ではGaAs / AlGaAs系におけるサブバンド間吸収の特性について述べる。第5章ではそのMQW試料にレーザ光を照射した時のサブバンド間吸収の変化について述べる。第6章では歪の影に響くエネルギーの材料特性について述べる。第7章では非対称形MQW構造におけるサブバンド間遷移の原理を説明し、第8章ではそのMQW試料にレーザ光を照射した時のサブバンド間吸収の変化について述べる。第9章ではそのMQW試料にレーザ光を照射した時のサブバンド間吸収の変化について述べる。第10章ではそのMQW試料にレーザ光を照射した時のサブバンド間吸収の変化について述べる。

第2章 サブバンド間遷移の原理

§ 2.1 双極子遷移

GaAs層とAlGaAs層とでMQW構造を作ると、図2.1の様に井戸内の伝導帯電子エネルギーが量子効果によってサブバンドに分裂する。井戸の中の電子は、井戸に垂直な面((X, Y)面)内では自由電子としてふるまい、井戸に沿う方向(Z方向)では電子は局在する。したがって、量子数nに対応する電子の波動関数 Ψ_n は

$$\Psi_n = A_n \phi_n(Z) \cdot \exp(i(k_x \cdot X + k_y \cdot Y)) \quad (2.1)$$

で与えられる。 k_x, k_y は(X, Y)面内の波数ベクトルのX, Y成分であり、 $\phi_n(Z)$ は包絡線関数である。 E_n を固有エネルギーとすると電子の全エネルギーEは

$$E = E_n + \left(\frac{h^2}{2m^*}\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot (k_x^2 + k_y^2) \quad (2.2)$$

と表わされる。(hはプランク定数, m^* は有効質量)サブバンド間のエネルギー差に対応する光を吸収する時、図2.1の様にZ方向のみエネルギーが量子化されているので光学遷移の遷移行列はZ方向の双極子モーメントの遷移行列になる。量子数mとnとの遷移行列($m \neq n$)要素はエルミート演算子を使えば次の形になる。

$$M(n \rightarrow m) = \langle \phi_m(Z) | Z | \phi_n(Z) \rangle \quad (2.3)$$

井戸の障壁が無限に高いと仮定すると $\phi_n(Z)$ は三角関数の形になり、式(2.3)は簡単になって、

$$M(n \rightarrow m) = L_z \cdot \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{m n}{(m^2 - n^2)^2} \quad (2.4)$$

になる1)。(L_z は井戸幅)量子化状態m, nは互いに極性が反対であれば遷移が可能であるが、この場合では偶数同士あるいは奇数同士の遷移は禁止遷移となる。図2.1にあるように、サブバンドの基底状態($n=1$)に電子が存在している場合に最もよく観察されるのは、基底状態からすぐ上の励起状態($m=2$)への遷移である。

次に、吸収強度を考えると、振動子強度fは

$$f = \frac{4\pi m^* \omega^2}{h} \cdot M \quad (2.5)$$

と定義できる。するとサブバンド間吸収の積分吸収強度IAは

$$IA = \frac{Nm_{qw} \cdot N_w \cdot (e^2 h / 4 \epsilon_0 m^* c)}{n r^2 \cdot (n r^2 + 1)^{1/2}} \cdot f \quad (2.6)$$

で与えられる1,10,14)。(Nm_{qw}は量子井戸の周期数, N_w は井戸1つ当りの電子の面密度, eは電気素量, ϵ_0 は真空の誘電率, cは光の速度, nrはGaAsの屈折率)(2.4)式・(2.5)式から、実際の量子井戸構造におけるサブバンド間吸収エネルギーは井戸幅の二乗にほぼ反比例し、その吸収強度はキャリア密度・量子井戸周期に比例することになる。

§ 2 . 2 偏光依存性

この波の方向で述べた様に、双極子の入射光の方向は、Z軸に沿って進む。吸収は、入射光の偏光方向とZ軸とのなす角θiに依存する。この場合、吸収係数は、 $\tan \theta_i = n r$ (2.7) で表わされる。ここで、nは媒質の屈折率、rは媒質の偏光係数である。この関係式は、 Brewster's angle (θi) を用いて、 $\theta_i = \arctan(n r)$ と表わされる。この角度θiは、入射光の偏光方向とZ軸とのなす角である。この角度θiは、媒質の屈折率nと偏光係数rに依存する。この関係式は、 Brewster's angle (θi) を用いて、 $\theta_i = \arctan(n r)$ と表わされる。この角度θiは、入射光の偏光方向とZ軸とのなす角である。この角度θiは、媒質の屈折率nと偏光係数rに依存する。

$$\tan \theta_i = n r \quad (2.7)$$

この波の方向で述べた様に、双極子の入射光の方向は、Z軸に沿って進む。吸収は、入射光の偏光方向とZ軸とのなす角θiに依存する。この場合、吸収係数は、 $\tan \theta_i = n r$ (2.7) で表わされる。ここで、nは媒質の屈折率、rは媒質の偏光係数である。この関係式は、 Brewster's angle (θi) を用いて、 $\theta_i = \arctan(n r)$ と表わされる。この角度θiは、入射光の偏光方向とZ軸とのなす角である。この角度θiは、媒質の屈折率nと偏光係数rに依存する。この関係式は、 Brewster's angle (θi) を用いて、 $\theta_i = \arctan(n r)$ と表わされる。この角度θiは、入射光の偏光方向とZ軸とのなす角である。この角度θiは、媒質の屈折率nと偏光係数rに依存する。

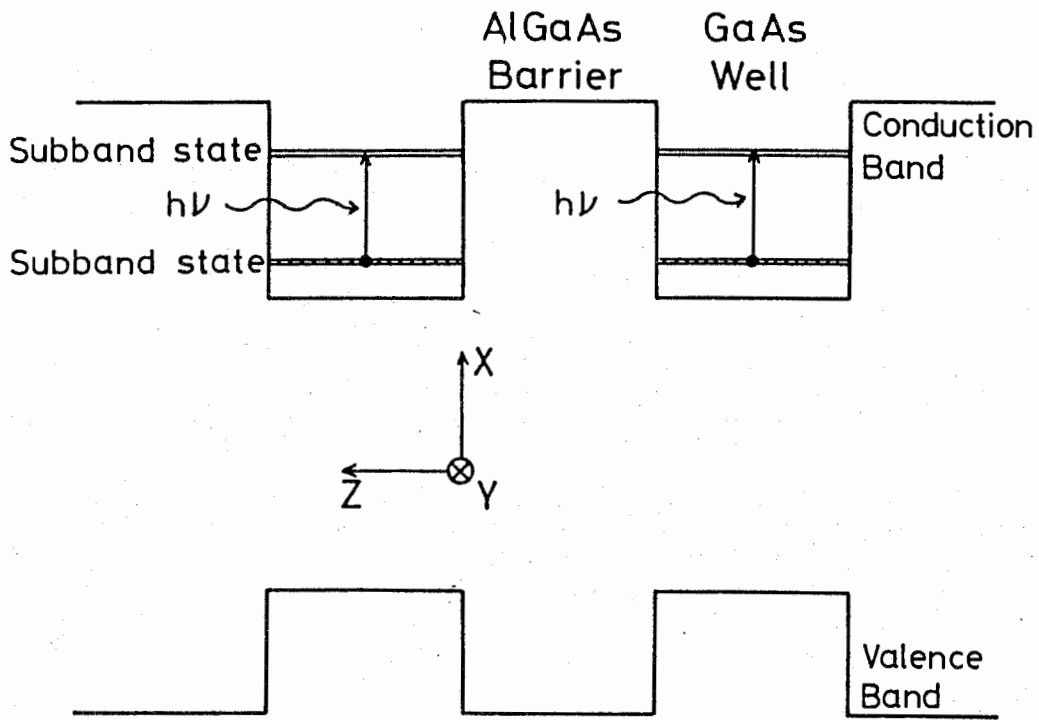


図2.1 MQW構造におけるサブバンド間吸収

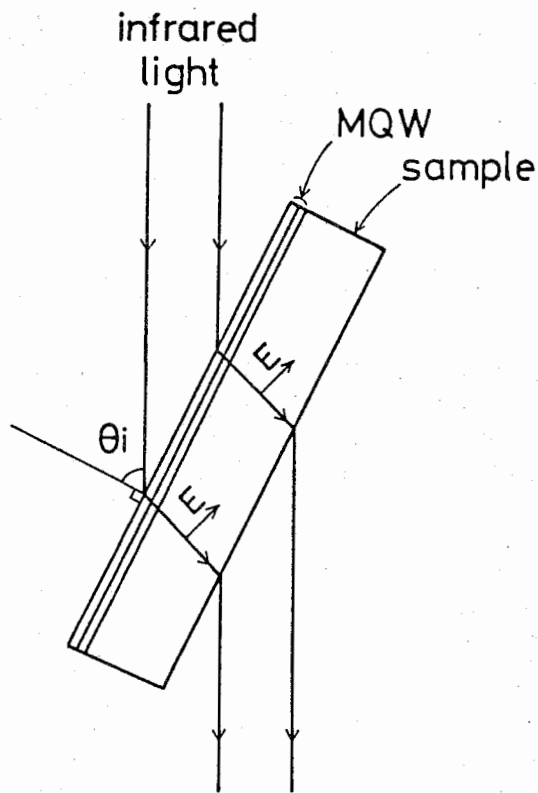


図2.2 ブリュスター角度に試料を設置した吸収測定系

第3章 実験システム

§ 3.1 MBE成長装置

MBE法は超高真空、中(1E-10 Torr)での蒸着成長法であり、大面積にわたって均一な膜が得られる。我々はこのMBE法でGaAs/AlGaAsを成長させた。使用したMBE装置は、超真空の容器内で行われ、原料の供給は、通常のMBE装置と同様に、シャッター制御による。基板は、GaAs(100)とAlGaAs(100)を用いた。基板の厚さは、約0.3mmである。成長温度は、600~800°Cで、成長速度は、0.6~1.0μm/hである。ドーピングは、V族元素(As, P)を用いて行われ、濃度は、10¹⁷~10¹⁹cm⁻³である。成長したGaAs/AlGaAsの組成比は、0.37である。ドープ濃度は、V族元素の濃度と等しい。成長したGaAs/AlGaAsの組成比は、0.37である。ドープ濃度は、V族元素の濃度と等しい。

§ 3.2 赤外分光装置

赤外吸収の測定には、BOMEM社製のDA326を用いる。波長は、30~15μmである。検出器は、HgCdTeを用いる。光源は、グローブランプを用いる。検出器は、冷却した。測定範囲は、10~4000cm⁻¹である。測定精度は、±1%以内である。測定には、積分器を用いる。測定範囲は、10~4000cm⁻¹である。測定精度は、±1%以内である。測定には、積分器を用いる。

ここで、赤外吸収の単位について述べる。よく使用される単位は、波数(c^{m-1})、エネルギー(meV)、波長(μm)の3つである。おたがいの関

係は

$$\begin{aligned} \text{Wavenumber (cm}^{-1}) &= 8.066 \times \text{Energy (meV)} \\ \text{Wavenumber (cm}^{-1}) &= 10000 / \text{Wavelength (\mu m)} \\ &\quad (3.1) \end{aligned}$$

吸収率は、吸収係数を横軸とし、エネルギーを縦軸として表している。図3.4に示すように、吸収係数とエネルギーとの関係を図3.4に示している。図3.4は、吸収係数とエネルギーとの関係を示している。図3.4は、吸収係数とエネルギーとの関係を示している。

サオ長照射の赤外線照射装置は、波長4.8μm、パワー100mW、パルス幅100ns、繰り返し周波数1000Hzのレーザー光源を用いて、試料に照射した。照射したエネルギーは、試料の吸収率によって変化する。照射したエネルギーは、試料の吸収率によって変化する。照射したエネルギーは、試料の吸収率によって変化する。

リットラ8.8μmを分光測定した。分光測定は、波長4.8μm、パワー100mW、パルス幅100ns、繰り返し周波数1000Hzのレーザー光源を用いて、試料に照射した。照射したエネルギーは、試料の吸収率によって変化する。照射したエネルギーは、試料の吸収率によって変化する。照射したエネルギーは、試料の吸収率によって変化する。

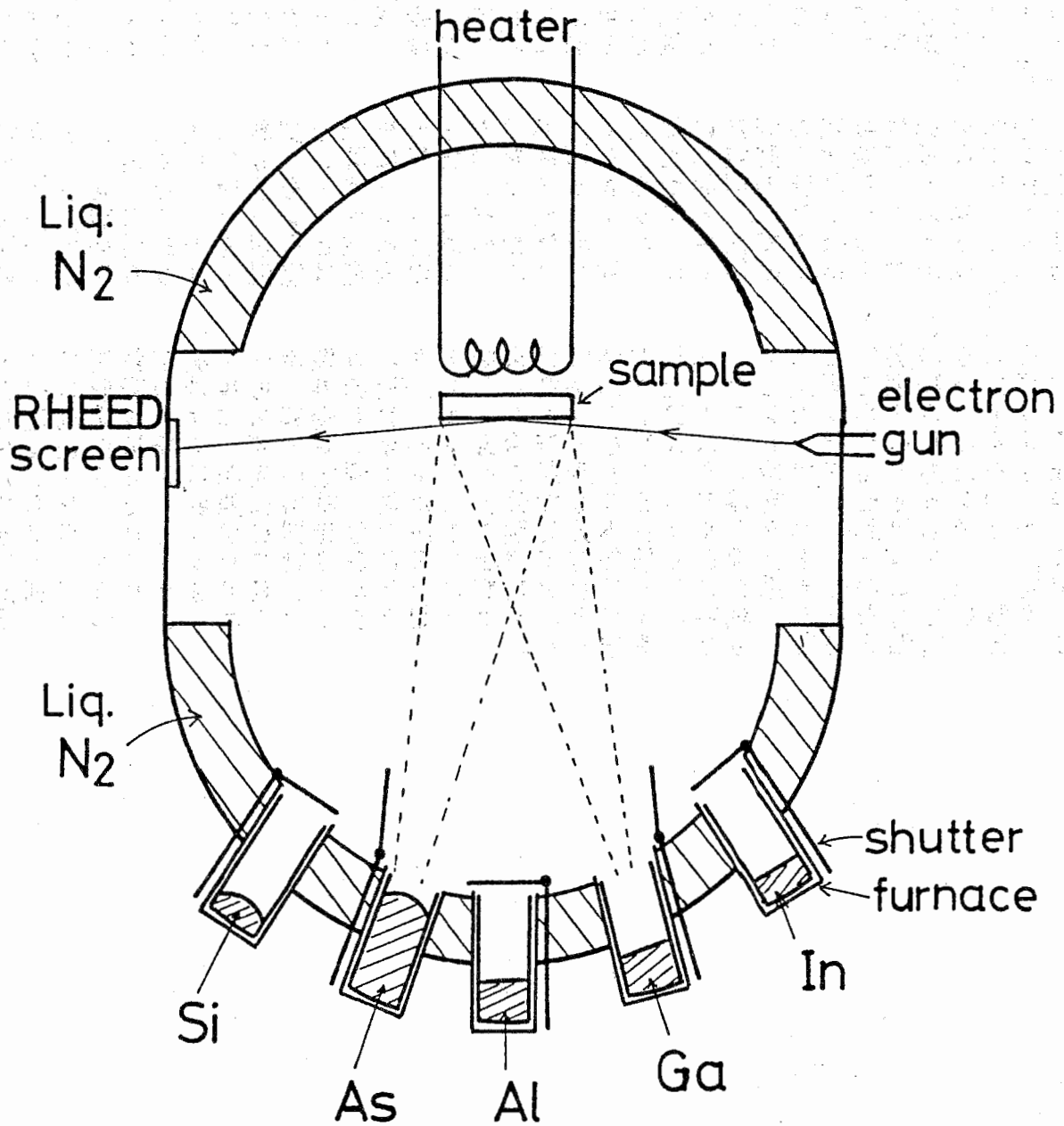


図3.1 MBE装置の概念図

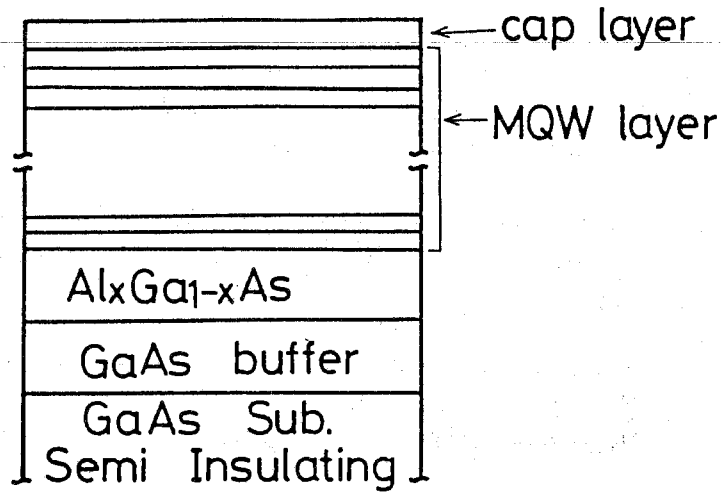


図3.2 MBE成長量子井戸試料の構造

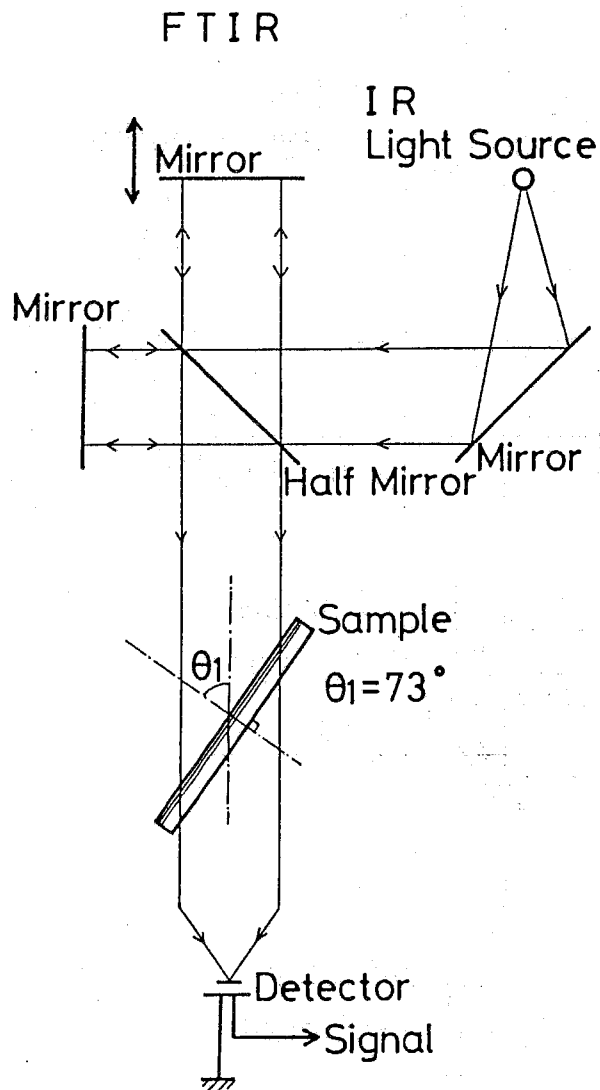


図3.3 FT-IR装置によるサブバンド間吸収測定 of 概略図

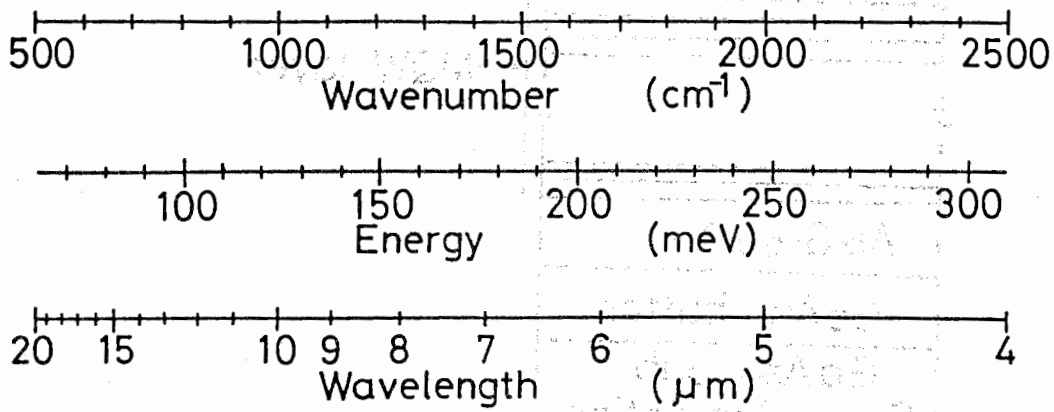


図3.4 光の波数,エネルギー,波長の関係

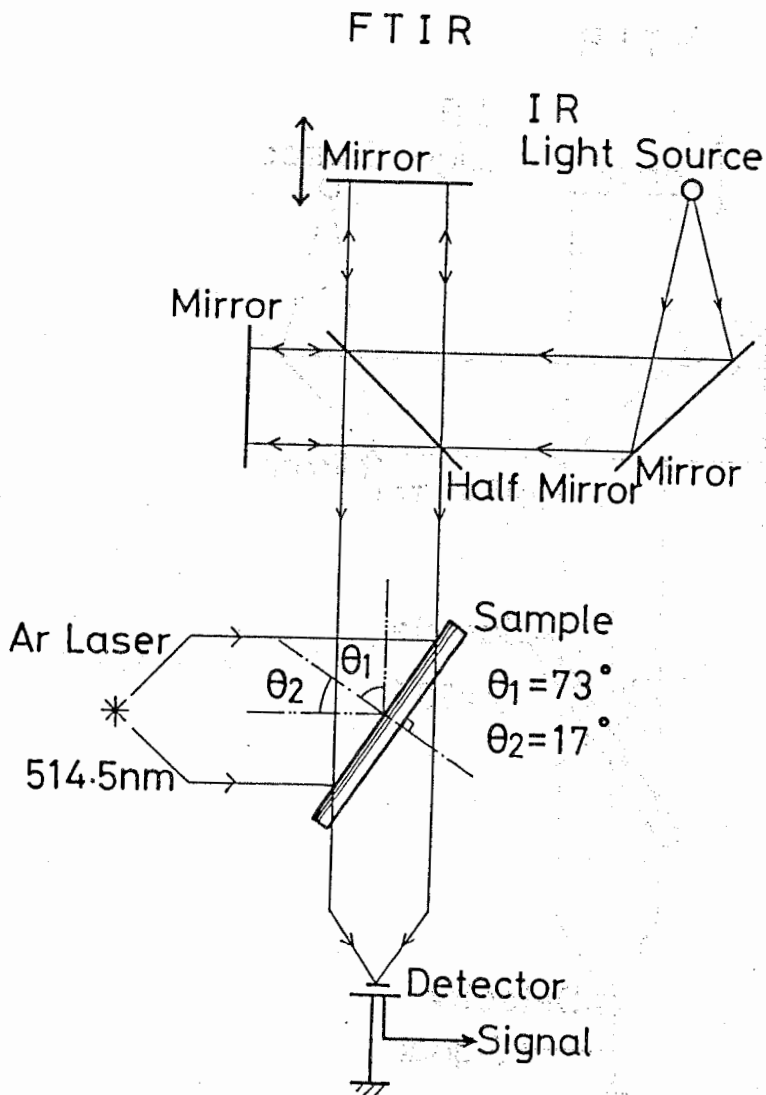


図3.5 外部光照射によるサブバンド間吸収変化の測定系

ギ一バンスドの曲がりとこの明確な関係をまだ捉えていないので、第6章であらためて説明する。図4.4の閉じの考察する。4.4の障壁高さに等しい構造M、Q、Wに、お従電2量は土

§ 4.4 サブバンド間吸収の温度依存性

前節の温度依存性を図4.3に示す。この図は、室温(約300K)で測定された吸収率と、低温(約77K)で測定された吸収率との比較を示している。図4.3は、室温(約300K)で測定された吸収率と、低温(約77K)で測定された吸収率との比較を示している。図4.3は、室温(約300K)で測定された吸収率と、低温(約77K)で測定された吸収率との比較を示している。

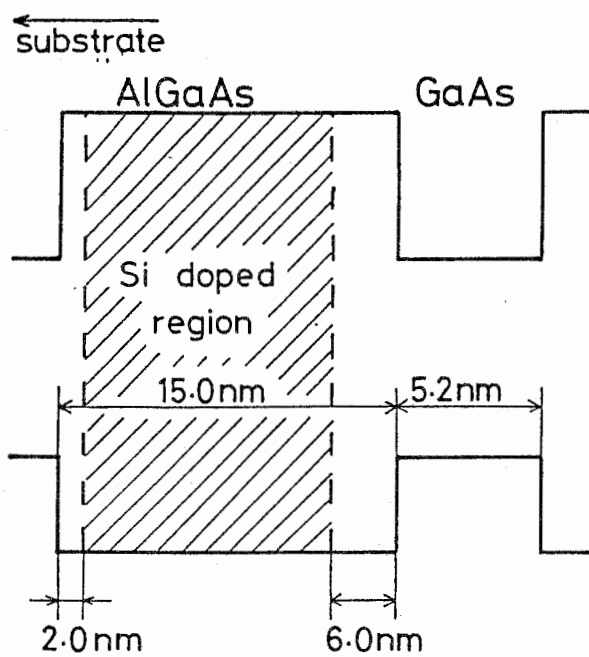
図4.3は、室温(約300K)で測定された吸収率と、低温(約77K)で測定された吸収率との比較を示している。図4.3は、室温(約300K)で測定された吸収率と、低温(約77K)で測定された吸収率との比較を示している。図4.3は、室温(約300K)で測定された吸収率と、低温(約77K)で測定された吸収率との比較を示している。

図4.3は、室温(約300K)で測定された吸収率と、低温(約77K)で測定された吸収率との比較を示している。図4.3は、室温(約300K)で測定された吸収率と、低温(約77K)で測定された吸収率との比較を示している。図4.3は、室温(約300K)で測定された吸収率と、低温(約77K)で測定された吸収率との比較を示している。

§ 4 . 4 ま と め

存こるンてる製素
依もよバしなと光
造ににブ動く計、
構め域サ連さ設ら、
てた領、も小のか
いるのた位も造点
つすグま準化構う
に用ン。2変、い
収利ピる第のはと
吸を一よも移とい
間移ドにて遷こな
ド遷。りい間いれ
ン間。るが動ドささ
バンドあ曲がン小響
バンドの位バが影
サブ要ド準バ化り
のブ必ン1サ変ま
造するバ第るのあ
構てす一はれ)に
Wしにギの現長境
Qとかるいて波環
M子らネさし(る
系素明エ小と一する。
A光ににが差ギ作あ
A。ら主性のル動で
aたさは存間ネに利
Gべを化依位工際有
I調性変度準ク実て
Aを特の温のつ一ばっ
/性を長のつピれと
s存的波長2。すに
A依本ク波、るに用
Ga度基一収であ実応
G温なピ吸ので確の
性・様収間るから作子

barrier doped MQW



well doped MQW

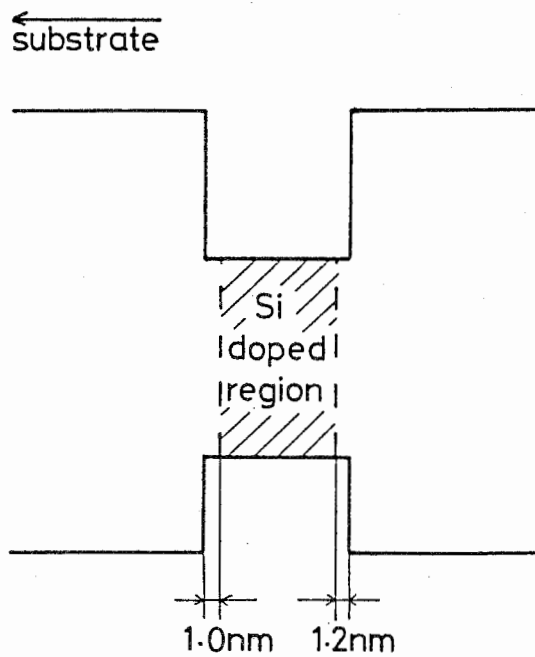


図4.1 GaAs/AlGaAs MQW 1周期の構造

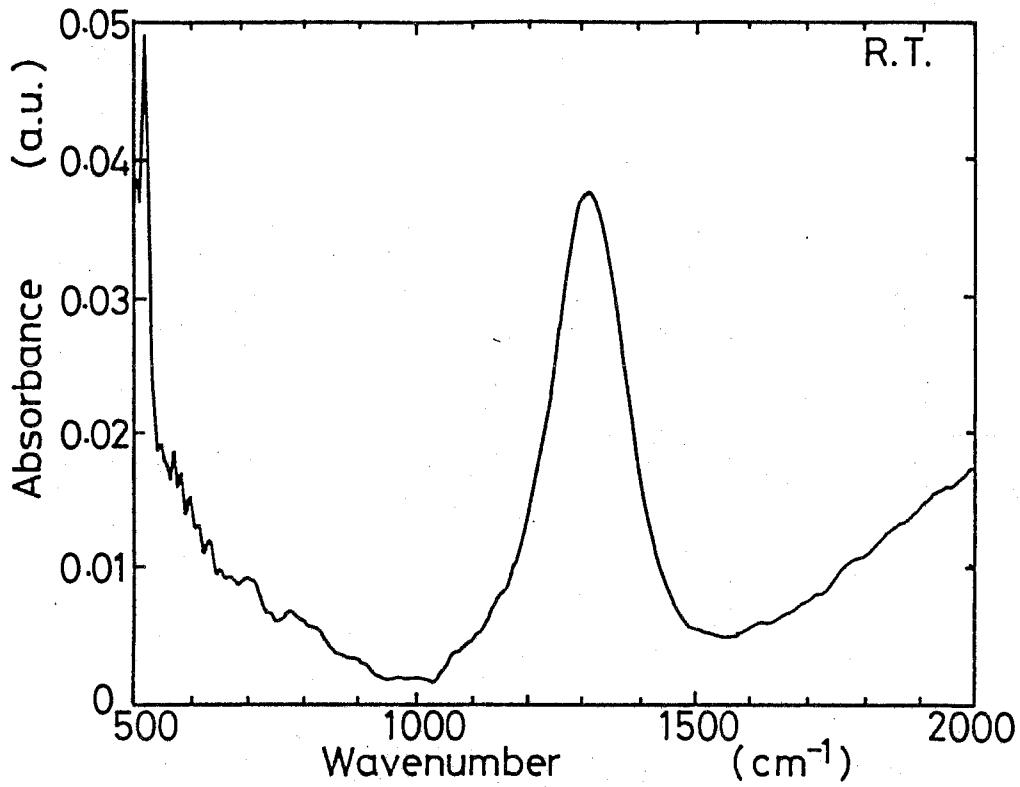


図4.2 井戸層ドーピングMQWのサブバンド間吸収スペクトル

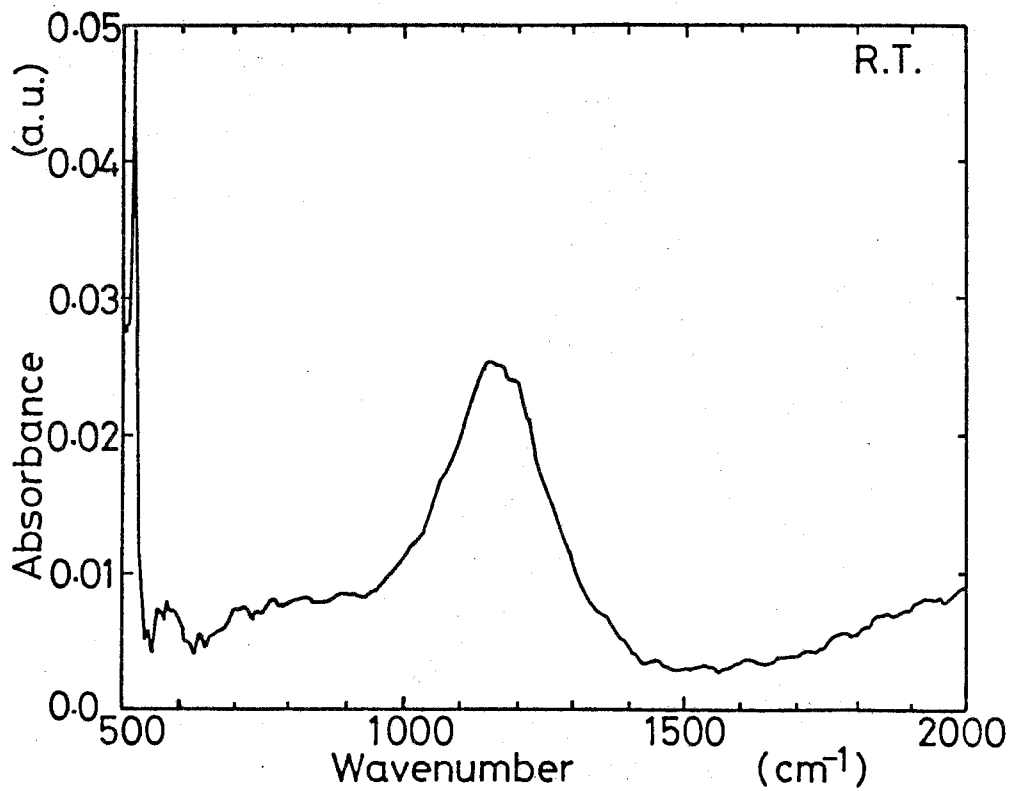


図4.3 障壁層ドーピングMQWのサブバンド間吸収スペクトル

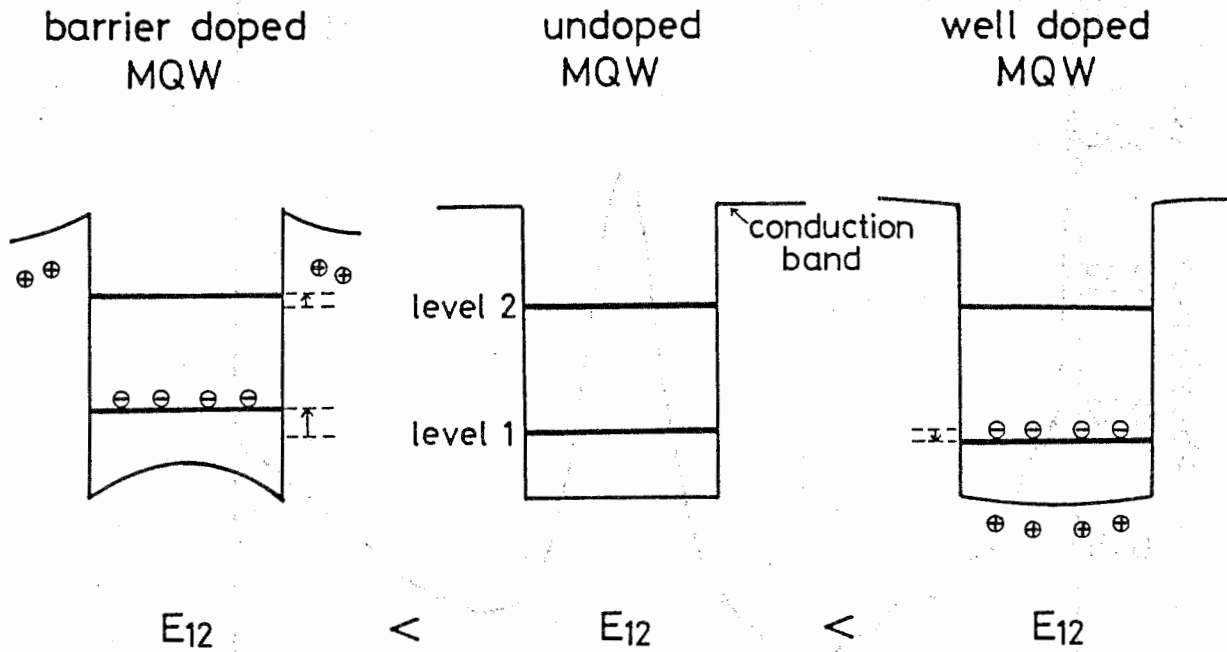


図4.4 エネルギーバンドの曲がりによるサブバンドのエネルギー・シフト

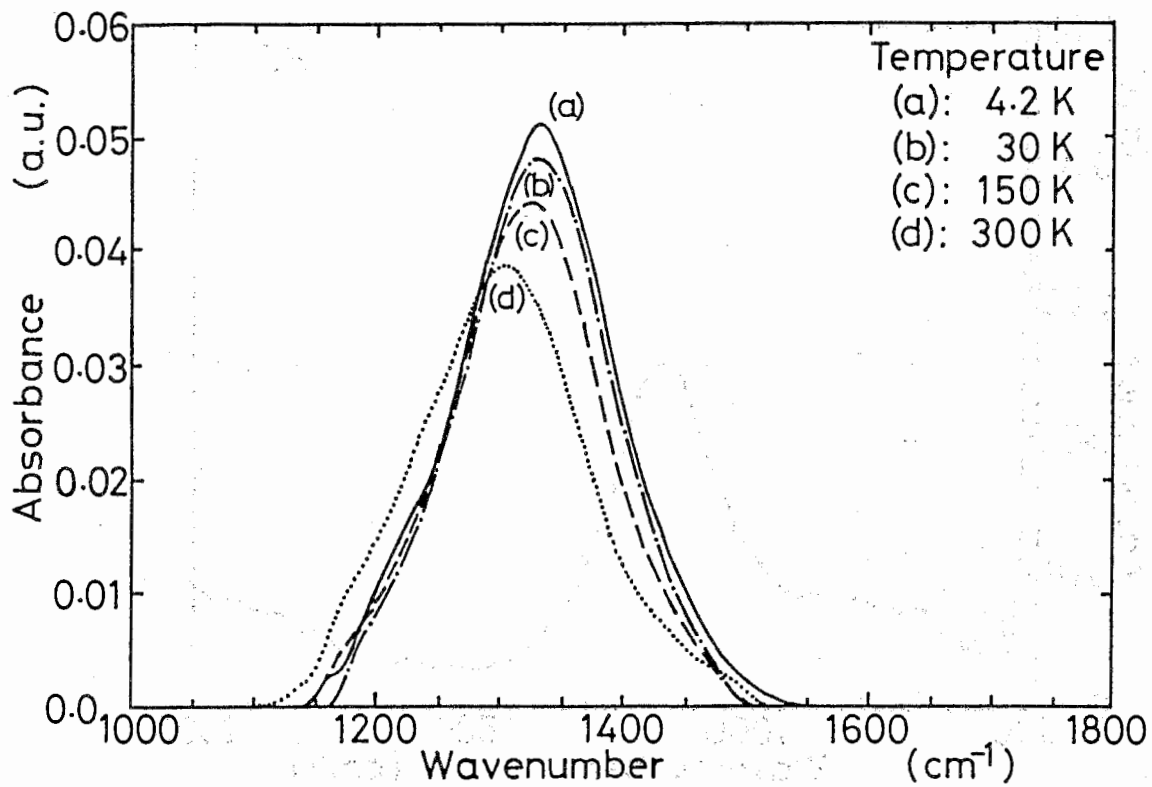


図4.5 井戸層ドーピングMQWのサブバンド間吸収スペクトルの温度依存性

MQW structure	sample No.	N_w (cm ⁻²) 300 K	N_w (cm ⁻²) 77 K
well doped	#W1040 ●	3.2×10^{12}	2.9×10^{12}
	#W1000 ○	6.1×10^{11}	5.2×10^{11}
barrier doped	#B1040 ■	2.1×10^{12}	1.8×10^{12}
	#B1000 □	1.1×10^{12}	1.1×10^{12}

表 4.1 各MQW試料の構造と電子の面密度

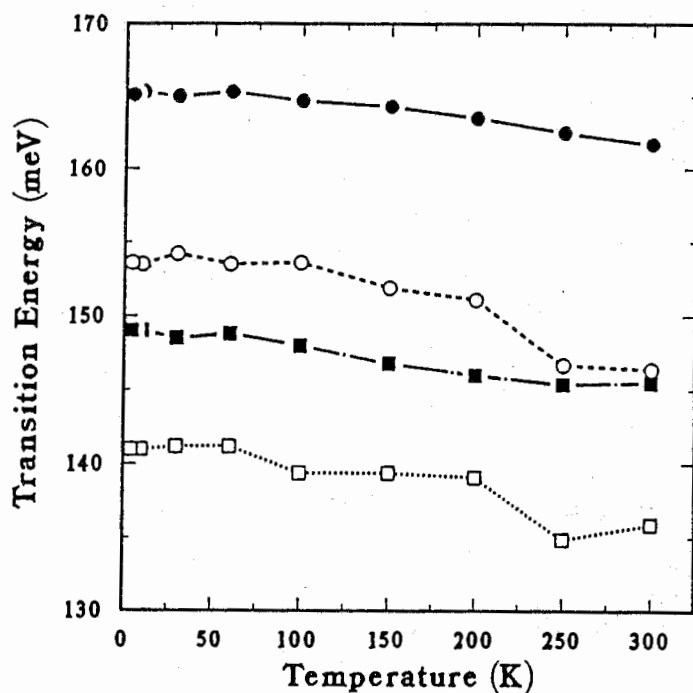


図4.6 サブバンド間遷移エネルギーの温度依存性

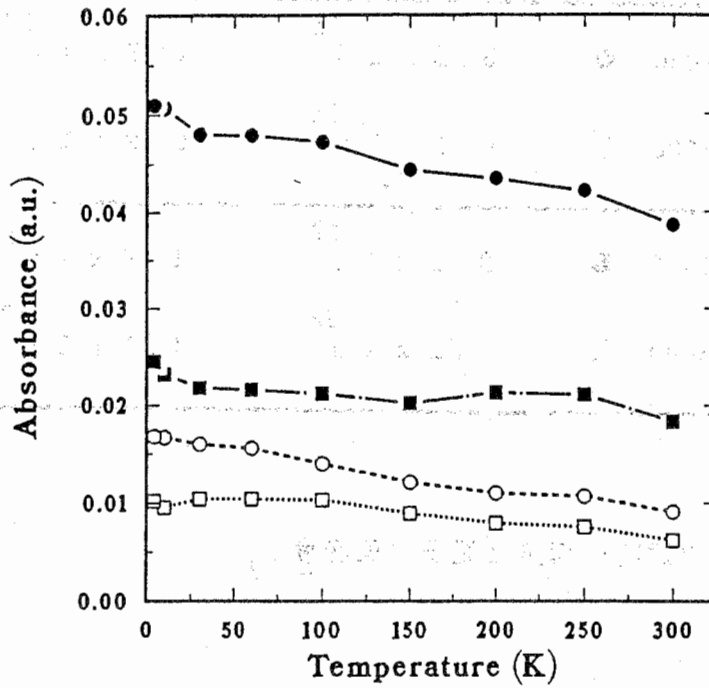


図4.7 サブバンド間吸収ピーク強度の温度依存性

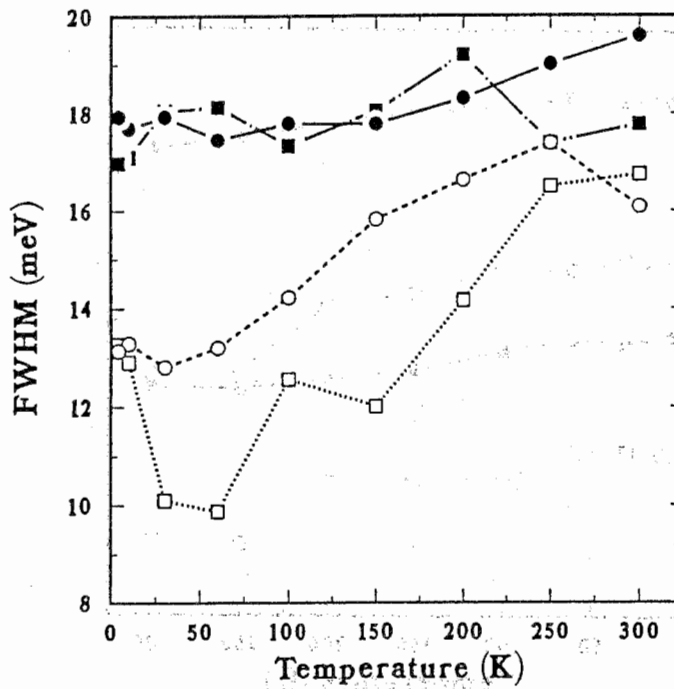


図4.8 吸収スペクトルの半値全幅の温度依存性

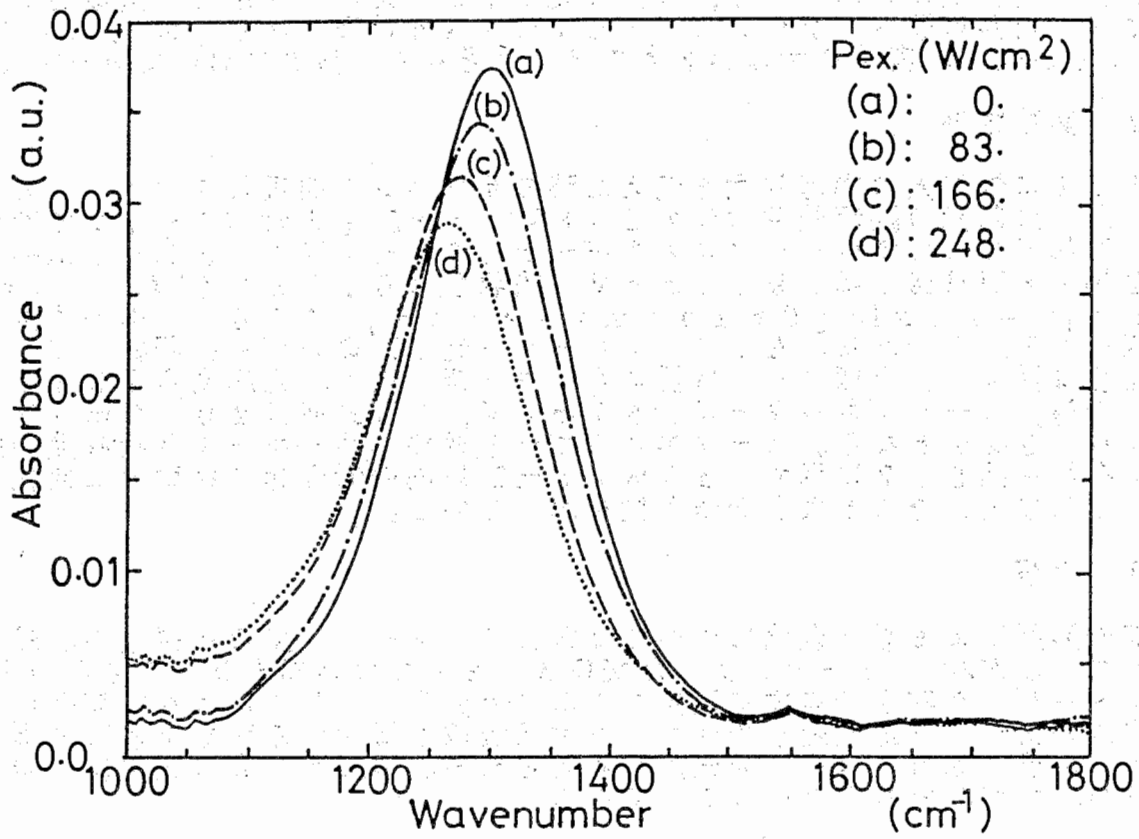


図5.1 外部光励起によるサブバンド間
吸収スペクトル変化

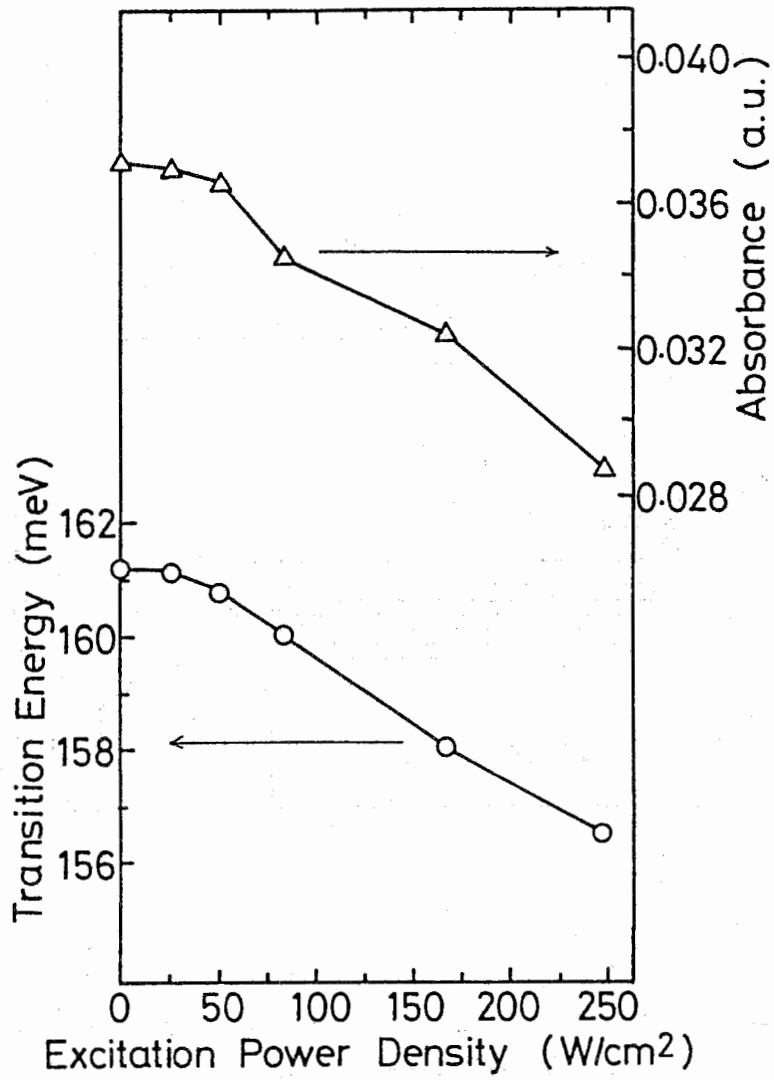


図5.2 サブバンド間遷移エネルギーと吸収ピーク強度の励起光強度依存性

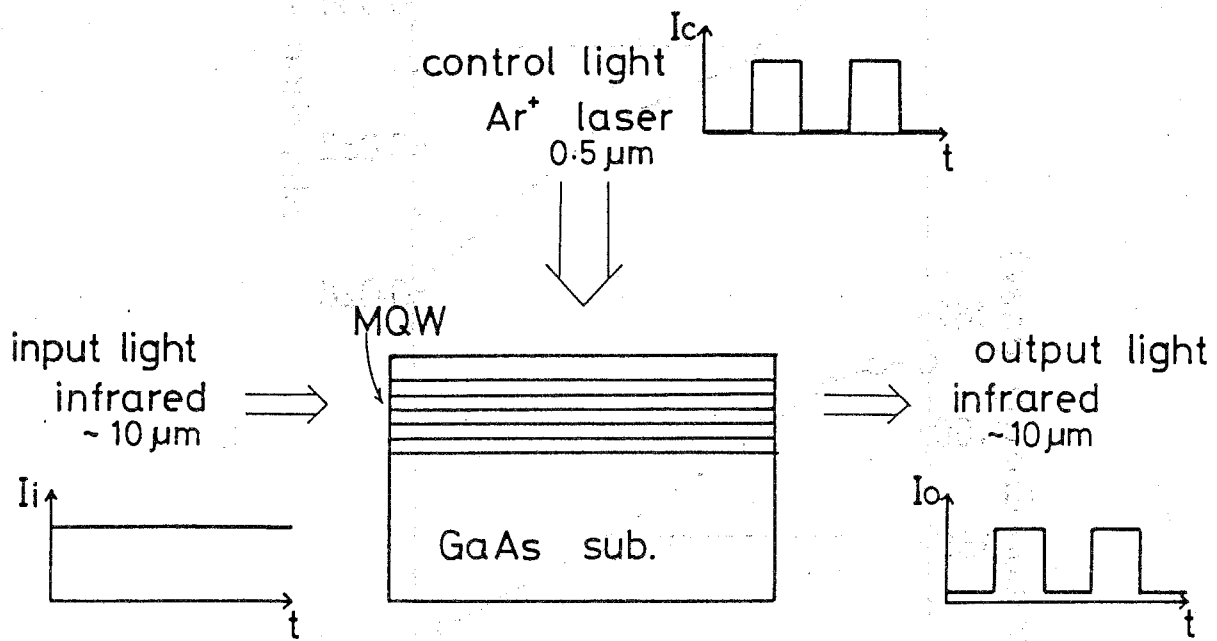


図5.3 サブバンド間吸収を利用した赤外の光-光変調器の原理図

cm^{-2} である。図6.2に吸収スペクトルの井戸幅依存性を示した。この図で(e),(f)のスペクトルのS/Nが悪いのは検知器に焦電検知器を使用しているからである。他の試料はHgCdTeの検知器を使用し、(e),(f)は波長感度範囲の関係で検知器を変えた。この図から次の項目のことがわかる。

- GaAs / AlGaAs MQW構造と同じ様に井戸幅を広げると吸収スペクトルが低エネルギー側へ移る。
- 同じ程度のGaAs / AlGaAs MQW構造のサブバンド間吸収と比べても歪等の影響で劣化している徴候はない。GaAs / AlAs MQW ($L_z = 7.1 \text{ nm}$, $L_b = 3.0 \text{ nm}$, $N_w = 3.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$)で吸収スペクトルの半値全幅は 19 meV (10), この実験の井戸幅 5.5 nm の試料において半値全幅は 17.9 meV になっていて良好な特性である。
- 井戸幅の広い試料になるに連れて、吸収スペクトルの高エネルギーの部分にピークがもう1つ現れる。そして井戸幅の増加と共にそのピークは大きくなる。このピークは電子の第2準位から第3準位への遷移吸収に相当する。ある程度低濃度ドーピング ($N_w < 1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)で、井戸幅が狭い ($L_z < 9.0 \text{ nm}$)と第1準位 (基底レベル) から第2準位 (励起レベル) への遷移しか観測できない。ところが、この場合の面密度は $2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ でフェルミ準位は第1準位の上およそ 80 meV の位置にある。したがって、井戸幅が広くなると第1準位と第2準位との間隔が小さくなりフェルミ準位の近くに第2準位が来る。室温の場合、フェルミ準位の上に第2準位があっても、電子は第2準位にいくら存在するので第2準位から第3準位へのサブバンド間吸収が現れることとなる ($L_z = 12.5 \text{ nm}$ の時 $N_w \sim 2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$)。さらに井戸幅が広がると第2準位内の電子数が増加しサブバンド間吸収も増大する。なお、第2準位から第3準位への遷移の方が、第1準位から第2準位への遷移よりも、一般的な量子井戸構造ではエネルギーが高い。同じ現象はInP基板上のInGaAs / InAlAs量子井戸構造においても観測されている(49)。

井戸幅依存性の実験と計算との対応については考察の節で述べることにする。

§ 6.4 ドーピング濃度依存性

井戸にドーピングした場合のサブバンド間吸収への影響をしらべるために、量子井戸の構造パラメータを (L_z, L_b) = ($8.5 \text{ nm}, 12.0 \text{ nm}$) に固定してドーピング濃度だけを変化させた試料について測定を行なった。図6.3にそのサブバンド間吸収スペクトルを示した。次の事柄がわかる。

- 吸収ピークについては、ドーピング濃度が増えるにつれて高エネルギーへ移動する。
- 吸収強度 (積分強度) は第2章の(2.6)式で表したように、ほぼドーピング濃度に比例して増加している。
- 半値全幅もドーピング濃度につれて増加傾向を示している。 $N_w : 1.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ の時で半値全幅は 10.5 meV , $N_w : 2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の時で 14.6 meV である。

吸収ピーク・エネルギーのドーピング濃度 (キャリア面密度) 依存性を図6.4に示す。白丸は実験値、実線はその実験値から最小二乗法で求めた2次曲線である。点線はその外挿を表わしている。そのアンドープ試料の外挿値 120.5 meV に比べ、 $N_w = 2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の面密度の試料では 134.6 meV に吸収ピークが移動している。

§ 6.5 考察

本節では、InGaAs / AlGaAs 歪MQW構造における、サブバンド間吸収に影響を与える次の要因について考察する。

- (1) 歪の影響：歪によって伝導帯、価電子帯のエネルギー・バンドが変化するのでバンド・オフセットの値が変わることになる。
- (2) エネルギー・バンドの非放物線性：エネルギーは波数にたいして2次曲線 (放物線) の関数でほぼ表すことができるが、エネルギーが高くなると近似か

らのずれが大きくなる。

(3) ドーピングの影響：井戸層にドーピングした構造においても電子が増えて来ると電子間の相互作用が無視できなくなる。

以上の要因について、サブバンド間吸収エネルギーの計算と関連して議論する。

§ 6.5.1 歪の影響

GaAs 量子井戸構造について調べられている50, 51, 52)。InGaAs の基板に平行な圧縮歪をかけることによって、InGaAs の伝導帯と重なり、軽い正孔のバンド・オフセットの比を65:35とすると図6.5のようになる。バンド・オフセットの値は伝導帯(ΔEc)で402 meV, 重い正孔(ΔEhhv)で216 meV, 軽い正孔(ΔElhv)で145 meVとなる。この様に、歪の存在によって伝導帯のバンド・オフセットつまり量子井戸の障壁高さは減少する。しかし、井戸がGaAsの場合(オフセット比=65:35)よりも119 meV高く、井戸をInGaAs層にする利点はない。

§ 6.5.2 エネルギー・バンドの非放物線性

量子井戸内の伝導帯エネルギー・バンドの非放物線性については主にGaAs/AlGaAs系において研究されている。53, 54, 55)半導体の伝導帯エネルギーは波数kに対して放物線関係が成り立つが、エネルギーが高くなると放物線からずれていく。これは、エネルギーが第1準位から第2準位へ移動するときに、第1準位と第2準位間のエネルギー差が小さくなるためである。特に第2準位が適用した非放物線性モデルは2バンド間のエネルギー準位にたいして次の式で表せる。

$$m^*w(E) = m^*w(1 + E/Ew) \quad (6.1)$$

$$m^*b(E) = m^*b(1 - (V-E)/Eb) \quad (6.2)$$

右辺のm*w, m*bは定数で井戸層, 障壁層の有効質量, Ew, Ebは井戸層, 障壁層のバンド・ギャップであるがここでは非放物線定数γと次の関係式で表せる物質定数である。

$$\gamma_i = \frac{h^2}{8\pi^2 \cdot m^*i \cdot Ei} \quad (i=w,b) \quad (6.3)$$

また, Ew, Ebとm*w, m*bとの関係は

$$m^*w/m^*b = Ew/Eb \quad (6.4)$$

と表せる。ここで, GaAsのγwの値として4.9 x 10⁻¹⁹ m² (56)を使うと, 上の(6.3)式からGaAsのEwが得られて, (6.4)式から障壁層のEbが計算できる。InGaAs/AlGaAs系の量子井戸構造においても

準1電子の法。くド
 第1電・移手るいよ
 第2遷のあしはバ
 の1h間様で等致う
 子h1ド同9にーい
 電1ーと・零のと
 (ー2計算6てと%
 11eの計図し)5
 h e・料ーがい□6
 hら2試ギ果た○し
 ーかhWル結に○し
 1ルhQエネた料(表
 eトーMエめ試値を
 らク2プ移求ブ験性
 かペeー遷でー実効
 ルス・ド間%ドと有
 トE)ンド5ン)の
 クL移ア6ア線法
 ペP遷。バ比、点手
 ス、のるブトは、算
 P)間きサッて線計い
 遷、準定節フつ(ギし
 ての1同前オに値ル示
 い間第が、響算ネを
 つ位のーもド影計工性
 に準孔ギてンの、移当
 移1正ルいバグも遷妥
 遷第1正ルいバグも遷妥
 のの軽エにーピいド比
 間孔との性ギーおドト
 の正位3存ルドにバト
 とい準h依ネ、合ブセ
 帯重1h幅エし場サフ
 電子と第1戸幅エし場サフ
 電位の3井でたこて、オ

§ 6.7 まとめ

吸にのず響ドた
 間する等ら影ンした
 ド減少か主ブ考
 バンが増加にサをた。
 サ幅がにッ料影らあ
 ける戸響ギ試の得で
 お、井ギ影ギWグが妥
 にお、ネ歪ドMP5も
 構造を移たバしド比
 構造を移たバしド比
 W性を遷つはグ・トお
 MQW依れ行、ピ線セ定
 M濃に察いド放オの
 Aグる考て。非・移
 Aンすもれたのド遷
 Gピ加てらっド間
 Aドが増い得かバンド
 /A度につがわバンド
 A性濃原因特と響示の
 A存グ原取こ影を料
 G幅ピその間良歪一プ
 In戸ードて、いー
 I井ドしんしてよド
 は、ただバないが
 で、まいブみつ験ア
 章い、見サ、に実は
 本つてをなと収と値
 収つ特良好す間計こ

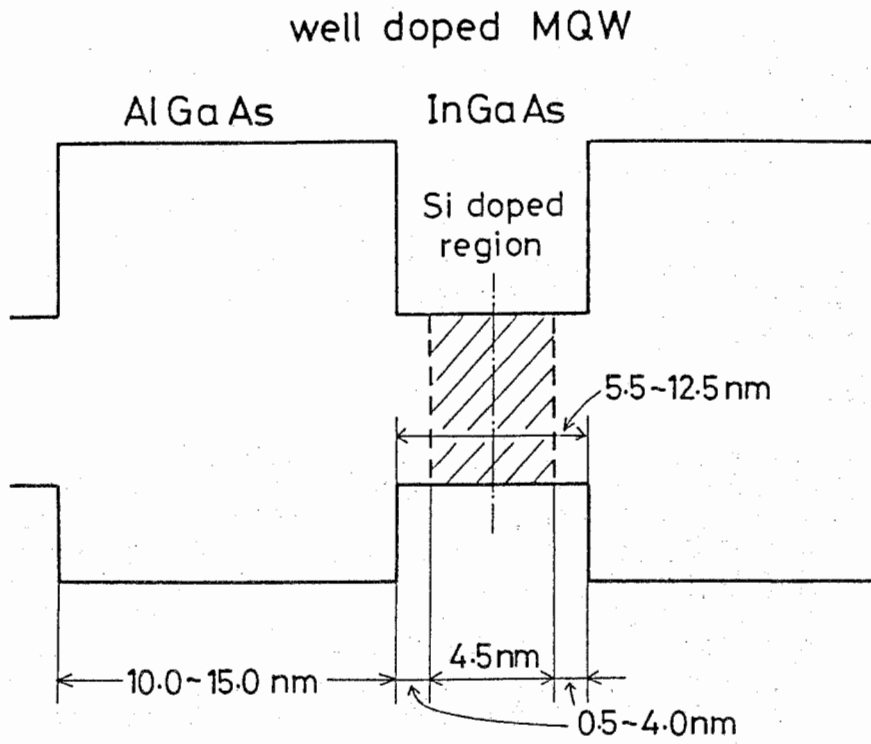


図6.1 InGaAs/AlGaAs MQW 1 周期の構造

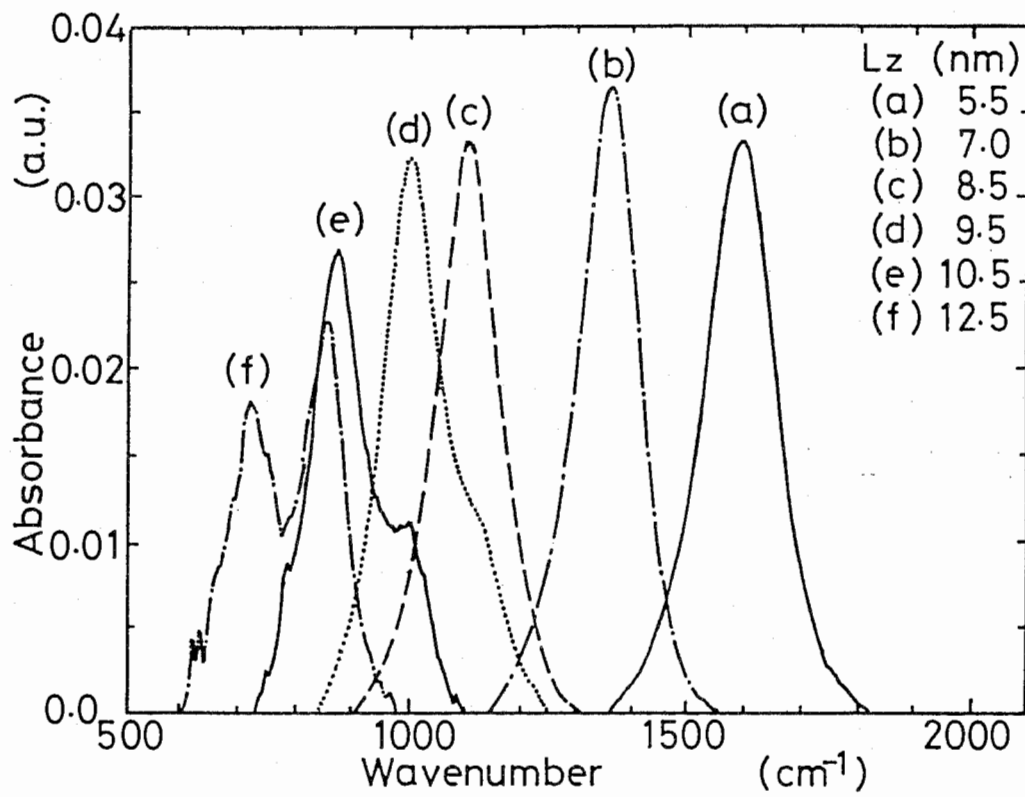


図6.2 サブバンド間吸収スペクトルの井戸幅依存性

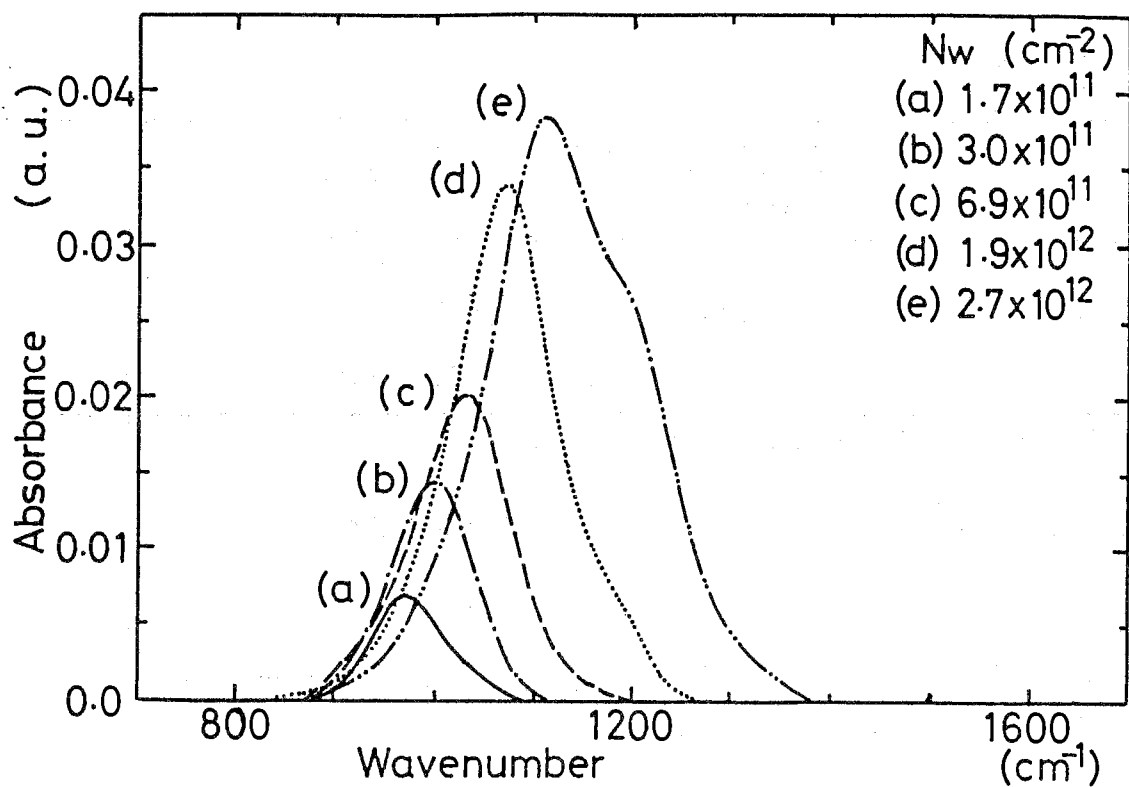


図6.3 サブバンド間吸収スペクトルのドーピング濃度依存性

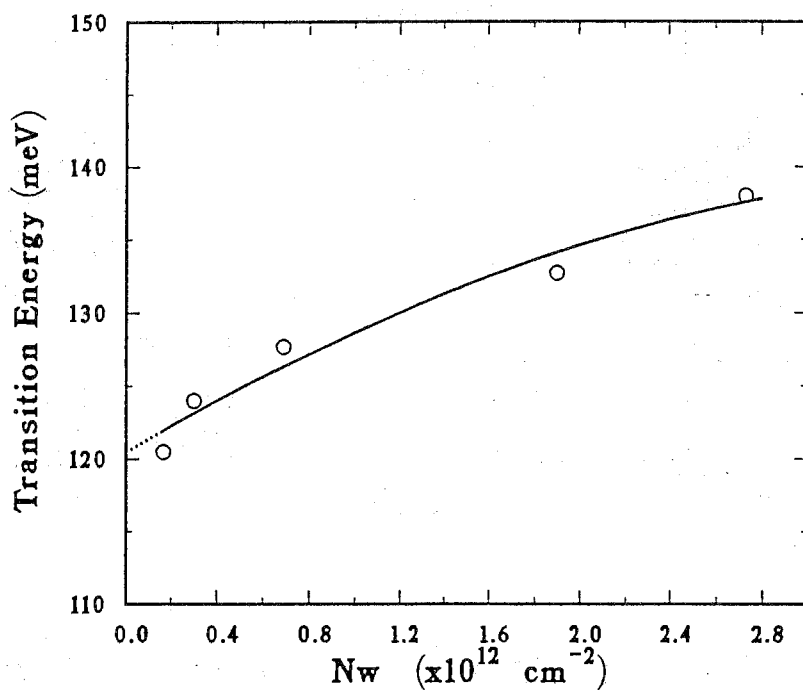


図6.4 サブバンド間吸収ピークエネルギーのドーピング濃度依存性

unstrained InGaAs	strained InGaAs		
E_g	hydrostatic term (conduction-band+ valence-band)	shear term (valence-band)	E_g
1.202 eV	78.3 meV	heavy hole -40.7 meV	1.240 eV
		light hole +30.2 meV	1.311 eV

InGaAs, $x(\text{In})=0.15$, $T=300\text{K}$

表6.1 InGaAsの歪によるバンドギャップ変化

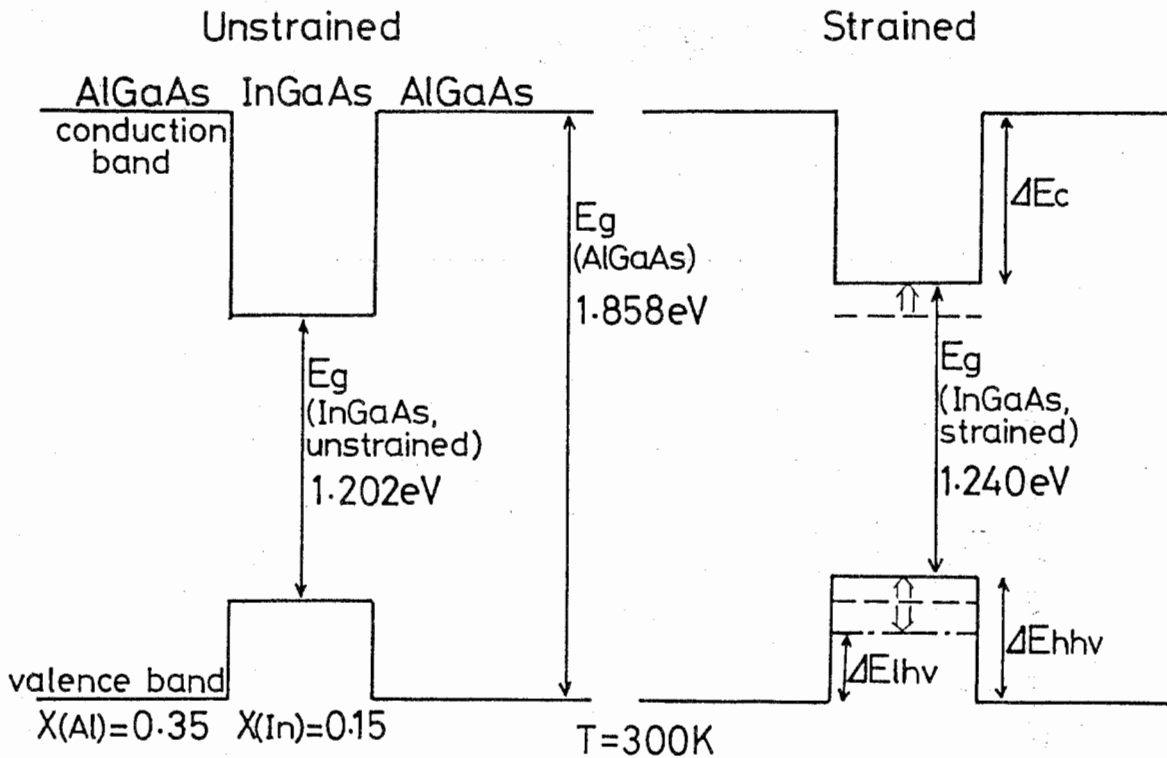


図6.5 歪による InGaAs のバンドギャップ変化

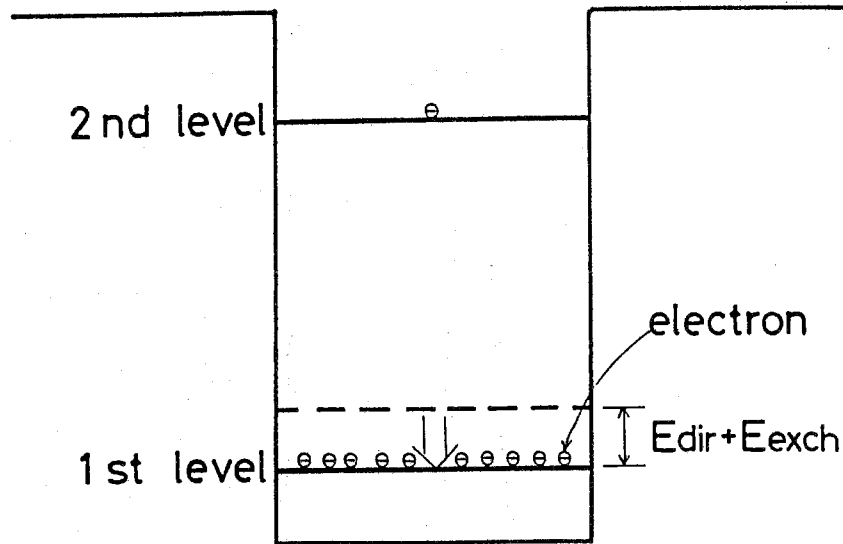


図6.6 電子の相互作用によるサブバンド準位の変化

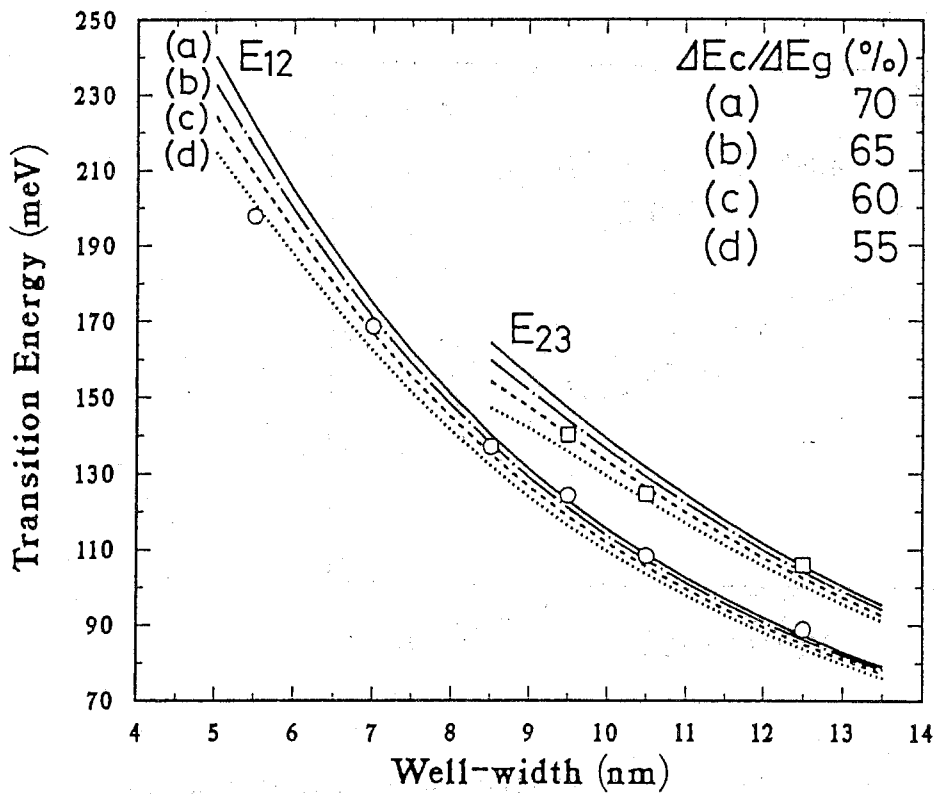


図6.7 サブバンド間遷移エネルギーの井戸幅依存性

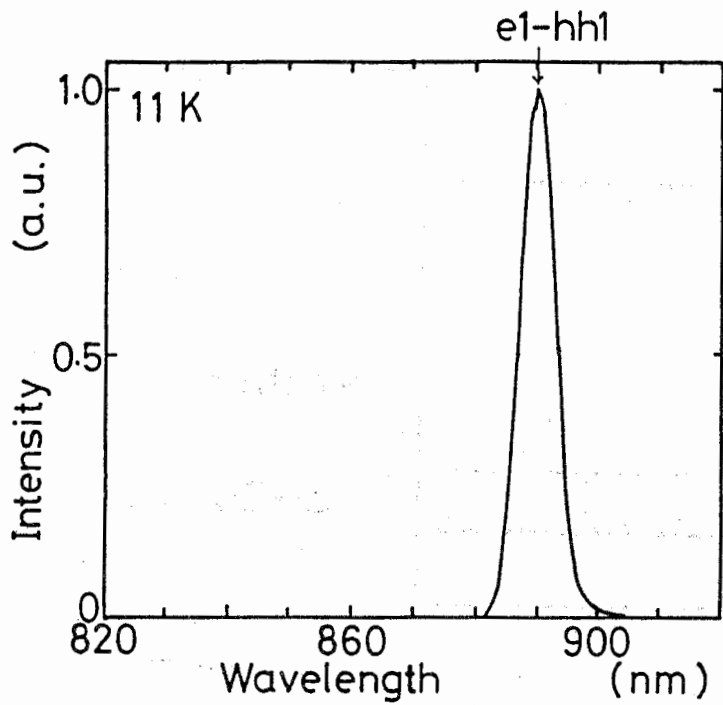


図6.8 (a) アンドープMQW試料($L_z = 8.5\text{nm}$)のPLスペクトル

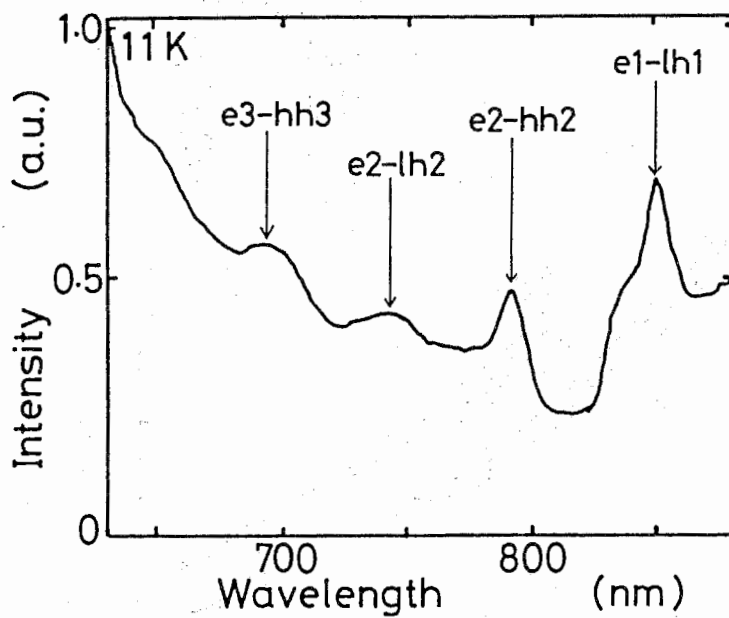


図6.8 (b) アンドープMQW試料($L_z = 8.5\text{nm}$)のPLEスペクトル

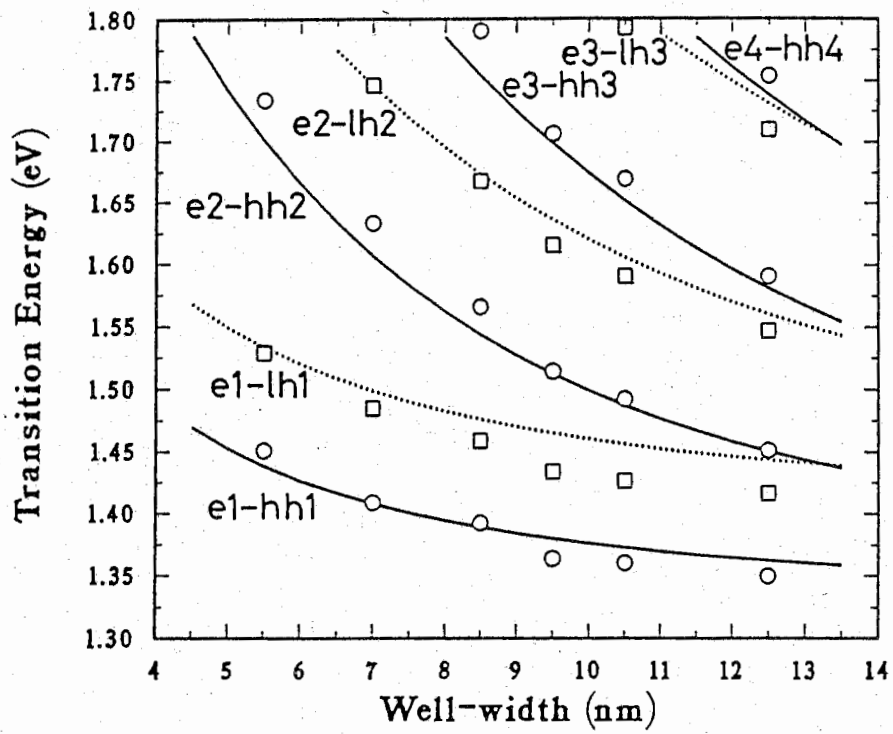


図6.9 アンドープMQW試料のバンド間遷移の井戸幅依存性

○ In G a A s 井戸幅 L1 の割合が全体の幅 (L1 + L2) に対して約 0 . 6 以上
 ○ 1 → 3 の遷移の行大 G a s の場 L1 / (L1 + L2) が増大する。
 ○ 1 → 3 の遷移の行大 G a s の場 L1 / (L1 + L2) が増大する。
 ○ 1 → 3 の遷移の行大 G a s の場 L1 / (L1 + L2) が増大する。

In 組成が 0 . 1 5 の時, 井戸幅 L1 が 7 . 2 n m , 1 . 9 n m の場合の
 線関数 $\phi_n(Z)$ は 0 . 7 3 の絶対値の差遷り (a) がやたらと重
 なる。このため、積もる。このため、積もる。このため、積もる。
 計算が困難な場合がある。このため、積もる。このため、積もる。このため、積もる。

§ 7 . 2 今後の課題とまとめ

前節で述べたように、1 → 3 の遷移の行大 G a s の場 L1 / (L1 + L2) が増大する。
 計算が困難な場合がある。このため、積もる。このため、積もる。このため、積もる。
 計算が困難な場合がある。このため、積もる。このため、積もる。このため、積もる。
 計算が困難な場合がある。このため、積もる。このため、積もる。このため、積もる。

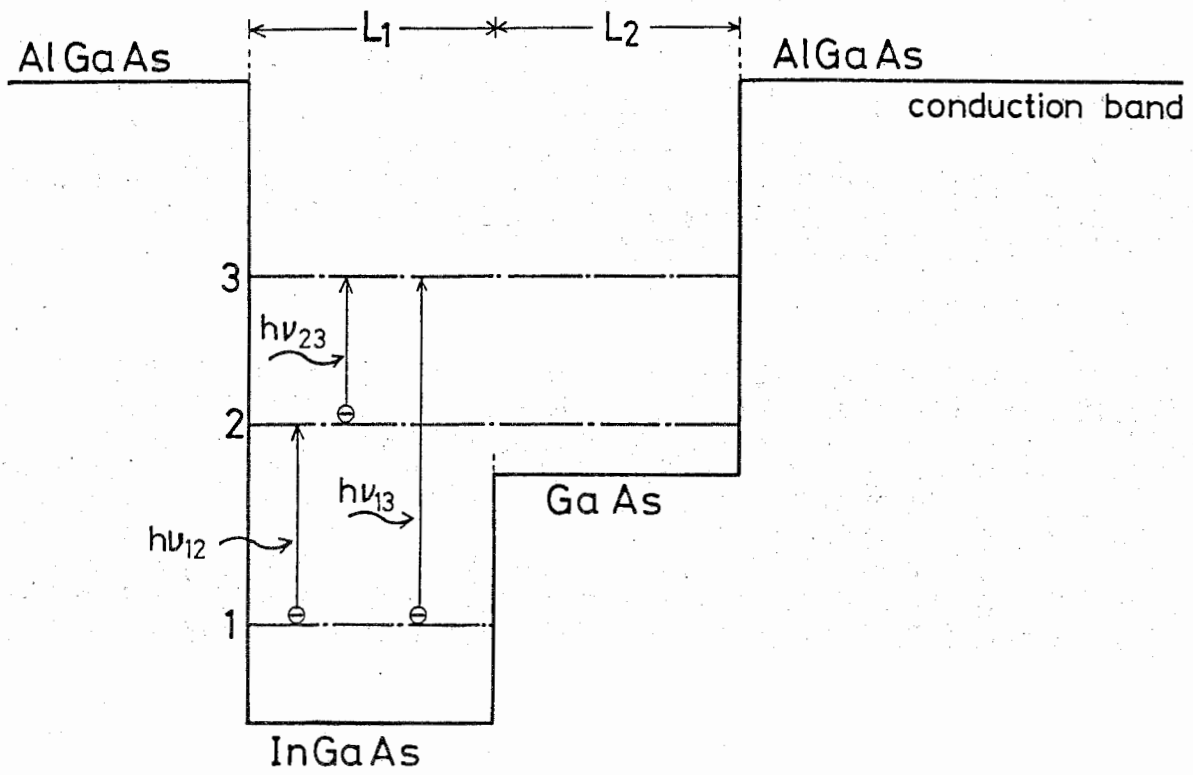


図7.1 非対称量子井戸のサブバンド準位

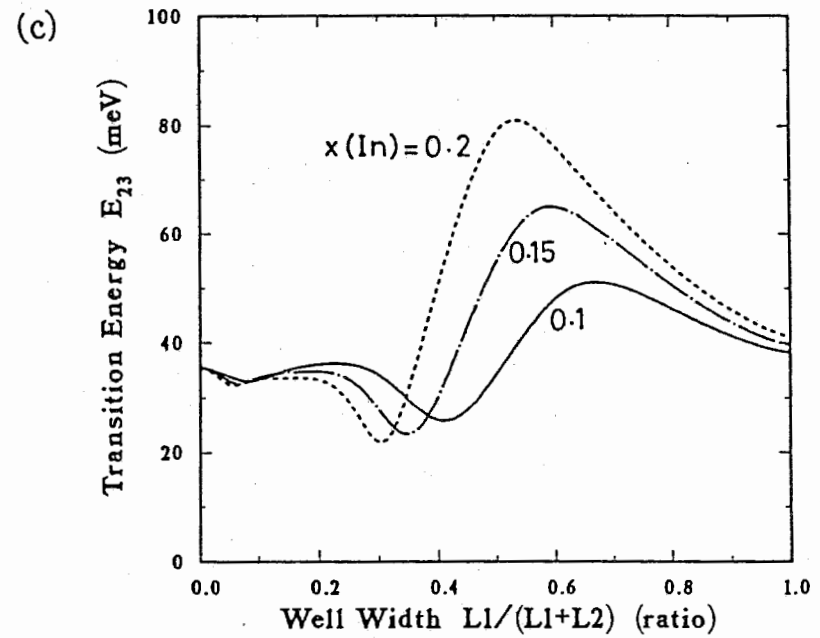
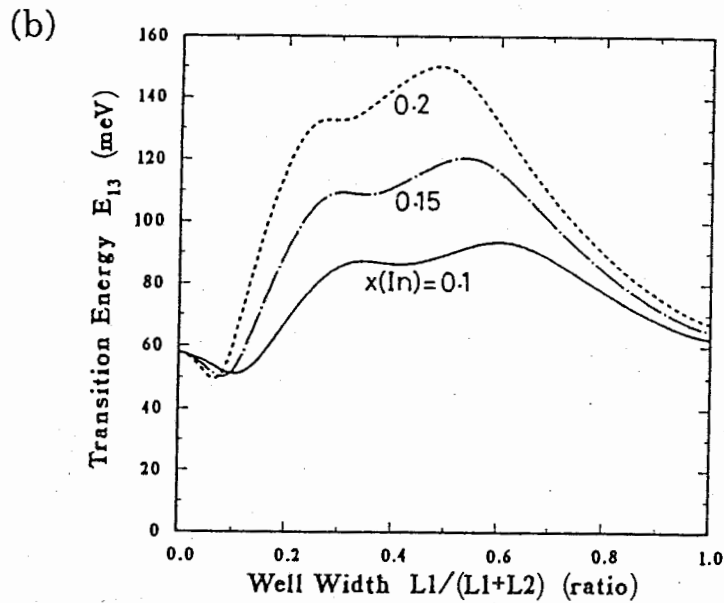
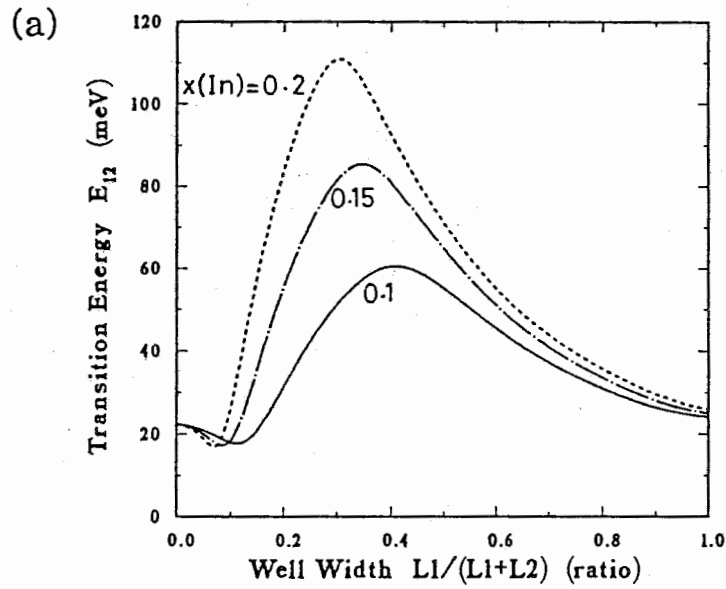


図7.2 非対称形MQWでのサブバンド間遷移エネルギーの構造依存性

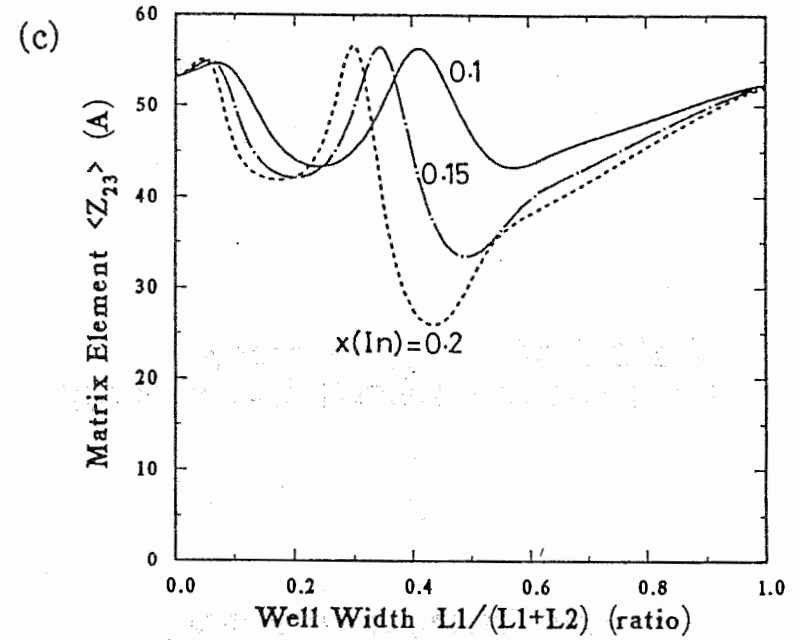
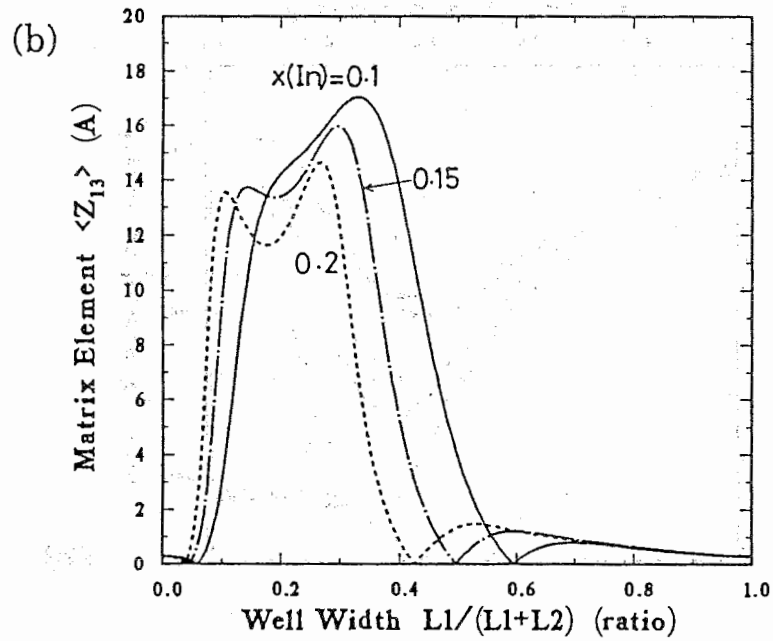
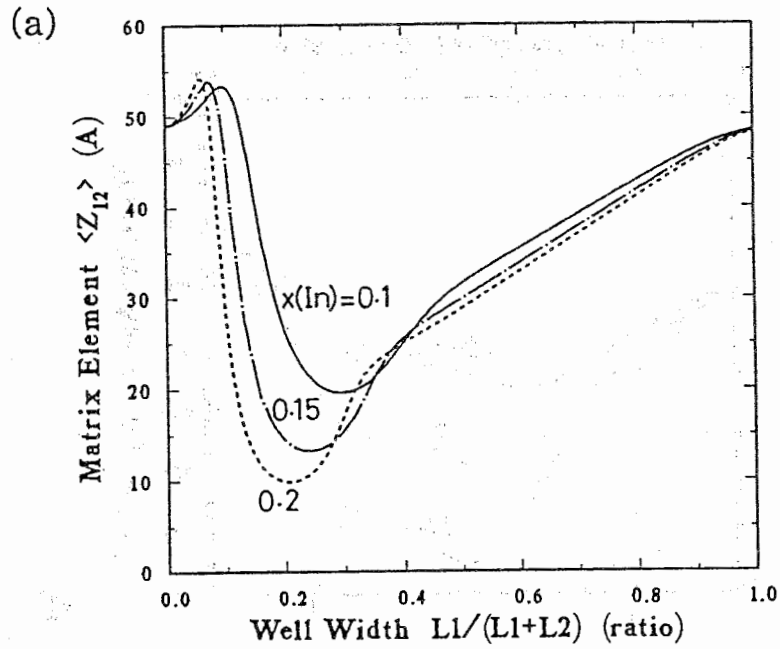


図7.3 非対称形MQWでのサブバンド間遷移行列要素の構造依存性

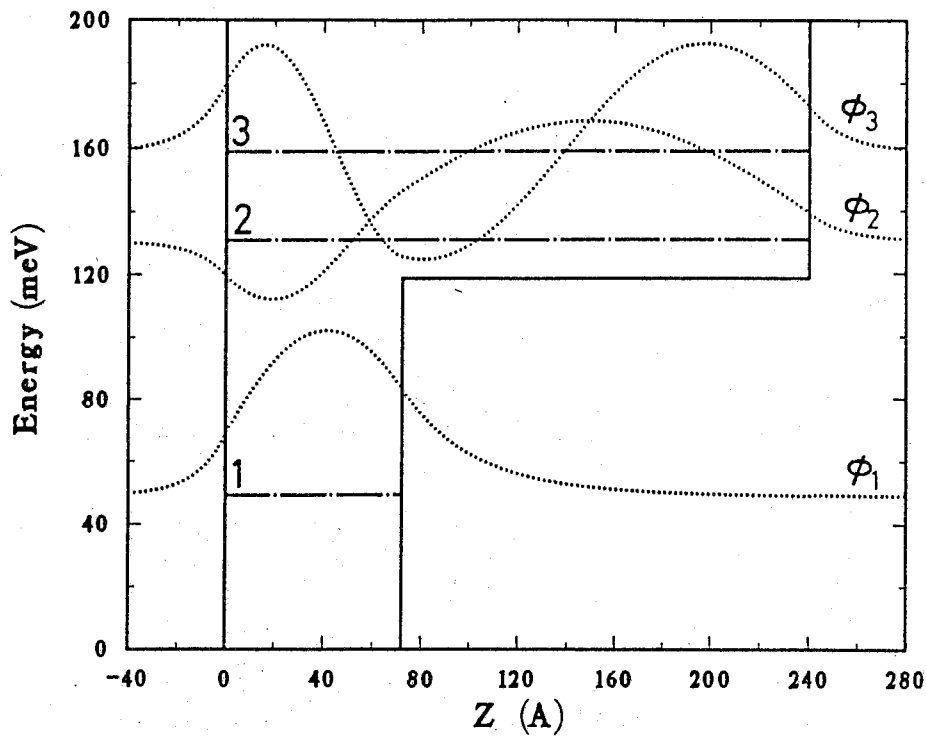


図7.4 (a) 1→3の行列要素が大きい量子井戸構造における電子の存在確率の包絡線関数

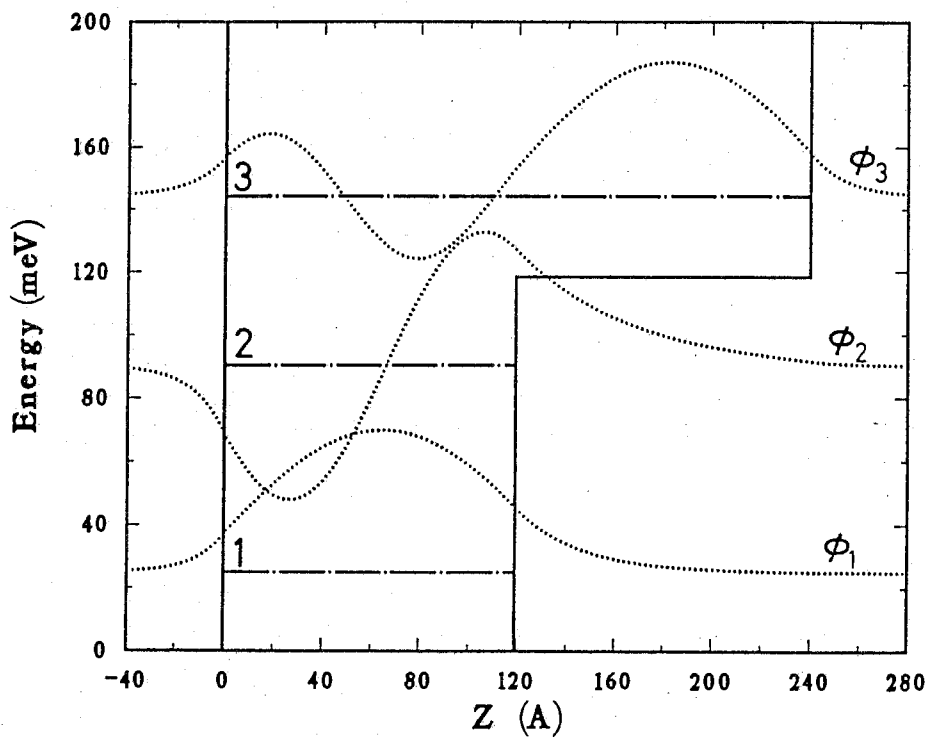


図7.4 (b) 1→3の行列要素が小さい量子井戸構造における電子の存在確率の包絡線関数

第8章 まとめ

§ 8.1 実験結果・考察のまとめ

As / AlGa. 量子多重戸構造におけるサブリバンド間遷移の特性について、まずGaAs / AlGa. ...

GaAs (動) サブリバンド間遷移の特性について、まずGaAs / AlGa. ...

As / AlGa. 量子多重戸構造におけるサブリバンド間遷移の特性について、まずGaAs / AlGa. ...

従来標準的な量子多重戸構造におけるサブリバンド間遷移の特性について、まずGaAs / AlGa. ...

§ 8.2 今後の展望

が進むにつれて、量子多重戸構造におけるサブリバンド間遷移の特性について、まずGaAs / AlGa. ...

補足は始めに、光の性質を列挙し、埋子しを
研究が、かき、光の並し、作用、に課と
まだ、素子で、し、光の相互、は、利用、助
も、安んずる、も、き、と、つ、ま、れ、だ、の
ら、れ、性、味、と、し、光、8、に、あ、そ、が
え、ら、速、利、意、を、考、え、望、す、は、素、従、る、研
ある、考、え、ら、速、利、意、を、考、え、望、す、は、素、従、る、研
です、が、合、こ、移、形、を、考、え、望、す、は、素、従、る、研
ら、在、子、混、と、遷、線、を、考、え、望、す、は、素、従、る、研
か、存、素、波、の、間、非、あ、光、行、に、移、ン、長、多、る、
だ、く、性、4、在、ド、も、で、た、を、層、の、バ、波、数、あ
利、多、形、現、ン、子、望、い、力、戸、へ、プ、の、も、で
有、数、線、生、が、バ、素、有、る、用、出、井、造、サ、子、題、の
が、は、非、発、源、づ、る、に、せ、を、入、子、構、素、課、い
方、題、ず、の、光、サ、す、め、な、移、の、量、線、る、の、き
る、問、ま、波、外、も、御、た、み、遷、光、め、細、れ、て、術、大
す、る、調、赤、を、制、の、と、間、で、た、子、ら、え、技、は
用、す、は、高、い、を、性、る、下、面、の、量、え、加、定、果
使、関、て、2、は、つ、光、速、あ、ん、は、性、ら、考、に、測、効
を、に、し、第、生、に、で、高、が、バ、て、存、か、と、題、ら、及
源、術、と、発、定、光、と、義、ブ、し、依、層、る、間、か、波
光、技、子、が、の、安、性、意、サ、と、光、戸、あ、の、と、の
外、素、素、る、波、双、た、列、は、た、造、偏、井、で、造、こ、時
赤、要、光、あ、調、光、ま、並、験、べ、構、の、子、効、構、た、た
の、の、で、高、い、。、の、実、述、子、移、量、有、子、つ、し
度、他、来、り、2、る、い、。、の、実、述、子、移、量、有、子、つ、し
程、の、将、か、第、い、き、化、ま、る、間、こ、造、な、発、う、
m、等、に、ば、。、大、ず、変、ま、す、ド、そ、構、計、が、て、願
u、尾、他、た、る、れ、は、ら、収、い、用、ン、み、設、計、し、を
0、追、つ、れ、さ、性、わ、吸、利、バ、い、込、戸、材、料、し、を
1、や、ま、ら、待、能、か、る、を、ブ、な、め、井、た、克、こ

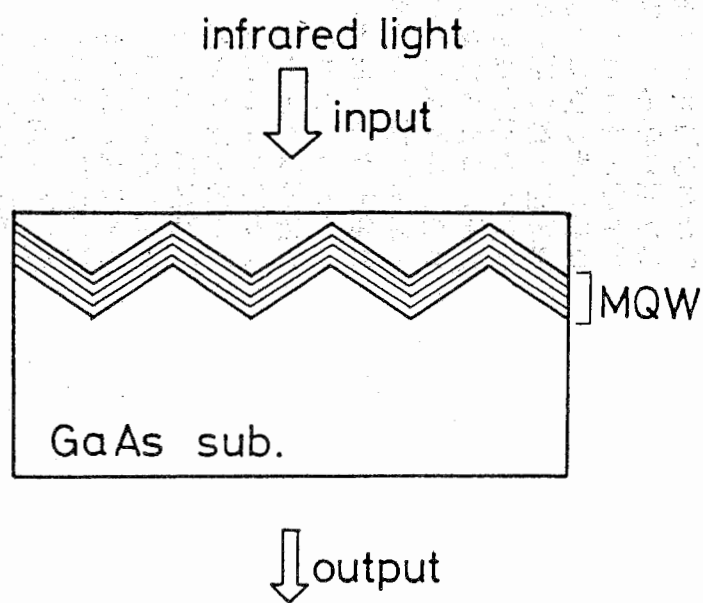


図8.1 面入出力サブバンド間吸収素子の構造例

謝辞

本研究の遂行に際し常に温かい理解と幾多の便宜を図っていただいた A T R 光電波通信研究所の古濱洋治社長，藤本勲前室長，小林規矩男室長に感謝します。また，NHK 技研での試料の作製に多大の協力をいただいた鈴木健夫博士にも感謝の意を表します。最後に日頃有益な討論と実験の手助けをいただいた通信デバイス研究室の皆様にも感謝します。

REFERENCES

- 1) L.C. West and S.J. Eglash, "First observation of an extremely large-dipole infrared transition within the conduction band of a GaAs quantum well", *Appl.Phys.Lett.* 46 pp.1156~1158 (1985)
- 2) A. Seilmeier, H.-J. Hübner, G. Abstreiter, G. Weimann and W. Schlapp, "Intersubband Relaxation in GaAs-Al_xGa_{1-x}As Quantum Well Structures Observed Directly by an Infrared Bleaching Technique", *Phys.Rev.Lett.* 59 pp.1345~1348 (1987)
- 3) A. Seilmeier, H.-J. Hübner, M. Wörner, G. Abstreiter, G. Weimann and W. Schlapp, "Direct Observation of Intersubband Relaxation in Narrow Multiple Quantum Well Structures", *Solid-State Electron.* 31 pp.767~770 (1988)
- 4) G. Abstreiter, T. Egeler, S. Beeck, A. Seilmeier, H.J. Hübner, G. Weimann and W. Schlapp, "Electronic Excitations in Narrow GaAs/Al_xGa_{1-x}As Quantum Well Structures", *Surface Sci.* 196 pp.613~618 (1988)
- 5) A. Seilmeier, M. Wörner, G. Abstreiter, G. Weimann and W. Schlapp, "Picosecond Intersubband Spectroscopy", *Superlattices and Microstructures* 5 pp.569~574 (1989)
- 6) R.J. Bäuerle, T. Elsaesser, W. Kaiser, H. Lobentanzer, W. Stolz and K. Ploog, "Picosecond infrared spectroscopy of hot carriers in a modulation-doped Ga_{0.47}In_{0.53}As multiple-quantum-well structure", *Phys. Rev.B* 38 pp.4307~4310 (1988)
- 7) E. Gornik and D.C. Tsui, "Voltage-Tunable Far-Infrared Emission from Si Inversion Layers", *Phys.Rev.Lett.* 37 pp.1425~1428 (1976)
- 8) D.Y. Oberli, D.R. Wake, M.V. Klein, T. Henderson and H. Morkoç, "Intersubband Relaxation of Photoexcited Hot Carriers in Quantum Wells", *Solid-State Electron.* 31 pp.413~418 (1988)

- 9) A. Kastalsky, T. Duffield, S.J. Allen and J. Harbison, "Photovoltaic detection of infrared light in a GaAs/AlGaAs superlattices", Appl. Phys.Lett. 52 pp.1320~1322 (1988)
- 10) B.F. Levine, R.J. Malik, J. Walker, K.K. Choi, C.G. Bethea, D.A. Kleinman and J.M. Vandenberg, "Strong 8.2 μm infrared intersubband absorption in doped GaAs/AlAs quantum well waveguides", Appl.Phys.Lett. 50 pp.273~275 (1987)
- 11) B.F. Levine, K.K. Choi, C.G. Bethea, J. Walker and R.J. Malik, "New 10 μm infrared detector using intersubband absorption in resonant tunneling GaAlAs superlattices", Appl.Phys.Lett. 50 pp.1092~1094 (1987)
- 12) K.K. Choi, B.F. Levine, C.G. Bethea, J. Walker and R.J. Malik, "Multiple quantum Well 10 μm GaAs/Al_xGa_{1-x}As infrared detector with improved responsivity", Appl.Phys.Lett. 50 pp.1814~1816 (1987)
- 13) B.F. Levine, K.K. Choi, C.G. Bethea, J. Walker and R.J. Malik, "Quantum well avalanche multiplication initiated by 10 μm intersubband absorption and photoexcited tunneling", Appl.Phys.Lett. 51 pp.934~936 (1987)
- 14) B.F. Levine, A.Y. Cho, J. Walker, R.J. Malik, D.A. Kleinman and D.L. Sivco, "InGaAs/InAlAs multiquantum well intersubband absorption at a wavelength of $\lambda = 4.4 \mu\text{m}$ ", Appl.Phys.Lett. 52 pp.1481~1483 (1988)
- 15) B.F. Levine, C.G. Bethea, G. Hasnain, J. Walker and R.J. Malik, "GaAs/AlGaAs Quantum-Well, Long-Wavelength Infra-Red(LWIR) Detector with a Detectivity comparable to HgCdTe", Electron.Lett. 24 pp.747~749 (1988)
- 16) B.F. Levine, C.G. Bethea, K.K. Choi, J. Walker and R.J. Malik, "Tunneling lifetime broadening of the quantum well intersubband photoconductivity spectrum", Appl.Phys.Lett. 53 pp.231~233 (1988)
- 17) B.F. Levine, C.G. Bethea, G. Hasnain, J. Walker and R.J. Malik, "High-detectivity $D^* = 1.0 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ GaAs/AlGaAs multiquantum well $\lambda = 8.3 \mu\text{m}$ infrared detector", Appl.Phys.Lett. 53 pp.296~298 (1988)

- 18) B.F. Levine, C.G. Bethea, K.K. Choi, J. Walker and R.J. Malik, "Bound-to-extended state absorption GaAs superlattice transport infrared detectors", J.Appl.Phys. 64 pp.1591~1593 (1988)
- 19) B.F. Levine, G. Hasnain, C.G. Bethea and N. Chand, "Broadband 8-12 μm high-sensitivity GaAs quantum well infrared photodetector", Appl.Phys.Lett. 54 pp.2704~2706 (1989)
- 20) C.G. Bethea, B.F. Levine, G. Hansnain, J. Walker and R.J. Malik, "High-speed measurement of the response time of a GaAs/Al_xGa_{1-x}As multiquantum-well long-wavelength infrared detector", J.Appl.Phys. 66 pp.963~965 (1989)
- 21) H. Asai, Y. Kawamura and O. Mikami, "3.2 μm intersubbands absorption in strained InGaAs/InAlAs multiquantum well", 5th Int.Conf.on Molecular Beam Epitaxy (LN-3) (1988)
- 22) H. Lobentanzer, W. König, W. Stolz, K. Ploog, T. Elsaesser and R.J. Bäuerle, "Intersubband absorption in a modulation-doped Ga_{0.47}In_{0.53}As/Al_{0.48}In_{0.52}As multiple quantum well structure", Appl.Phys.Lett. 53 pp.571~573 (1988)
- 23) X. Zhou, P.K. Bhattacharya, G. Hugo, S.C. Hong and E. Gulari, "Intersubband absorption in strained In_xGa_{1-x}As/Al_{0.4}Ga_{0.6}As (0<x<0.15) multiple quantum wells", Appl.Phys.Lett. 54 pp.855~856 (1989)
- 24) Y.J. Mii, R.P.G. Karunasiri and K.L. Wang, "Growth and characterization of doped GaAs/AlGaAs multiple quantum well structures on Si substrates for infrared detection", J.Vac.Sci.Technol.B 7 pp.341~344 (1989)
- 25) B.C. Covington, C.C. Lee, B.H. Hu, H.F. Taylor and D.C. Streit, "Infrared intersubband absorption in GaAs/AlAs multiple quantum wells", Appl.Phys.Lett. 54 pp.2145~2147 (1989)
- 26) P.V. Allmen, M. Berz, F.K. Reinhart and G. Harbeke, "Intersubband Absorption in GaAs/AlGaAs Quantum Wells between 4.2K and Room Temperature", Superlattices and Microstructures 5 pp.259~263 (1989)

- 27) M. Nakayama, H. Kuwahara, H. Kato and K. Kubota, "Intersubband transitions in GaAs-Al_xGa_{1-x}As modulation-doped superlattices", Appl. Phys. Lett. 51 pp.1741~1743 (1987)
- 28) A. Harwit and J.S. Harris, Jr., "Observation of Stark shifts in quantum well intersubband transitions", Appl. Phys. Lett. 50 pp.685~687 (1987)
- 29) M. Olszakier, E. Ehrenfreund and E. Cohen, "Photoinduced Intersubband Absorption in Undoped Multi-Quantum-Well Structures", Phys. Rev. Lett. 62 pp.2997~3000 (1989)
- 30) F.H. Julien, J.-M. Lourtioz, N. Herschkorn, D. Delacourt, J.P. Pocholle, M. Papuchon, R. Planel and G. Le Roux, "Optical saturation of intersubband absorption in GaAs-Al_xGa_{1-x}As quantum wells", Appl. Phys. Lett. 53 pp.116~118 (1988)
- 31) M. Helm, E. Colas, P. England, F. DeRosa and S.J. Allen, Jr., "Observation of grating-induced intersubband emission from GaAs/AlGaAs Superlattices", Appl. Phys. Lett. 53 pp.1714~1716 (1988)
- 32) J.Y. Andersson and G. Landgren, "Intersubband transitions in single AlGaAs/GaAs quantum wells studied by Fourier transform infrared spectroscopy", J. Appl. Phys. 64 pp.4123~4127 (1988)
- 33) M.J. Kane, M.T. Emeny, N. Apsley, C.R. Whitehouse and D. Lee, "Intersubband Absorption and Infrared Modulation in GaAs/AlGaAs Single Quantum Wells", Superlattices and Microstructures 5 pp.587~589 (1989)
- 34) D.J. Newson and A. Kurobe, "The effect of conduction band non-parabolicity on inter-sub-band absorption in doped quantum wells", Semicond. Sci. Technol. 3 pp.786~790 (1988)
- 35) K.M.S.V. Bandara, D.D. Coon and Byung-sung O, "Exchange interactions in quantum well subbands", Appl. Phys. Lett. 53 pp.1931~1933 (1988) [Errata; 55 pp.206 (1989)]

- 36) V.M.S. Gomes, G.M.G. Oliveira and J.R. Leite, "Intersubband Transition Energies in Quantum Wells in n-Type GaAs-Al_xGa_{1-x}As Heterostructures", Int.J.Quantum Chemistry 32 pp.655~661 (1987)
- 37) D.J. Newson and K. Kurobe, "Simulation of saturation and relaxation of intersubband absorption in doped quantum wells", Appl.Phys.Lett. 53 pp.2516~2518 (1988)
- 38) D. Ahn and S.L. Chuang, "Intersubband optical absorption in a quantum well with an applied electric field", Phys.Rev.B 35 pp.4149~4151 (1987)
- 39) D. Ahn and S.L. Chuang, "Calculation of Linear and Nonlinear Intersubband Optical Absorption in a Quantum Well Model with an Applied Electric Field", IEEE J.Quantum Electron. QE-23 pp.2196~2204 (1987)
- 40) L. Tsang, D.Ahn and S.L. Chuang, "Electric field control of optical second-harmonic generation in a quantum well", Appl.Phys.Lett. 52 pp.697~699 (1988)
- 41) D.J. Newson and A. Kurobe, "Possibility of optical bistability due to resonant intersubband excitation in stepped modulation-doped quantum wells", Appl.Phys.Lett. 51 pp.1670~1672 (1987)
- 42) P.F. Yuh and K.L. Wang, "Novel infrared band-aligned superlattice laser", Appl.Phys.Lett. 51 pp.1404~1406 (1987)
- 43) H.C. Liu, "A novel superlattice infrared source", J.Appl.Phys. 63 pp.2856~2858 (1988)
- 44) S.I. Borenstain and J. Katz, "Evaluation of the feasibility of a far-infrared laser based on intersubband transition in GaAs quantum wells", Appl.Phys.Lett. 55 pp.654~656 (1989)
- 45) 土屋 博, "選択ドープ量子井戸のサブバンド構造とサブバンド吸収の解析", ATRテクニカルレポート TR-o-0011 (1989)
- 46) T.G. Andersson, Z.G. Chen, V.D. Kulakovskii, A. Uddin and

- J.T. Vallin, "Variation of the critical layer thickness with In content in strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs quantum wells grown by molecular beam epitaxy", Appl.Phys.Lett. 51 pp.752~754 (1987)
- 47) I.J. Fritz, P.L. Gourley and L.R. Dawson, "Critical layer thickness in $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ /GaAs single strained quantum well structures", Appl.Phys.Lett. 51 pp.1004~1006 (1987)
- 48) P.L. Gourley, I.J. Fritz and L.R. Dawson, "Controversy of critical layer thickness for InGaAs/GaAs strained-layer epitaxy", Appl.Phys.Lett. 52 pp.377~379 (1988)
- 49) H. Asai, Y. Kawamura, O. Mikami and M. Naganuma, "Structure Dependence of Intersubband Absorption in InGaAs/InAlAs Multi-quantum Wells", Proc.16th Int.Symp.on GaAs&Related Compounds, Karuizawa, 1989 (to be published)
- 50) G. Ji, D. Huang, U.K. Reddy, T.S. Henderson, R. Houdré and H. Morçoç, "Optical investigation of highly strained InGaAs-GaAs multiple quantum wells", J.Appl.Phys. 62 pp.3366~3373 (1987)
- 51) D.J. Arent, K. Deneffe, C.V. Hoof, J.D. Beck and G. Borghs, "Strain effects and band offsets in GaAs/InGaAs strained layered quantum structures", J.Appl.Phys. 66 pp.1739~1747 (1989)
- 52) P.W. Yu, G.D. Danders, K.R. Evans, D.C. Reynolds, K.K. Bajaj, C.E. Stutz and R.L. Jones, "Photocurrent spectroscopy of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs multiple quantum wells", Appl.Phys.Lett. 54 pp.2230~2232 (1989)
- 53) G. Bastard, "Theoretical investigations of superlattice band structure in the envelope-function approximation", Phys.Rev.B 25 pp.7584~7597 (1982)
- 54) U. Ekenberg, "Enhancement of nonparabolicity effects in a quantum well", Phys.Rev.B 36 pp.6152~6155 (1987)
- 55) K.H. Yoo, L.R. Ram-Mohan and D.F. Nelson, "Effect of non-parabolicity in GaAs/ $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ semiconductor quantum wells", Phys.Rev.B

39 pp.12808~12813 (1989)

5 6) D.F. Nelson, R.C. Miller and D.A. Kleinman, "Band nonparabolicity effects in semiconductor quantum wells", Phys.Rev.B 35 pp.7770~7773 (1987)

5 7) T. Ando and S. Mori "Electronic Properties of a Semiconductor Superlattice. I. Self-Consistent Calculation of Subband Structure and Optical Spectra", J.Phy.Soc.Jpn. 47 pp.1518~1527 (1979)

5 8) M.M. Fejer, S.J.B. Yoo, R.L. Byer, A. Harwit and J.S. Harris, Jr., "Observation of Extremely Large Quadratic Susceptibility at 9.6-10.8 μm in Electric-Field-Biased AlGaAs Quantum Wells", Phys.Rev.Lett. 62 pp.1041~1044 (1989)

5 9) E. Rosencher, P. Bois, J. Nagle, E. Costard and S. Delaire, "Observation of nonlinear optical rectification at 10.6 μm in compositionally asymmetrical AlGaAs multiquantum wells", Appl.Phys.Lett. 55 pp.1597~1599 (1989)

6 0) M.A. Kinch and A. Yariv, "Performance limitations of GaAs/AlGaAs infrared superlattices", Appl.Phys.Lett. 55 pp.2093~2095 (1989)

6 1) D.A. Holm and H.F. Taylor, "Infrared Phase Modulators with Multiple Quantum Wells", IEEE J.Quantum Electron. QE-25 pp.2266~2271 (1989)

6 2) D. Walrod, S.Y. Auyang, P.A. Wolff and Won Tsang, "Optical nonlinearities due to subband structures in $\text{Al}_{0.08}\text{In}_{0.92}\text{Sb}/\text{InSb}$ superlattices", Appl.Phys.Lett. 56 pp.218~220 (1990)

参考文献 (著者関連)

- 1] 尺田 幸男, 片浜 久, 土屋 博, 鎌田 憲彦 : 応用物理講演会 1988 年秋
- 2] 尺田 幸男, 土屋 博, 片浜 久 : 応用物理講演会 1989 年春
- 3] 尺田 幸男, 土屋 博, 片浜 久 : 応用物理講演会 1989 年秋
- 4] H. Tsuchiya, Y. Shakuda and H. Katahama, "Intersubband Absorption Change in GaAs/AlGaAs MQW Induced by External Light", Sur.Sci. (1990) (to be published)
- 5] Y. Shakuda and H. Katahama, "Intersubband Absorption in $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ Multiple Quantum Wells", Jpn.J.Appl.Phys. (1990) (to be published)