

TR-O-0134

29

単一ドープドSiのみを用いたGaAs(111)A段差基板上
横方向サブミクロンキャリ閉じ込め構造のMBE成長

藤田 和久

1996. 3.18

ATR光電波通信研究所

単一ドープメント Siのみを用いたGaAs(111)A段差基板上
横方向サブミクロンキャリア閉じ込め構造のMBE成長

ATR光電波通信研究所
通信デバイス研究室

藤田 和久

概要

近年微細構造作製技術の発展にともない、量子細線、量子ドット等の量子ナノ構造のデバイス応用の研究も盛んになっている。量子ドット構造においてはエネルギー準位が完全に離散化されるためデルタ関数状になり、レーザーに応用した場合にしきい値電流の温度依存性の著しい改善が期待できる等の特徴がある。

本報告では、まずGaAs量子構造についてその作製および評価技術について紹介する。さらに、GaAs高指数A面(特にGaAs(n11)A($n \leq 3$)面)は、(100)面上GaAsのMBE成長においてn型ドーパントであるシリコン(Si)が両性不純物として働くという特徴を持っているが、この特徴を活かしてドーパントSiのみを用いて成長したGaAs(111)A段差基板上の横方向GaAs p-n接合によるサブミクロンキャリア閉じ込め構造について述べる。また、サブミクロンサイズの(111)A段差基板上に成長したAlGaAs/GaAs単一量子構造においては、(111)A微小領域からの発光のピーク波長の横方向の変調が見られ、キャリア閉じ込めだけでなく、光学的閉じ込めにも有効であることを示す。

目 次

第1章 緒言	1
第2章 GaAs量子構造	3
2-1. 作製技術	3
2-2. 評価技術	3
2-3. GaAs(111)A段差基板上	5
2-4. まとめ	11
第3章 μ ミロンキャリア閉じ込め構造	12
3-1. 実験方法	12
3-2. GaAs成長	12
3-3. AlGaAs/GaAs SQW成長	16
3-4. まとめ	21
第4章 結言	22
謝辞	23
文献	24

第1章 緒言

シリコン (Si) は現在のほとんどすべての半導体ICの構成材料であり、他の半導体材料の追随をまったく許さない領域に達している。ところが一方では、発光デバイスが作製できないことから半導体レーザー等の分野においては、これに代わるものとして化合物半導体、特にガリウムヒ素 (GaAs) が使われている。GaAsは、この他にSiより移動度が大きいことから高速デバイスとしても非常に注目されている材料である。さらに、GaAs ICを構成した場合の消費電力がSiに比べて、かなり低いでなく、動作温度範囲が $-200^{\circ}\text{C} \sim +200^{\circ}\text{C}$ と広く、耐放射性もあることから宇宙、高速コンピュータ等の分野での期待も大きい。

これまで、デバイス作製のGaAs基板として主に面方位(100)のものが用いられ、種々のデバイスが実用化されてきた。そして、高機能デバイスの実現を目指して量子構造を有する量子井戸レーザーや励起子の量子閉じ込めシュタルク効果を利用した光変調器などが実用化されている。最近では微細構造作製技術の発展にともない、量子細線、量子ドット等の量子ナノ構造のデバイス応用の研究も盛んになっている。量子ドット構造においてはエネルギー準位が完全に離散化されるためデルタ関数状になり、レーザーに応用した場合にしきい値電流の温度依存性の著しい改善が期待できる。

メゾスコピック構造と呼ばれる試料サイズが1ミクロン程度の小さな試料では、低温においてマクロな試料では見られない多彩な効果が観測されている[1,2]。この領域では、試料サイズは平均自由行程よりも大きい、非弾性散乱長 (コヒーレント長) よりも小さい。そのため、磁気抵抗を低温で測定すると、UHF(Universal Conductance Fluctuations) と呼ばれるコンダクタンスの普遍的なゆらぎが観測される。また、図1-1に示すように、試料サイズが非弾性散乱長のみならず平均自由行程よりも小さいバルジスティック領域になると、不純物散乱がないことからそこにみられる現象も拡散領域とは異なり、電子波と光波の類似性が見られるようになる。さらに、小さなナノ構造においてクーロンブロッケードや単電子トンネル効果が見られるようになる。

微細構造を作る方法として種々のものが検討されているが、電子ビーム露光などのリソグラフィ技術とエッチングを組み合わせた方法はダメージを与える可能性がある。そこで、当研究所では微細構造作製技術に頼るのではなく、GaAs高指数面が持っている材料としての可能性に注目し、これらの特性を利用することにより、自己制御的に微細構造を得る研究を行ってきた。一般に、(100),(110)面以外の結晶面方位は高指数面と呼ばれており、各結晶面は異なる原子配列、電子状態を有し、その物性までもが大きく変化する。高指数面を用いた研究の利点は、材料が持っている特性を積極的に利用することにより、複雑な作製技術を用いることなく、極微細構造を作製することにある。

本報告においては、まず第2章において量子構造の作製および評価技術について紹介した後、第3章でGaAs高指数面上ではドーパントSiが両性不純物として働くという特徴を活かして、ドーパントSiのみで成長したGaAs(111)A段差基板上の横方向 p-n接合によるサブミクロンのキャリア閉じ込め構造について報告する。そして、第4章において、まとめを行なう。なお、本文中に使用した略称の正式名称については最後にまとめて示してある。

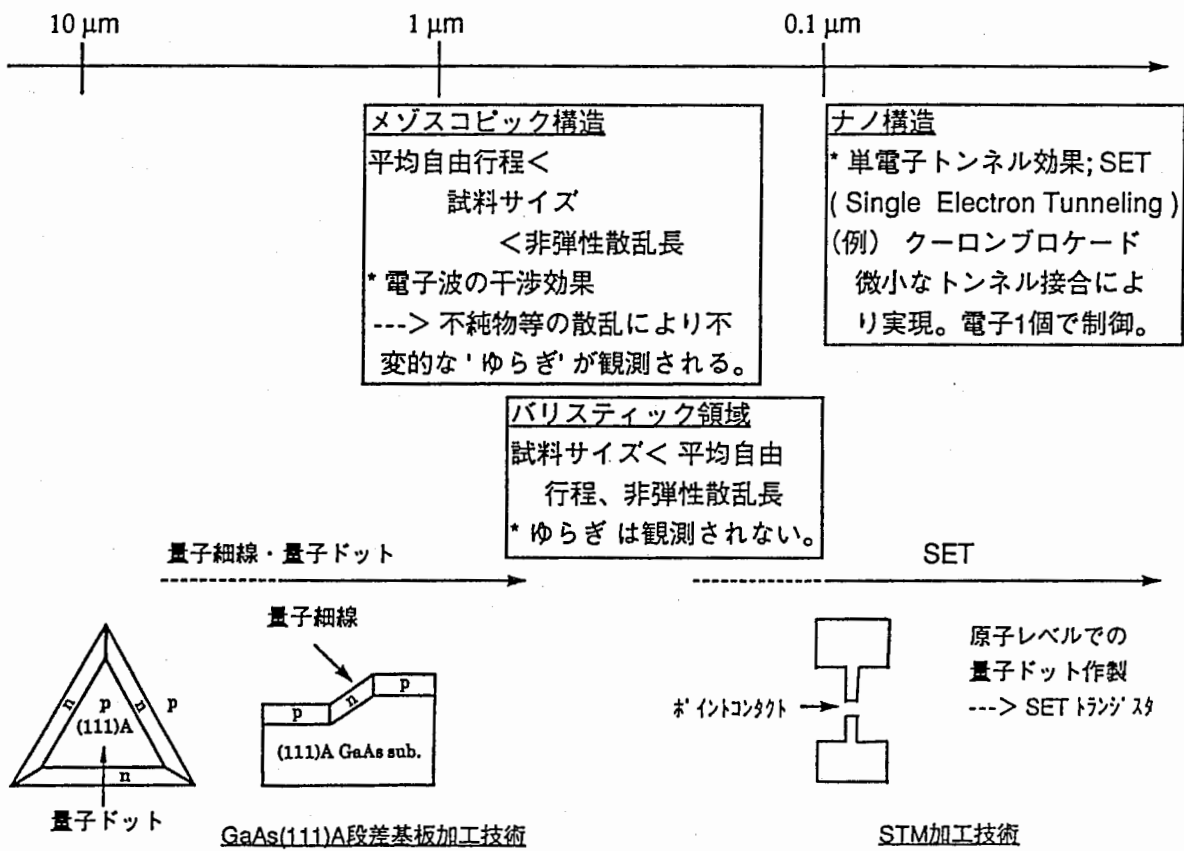


図 1-1. GaAs量子構造のサイズ効果

第2章 GaAs量子構造

前章で述べたように、メゾスコピック構造と呼ばれる試料サイズが1ミクロン程度の小さな試料では、低温においてマクロな試料では見られない多彩な効果が観測されている[1,2]。拡散的伝導領域におけるコンダクタンスのゆらぎ、リング構造におけるAB効果に代表される電子干渉効果にはじまり、コンダクタンスの量子化に代表されるバリスティック伝導、最近では、さらに小さなナノ構造においてクーロンブロックードや単電子トンネル効果が注目を集めている。

微細構造を作る方法としては、電子線リソグラフィやエッチングなどの技術を利用した方法と、結晶成長機構を積極的に利用した自然形成法に大別することができる。前者では高額な装置が必要なだけでなく、プロセス中にダメージを受ける可能性がある。これに対して、後者は成長だけで自己制御的に量子構造が得られるという特徴があるが、その制御性等に問題が残されている。

本章では、まず量子構造の作製技術および評価技術について紹介した後、当研究室でこれまで行なってきたGaAs(111)A段差基板上SiドープGaAs成長による横方向p-n接合によるのキャリア閉じ込め構造作製について報告する。そして、最後にまとめを行なう。

2-1. 作製技術

まず、量子構造を人工的に作製する方法であるが、電子線リソグラフィやエッチングなどの技術を利用する以外に集束イオンビームを用いて高抵抗のダメージ層を形成し、ダメージのない部分に構造を形成する、あるいはこれは現状最もよく用いられている方法であるが、スプリットゲート法と呼ばれているもので、ウエハー上に形成した金属ゲートに負の電圧をかけることにより、ゲート直下の電子を空乏化させ、ゲート間に電子を残すというものがある[2]。

また、もう一つの方法として、結晶成長機構を積極的に利用した自然形成法がある。この中で最も代表的な手法がStranski-Krastanov (SK) モードを利用する方法である。SKモードでは図2-1に示すように、基板上に成長層を数層成長したときには、2次元成長層となるのに対して、その後は3次元的な成長となる。このSKモードは、図に示すようにGaAs上にInGaAs層を成長するなど、格子定数の異なる物質を成長した時に起こる。SKモード自体は既に30年前に議論されている。当初はむしろ3次元構造が良質の結晶成長の形成を妨げていると考えられていた。SKモード以外にも自然形成的手法と呼ばれている形成手法があり、Nötzelら[3]のGaAs(311)A面上InAs量子細線形成などが注目されている。

2-2. 評価技術

量子箱などの微細構造の評価のためには、走査型原子間力顕微鏡 (AFM) が最も簡便な方法として有効である。これは大気圧中で、しかも原子レベルの凹凸が観察されることからよく使われている。量子閉じ込め効果の判定には、ホトルミネッセンス (PL) の測定が有効であるが、実際に個々の量子箱の評価が出来ないという問題がある。そこで、最近光走査型トンネル顕微鏡 (PSTM) が注目されている。化学エッチングにより先鋭化さ

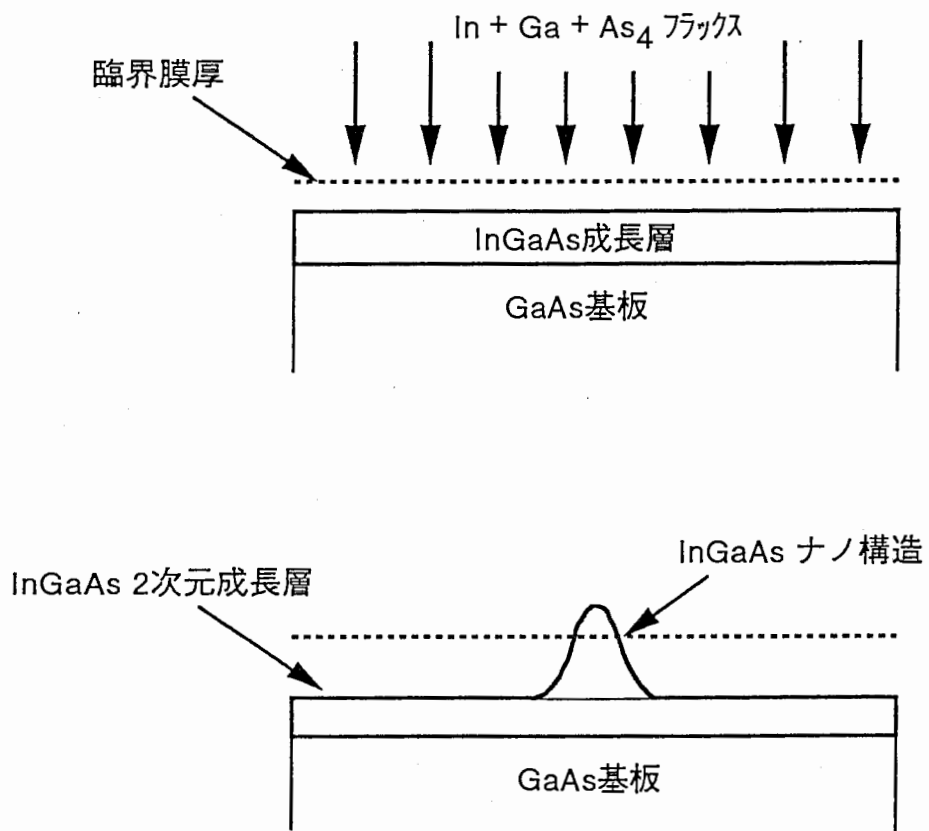


図 2・1. Stranski-Krastanovモードを利用した量子ドットの形成

れたファイバプローブを用いるもので、励起光源にはArレーザー等が、高さ制御に利用されるシアフォース用の光源には長波長の半導体レーザーなどが用いられている。最近では、量子井戸における局在効果の観測にも応用されており、量子ナノ構造の光学情報の取り出しには有効である。

また、量子閉じ込め効果の検証として、磁気PLがある。これは、ディスクのような横方向にも閉じ込めを持つ構造に閉じ込め方向に垂直に磁場を加え、低磁場において優勢なポテンシャルによる量子閉じ込めと、高磁場における反磁性項による調和振動子型ポテンシャル閉じ込めとの競合、または両者間の遷移を調べることにより、磁場に垂直な方向の量子閉じ込め効果、量子閉じ込めによる拡がりを知ることができる。

2-3. GaAs(111)A段差基板上

量子構造作製の一つの方法として、当所では、GaAs(111)A段差基板上を用いた研究を行なっている。これは、GaAs(111)A面上に成長したSiドープGaAs層の伝導型が成長条件(As/Ga分子線強度比すなわちフラックス比)に依存することを利用して同時に横方向のキャリア閉じ込め構造を作製しようとするものである。図2-2はSiドープGaAs層の伝導型の成長条件依存性を示したもので、フラックス比が大きくなるのに従い、p型からn型に変化する傾向を示す。(111)A面ではGaの単結合手に与る価電子密度が極めて低いので、(111)A面上でAs₄分子が分解して付着する係数がかなり小さくなる。そのため、SiはAs₄と競合しながらGa面上に堆積していき、SiはAs位置に入ってアクセプターとなる。また、高As圧や低成長温度の下では、表面As被覆率が高まるので、SiはGa位置にも入るようになる。これが、定性的な伝導型のフラックス比、成長温度依存性の説明である。さらに、基板の傾斜角度の増加とともに、このp型の領域は狭くなり(311)Aではn型になり易い傾向を示す[4]。これは、(100)ステップが(111)Aテラスに対しオフ角度で決まる平均的なピッチで発生することと関係がある。(100)ステップではAs₄の付着率が高く、また、このステップから横方向ステップフローモードの成長が(111)Aテラス上の2次元島状成長と競合しながら発生するのでSiはGa位置に入り易くなる。基板傾斜によりn型になるのはこのためである。(100)ステップと(111)AテラスそれぞれのSi置換位置密度、SiのGa表面、As表面への付着係数、GaとAsの表面被覆率を定義して、フラックス比と傾斜角の関数としてSiドナー濃度とSiアクセプター濃度を計算し、n型とp型の境界を見積ったのが、図2-2に点線で示す境界であり、実験データを定性的にはあるが、良く説明している[4]。

以上、(100)面上ではn型ドーパントであるSiが(111)A面上ではp型ドーパントとして働くことを利用すると、斜面に(100)面を持つような段差基板加工を行なうことにより、図2-3に示すように、一回のSiドープGaAs層の成長で横方向のp-n接合が作製出来る[5]。また、この時GaAs(111)A面は結晶が3回対称性を持つことから、図に示すように、等価な3つの斜面を有する三角形の横方向p-n-p接合による電流閉じ込め構造が形成される。この構造を利用するデバイスは素子分離のプロセスが不要になるため、デバイスをアレー化する場合に有効になると考えられる。また、この横方向のp-n接合を用いてデバイスを作製することにより、従来膜厚方向に作製していたデバイスを平面的に作り込むことができ、集積化し易くなるという利点がある。しかしながら、(111)A面と斜面と

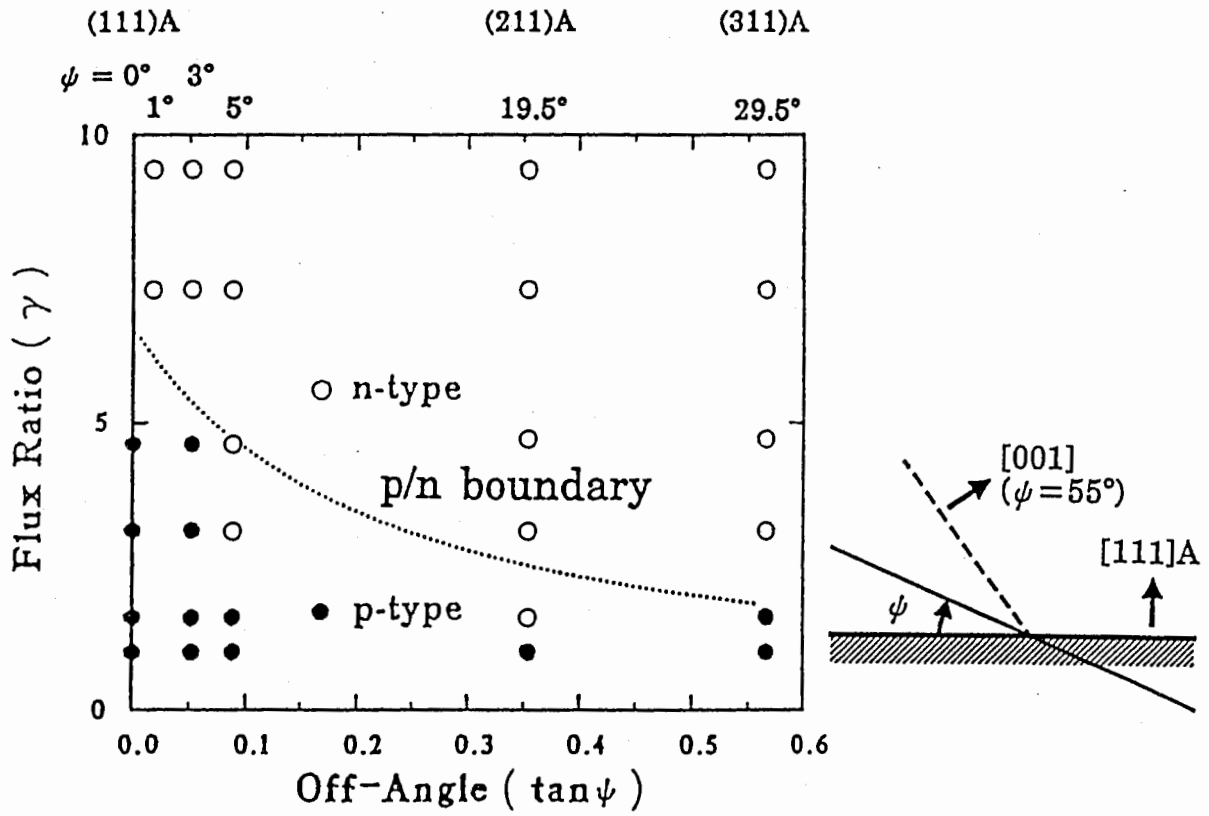


図 2-2. SiドープGaAs層伝導型のフラックス比および基板オフ角度依存性 [4]

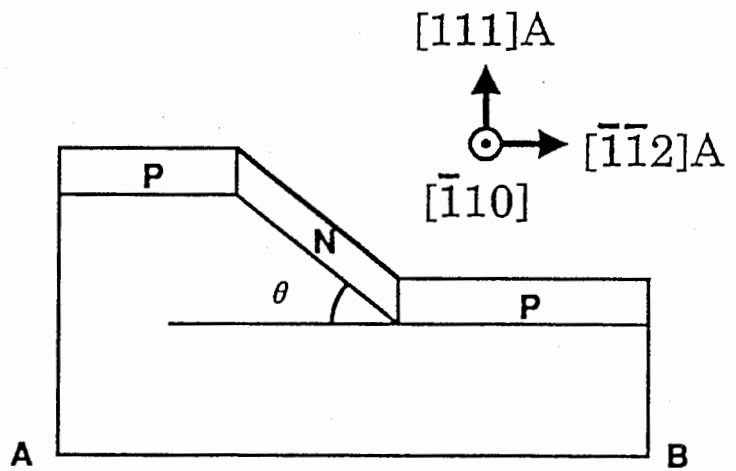
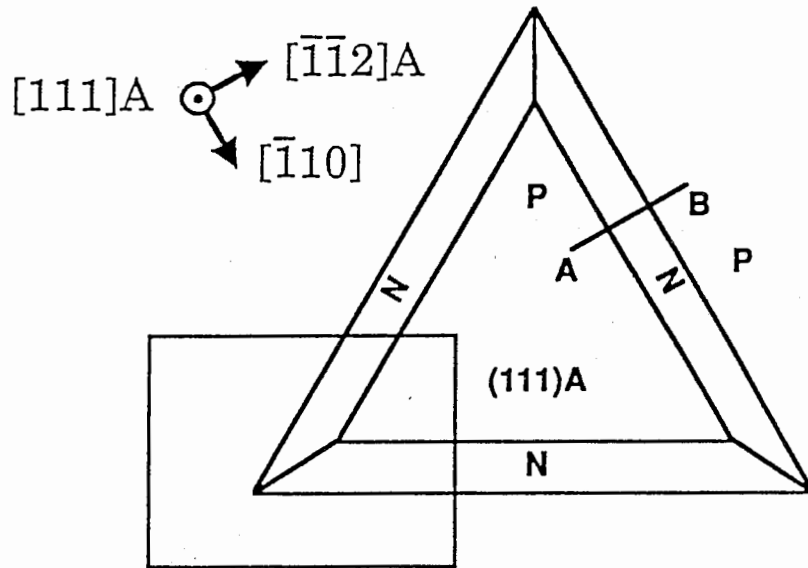


図2-3. GaAs(111)A段差基板上的横方向p-n-p構造[5]

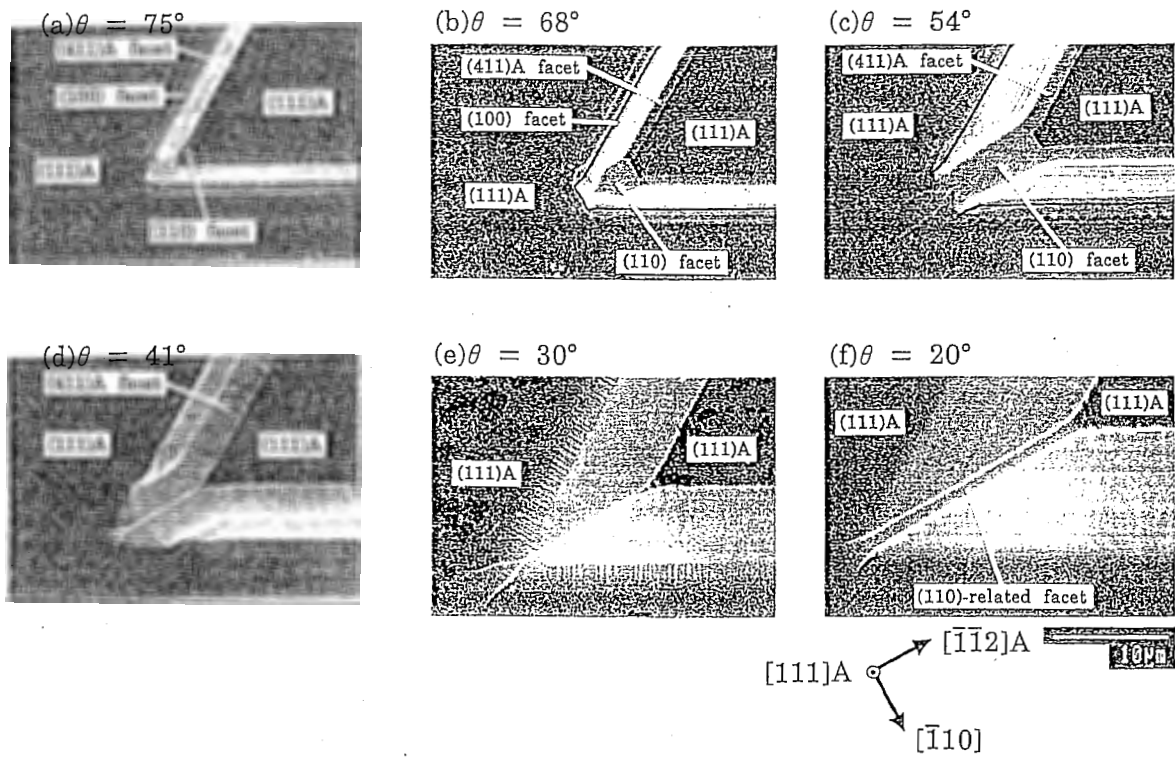


図 2-4. 各種斜面面方位を持つGaAs(111)段差基板上に成長したGaAs層の三角形コーナー部SEM写真 [6]

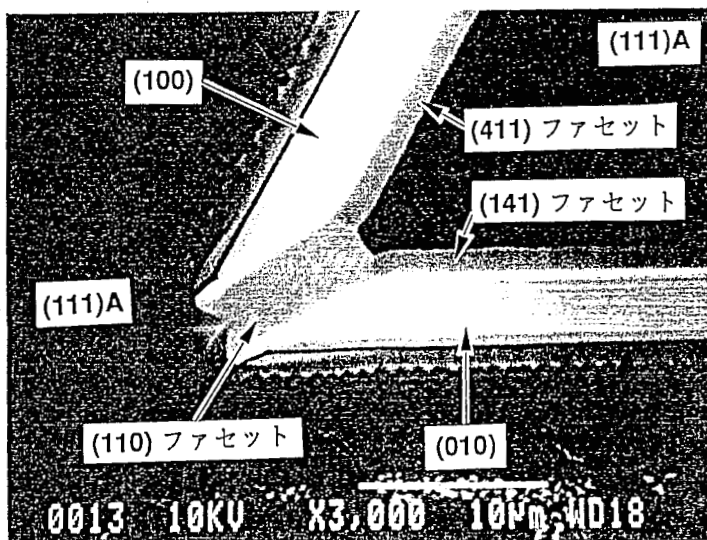


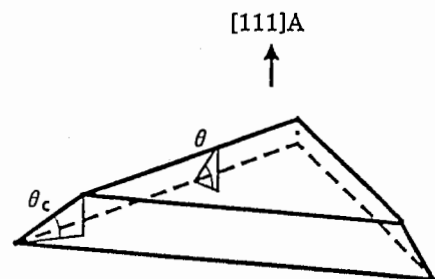
図 2-5. 図 2-4 (c) の拡大写真

表 2-1. GaAs(111)A 段差基板上 GaAs 成長におけるファセット形成の斜面およびコーナー傾斜角依存性 [6]

側 壁		コーナ ー			備 考
θ	(114)Aファセット	θ_c	(110)ファセット	(110)関連ファセット	
84°	Y	78°	N		$\theta_f = 35^\circ /$ (110) \updownarrow $\theta = 54^\circ$
75°	Y	62°	Y		
68°	Y	50°	Y		
61°	Y	42°	Y		
54°	Y	35°	Y	←	
52°	Y	33°	N	N	$\theta = 33^\circ /$ (114)A \leftarrow
44°	Y	25°	N	N	
41°	Y	23°	N	N	
36°	Y	20°	N	N	
30°	N	17°	N	N	$\theta_f = 15^\circ /$ (221)A \updownarrow $\theta = 28^\circ$
24°	N	13°		Y	
20°	N	11°		Y	
11°	N	6°		Y	

Y: 有り N: 無し

θ : 斜面傾斜角
 θ_c : コーナー傾斜角



のなす角, ϕ に依存して、三角形のコーナー部ファセットが生じるという問題がある。図2-4は各種斜面面方位を持つGaAs(111)段差基板上に成長したGaAs層の三角形コーナー部SEM写真を示す。図2-5の拡大写真に示すように、コーナー部に(110)ファセット、また肩部に(411)ファセットが発生する。これらのファセットは横方向p-n-p構造を利用した電流閉じ込め構造を作製する場合に電流リークの原因となることから、その発生を避ける必要がある。表2-1にファセット形成の斜面およびコーナー傾斜角依存性を示す。表から明らかなように、角度が 33° から 28° と非常に狭い範囲でファセットを生じないことが分かる[6]。そして、この範囲での定指数面としては、(311)A面($\phi=29.5^\circ$)が有効であることが分かる。

この横方向p-n-p接合による電流閉じ込め構造は、EB露光などのリソグラフィー技術を用いることにより、キャリア閉じ込め構造を有する量子ナノ構造の作製に有効である。次章において、量子ナノ構造作製の予備検討として行なった、本構造を用いたサブミクロンサイズのキャリア閉じ込め構造作製について報告する。

2-4. まとめ

メゾスコピック構造と呼ばれる試料サイズが1ミクロン程度の小さな試料では、低温においてマクロな試料では見られない多彩な効果が観測される。拡散的伝導領域におけるコンダクタンスのゆらぎ、リング構造におけるAB効果に代表される電子干渉効果にはじまり、コンダクタンスの量子化に代表されるバリスティック伝導、最近では、さらに小さなナノ構造においてクーロンブロックや単電子トンネル効果が注目を集めており、従来にはない高機能デバイス実現の可能性を秘めている。

微細構造を作る方法としては、電子線リソグラフィやエッチングなどの技術を利用した方法と、結晶成長機構を積極的に利用した自然形成法に大別することができる。前者では高額な装置が必要なだけでなく、プロセス中にダメージを受ける可能性がある。これに対して、後者は成長だけで自己制御的に量子構造が得られるという特徴があるが、その制御性等に問題が残されている。

量子箱などの微細構造の評価のためには、最近光走査型トンネル顕微鏡(PSTM)が注目されている。量子井戸における局在効果の観測にも応用されており、量子ナノ構造の光学情報の取り出しには有効である。また、量子閉じ込め効果の検証として、磁気PLがある。低磁場において優勢なポテンシャルによる量子閉じ込めと、高磁場における反磁性項による調和振動子型ポテンシャル閉じ込めとの競合、または両者間の遷移を調べることにより、磁場に垂直な方向の量子閉じ込め効果、量子閉じ込めによる拡がりを知ることができる。

さらに、GaAs高指数面上ではドーパントSiが両性不純物として働くという特徴を活かして、ドーパントSiのみで成長したGaAs(111)A段差基板上の横方向 p-n-p接合によるキャリア閉じ込め構造を作製することが出来る。本構造はリソグラフィ技術に依存して、量子ナノサイズのキャリア閉じ込め構造を作製する場合に有効である。

第3章 サブミクロンキャリア閉じ込め構造

シリコン (Si) は (100)面およびB面上のMBE成長においてn型ドーパントとして広く用いられている。ところが、GaAs (n11)A ($n \leq 3$) 面上においてはSiは両性不純物として働く[7-9]。さらに、GaAs(111)A基板上に成長したSiドープGaAs層の伝導型がMBE成長条件すなわちAs/Ga分子線強度比（フラックス比）や基板の傾斜角度に依存するという特徴がある。[4]。この技術を用いた横方向p-n接合作製に関する研究はその成熟した技術的背景から主に(100)段差基板を用いて行なわれてきた[10,11]。これに対し、当所においては第2章でも述べたように、三角形の形状を有するGaAs(111)A段差基板上にSiドープGaAs層を成長することにより、横方向p-n構造（(111)A面がp型、斜面がn型）の作製を行なってきた[5]。このような構造が実現出来たのは良好な表面モホロジーを持つ(111)A GaAs層のMBE成長技術の著しい進歩によっている[12]。(111)A段差基板上へのMBE成長技術は、(111)A面が結晶学的に3回対称性を持っており、一回のSiドープGaAs層のMBE成長で横方向キャリア閉じ込め構造が得られるということで魅力ある技術である。また、この技術はキャリア閉じ込め構造を持つ量子ドットのような微小構造作製に応用できるということからも有効である。

本章では、ドーパントSiのみを用いて成長した(311)A斜面を持つ(111)A段差基板上横方向キャリア閉じ込め構造について述べる。また、(111)A段差基板上へのAlGaAs/GaAs 単一量子(SQW)構造についても報告する。

3-1. 実験方法

サンプルとしては、ノンドープGaAs(111)A段差基板を使用した。基板加工および表面処理条件を表3-1に示す。加工した基板をアンモニア系エッチング液により表面処理した後、ただちにMBE装置の試料室に導入した。さらに、表3-2に示すようにAs雰囲気中で700°C、10分間のサーマルクリーニングの後、1 μm のSiドープGaAs層を600°Cで成長した。この時、p型(111)A GaAs層およびn型(311)A層を得るために、フラックス ($V/\text{III}:J_{\text{As}}/J_{\text{Ga}}$) 比を6とした。また、同様にサーマルクリーニングを行なった後、表3-2中の図に示すように、600 nmのバッファ層、ノンドープAlGaAs(200 nm)/GaAs(8 nm) SQW構造およびキャップ層を成長した。

3-2. GaAs成長

図3-1は(311)A側壁を持つGaAs(111)A段差基板上に成長したGaAs層のSEM像を示す。(111)A面は3回対称性を持っているので、等価な3つの斜面を有する三角形の形状を示している。表面モホロジーは非常に滑らかで、三角形のコーナー部に特別なファセットも見られない。当所では、これまで(111)A面と斜面とのなす角、 ϕ が三角形コーナー部へのファセット形成に影響すると報告してきた[6]。そして、角度が33°から28°と非常に狭い範囲でファセットを生じないことを示した。ここでの結果から、(311)A斜面 ($\phi=29.5^\circ$)がファセット抑制に有効であることが分かる。

図3-2(a)は図3-1のサンプルの斜面からのCL像を示している。ピーク波長は823 nmである。p型の三角形の領域は完全にn型斜面領域から孤立しているのが分かる。図3-

表 3-1. 基板処理条件

サンプル

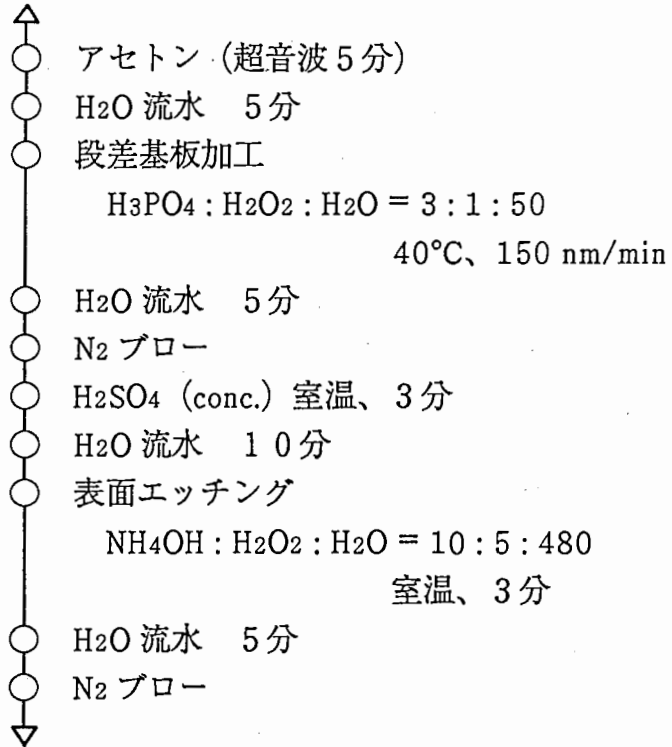


表 3-2. 実験条件

1. MBE 成長条件

(1) 基板

ノンドープ GaAs(111)A

(2) 基板処理; 表 3-1 による

(3) サーマルクリーニング (MBE装置内)

700°C, 10 分, As 圧; 2×10^{-3} Pa

(4) MBE 成長; $V/III = 2 \sim 7$, 540°C

a. Si ドープ GaAs 成長 (1 μm)

$V/III = 6$, 540°C, 1 $\mu\text{m}/\text{h}$, Si キャリア濃度; $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$

* (111)A 上で p 型層、(311)A 上で n 型層を得るための条件。

b. $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ 単一量子井戸 (SQW) 成長

$V/III = 6$, 540°C, ノンドープ

1 $\mu\text{m}/\text{h}$ ($\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 層)

0.7 $\mu\text{m}/\text{h}$ (GaAs 層)

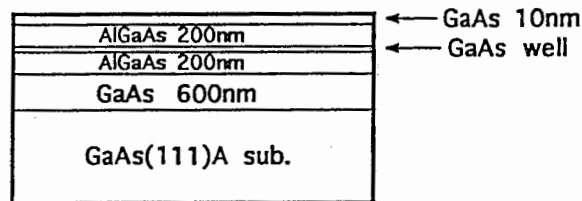


図. AlGaAs/GaAs SQW 構造

2. 評価

(1) 表面モホロジー

走査型電子顕微鏡 (SEM)

(2) 横方向キャリア閉じ込め構造

カソードルミネッセンス (CL)

加速電圧: 12 kV, プローブ電流: 10^{-7} A

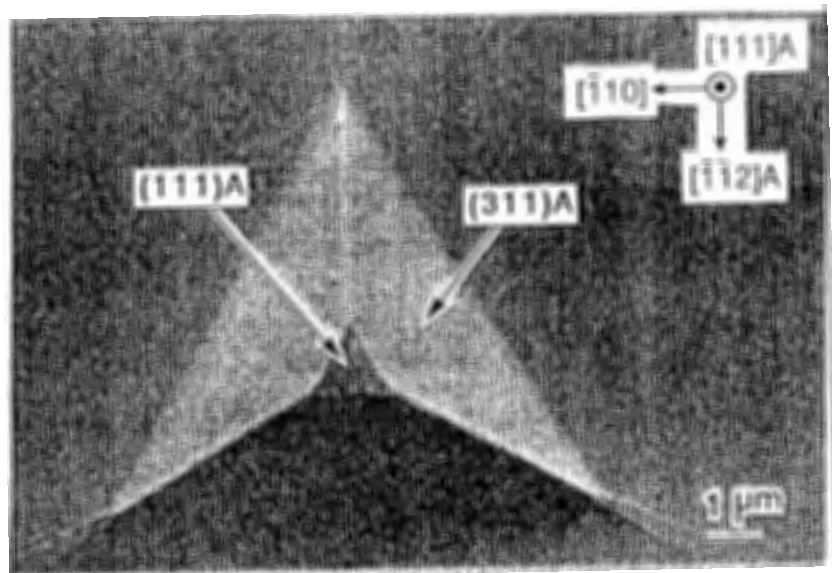


図 3-1. (311)A側壁を持つGaAs(111)A段差基板上に成長したSiドーピングGaAs層のSEM像

2 (b) はサブミクロン閉じ込め構造を持つサンプルからのCL像を示している。三角形のコーナー部にCL像の暗い部分が見られる。これらは、おそらく深くエッチングした段差基板上に成長したために生じたマイクロファセットであろうと考えられる。このファセットは段差基板のエッチングプロファイルを制御することにより除くことが出来ると考えられる。これらの図に見られるように、斜面の波長で得られるCLピーク強度は強い。これに対して、中央三角形部の閉じ込め領域からの発光強度は弱い。図3-3は図3-2 (b) サンプルのCLスペクトルを示している。図中、(111)Aおよび(311)Aは、(111)A領域および(311)A斜面からのスペクトルを表している。p型閉じ込め領域からのスペクトルはブロードであるが、ピーク波長はn型斜面領域からのスペクトルと分離している。これらの波長はホール測定によりその伝導型が分かっているSiドープGaAs層と一致しており、横方向p-n接合が形成されていることが分かる。また、この横方向p-n接合に関しては、電気的にもその形成が確かめられている[13]。

以上の結果から、(111)A段差基板上にサブミクロンキャリア閉じ込め構造が出来ていることが分かる。しかしながら、横方向キャリア閉じ込めによる量子サイズ効果を観察するためには閉じ込め領域をさらに微細化する必要がある。電子ビーム露光などの方法を用いることによりパターンサイズをナノメートルまで小さくすることが出来ると考えられる。

3-3. AlGaAs/GaAs SQW成長

図3-4 (a)はサブミクロンサイズの(111)A領域を持つ段差基板上に成長したAlGaAs/GaAs SQW構造のSEM像を示す。図3-4 (b)はこのサンプルのCL像を示しており、図中(111)A, (311)A, '(111)A sub' はそれぞれ三角形(111)A領域、(311)A斜面、(111)A基板からのスペクトルを示している。平坦な(111)A基板上AlGaAs層からのCLピーク波長は646 nmであり、Al組成は0.32と見積ることができる。このAl組成は3つの領域ではほぼ同じであるが、SQWからのピーク波長は異なっている。このことは、SQW構造においてGaAs層の膜厚に違いがあるということを示しており、理論計算から表3-3に示すように見積ることができる。これら膜厚の差の原因であるが、その理由としては(111)A面上と(311)A面上でのGa原子の拡散距離の差によって説明できる。(111)A面上のGa原子の拡散距離は(311)A面上のものより長いので[14]、図3-5に示すように、Ga原子は三角形(111)A領域から(311)A斜面に拡散する[14]。その結果、三角形(111)AのGaAsの膜厚は(311)A斜面より薄くなり、ピーク波長が単波長側にシフトする。ここで注目すべき点は、三角形領域からのCLピーク強度がSiドープGaAs層を成長したサンプルと比較して大きくなり、さらにスペクトルの半値幅も小さくなっていることである。

AlGaAs SQW構造のCLスペクトルにおいて、ピーク強度が大きくなるということは興味深い。Kaponら[15]はV溝を持つ(100)段差基板上に成長したAlGaAs/GaAs超格子において、底部(100)面上の量子井戸の膜厚が増加し、両サイドの最も低い励起状態のエネルギーが上昇することによる横方向キャリア閉じ込めの可能性について報告している。しかしながら、今回の場合は強いピーク強度の原因として、横方向のエネルギー状態によって説明できない。というのは、三角形(111)A領域の励起状態のエネルギーが高くなるからである。そこで、強いピーク強度の原因としては、 $\langle 111 \rangle$ 方向への量子化によっている

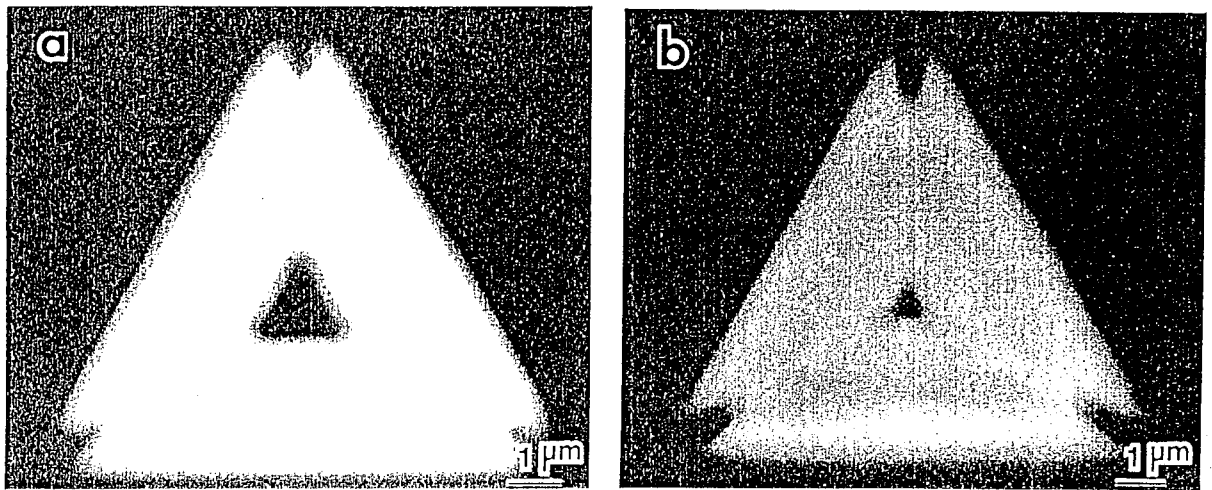


図 3-2. (311)A側壁からのピーク波長(823 nm)で測定した GaAs(111)A段差基板上GaAs層のCL像
 (a), (b)はそれぞれ 図 3-1 および微小サイズの サンプルからの像を示す。

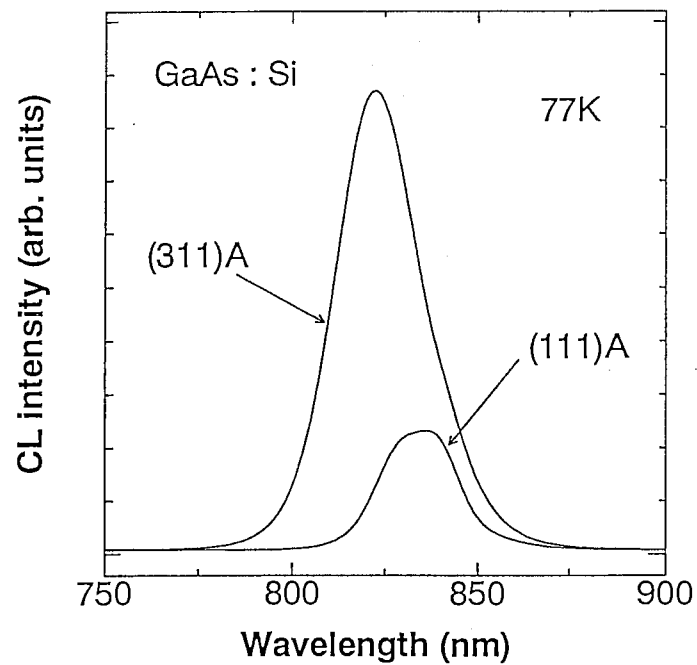


図 3-3. 図 3-2 (b) に示す GaAs(111)A 段差基板上GaAs層からのCL像

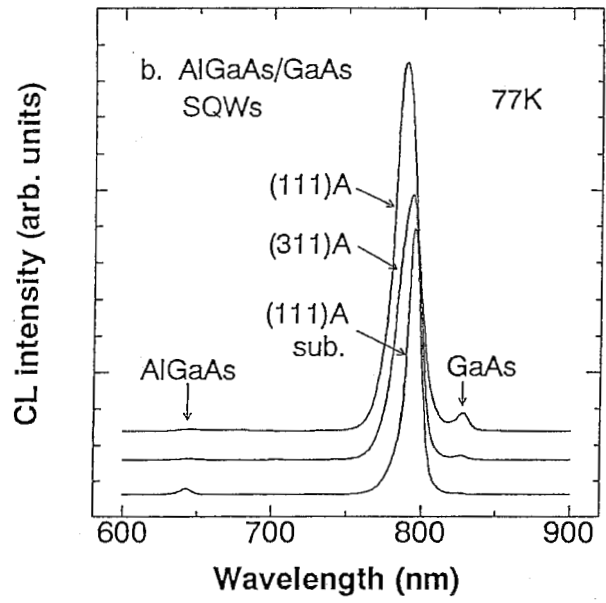
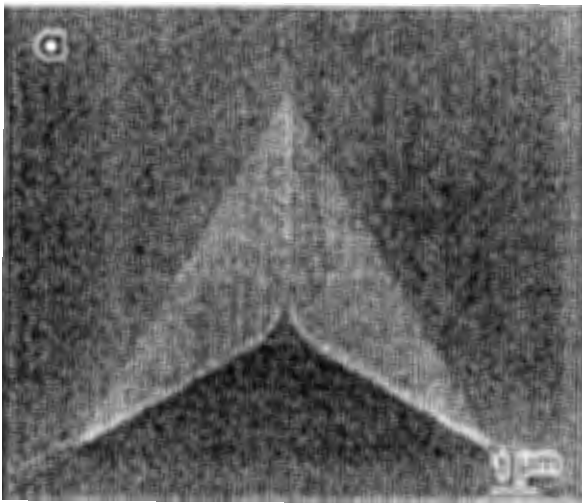


図3-4. サブマイクロサイズのGaAs(111)A段差基板の上に成長したAlGaAs/GaAs SQW構造の(a) SEM像および(b) CL像。

表3-3. CL波長から計算した井戸幅

Position	CL wavelength (nm)	Well width (nm)	Effective mass
(111)A	789	6.4	$m_{hh}^*=0.9$ (GaAs) $m_{hh}^*=1.023$ (AlGaAs)
(311)A	793	7.5	$m_{hh}^*=0.46$ (GaAs) $m_{hh}^*=0.583$ (AlGaAs)
(111)A sub.	795	7.5	

$m_e^*=0.0665$ (GaAs)
 $m_e^*=0.0914$ (AlGaAs)

Energy gaps: Adach, Properties of AlGaAs, INSPEC (1993) p.80.
(111)m_{hh}*: T. Hayakawa et al., Phys. Rev. Letters 60 (1988) 349.
(311)m_{hh}*: O. Brandt et al., Phys. Rev. B, 48 (1993) 17599.

Ga原子の拡散距離 [14]

(100) \approx ($\bar{3}\bar{1}\bar{1}$)B < ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)B, ($\bar{3}\bar{3}\bar{1}$)B, (311)A
< (411)A \approx (111)A \leq (110)

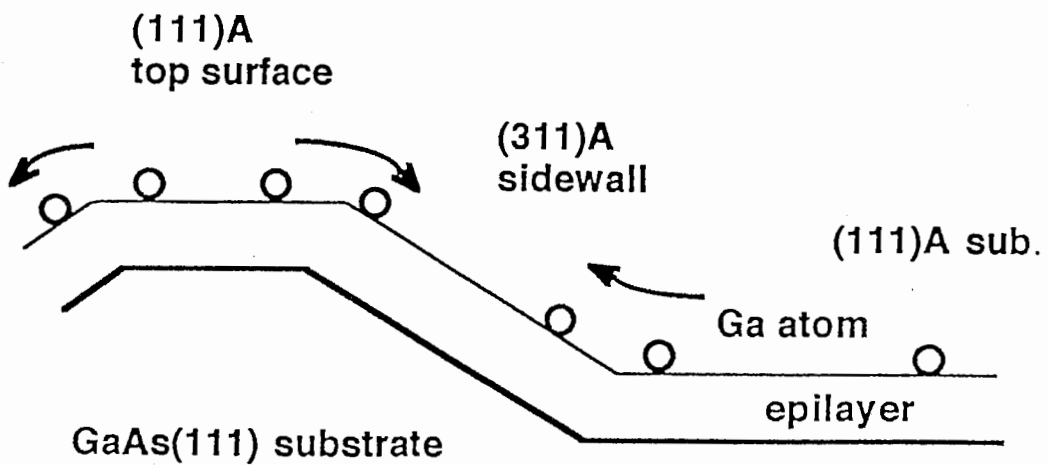


図3-5. GaAs(111)A段差基板上Ga拡散模式図

と考えられる[16]。この効果とピーク波長の横方向の変調が光学的閉じ込めを生み出すことになる。その結果、室温においても(111)A閉じ込め領域から強い発光(833 nm)が得られている。

最近、当所ではGaAs(111)A基板上にAlGaAs/GaAsダブルヘテロ構造の発光ダイオード(LED)がドーパントSiのみで成長できることを報告した[17]。この技術を(111)A段差基板上の成長と組み合わせることで、横方向のサブミクロンキャリア閉じ込め構造を持つLEDのような光デバイスを作製することができる。

3-4. まとめ

横方向サブミクロンキャリア閉じ込め構造を3つの等価な(311)A斜面を持つGaAs(111)A段差基板上に成長した。閉じ込め構造が出来ていることについては、CLスペクトルの観察結果から確認した。さらに、AlGaAs/GaAs SQW 構造をサブミクロンサイズの段差基板上に成長した結果、閉じ込め領域からの強い発光が観察された。この原因としては、 $\langle 111 \rangle$ 方向への量子化によると考えられる。また、量子井戸厚の変化によるピーク波長の横方向への変調が見られた。これらの結果から、(111)A段差基板上のMBE成長はサブミクロンサイズのキャリア閉じ込めだけでなく、光学的閉じ込め構造の作製に有効であることが分かる。

第4章 結言

第1章では、GaAs量子構造のサイズ効果について述べた。メゾスコピック構造と呼ばれる試料サイズが1ミクロン程度の小さな試料では、低温においてマクロな試料では見られない多彩な効果が観測される。この領域では、試料サイズは平均自由行程よりも大きい、非弾性散乱長よりも小さいため、磁気抵抗を低温で測定すると、UHFと呼ばれるコンダクタンスの普遍的なゆらぎが観測される。また、試料サイズが非弾性散乱長のみならず平均自由行程よりも小さいバルスティック領域になると、不純物散乱がないことからそこにみられる現象も拡散領域とは異なり、電子波と光波の類似性が見られるようになる。さらに、小さなナノ構造においてクーロンブロッケードや単電子トンネル効果が見られるようになる。

第2章では、GaAs量子構造について、その作製および評価技術について述べるとともに、GaAs(111)A段差基板上に微細構造を作製する場合の課題について述べた。微細構造を作る方法としては、電子線リソグラフィやエッチングなどの技術を利用した方法と、結晶成長機構を積極的に利用した自然形成法に大別することができる。前者では高額な装置が必要なだけでなく、プロセス中にダメージを受ける可能性がある。これに対して、後者は成長だけで自己制御的に量子構造が得られるという特徴があるが、その制御性等に問題が残されている。

量子箱などの微細構造の評価のためには、最近光走査型トンネル顕微鏡が注目されている。量子井戸における局在効果の観測にも応用されており、量子ナノ構造の光学情報の取り出しには有効である。また、量子閉じ込め効果の検証として、磁気PLがある。低磁場において優勢なポテンシャルによる量子閉じ込めと、高磁場における反磁性項による調和振動子型ポテンシャル閉じ込めとの競合、または両者間の遷移を調べることで、磁場に垂直な方向の量子閉じ込め効果、量子閉じ込めによる拡がりを知ることができる。

第3章では、3つの等価な(311)A斜面を持つGaAs(111)A段差基板上にSiドープGaAs層を成長することにより作製した横方向p-n-p構造によるサブミクロンキャリア閉じ込め構造について報告した。閉じ込め構造が出来ていることについては、CLスペクトル観察結果から確認した。さらに、AlGaAs/GaAs SQW構造をサブミクロンサイズの(111)A段差基板上に成長した結果、三角形の(111)A閉じ込め領域から強い発光が観察された。この強い発光の原因としては、 $\langle 111 \rangle$ 方向への量子化によると考えられる。また、GaAs量子井戸厚の横方向の変化によるピーク波長の横方向の変調が見られた。これらの結果から、(111)A段差基板を利用したMBE成長は、光学的閉じ込め構造の作製にも有効であることが分かる。

以上述べたように、(111)A段差基板上へのMBE成長技術はパターンサイズを小さくすることにより、量子ナノ構造が作製出来るだけでなく、キャリアおよび光学的閉じ込め構造が同時に形成されることからデバイス応用上有効である。

謝辞

本研究の推進にあたり常に御指導を賜りました、ATR光電波通信研究所 猪股英行社長、古濱洋治前社長（現郵政省通信総合研究所）、渡辺敏英室長、小林規矩男前室長（現NHK技研）に感謝いたします。また、有意義な議論をして頂いた武部敏彦主任研究員（現住友電気工業）、実験の遂行におきまして多大の協力を頂きました大西一研究員並びに通信デバイス研究室の皆様感謝致します。

文 献

- [1] メゾスコピック現象の基礎, オーム社 (難波 進編).
- [2] 応用物理 63(2) (1994) p.104., 応用電子物性分科会誌 vol.1, no.5 (1996).
- [3] R. Nötzel, N. N. Ledentsov, L. Däweritz, M. Hohenstein and K. Ploof: Phys. Rev. Lett. 67 (1991) 3812.
- [4] M. Shigeta, Y. Okano, H. Seto, H. Katahama, S. Nishine and K. Kobayashi: J. Cryst. Growth 111 (1991) 248.
- [5] M. Fujii, T. Yamamoto, M. Shigeta, T. Takebe, K. Kobayashi, S. Hiyamizu and I. Fujimoto: Surf. Sci. 267 (1992) 26.
- [6] T. Takebe, M. Fujii, T. Yamamoto, K. Fujita and K. Kobayashi: J. Cryst. Growth 127 (1993) 937.
- [7] J. M. Ballingall and C. E. C. Wood: Appl. Phys. Lett. 41 (1982) 947.
- [8] W. I. Wang, E. E. Mendez, T. S. Kuan and L. Esaki: Appl. Phys. Lett. 47 (1985) 826.
- [9] S. Subbanna, H. Kroemer and J. L. Merz: J. Appl. Phys. 59 (1986) 488.
- [10] D.L. Miller: Appl. Phys. Lett. 47 (1985) 1309.
- [11] H. P. Meier, R. F. Broom, P. W. Epperlein, E. van Gieson, Ch. Harder, H. Jackel, W. Walter and D. J. Webb: J. Vac. Sci. & Technol. B6 (1988) 692.
- [12] T. Yamamoto, M. Inai, T. Takebe and T. Watanabe: J. Vac. Sci. & Technol. A11 (1993) 631.
- [13] M. Fujii, T. Takebe, T. Yamamoto, M. Inai and K. Kobayashi: Superlattices and Microstructures 12 (1992) 167.
- [14] T. Takebe, M. Fujii, T. Yamamoto, K. Fujita and T. Watanabe: Proc. 20th Intern. Symp. on GaAs and Related Compounds, Freiburg, 1993, Inst. Phys. Conf. Ser. 136, Eds. H.S. Rupprecht and Weimann, Inst. Phys., Bristol (1994) p.577.
- [15] E. Kapon, M. C. Tamargo and D. M. Hwang: Appl. Phys. Lett. 50 (1987) 347.
- [16] T. Hayakawa, M. Kondo, T. Suyama, K. Takahashi, S. Yamamoto and T. Hijikata: Jpn. J. Appl. Phys. 26 (1987) L302.
- [17] K. Fujita, K. Nitatori, M. Hosoda, T. Egawa, Y. Niwano, T. Jimbo, M. Umeno and T. Watanabe: J. Cryst. Growth 146 (1995) 384.

本報告に関する発表論文

- [1] K. Fujita, H. Ohnishi, M. Hirai, K. Shimada and T. Watanabe: 'MBE growth of Submicron Carrier Confinement Structures on Patterned GaAs(111)A Substrates Using Only Silicon Dopant ', Solid-State Electronics (1996) (in press).

略語一覧

(1) AFM	---	<u>A</u> tom <u>i</u> c <u>F</u> orce <u>M</u> icroscopy
(2) CL	---	<u>C</u> athodo <u>L</u> uminescence
(3) MBE	---	<u>M</u> olecular <u>B</u> eam <u>E</u> pitaxy
(4) SEM	---	<u>S</u> canning <u>E</u> lectron <u>M</u> icroscopy
(5) SK	---	<u>S</u> transki <u>K</u> rastanov
(6) STM	---	<u>S</u> canning <u>T</u> unneling <u>M</u> icroscope
(7) SQW	---	<u>S</u> ingle <u>Q</u> uantum <u>W</u> ell
(8) UCF	---	<u>U</u> niversal <u>C</u> onductance <u>F</u> luctuations