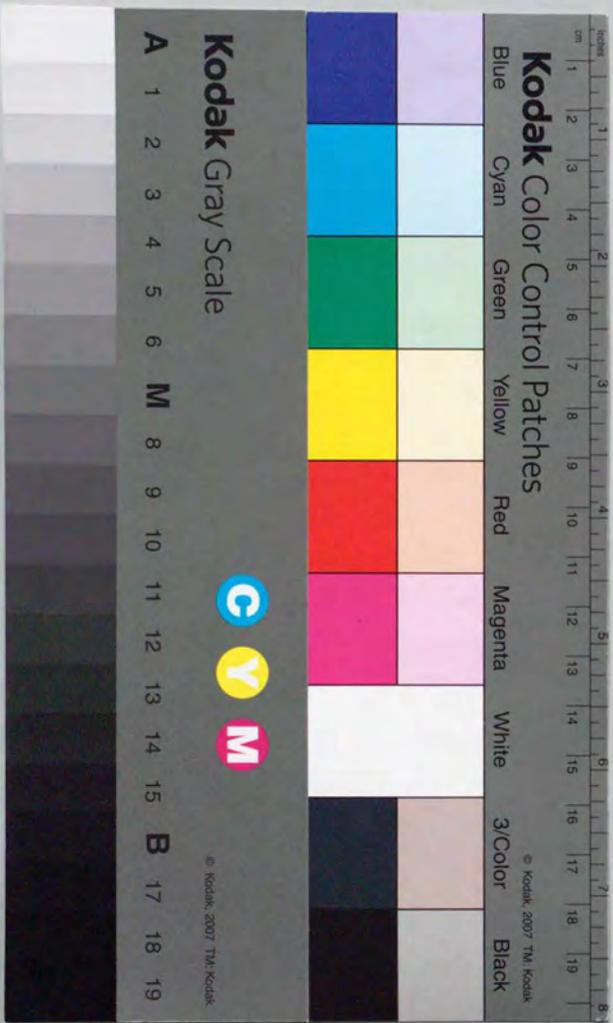


GaAs 系導波路型光集積デバイスと
その作製プロセスに関する研究

岡本 和也



GaAs系導波路型光集積デバイスと
その作製プロセスに関する研究

1996年

岡本和也

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 光集積回路の分類	1
1.1.2 モノリシックPICの必要性と歴史的経緯	3
1.2 本研究の目的と概要	6
参考文献	9
第2章 導波路型光集積デバイスの基礎的解析と設計	11
2.1 光導波路デバイスの設計	11
2.1.1 光導波路と導波路解析の概要	11
2.1.1.1 GaAs/AlGaAs系半導体光導波路構造の検討	11
2.1.1.2 各種導波路構造に於ける単一モード条件の設定	13
2.1.2 受動型導波路デバイスの基礎解析	13
2.1.2.1 直線導波路の収束性の検討	13
2.1.2.2 曲がり導波路の過剰損失の検討	16
2.1.3 能動型導波路デバイスの基礎解析	16
2.1.3.1 必要とされる解析項目	16
2.1.3.2 GaAs/AlGaAsヘテロ接合を考慮した電子デバイス解析	16
2.1.3.3 能動型導波路デバイスの設計	20
2.1.4 PICに求められる導波路デバイスと試作方針	25
2.2 DFBレーザにおける回折格子形状の解析	25
2.2.1 結合係数解析	26
2.2.2 計算	27
2.2.2.1 DFBレーザ構造	27
2.2.2.2 解析結果	27
2.2.3 結論	28
2.3 レーザ/導波路集積一体化デバイスの設計	31
2.3.1 レーザ/導波路結合解析	31
2.3.1.1 PICに要求される項目	31
2.3.1.2 EFC型PICの設計	33
2.4 まとめ(導波路型光集積デバイスに求められるプロセス研究)	42
参考文献	43
第3章 レーザホログラフィック露光技術の最適化に関する研究	45
3.1 はじめに	45
3.2 レーザホログラフィック露光を用いた高アスペクト比回折格子の解析	47
3.2.1 単層フォトレジストによる方法	47
3.2.2 ボジ型フォトレジストの特性	48
3.2.2.1 基本特性	48
3.2.2.2 実際のレジストの特性比較	51
3.2.3 パターン形状シミュレーション	56
3.2.3.1 計算方法	56
3.2.3.2 計算結果	58
3.2.3.2.1 レジスト内光強度分布計算	58
3.2.3.2.2 回折格子形状シミュレーション	59

3.3 レーザホログラフィック露光を用いた高アスペクト比回折格子の作製プロセス	66
3.3.1 露光システム	66
3.3.2 露光/現像結果	66
3.3.3 i線レジストの適用	67
3.3.3.1 露光実験・考察	67
3.4 まとめ	71
参考文献	72
第4章 微細周期回折格子の電子線描画に関する研究	73
4.1 はじめに	73
4.2 電子線描画装置の概要	74
4.2.1 装置概要	74
4.2.2 データ変換方式	74
4.3 描画プロセスの最適化	75
4.3.1 理論計算	75
4.3.1.1 Monte-Carlo法による電子線描画計算の概要	75
4.3.1.2 電子軌跡解析による近接効果の傾向の理解	80
4.3.1.3 GaAs基板上高微細パターン形成の加速電圧依存性	83
4.3.1.4 GaAs基板上高微細パターン形成の電子ビームスポット径依存性	85
4.4 レジストパラメータの最適化実験	85
4.4.1 化学増幅型ネガレジスト	85
4.4.2 レジストパラメータの最適化実験 (PEB温度低下に伴う γ 値向上の抽出)	87
4.5 描画特性	88
4.5.1 レジスト描画特性	88
4.5.2 反応性イオンエッチングによるGaAsへの転写特性評価	88
4.5.3 化学増幅型レジストの問題点とポジ型プラズマ耐性レジストへの展開	88
4.6 まとめ	93
参考文献	94
第5章 GaAsへの簡易型不純物ドーピング技術とその応用に関する研究	95
5.1 序論	95
5.2 シリカ拡散剤による、p型、n型不純物ドーピング技術	96
5.2.1 シリカ拡散剤と実験指針	96
5.2.2 基礎拡散条件の抽出	99
5.2.2.1 シリカ薄膜の解析	99
5.2.2.2 キャリア濃度プロファイル	102
5.2.2.3 活性化エネルギーの算出	105
5.2.3 拡散メカニズムの検討	106
5.2.3.1 補誤差関数による解析	108
5.2.3.2 Boltzmann-Matano modelによる解析	108
5.2.3.3 Weisberg-Blanc modelによる解析	109
5.2.3.4 拡散メカニズムの総括	112
5.2.4 拡散表面状態の検討	112
5.2.5 拡散層の電気的特性評価	117
5.2.5.1 オーミック特性評価	117
5.2.5.2 横方向拡散長とpn接合特性評価	119
5.2.5.3 横方向拡散に関する一考察	121
5.2.6 急速アニール (RTA) 法によるドーピング特性と横注入レーザの試作	123

5.2.6.1 RTAによる不純物ドーピング特性	123
5.2.6.2 TJSレーザ試作プロセス	123
5.2.7 5.2節のまとめ	126
5.3 シリカ薄膜の多重量子井戸の無秩序化への応用	127
5.3.1 はじめに	127
5.3.2 量子井戸の無秩序化の方法	128
5.3.3 量子井戸の無秩序化プロセスとその評価	128
5.3.3.1 PL測定、多結晶X線回折法による量子井戸の無秩序化の評価とポテンシャル変化の定量化	129
5.3.3.2 空間分解顕微PLによる、無秩序化領域の横方向拡散状態評価	132
5.3.4 5.3節のまとめ	132
5.4 第5章まとめ	134
参考文献	134
第6章 GaAs系導波路型光集積デバイスの作製プロセスと試作評価	136
6.1 はじめに	136
6.2 低損失単一モード導波路作製のためのプロセス研究	136
6.2.1 電子線描画マスク作製に関する検討	136
6.2.2 埋め込み型単一モード導波路作製プロセス	138
6.2.2.1 硫酸系エッチャントによる基板処理法の検討	138
6.2.2.2 反応性イオンエッチング法によるGaAsエッチング条件の最適化	138
6.2.2.3 埋め込み型導波路の作製プロセス	141
6.2.2.3.1 MBE成長の基本特性	141
6.2.2.3.2 埋め込み型導波路の試作	144
6.3 導波路デバイスの試作評価	147
6.3.1 受動型導波路デバイスの試作	147
6.3.1.1 S-bend単一モード導波路の分岐角評価	147
6.3.1.2 TE/TMモードスプリッタの試作評価	148
6.3.2 能動型導波路デバイスの試作	150
6.3.2.1 連続拡散法による横型pinダイオードの試作とショットキーダイオードとの特性比較	153
6.3.2.2 位相シフタ、モードコンバータ試作評価	153
6.4 FPレーザ/単一モード導波路デバイスの集積化プロセス	156
6.4.1 FP型EFC-PICの作製プロセス設計	156
6.4.2 FP型EFC-PICのプロセス評価	156
6.4.3 FP型EFC-PICの基本特性評価	161
6.4.4 FP型EFC-PICにおける複合共振器構造に起因する縦モード解析	164
6.4.4.1 解析方法	165
6.4.4.2 解析結果	166
6.5 DFBレーザ/Y分岐単一モード導波路の集積化プロセス	167
6.5.1 DFB型EFC-PICの作製プロセス工程	167
6.5.1.1 EB描画装置のアライメント手法の工夫	167
6.5.1.2 試作プロセスとデバイス評価	169
6.5.1.3 前進波と後進波との結合を含めた解析による一考察	171
6.5.2 まとめ	177
参考文献	178
第7章 結論	180
本論文に関する研究発表	184
謝辞	187

第1章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 光集積回路の分類

1970年頃、S.E. Miller¹⁾及びP.K. Tien²⁾によって提案された概念である「集積光学 (Integrated Optics)」は四半世紀程度経た現在においては、様々な技術革新により多様な形態の「デバイス」として研究開発が進められている。当初の提案は、従来の光学定盤上に置かれたレンズ、ミラー等の光学部品により構成した「バルク光学系」を、誘電体系の光導波路を用いて光回路を組むことで「導波路光学系」を構成し、小型軽量化、安定化を図ろうとする、いわゆる光集積回路 (光IC) の概念であった。この時代に、Fig.1.1に示されるような光導波路並びに方向性結合器や位相変調器という、光デバイスの具体的なコンセプトが明示されていたことは驚嘆に値する。又、一方では半導体基板を用いた光素子と電子素子とのモノリシック集積に関する提案がA. Yariv³⁾らによってなされた。かれらは光素子として半導体レーザ (LD)、電子素子としてGunnダイオードなどを半絶縁基板上へ集積することを達成している。現在の光ICは両者の流れをく

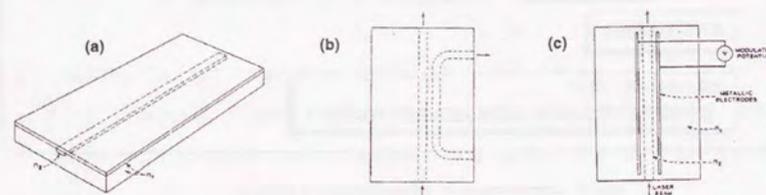


Fig.1.1. Conceptual schematics of optical integrated circuits by S.E. Miller. ¹⁾
(a) straight waveguide, (b) directional coupler and (c) phase shifter.

み、Fig.1.2のように分類できる。すなわち、一方が前者の流れを汲む導波路型光IC⁽¹⁾であり、OIC (Optical Integrated Circuit) もしくはOOIC (Opto-Optic Integrated Circuit) と称されるもの、他方が後者の流れを汲む光電子集積回路、即ち、OEIC (Opto-Electronic Integrated Circuit) と称されるものである。「広義の光IC」という概念に関して、国内においては後者の「OEIC」の開発が先行してきたものと考えられるが、その背景には1979年度から開始された通産省の主催する大型プロジェクト「光応用計測制御システムの研究開発」がある。そこではLANシステムのノードの高性能化、すなわち光ファイバ通信における「ワンチップ中継器」の実現が目的とされ、1986年の終了時まで最高50素子程度を集積したGaAs系OEICが開発された。一方、前者の「OIC」については2つの形態が考えられる。ハイブリッド型OICとしては、優れた電気光学効果を有するLiNbO₃ (LN) 基板を用いた系と光検出器等も集積可能なSiO₂/Si基板、もしくはガラス(石英)基板を用いた系とが考えられ、いずれも長い研究経緯を有している。ハイブリッド型光計測用OICとしては、LN系干渉測長計OIC⁽²⁾やOICの特徴的な光学要素である「集光グレーティングカップラ(FGC: Focusing Grating Coupler)」及び光検出器を集積した、SiO₂/Si系光ディスクピックアップOIC⁽³⁾がその代表例としてあげられる。もう一方の「モノリシック型OIC: PIC (Photonic Integrated Circuit)」はハイブリッド型の短所を凌駕する最終的な形態とも考えられていたにも拘わらず、これまで立ち遅れていたのは、光導波路自身の特性の問題(伝搬損失の点)や光素子間(特にレーザ/導波路間)の接続技術等の難しさに大きく起因している。しかしながら、最近では結晶成長技術の充実や微細加工技術の進歩により大幅に躍進し、光ヘテロダイン検波用PIC⁽⁴⁾など様々なデバイスが報告されてきている。

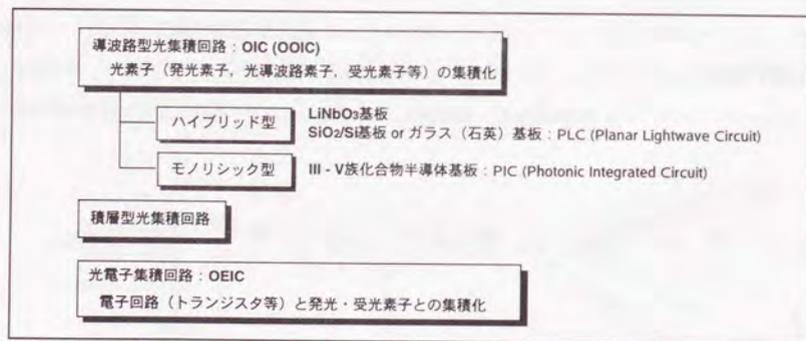


Fig.1.2. Classification of integrated optical devices.

⁽¹⁾ 導波路型光IC (OIC) : 基板面に沿う方向に光が導波路により導かれる形態であり、基板面に垂直な方向に入出力光が空間伝搬で導かれる積層型光IC若しくは面垂直型光ICとは本質的に異なる。

1.1.2 モノリシック型OIC (PIC) の必要性和歴史的経緯

現行の光計測システムにおいては、前述のように光学定盤上にガスレーザ又は半導体レーザ等の光源、レンズ、ミラー等の光学部品、及びフォトダイオード等の光検出器を組み合わせる光学系を構成し、経時的な安定性をも十分に配慮した精密な光軸調整が必要とされる。この場合、多大な労力と時間とが要求され、要素となる基本光学系だけでも何らかの手段により緩和されれば、システム構築において極めて多大な技術革新にも繋がるものと考えられる。「OIC」はその様な位置づけの中にある最も重要な技術の一つといえ、前節にも述べたような開発事例があるものの、未だ作製プロセス技術を中心として未確立な領域が多い。

「ハイブリッド型OIC」は光学系の一部の集積化という点では極めて有用であるが、様々な問題点も有している。その本質は、誘電体系においては光源を中心とした光学部品が、必然的に外付けとなることにある。すなわち、光ファイバと導波路との接続においては光軸調整に困難が伴い、また使用する接着用樹脂素材の環境安定性も含め長期信頼性においても疑問がある。さらに、LN系においては光損傷、DCドリフトといった、結晶そのものに起因する根本的な問題点も存在する。一方、光検出器が集積可能なSiO₂/Si系においては、一般的なLSIプロセスが利用出来るためデバイス作製が容易であること、また比較的低損失な導波路の作製が可能といった特長を有するが、導波路への能動作用の点で劣る。石英ガラス系においては熱光学 (TO) 効果を適用した通信用OICの優れた報告⁽⁵⁾があるが、この場合、極めて近接する導波路間では熱的クロストークの発生など様々な問題も考えられる。

以上の点からも明らかなように、光源/導波路デバイス/光検出器等を集積一体化した「モノリシック型OIC: PIC」が光計測分野、光通信分野等で最も必要とされている「キーデバイス」の一つであると考えられる。この場合、直接遷移型III-V族化合物半導体基板を用いることで以下のような特徴を得ることができる。

- 超小型/軽量化。
- 小型化による機能の高帯域化/高速化。
- 光軸アライメント不要、アセンブリの簡略化等に伴う高信頼性。
- 高い量産性による低価格化。
- 導波路特有の現象を利用した新機能デバイス

及び電子デバイスの集積による多機能化。

これらの具体的な背景として、次の3項目があげられる。

- 1) 発光部、光導波路部、光制御部(強度変調、位相変調、偏波モード変換、増幅など)、光検出など従来のバルク光学系部品は、ほぼ全て導波路光学系部品に置き換え集積することができる (Table 1.1を参照)。
- 2) 光制御効果の性能指数が高く、高性能化に有利である。実際、GaAsの1次電気光学効果の性能指数(γ係数)は比較的高い⁽⁶⁾。更に、pin型埋め込みダブルヘテロ接合構造を形成すれば、μmオーダーの導波領域に光波を閉じ込め、かつ有効に制御電界を与えることが可能となり、結果的に低電圧化、

Table1.1. Comparison of optical elements.

Element	Conventional Optics	Guided wave optics
Light source / detector	Laser	Monolithically integrated laser diode
	Photo detector	Monolithically integrated photodiode
Passive components	Half mirror	Y-branch waveguide, 3dB coupler
	Mirror	Evaporated edge mirror
	Polarizer	Metal cladding (TE mode)
	Polarization beam splitter	TE/TM mode splitter
Active components	Phase shifter	Guided phase shifter (EO effect)
	Wave plate	TE/TM mode converter

高速化に寄与できる。

- 3) 各種ダイオード、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT)、高電子移動度トランジスタ (HEMT) 等の電子デバイスをも集積可能である。

では、これまでこの「PIC」はどのような経緯で開発が進行してきたのであろうか。先述のS.E.Millerにより発表されたOICのコンセプトをもとに、当初開発が進められた材料はLN、ガラス、高分子であった。初期は導波特性の基礎的な確認に研究が集中し、導波路として適する素材の選択、プロセス技術の開発に重点的に注力された。一方、化合物半導体に関しては、GaAs基板に対し不純物ドーピングを施して屈折率差を形成する、いわゆるホモ接合型構造から研究が始まったため、本質的に導波路の低損失化に至らなかった。このことがPICの発展の障害になったことは自明であるが、その後、結晶成長技術の大幅な進歩に伴い、GaAsと格子定数の近いAlGaAs間のヘテロ接合型の適用が可能となり躍進のtriggerとなる。勿論、この背景にはdiscreteデバイスである半導体レーザーの開発も大きく寄与している。それが1969年のHayashiらのsingle-heterojunction (SH) 及びdouble-heterojunction (DH) レーザの開発^{11,12}である。このGaAs/AlGaAs系ヘテロ接合型導波路デバイスの初期には、スラブ導波路へのUV励起光照射によるfree carrierを用いた10.6 μ m帯での変調器、偏向器の試作¹³、1 μ m帯でのリブ型チャンネル導波路の伝搬特性¹⁴、及び低損失化¹⁵に関する基礎的な報告がある。これらはいずれも液相エピタキシャル (LPE: Liquid Phase Epitaxy) 成長により試作されたものであったが、その後、様々な結晶成長法を用いた低損失化に関する研究^{16,18}が活発化する。更に、化合物系導波路において、曲がり導波路、方向性結合器等のチャンネル導波路型デバイスの開発が進められ、その過剰損失が比較的強く抑制できることから、この系においてもPICが形成可能であることが明らかになった。

さて、次に到来する大きな分岐点が化合物材料の変化であった。これは光ファイバ通信分野からのニーズを反映したものである。光ファイバとしては、波長分散が最小で伝送帯域が最大となる1.3 μ m帯、並びにレイリー散乱及びSiO₂吸収から決定される、伝送損失が最も小さい1.55 μ m帯の各波長帯の石英系ガラス

が多用されている。そのため、発光/受光、導波路を全て一体化する上で好適なInGaAsP/InP系材料を適用することが主流となった。さらには、GaAs/AlGaAs系材料におけるAlGaAs系結晶成長時の酸化の問題が回避できる点、後述するDFBレーザーの回折格子周期の微細加工性が緩和される点など、プロセスの簡便性もこの材料系への移行を加速させたとも考えられる。

しかしながら、PICを光計測へ適用することを考慮した場合、波長は短い方が好ましいといえる。これは干渉測長における方向弁別を含んだ基本分解能は $\lambda/8$ (λ :光源波長, Michelson型干渉計) であり短波長ほど分解能が向上するとともに、可視域の光を適用できるのであればPIC以外の光学系アライメントが極めて容易になるためである。また、光応用計測で重要な波長基準光源に関しても、従来広く認められている吸収線源である、Rb、Cs蒸気の吸収線 (各780nm, 852nm) で発振する短波長高度半導体レーザーの要求もある。このような中で、筆者は短波長光計測用PICの作製に好適なGaAs/AlGaAs系III-V族半導体基板を用いた光源、光検出器、導波路デバイスを集積一体化した基礎的な光デバイスの開発を目指し、必要となるプロセス技術の確立に注目した。半導体レーザー単体の素子と異なり、PICにおいてはその素子長は一般に数mm以上となりうるため、広い素子領域において如何に再現性のよいプロセスを確立するかが重要となる。また、集積化の課題は、性能を損なうことなく集積する光デバイス同志の整合を作製プロセスにおいて如何にとるかにある。Si系LSIにおいては、光検出器、アンプ、読み出し回路、その他の電子デバイスを比較的容易に集積できるが、これはSi基板をベースにして永年培われてきた「拡散技術」と「リソグラフィ/エッチング技術」を巧く組み合わせることが比較的簡便に達成できることに他ならない。

では、これまで報告されている広義のPICとしては、どのようなものがあるのか。ここでは機能による分類¹⁹を行ってみる。

(分類1) 発光機能を重点においたデバイス

- 1-1. 分布反射型 (DBR: Distributed Bragg Reflector) レーザ²⁰: これも広義の意味でPICに含まれよう。
 1-2. 利得結合型DFBレーザー²¹: PICに関連する要素技術として位置づけられる。吸収性回折格子型においては、レーザー活性層直上に周期的な吸収領域を配し、正味の利得係数が軸方向に周期的に変化させている。この場合、良質な単一モードが入/4シフト構造の導入なしで達成できる点で有意義であると共に、端部反射戻り光耐性があるなどのPICにとって好都合な光源といえる。本研究で開発するPICにおいては、通常の屈折率結合型DFBレーザーを採用しているが、将来の高密度集積化PICにおいては採用すべき光源となりえよう。
 1-3. 波長可変レーザー^{22,26}: 波長多重分割 (WDM) 通信への応用を睨んだ光源であり、様々な形態がある。
 1-4. DFBレーザー/光増幅器集積デバイス²⁷

(分類2) 光スイッチ機能を重点をおいたデバイス

- 2-1. DFBレーザー/光変調器集積デバイス: 幹線系光通信では高速、長距離化に伴い半導体レーザーの外部変

調方式が採用されようとしている。そのための集積化光源として、ほぼ実用の域に達した代表的なデバイス^{28,29)}である。最近では、面積依存選択MOVPE成長により直接結合を1回の成長で簡便に形成可能^{30,31)}となり、研究開発が加速している。

2-2. 偏波無依存変調器：量子閉じ込めシュタルク効果 (QCSE) 利用による多重量子井戸 (MQW) 型開発例がある。量子井戸内のポテンシャル分布を放物線型にする試み³²⁾、量子井戸層を層に沿う方向に伸張した歪み量子井戸を適用する試み³³⁾、及び両者を併用する試みがある。

2-3. $N \times N$ マトリクス光スイッチ：現在、半導体系では 8×8 が最大規模であり³⁴⁾、光交換方式では最も重要なデバイスである。

(分類3) 合分波機能に重点をおいたデバイス

3-1. WDMデマルチプレクサ：スラブ導波路上に回折格子、光検出器等を集積³⁵⁾したデバイスが試作されている。

3-2. 多モード干渉 (MMI) カブラ：モード間の干渉パターンを利用した分波デバイス³⁶⁾の報告がある。

(分類4) トータルなシステム機能に重点をおいたデバイス

4-1. コヒーレント光通信用レーザ/受信器デバイス^{7,8,37,38)}

上記分類の中の、(分類4) 4.1「コヒーレント光通信用レーザ/受信器デバイス」において、最も重要な「レーザ/導波路デバイスのモノリシック集積化」については、基本的には多数回のエッチングと結晶成長の繰り返しによる複雑なプロセス工程を経て作製される。従って、実用化にあたっては各デバイスごとのパラメータ (層構造等) の整合をとり、かつ安定したプロセスの確立が必要となる。

1.2 本研究の目的と概要

以上の背景を考慮し、本研究の目的は主として光計測分野で必要とされる「GaAs/AIGaAs系PIC」の要素デバイスの開発にある。その中でも特に、実用化を目指した「作製プロセス」に関する研究を中心に行う。最終的には、基礎的な理論をベースにし、これまで報告例のない様々な作製プロセスを開発し、さらにシンプルなプロセスで所期の仕様を満足する「PIC」の開発を目指す。

さて、本論文は7章より構成されている。その流れをFig.1.3に示す。

まず、「第2章」において試作するPICに関する基礎的な設計/解析を行い、開発すべきその形態を明らかにし、さらに必要とされるプロセス研究項目を導出する。具体的には、単一モードを満足する導波路パラメータを設定した後、ビーム伝搬法 (BPM: Beam Propagation Method) 等を用いて代表的なデバイスの

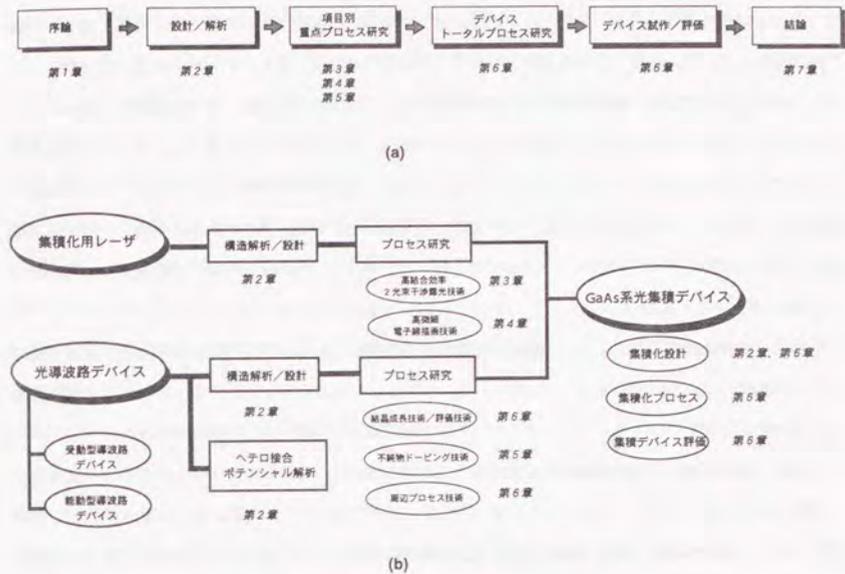


Fig.1.3. Research flows. (a) outline, (b) details.

特性を明らかにする。また、ドリフト拡散モデルを用いた解析をGaAs/AIGaAsヘテロ界面の効果をも考慮して行い、実際のPIC構造における空乏層制御電界ポテンシャル、電流密度ベクトル等を求める。また、DFBレーザの回折格子形状と光結合係数との関係を計算し、高効率単一縦モード発振のための最適な形状を導出する。さらに、レーザ/導波路間の光結合に関しての検討を行い、簡便なプロセスで高効率に結合する方式を提案/解析し、全体的なPICの描像を明らかにする。最後に、求められる重要な開発プロセス項目を抽出し列挙する。

「第3章」では、重点プロセス研究の第一として、単色性に優れたDFBレーザ作製の要といえる「レーザホログラフィック露光 (2光束干渉露光) 技術の最適化」に着目し、これまでになく高いコントラストを有し、かつ広いプロセス許容幅を与える露光プロセスに関し、フォトリソの材料面からのアプローチを試みる。実際には、高解像力とプラズマ耐性のある「Novolak系ポジレジスト」をベースにレジストの光学パラメータを見直し、最適レジストの見通しをつける。次に、コヒーレント結像に関する理論解析を位相シフト光学系を用いて行い、各レジストの露光形状をシミュレートする。最後に、実際の露光実験を行い理論解析との整合性を明らかにする。

次に、重点プロセス研究の第二として、「第4章」においては、前章と同様の回折格子形成に関し「電

子線描画装置を用いた局所的な回折格子描画」に関する検討を行う。ここでは、最近開発が活発化してきた「化学増幅型ネガレジスト」を用いたプロセスについて中心に報告する。近接効果が顕著である化合物半導体基板上で、 $0.2\mu\text{m}$ 以下の短周期かつレーザの共振器程度の作用長を有する回折格子形成に関し、始めに本研究で適用する電子線描画装置（以下EB描画装置）の概要を述べた後、化学増幅型ネガ型レジストAZ-PN100（ヘキスト製）を用いて単層プロセスでの検討を試みた結果について述べる。なお、プロセス構築にあたっては、一般的な「PMMA系ポジレジスト」を用いた描画特性の解析を行いEB描画方法に関する最適条件の検討を、Si基板を用いた場合との比較を交えながら述べる。次に、新しく開発された高感度ポジ型プラズマ耐性レジスト「ZEP520（日本ゼオン製）」を用いた同様の微細描画条件を抽出し、第6章で述べるPIC開発への初段階とする。

重点プロセス研究の第三として、「第5章」では、PICの開発のみならずGaAs系を中心とするIII-V族化合物半導体デバイス作製に必要な「不純物ドーピング技術」を検討する。ここでは、複雑かつ高価な装置を必要とせずに簡便に行える、スピンオンコート法で形成したシリカ（ SiO_2 ）薄膜を用いた、ブリデポジション/ドライブイン一体型の「開管式拡散法」の適用を試みる。薄膜の解析からデバイスへの適用性まで細部にわたる検討を行い、実用化への見通しを得ることを目的とする。実際には、p型不純物としては亜鉛（Zn）、n型不純物には錫（Sn）を適用し、始めに両者のキャリア濃度プロファイルからその基礎的ドーピング特性を把握し、次にその拡散メカニズムを検討する。さらに、拡散表面状態の観察、及び拡散層の電気的特性評価、発光デバイスへの適用性についても言及し、III-V族化合物半導体への不純物ドーピング手法として本方法の有用性を考察した結果について報告する。また、このシリカ薄膜を適用した多重量子井戸の無秩序化に関する検討も加える。

次に、「第6章」では、GaAs系PICに関して受動型/能動型単モード導波路デバイス、及びレーザを集積したデバイスについて、その作製プロセス及び素子の基本特性について検討を行う。「第2章」での設計/解析及び「第3章」から「第5章」までの基礎プロセス研究成果をもとに、ここではまず、単モード導波路デバイスについてCAD設計パターンの最適化を行った後、必要とされる基礎的なプロセス工程の最適化を行う。次に、受動型並びに能動型導波路デバイスの試作評価を行い、その基本特性を明らかにし、レーザとの集積化への目処を立てる。さらに、これまでのプロセス研究の集大成として、半導体レーザと単モード導波路との結合方式について詳細な検討を行い、レーザ/導波路を一体化したPICの試作評価を行う。基本コンセプトを“プロセスの簡便性”と“デバイス特性の向上”におき、結晶成長回数を抑制しかつ導波路伝搬損失を劣化させることのない、新たな構造を提案し試作した結果について述べる。ここではまず、「第2章」での解析結果をもとにFP（Fabry-Perot）レーザ集積化PICのプロセス設計について述べ、新たに実施したプロセス開発結果についても触れる。その後、DFB（Distributed Feedback）レーザ集積化PICへと展開させる。なお、ここでは単モードY分岐導波路、TE/TMモードスプリッタ及び光検出器の集積化について検討するが、本構成は様々な素子を集積したトータルな機能デバイスへの展開も可能であ

る。

最後に、「第7章」ではこれまで得られた結果について総括する。

参考文献

- 1) S. E. Miller: Bell Sys. Tech. J. **48** (1969) 2059.
- 2) S. E. Miller: J. Quantum. Electron. **QE-8** (1972) 199.
- 3) P. K. Tien: Appl. Opt. **11** (1971) 2395.
- 4) S. Somekh and A. Yariv: Proc. Conf. Int. Telemetry 1972, p.407.
- 5) 水内公典, 戸田裕之, 春名正光, 西原浩: 信学会光・量エレ研究会資料, OQE86-146 (1986).
[in Japanese]
- 6) S. Ura, T. Suhara and H. Nishihara: Appl. Opt. **26** (1987) 4777.
- 7) H. Takeuchi, K. Kasaya, Y. Kondo, H. Yasaka, K. Oe and Y. Imamura: IEEE Photon. Technol. Lett. **1** (1989) 398.
- 8) R. Kaiser, F. Fidorra, D. Trommer, S. Malchow, P. Albrecht, D. Franke, H. Heidrich, W. Passenberg, H. Schroeter-Janßen, R. Stenzel, W. Rehbin: Conf. Dig. 14th IEEE Int. Semiconductor Laser Conf. 1994, p.30.
- 9) K. Takiguchi, K. Jinguji and Y. Ohmori: Tech. Dig. 10th Int. Conf. Integrated Optics and Optical Fibre Communication 1995, Hong Kong, paper ThB1-3.
- 10) N. Suzuki and K. Tada: Jpn. J. Appl. Phys. Part **123** (1984) 1011.
- 11) I. Hayashi, M. B. Panish and P. W. Foy: IEEE J. Quantum Electron. **QE-5** (1969) 211.
- 12) H. Kressel and H. Nelson: RCA Rev. **30** (1969) 106.
- 13) J. H. McFee, R. E. Nahory, M. A. Pollack and R. A. Logan: Appl. Phys. Lett. **23** (1973) 571.
- 14) F. K. Reinhart, R. A. Logan and T. P. Lee: Appl. Phys. Lett. **24** (1974) 270.
- 15) S. M. Jensen, M. K. Barnoski, R. G. Hunsperger and G. S. Kamath: J. Appl. Phys. **46** (1975) 3547.
- 16) J. L. Merz and A. Y. Cho: Appl. Phys. Lett. **28** (1976) 456.
- 17) F. J. Leonberger, C. O. Bozler, R. W. McClelland and I. Melngailis: Appl. Phys. Lett. **38** (1981) 313.
- 18) K. Hiruma, H. Inoue, K. Ishida and H. Matsumura: Appl. Phys. Lett. **47** (1985) 186.
- 19) 多田邦雄, 中野義昭: 信学論 (C-1) **J77-C-1** (1994) 238. [in Japanese]
- 20) Y. Abe, K. Kishino, Y. Suematsu and S. Arai: Electron. Lett. **17** (1981) 945.
- 21) Y. Nakano, H. L. Cao, K. Tada, Y. Luo, M. Dobashi and H. Hosomatsu: Jpn. J. Appl. Phys. Part **132** (1993) 825.
- 22) W. T. Tsang, R. M. Kapre, R. A. Logan and T. Tanbun-Ek: Tech. Dig. 6th IEEE Lasers and Electro-Optics Soc.

Annual Meeting, 1993, paper SCL10.5.

- 23) S. Illek, W. Thulke, C. Schanen, H. Lang and M. -C. Amman: Electron. Lett. **26** (1990) 46.
- 24) S. Sakano, T. Tsuchiya, M. Suzuki, S. Kitajima and N. Chinone: IEEE Photon Technol. Lett. **4** (1992) 321.
- 25) N. Chen, Y. Nakano, K. Tada, K. Okamoto, G. Mortheir and R. Baets: Tech. Dig. 7th IEEE Lasers and Electro-Optics Soc. Annual Meeting, 1994, paper SL1.4.
- 26) Y. Tohmori, Y. Yoshikuni, H. Ishii, F. Kano, T. Tamamura and Y. Kondo: Electron. Lett. **29** (1993) 352.
- 27) Y. Nakano, Y. Hayashi, N. Chen, Y. Sakaguchi and K. Tada: Jpn. J. Appl. Phys. Part 2 **29** (1993) L2430.
- 28) K. Sato, K. Wakita, I. Kotaki, Y. Kondo and M. Yamamoto: Proc. 19th European Conf. on Optical Communication (ECOC), 1993, paper WeC7.2.
- 29) H. Ishikawa, H. Soda, T. Watanabe, H. Sudo and K. Sato: Conf. Dig. 12th IEEE Int. Semiconductor laser Conf., 1990, paper K-6.
- 30) T. Kato, T. Sasaki, K. Komatsu and I. Mito: Electron. Lett. **28** (1992) 153.
- 31) M. Aoki, M. Suzuki, M. Takahashi, H. Sano, T. Ido, T. Kawano and A. Takai: Electron. Lett. **28** (1992) 1157.
- 32) K. Tada, S. Nishimura and T. Ishikawa: Appl. Phys. Lett. **59** (1991) 2778.
- 33) H. W. Wan, T. C. Chong and S. J. Chua: IEEE Photon. Technol. Lett. **3** (1991) 730.
- 34) K. Hamamoto, T. Anan, K. Komatsu, M. Sugimoto and I. Mito: Electron. Lett. **28** (1992) 441.
- 35) S. M. Ojha, G. H. B. Thompson, C. G. Cureton, C. B. Rogers, S. J. Clements, M. Asghari and I. H. White: Electron. Lett. **29** (1993) 805.
- 36) L. B. Soldano, F. B. Veerman, M. K. Smit, B. H. Verbeek, A. H. Dubost and E. C. M. Pennings: Proc. 17th European Conf. on Optical Communication (ECOC)/ 8th Int. Conf. Integrated Optics and Optical Fibre Communication, 1993, paper TuB5-2.
- 37) T. L. Koch, U. Koren, R. P. Gnall, F. S. Choa, F. Hernandez-Gill, C. A. Burrus, M. G. Young, M. Oron and B. I. Miller: Electron. Lett. **25** (1989) 1621.
- 38) T. L. Koch and U. Koren: IEEE J. Lightwave Technol. **8** (1990) 274.

第2章 導波路型光集積デバイスの基礎的解析と設計

本章では化合物半導体系導波路型光集積デバイス (PIC: Photonic Integrated Circuit) に関する基礎的な設計/解析を行い、開発すべきPICの形態を明らかにし、さらに必要とされるプロセス研究項目を導出する。設計/解析の手法に関する詳細な記述は避け、「単一モード導波路デバイス」に関する項目、「DFBレーザのための回折格子形状」に関する項目、「集積化デバイス構造」に関する項目、以上の3点について詳細に述べる。

2.1 光導波路デバイスの設計

2.1.1 光導波路と導波路解析の概要

2.1.1.1 GaAs/AlGaAs系半導体光導波路構造の検討

OICの一形態であるLiNbO₃及びSiO₂/Si基板を用いた場合、導波路のコア層について前者はTi拡散若しくはプロトン交換、後者はガラス系薄膜の堆積により形成される。一方、化合物半導体は、導波路デバイス以外に発光素子、受光素子をモリシックに集積できる特徴を有し、基板材料上に半導体単結晶をエピタキシャル成長させる方法が一般的である。この場合、コア層/クラッド層の屈折率差形成のために、Table 2.1に示されるような2種の方法に分類できる。ホモ接合型は半導体材料の分極率の変化、即ちプラズマ効果による屈折率の差異を利用するものである。この場合、キャリア濃度増加に伴う屈折率の減少は有効質量の小さい電子

Table 2.1. Classification of semiconductor waveguides.

構造	基板/エピ成長層	導波路形成
ホモ接合型	同種	プラズマ効果 (高キャリア濃度: 低屈折率)
ヘテロ接合型	異種	半導体材料固有の屈折率差

によりほぼ決定され、屈折率変化量 δn は 10^3 オーダーであり、いわゆる高 Δ 導波路 (Δ : 比屈折率差) には適用できない。さらに、クラッド層が高キャリア濃度である以上、本研究の目的の一つである低伝搬損失な光導波路の形成も望めない。もう一方のヘテロ接合型はIII-V族混晶の特性を活かしたもので、格子定数がほぼ一致するGaAs/AlAs系においては比較的容易に達成できる。

次に、このヘテロ接合型光導波路構造の分類をFig.2.1に示す。各構造の呼称は様々存在するが、本論文では一般的で明解な同図のように定めることとする。

(a)リッジ型 (Ridge type): 結晶成長、エッチングとも一回で達成でき、最もシンプルな構造である。しかしながら、光波は横方向に強く閉じ込められるため、屈折率の制御性に著しく欠ける。さらに、エッチングによる表面性状の影響を受けやすく、低い伝搬損失は望めない。コア側部に僅かな残存層がある場合をリブ型 (Rib type) と称する場合もあるが、同様である。

(b)装荷型 (Strip-loaded type): 半導体系光導波路で最も多用される構造である。リブ残存層による屈折率の変動が生じ、単一モード条件の設定がやや困難であること、さらに導波光のエバネッセント波がコア側部にも広がるため、伝搬損失がエッチング表面性状に影響することも考えられる。しかしながら、作製面、集積化面において最も優れている構造と考えられ、第6章のPIC作製においては本構造を適用することとした。

(c)埋め込み型 (Buried type): 導波路の低伝搬損失の点、集積化の点、単一モード許容幅の点で優れた構造といえる。但し、導波路コア部を再度埋め込むため、必然的に結晶成長回数が一つ増加する。本論文の第6章では、GaAs/AlGaAs系においてこれまで報告例のない、この埋め込み構造を利用した「モード干渉型デバイス」を試作した。レーザその他のデバイスと全くstand-aloneで構成できる点でも特徴的である。

本章では、導波路デバイスの解析にあたり、最も簡便な解析の近似解法である等価屈折率法¹⁾、マーカートリ法²⁾、多層導波路解析には転送行列法³⁾、光波の実デバイスレベルでの挙動解析には数値解法の一つであるBPM (Beam Propagation Method)⁴⁾法を適用し、単一モード条件の導出を行うとともに、様々な導波路特性の検討を行った。

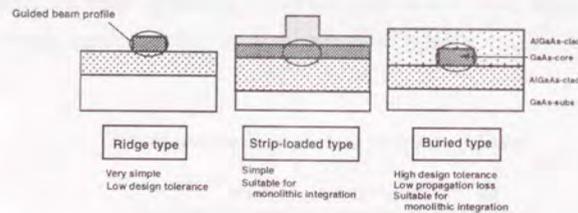


Fig.2.1. Structure of semiconductor waveguides.

2.1.1.2 各種導波路構造における単一モード条件の設定

GaAs/AlGaAs系導波路解析の基本となるのは、使用する光波長での混晶材料の屈折率である⁵⁾。AlGaAsの屈折率に関しては理論的、実験的に数多くの報告がある⁷⁻¹⁰⁾が、ここでは「Sellmeierの分散式」から導出¹⁾することを試みた。第6章に示すレーザ/導波路のモノリシック集積デバイスにおいては、レーザの発振波長の制限から0.8 μm 帯、すなわち材料の吸収端近傍の議論が必要とされるが、導波路デバイス単体の試作においてはNd:YAGレーザの波長帯 (1.064 μm) での評価を考え、始めにこの波長での設計解析を行うこととした。さて、光導波路の構築にあたり必要とされる基礎概念は「単一モード」である。複数の導波モードが伝搬可能な「多モード導波路」を用いてPICを構成した場合、導波路の内部でモード干渉、若くは外的な摂動によるモード変換等が発生し、デバイスの特性に悪影響を与える。従って、「単一モード」を満足するプロセス許容幅の広い「光導波路」の形成が必要とされる。前節で示したリッジ型と埋め込み型の単一モード条件について等価屈折率法により得られた結果を、スラブ導波路膜厚と導波路幅との関係としてFig.2.2に示す。同図(c)に示すように、(a)、(b)において実線若しくは破線で囲まれた部分が単一モード条件を満足する導波路のコア厚とコア幅である。マスクアライナでのパターン解像線幅を、再現性を考慮して2 μm と仮定した場合のコア膜厚許容幅 (allowance) を図中に示してあるが、リッジ型の0.06 μm に比して埋め込み型 (AlGaAs_x0.35の場合) は5倍近い0.28 μm という許容幅を有し、作製プロセス上有利なことが分かる (TEモード光)。また、埋め込み型導波路は、1) 1回目結晶成長の組成評価を行うことで、2回目成長時に単一モードを得るための結晶組成等を tuning できる点、2) 2回目成長にLPE (液相エピタキシャル) 成長法を適用することにより、エッチング端面の凹凸や損傷をメルトバックにより除去してくれる点、などの優れた特徴も有する。一方、装荷型は残存層厚 (リブオフセット量) に大きく依存するが、エッチング量の精密制御が可能であれば、作製の簡便性を考慮すると十分に適用できる。

以上のことを加味し、本研究ではまずGaAs系で報告例の少ない「埋め込み型単一モード導波路」の基本設計を行い、各種デバイスの試作評価を行う。その後、装荷型導波路に関する基本解析を実施し、PICへと展開させる。本節では、導波路デバイスの基礎的解析について受動型、能動型を個別に検討した結果を示し、他のデバイス試作結果に関しては第6章にて述べることとする。

2.1.2 受動型導波路デバイスの基礎解析

2.1.2.1 直線導波路の収束性の検討

PICにおいては様々な素子が共存するため、特性の安定化のために各素子間の接続には直線導波路が必要と

注1) 一般に半導体における屈折率 n は複素誘電率の虚数部が0とみなせる。即ち吸収が無視できるほど小さい条件下では $n \propto \epsilon^{1/2}$

で示される。誘電率 ϵ はSI単位系では

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

によって電気感受率 ϵ_r と結びつけられる。microscopicな系においては電気感受率は分極率に対応し、分極率は光の波長に依存する。従って、この系では屈折率は導波光の波長依存性を有することになる。

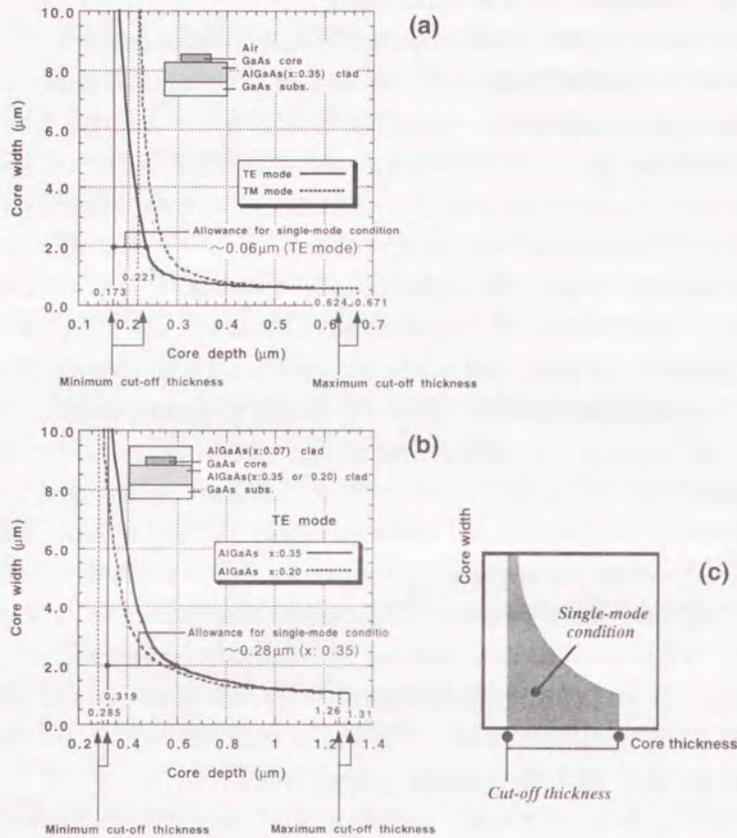


Fig.2.2. Single-mode condition. (a) ridge waveguide, (b) buried waveguide and (c) schematic of the single-mode area.

される。PICサイズの縮小のためには極力、その長さを抑える必要があり、従って軸ずれ光に対する直線導波路の収束性の検討は重要である。ここでは、Fig.2.2(b)に示す埋め込み型導波路（下部クラッドAlGaAs x:0.35）について、入射光軸を導波路中心して対して Δx だけシフトさせた場合に生ずる光波の収束性を検討した。解析手法としては2次元BPM (2D-BPM)を用い、導波路幅は $2\mu\text{m}$ 、入射光のガウスビーム径は $4.0\mu\text{m}$ ($1/e$ 強度における)とし、伝搬長 $409.6\mu\text{m}$ での光波の挙動を解析した。Fig.2.3にBPM解析結果、Fig.2.4には伝搬した導波路長毎の伝搬損失の計算結果を示す。入射端面での導波路のモードプロファイルと入射光

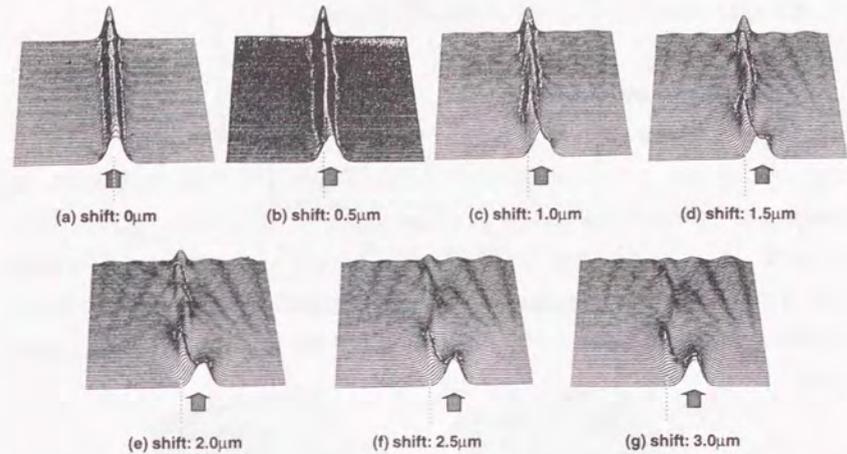


Fig.2.3. Straight-waveguide BPM results with dependence on input-beam position.

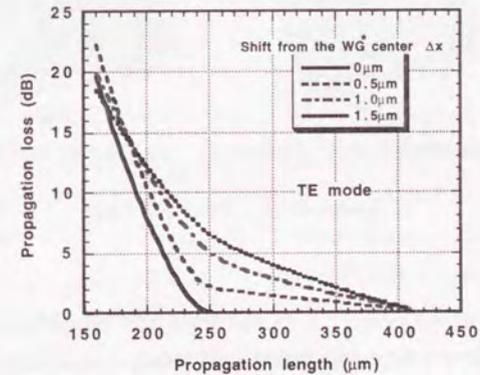


Fig.2.4. Calculated propagation loss as a function of propagation length with dependence on beam-incident-point shift. (WG*: waveguide)

のビームプロファイルとの不整合から損失は生ずるため、軸ずれ量の多い入射光ほど収束性は失われる傾向を有する。しかしながら、 $1.5\mu\text{m}$ 程度の軸ずれ光に対しても、 $400\mu\text{m}$ 程度の直線導波路を伝搬させることで、損失1dB以下の良好な単一モード光として作用することが分かる。

2.1.2.2 曲がり導波路の過剰損失の検討

第6章では、正弦波関数を採用することで低損失でパターン長の短い「S字型曲がり導波路」を試作した結果について述べるが、ここでは一般に多用される「定角曲がり導波路」についての計算結果を述べる。導波路は前節と同一の構造を有する。曲がり部での散乱損失（過剰損失）の計算結果をFig.2.5に示す。ヘテロ接合型においては1%以上の比較的高い Δ が約束されるため、曲がり角 $1/50(\text{rad})$ でも損失は1dB以下に抑制される。また、Fig.2.6には曲がり角 $1/25(\text{rad})$ から $1/200(\text{rad})$ までの場合についての光波伝搬の描像を示す。導波光はTEモードである。1/25(rad)を有する定角曲がり導波路の場合、光波は大きな過剰損失を受けることが観察される。

2.1.3 能動型導波路デバイスの基礎解析

2.1.3.1 必要とされる解析項目

PIC開発において要求される解析項目として以下の2点を検討する。

- 1) 電流密度ベクトル解析：GaAs/AlGaAs系ヘテロ接合における電流ベクトル解析は、レーザーのキャリア注入及び導波路デバイスの屈折率変化誘起のための電流注入解析において必要となる。後節に示すとおり、PICにおいては半導体レーザーと導波路とが複雑に共存するため、電流密度ベクトルを厳密に解析する必要がある。
- 2) 電界ベクトル解析：単純にPoisson方程式を解くことで求められるが、1)と同様にGaAs/AlGaAsヘテロ接合を考慮した厳密解を得る必要がある。本論文で議論するPICに集積した能動デバイスは、その高速性と制御性に着目し電気光学効果(Pockels効果)を適用するものである。この場合、逆バイアス印加による空乏層制御により電界印加が可能となる。

これらの基礎解析結果をもとに実際の能動デバイス、すなわち位相シフタ(PS:Phase Shifter)、モードコンバータ(MC:Mode Converter)等のパターン設計を行うこととする。

2.1.3.2 GaAs/AlGaAsヘテロ接合を考慮した電子デバイス解析

PICの設計解析を行う上で、これまで解析してきたように導波路型光デバイス領域に関しては、等価屈折率法等の近似解析などにより見通しをつけられるが、レーザーや空乏層制御による導波光の制御を行う場合には、電気的特性について詳細な解析を行う必要がある。本節では、ヘテロ接合に関する考慮を加えた計算を

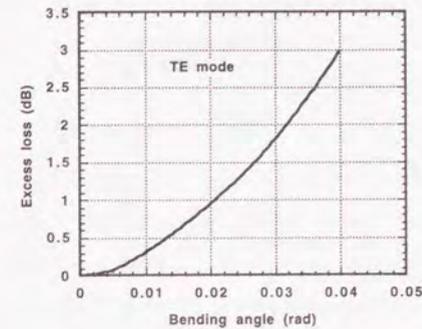


Fig.2.5. Calculated excess loss as a function of bending angle.

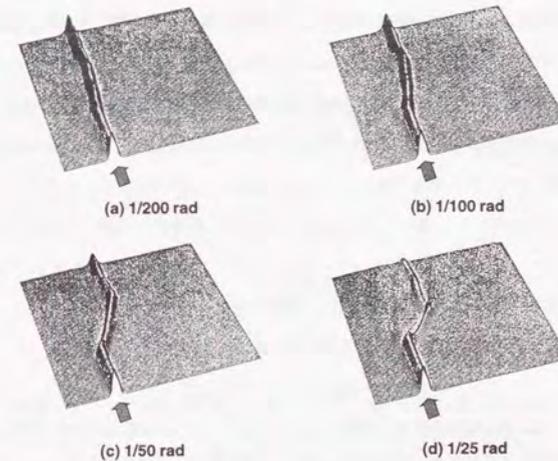


Fig.2.6. BPM results of bending waveguide.

行い、空乏層制御状態及び電流密度ベクトルを求めることにより実デバイスへの設計へと展開させる。

さて、デバイスの電気特性を解析するにはデバイス内部の電界分布とキャリアである電子/正孔の電界中の運動の様子を求めることとなる。ここでは、物理モデルとしてキャリアの粒子性(粒子モデル)を考慮せず、最も実用的なその分布が連続的であるとみなす連続体モデル(流体モデル)を適用し¹⁰⁾、2次元断面での2つのキャリアについて解析する^{12,13)}こととした。

2.1.3.2.1 解析モデル

デバイス解析の手法について詳細に述べることは本論文の主旨ではないため、ここではそのエッセンスのみを記すこととする。

(1) 基礎方程式

デバイス解析の基礎方程式は以下の3式である。

Poisson方程式

$$\nabla(\epsilon \nabla \Psi) = q(n - p - C) \quad (2.1)$$

電子電流連続方程式

$$-\nabla J_n + qR = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2.2)$$

正孔電流連続方程式

$$-\nabla J_p - qR = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.3)$$

上式において、 ϵ : GaAs系材料の誘電率、 Ψ : 静電ポテンシャル、 q : 単位電荷、 n : 電子濃度、 p : 正孔濃度、 C : n 型基板不純物濃度 N_D と p 型基板不純物濃度 N_A との差、 J_n : 電子電流密度、 J_p : 正孔電流密度、 R : 単位時間当たり発生/消滅する電子正孔濃度、である。ここで、注目すべきは(2.1)式の左辺である。これは右辺の電荷分布に対する静電ポテンシャル分布を示すものであり、電気光学効果誘起のための空乏層制御解析に必要とされるものである。逆に、同式だけでも空乏層解析は可能である。さて、実際の電界強度 E はこの物理量である静電ポテンシャルの微分から次式で示される。

$$E = -\epsilon \nabla \Psi \quad (2.4)$$

又、実際のデバイスにおいてはフィールドパッシベーションとして、 SiO_2 、 SiN 等が使用されるが、これらにおいてはキャリアは存在せず電流は流れないものとし、電界分布のみを計算している。即ち、(2.1)式は下記のように変形される。

$$\nabla(\epsilon \nabla \Psi) = qC \quad (2.5)$$

さて、(2.2)、(2.3)式の電子電流密度と正孔電流密度は、電子/正孔の運動を記述する輸送方程式から導かれる次式を用いる。

$$J_n = -q(\mu_n n \nabla \Psi - D_n \nabla n) \quad (2.6)$$

$$J_p = -q(\mu_p p \nabla \Psi + D_p \nabla p) \quad (2.7)$$

ここで μ_n : 電子移動度、 D_n : 電子拡散係数、 μ_p : 正孔移動度、 D_p : 正孔拡散係数、である。これらの式で右辺第一項は電界によるクーロン力に起因するドリフト電流、第二項は電子正孔の濃度勾配により流れる拡散電流を示す。又、拡散係数と移動度とはEinsteinの関係式で結ばれ、次式で示される。

$$D_n = \left(\frac{kT}{q}\right) \mu_n \quad (2.8)$$

$$D_p = \left(\frac{kT}{q}\right) \mu_p \quad (2.9)$$

上式で k : Boltzmann定数、 T : 絶対温度である。これらから各連続方程式は

$$J_n = -q\mu_n \left[n \nabla \Psi - \left(\frac{kT}{q}\right) \nabla n \right] \quad (2.10)$$

$$J_p = -q\mu_p \left[p \nabla \Psi + \left(\frac{kT}{q}\right) \nabla p \right] \quad (2.11)$$

となる。これらの式とPoisson方程式を境界条件(オーミックコンタクト境界条件、電流と電界の垂直方向成分を0とする自然境界条件等)のもとで解けば、その電気特性を求めることができる。また、半導体の各パラメータ(禁制帯幅、電子親和力、状態密度など)は一般的な報告値¹⁴⁾を用い、移動度に関しても十分に配慮し¹⁵⁾厳密性を高めた。実際の計算手法に関して、基礎式の離散化は有限差分法を適用した。また、基礎式には非線形項があるため、これを線形化する必要がある。この種の数値解法には周知のNewton法(離散化した基本方程式をTaylor展開する方法)が多用されるが、ここでは計算容量の縮小、計算時間の短縮、定式化の容易性から、簡便な「Gummel法」を採用した。この時、3方程式は各々静電ポテンシャル、電子濃度、正孔濃度のみの関数と仮定することで個別解を得ることができ、その他の変数は繰り返し計算時の前の回の数値を利用することで処理される。また、GaAs/AlGaAsヘテロ界面については、バンドパラメータ¹⁴⁾¹⁵⁾を導入することで、ヘテロ界面での伝導帯並びに荷電子帯での不連続性を処理した。その方法を以下に簡単に述べる。

ヘテロ接合領域においては、バンドギャップエネルギーや電子親和力が不連続に変化する問題が生ずる。本計算のドリフト拡散モデルにおいては、これをバンドパラメータを用いてモデル化することで処理した。まず、静電ポテンシャルと擬フェルミポテンシャルを用いると、各キャリア濃度は下式で示される。

$$\text{電子濃度: } n = n_i \exp(q(\Psi - \Phi_n)/kT) \quad (2.12)$$

$$\text{正孔濃度: } p = n_i \exp(q(\Phi_n - \Psi)/kT) \quad (2.13)$$

$$\text{真性キャリア濃度: } n_i = N_c \exp\{(E_n - E_{cl})/kT\} = N_v \exp\{(E_{vl} - E_n)/kT\} \quad (2.14)$$

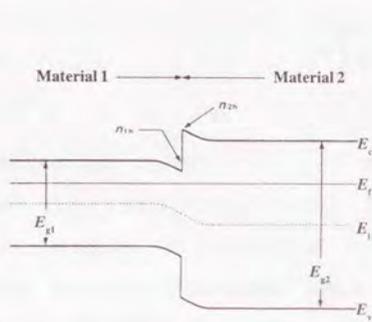
ここでは簡単のため、電子濃度について検討する。Fig.2.7のようにヘテロ接合部では電子濃度は不連続となるが接合部での電子濃度を材料1、2について n_{1h} 、 n_{2h} とする。これらの比を電子のバンドパラメータ θ_n を用いて記述する。

$$\frac{n_{2h}}{n_{1h}} = \exp\left(\frac{q\theta_n}{kT}\right) \quad (2.15)$$

ヘテロ接合部では静電ポテンシャルと擬フェルミポテンシャルは連続であるので、下式ようになる。

$$\frac{n_{12h}}{n_{11h}} = \exp\left(\frac{q\theta_n}{kT}\right) \quad (2.16)$$

ここで、 n_{11h} : ヘテロ接合部での材料1の真性キャリア濃度、 n_{2h} : ヘテロ接合部での材料2の真性キャリア



- E_c : 伝導帯の下端のエネルギー
- E_v : 価電子帯の上端のエネルギー
- E_f : Fermi エネルギー
- E_i : 真性半導体の Fermi エネルギー
- E_{g1} : 材料1のバンド・ギャップ・エネルギー
- E_{g2} : 材料2のバンド・ギャップ・エネルギー
- n_{1n} : ヘテロ接合部分での材料1の電子濃度
- n_{2n} : ヘテロ接合部分での材料2の電子濃度
- n_i : 真性キャリア濃度
- Φ_n : 電子の擬フェルミ・ポテンシャル
- Φ_p : 正孔の擬フェルミ・ポテンシャル
- k : Boltzmann 定数
- T : 格子温度
- N_c : 伝導帯の有効状態密度
- N_v : 価電子帯の有効状態密度
- E_{fn} : 真性半導体の Fermi エネルギー
- E_{fv} : 真性半導体の伝導帯の下端のエネルギー
- E_{vn} : 真性半導体の禁制帯の上端のエネルギー

Fig.2.7. Band diagram of the heterojunction structure.

ア濃度である。これにより電子濃度についてのバンドパラメータは

$$\theta_n = (kT/q) \ln(N_{c2}/N_{c1}) - (E_{g2} - E_{g1})/2q \quad (2.17)$$

$$E_g = E_{c1} - E_{v1} \quad (2.18)$$

で示され、同様に正孔についても下式で与えられる。

$$\theta_p = (kT/q) \ln(N_{v2}/N_{v1}) - (E_{g2} - E_{g1})/2q \quad (2.19)$$

よって、このバンドパラメータを用いることで材料2の真性キャリア濃度を材料1の真性キャリア濃度で記述できる。

$$n_2 = n_{i1} \exp\left\{q\left(\Psi - \Phi_n + \theta_n\right)/kT\right\} \quad (2.20)$$

$$p_2 = n_{i1} \exp\left\{q\left(\Phi_p - \Psi + \theta_p\right)/kT\right\} \quad (2.21)$$

このように静電ポテンシャルにバンドパラメータを加えた量を新たに静電ポテンシャルと考えることで、ヘテロ接合部での電子濃度変化を容易に計算できる。

2.1.3.3 能動型導波路デバイスの基本設計

能動型導波路デバイスとは、Fig.2.8に示す様に外部からの何らかの摂動により導波光自身が変調を受け、その結果として位相変調など様々な能動的な効果を与えるデバイスである。このようなデバイスにはTable2.2に示す様に様々な原理に基づくものがある。この中で、フランツ・ケルディッシュ効果とQCSEの2者は電界

吸収効果 (Electro-absorption effect) として有名であり、高速光変調器等に利用されている。特に、前者は電場印加した場合に生ずる「電子のトンネル効果」による実効的なバンド幅狭帯化現象であり、後者は半導体量子井戸固有の効果で垂直電界印加した場合に電子/正孔が逆向きの力を受け、エネルギー状態を変化させる現象である。いずれも吸収端はレッドシフトするが、後者はバンドギャップ近傍の光吸収スペクトルが、明確な励起子ピークを持ったままシフトするため、吸収端の急峻性とその高速応答が特徴的であり、光通信用デバイスとしてホットな話題を呼んでいる。一方、電気光学効果は電界の印加により物質の屈折率が変化する効果である。この場合Fig.2.8に示すような効果が、本研究で使用する通常の光導波路(量子井戸構造でない)にも電界強度に比例して高速に得られるため、ここでは簡便な同効果を利用した能動型導波路デバイスを検討する。なお、Ken効果は電界の2乗に比例するものであり、点対称性を示す媒質中でのみ顕著な効果として処理される。

さて、ポッケルス効果は一般に、屈折率楕円体の微小な変形として取り扱うことができる。電界を印加しない時の主軸座標系を (x,y,z) とすると屈折率楕円体は次式で示される。

$$\frac{x^2}{n_0^2} + \frac{y^2}{n_0^2} + \frac{z^2}{n_0^2} = 1 \quad (2.22)$$

ここで n_0 は主軸に対する主屈折率である。電界 $E (E_x, E_y, E_z)$ を印加することにより楕円体は変形し、もとの座標系において

$$B_{11}x^2 + B_{22}y^2 + B_{33}z^2 + 2B_{23}yz + 2B_{31}zx + 2B_{12}xy = 1 \quad (2.23)$$

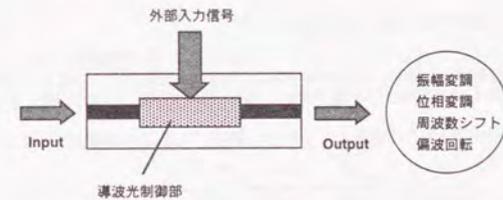


Fig.2.8. Schematic of active waveguide device.

Table2.2. Typical optical effects.

非線形光学効果	電場作用効果	電気光学効果	ポッケルス効果 カー効果
		光双安定性	
		高調波発生	
		フランツ・ケルディッシュ効果	
		量子閉じ込めシタレク効果 (QCSE)	
	磁場作用効果	磁気光学効果	ファラデー効果
			フォークト効果 (コットン・ムートン効果)
音響光学効果		ブラッグ反射	
		ラマン・ス回折	

と示される。最終的に行列式 (i=1~6, j=1~3) で記述すると

$$\begin{pmatrix} B_{11} \\ B_{21} \\ B_{31} \\ B_{41} \\ B_{51} \\ B_{61} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{n_x^2} \\ \frac{1}{n_y^2} \\ \frac{1}{n_z^2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \sum \gamma_{ij} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

となる。4_{3m}結晶のGaAsの場合のγ行列はTable 2.3に示す様になり、γ₄₁は~1.6x10⁻¹⁴m/V (非クランプ状態)である。次に、電界制御による導波路デバイスへの能動制御には、このように印加によって生ずる屈折率楕円体の変化を考え、新たな楕円体の式を導出すればよい。位相シフトについては、単純に電界印加による屈折率変化を求めればよいが、電界印加により結晶の主軸回転が伴う時、媒質の誘電率テンソルεに新たな非対角項δεが生じ、結晶内に分極が誘起され新たな効果が生まれる。この場合、ある方向に偏光した電磁波の電界がこれと直交する方向の分極を起し、偏光方向の異なる電磁波を発生することになる。これにより互いに直交する光波間に結合が生まれ、いわゆる、TE/TMモードコンバージョン (偏波回転) が達成されることになる。

本研究で作製する導波路デバイスは、基板として(100) GaAsを用い、光波進行方向は<110>としている。能動デバイスの設計は上述の屈折率楕円体の座標変換に基づくものであるが、その手法を以下に簡単にまとめる。まず、電界E印加時のこの系での屈折率楕円体は下式で示される (E=(E_x, E_y, E_z))。

$$\frac{1}{n_0^2} (x^2 + y^2 + z^2) + 2\gamma_{41} (E_x y z + E_y z x + E_z x y) = 1 \quad (2.25)$$

i) <001>方向への縦電界印加の場合 (E_x=E_y=0, E_z=E)。

Fig.2.9に示すような座標変換に伴い、屈折率楕円体は下式のようになる。つまり、結晶は電界印加により2軸性を有することがわかる。

$$\frac{x'^2}{n_x'^2} + \frac{y'^2}{n_y'^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (2.26)$$

$$n'_x = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{41} E, \quad n'_y = n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{41} E, \quad n'_z = n_0 \quad (2.27)$$

従って、光波進行方向<110>では

Table 2.3. γ matrix of every crystal.

42m	43m	3m
$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{41} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{41} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{63} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{41} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{41} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{63} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & -\gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & \gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & 0 & \gamma_{23} \\ 0 & \gamma_{41} & 0 \\ \gamma_{41} & 0 & 0 \\ -\gamma_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix}$
KDP, ADP等	GaAs, CdTe等	LiNbO ₃ , LiTaO ₃ 等

$$\frac{x'^2}{n_x'^2} + \frac{z^2}{n_0^2} = 1 \quad (2.28)$$

$$n_x = n_{TE} = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{41} E, \quad n_z = n_{TM} = n_0 \quad (2.29)$$

と示され、縦電界Eの印加により、TEモード光についてΔn = -1/2 n₀³γ₄₁Eの屈折率変化を与える。一方、TMモード光には作用しない。よって、リターデーションΔφ (両固有偏光間の位相差) は

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{TE} - n_{TM}) L = \frac{2\pi}{\lambda} \left[(n_0 - n_0) - \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{41} E \right] L = -\frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} E L \quad (2.30)$$

として求められる。この場合、結晶の主軸回転はなく、上式から自然複屈折性のないことも明らかである。なお、Lは作用電極長である。

ii) <110>方向への横電界印加の場合 (E_x=E_y=1/√2 E, E_z=0)。

まず、xy平面をz軸を中心に45度回転しx'y'平面を形成し、さらにzx'平面を光の進行軸であるy'軸を中心に45度回転させる。得られる屈折率楕円体は

$$\frac{x''^2}{n_x''^2} + \frac{y''^2}{n_y''^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (2.31)$$

$$n''_x = n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{41} E, \quad n''_y = n_0, \quad n''_z = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{41} E \quad (2.32)$$

と示される。<110>方向への伝搬光は45度の主軸回転を伴い、TE/TMモードコンバージョンが生ずる。以上、位相シフタ (PS) とモードコンバータ (MC) について、伝搬方向及び電界印加方向、屈折率変化Δn、位相差Δφ並びに非対角項δεの発生有無についてTable 2.4にまとめる。Γは導波路に寄与する実効電界量を与える印加係数である。

同表から導波路に対し、PSは縦電界制御、MCは横電界制御により達成されることが分かる。最も簡単な平面形状をFig.2.10に示す (MCにおいてはTE/TMモード間の位相整合用PSが導波路上部に付加され、実際には3電極型となるが、ここでは省略している)。簡単なデバイスの見積もりを行うと、PSとしては素子長

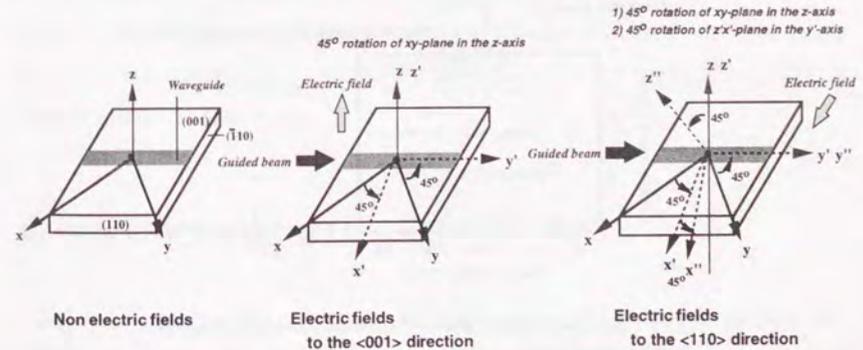


Fig.2.9. Electro-optic effect for GaAs with electric fields.

Table 2.4. Active waveguide devices.

Device	Electric Field	Propagation	Δn	$\Delta\Phi$	摘要
PS	E_z (vertical)	Y	$-\frac{1}{2}n_0^3\gamma_{41}E$	$-\Gamma\pi n_0^3\gamma_{41}\frac{VL_{ps}}{d\lambda}$	$\delta\epsilon$ なし
		X	$+\frac{1}{2}n_0^3\gamma_{41}E$	$+\Gamma\pi n_0^3\gamma_{41}\frac{VL_{ps}}{d\lambda}$	$\delta\epsilon$ なし
MC	E_x (horizontal)	Y	$+n_0^3\gamma_{41}E$	$\Gamma 2\pi n_0^3\gamma_{41}\frac{VL_{ps}}{d\lambda}$	$\delta\epsilon$ あり
		X	—	—	EO効果なし

Propagation X: $\langle 110 \rangle$
 Propagation Y: $\langle \bar{1}10 \rangle$
 L_{ps} : Length of phase shifter

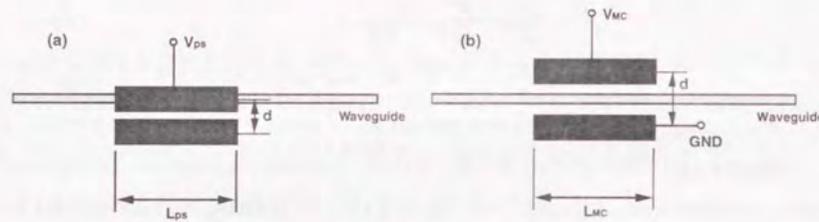


Fig.2.10 Schematic drawing of the phase shifter (a) and TE/TM mode converter (b).

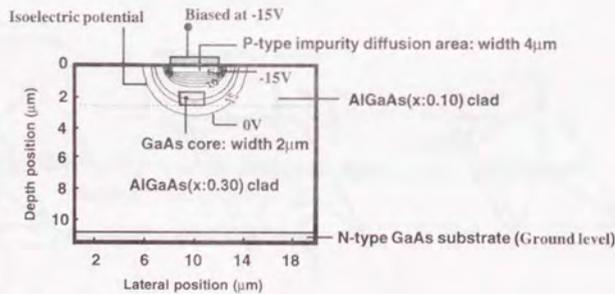


Fig.2.11. Calculated potential profile of GaAs/AlGaAs buried waveguide. Applied voltage: -15V.

L_{ps} : 3000 μm , 印加係数 Γ : 0.4 と仮定すると、半波長電圧 V_{π} : 35.2 V となる。また、MC デバイスには素子長 L_{mc} : 5000 μm , 印加係数 Γ : 0.3 においてモード変換電圧 V_{mc} : 14.1 V と算出され (ここで TE/TM モード間は位相整合しているものと仮定)、デバイスパターンはこの数値をベースに設計できる。Fig.2.11 には表面に p 型拡散層 (表面キャリア濃度: $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$) を有する埋め込み型導波路 PS (電極幅 4 μm) において、印加バイアス -15V の際の空乏層の状態、ポテンシャル分布の解析結果を等高線分布で示す。この系では導波路厚さ方向に対しほぼ垂直な電界が印加され、高い Γ により良好な位相シフトが期待される。

2.1.4 PICに求められる導波路デバイスと試作方針

次に第 6 章にて試作する、計測用 PIC の基礎となる導波路デバイス等の概要を示す。

- 1) 受動型導波路デバイス (例)
 - 直線導波路: 伝搬特性評価, モードプロファイル観察評価
 - Y 分岐導波路 (標準定角型, S-bend 型): 過剰損失特性評価
 - TE モードポライザ: 金属装荷型
 - TE/TM モードスプリッタ: モード干渉型
- 2) 能動型導波路デバイス (例)
 - 位相シフト (単体)
 - マッハツエンダ強度変調器
 - TE/TM モードコンバータ
- 3) プロセス評価モニタ (例)
 - 等方性エッチングモニタ
 - 選択エピタキシャル成長モニタ
 - RIE 開口率モニタ
 - SEM 観察用モニタ
 - リフトオフ評価用モニタ

これらの基礎デバイスを埋め込み型、もしくは装荷型導波路にて試作評価を行なうが、効率良く達成するための手法として、LSI 設計の初期において取り扱われる、TEG (Test Element Group) の概念を利用することとした。デバイスは液相エピタキシャル (LPE) 成長装置における成長面積で制限を受け、全て共通して 15mm \square に納まるような配慮を加えた。

2.2 DFBレーザにおける回折格子形状の解析

本節ではモード結合理論を用いた、DFBレーザ構造に関する解析を行う。ここでは周期性回折格子の形状により DFBレーザの結合係数がどのように変化するかを定量的に見積もり、回折格子作製工程における最適

形状を設計する。

2.2.1 結合係数解析¹⁸⁻²¹⁾

計算にあたり、回折格子形状に設計柔軟性を与えるため、Fig.2.12に示すように回折格子は台形形状を有するものとし、傾斜部の関数を $W_1(x)$ 、 $W_2(x)$ と規定した。また、回折格子の深さ(エッチング量)を g とし、Duty比(Duty Rate)、トース幅(Tooth Width) L_1 、スロー幅(Slope Width) L_2 は、同図に示すように定義した。まず、回折格子による屈折率の空間分散は次式で示される。

$$\Delta n^2(x, z) = \sum_{m \in Z} A_m(x) \exp(2im\pi z/\Lambda) \quad (2.33)$$

なお、

$$A_m(x) = \frac{n_2^2 - n_1^2}{2im\pi} \left[\exp(-2im\pi W_2(x)/\Lambda) - \exp(-2im\pi W_1(x)/\Lambda) \right] \quad (2.34)$$

である($m \neq 0$)。ここで、 n_1 、 n_2 は上部クラッド層、ガイド層の屈折率である。モード結合理論によれば、結合係数 K は次式で示される。

$$K = \frac{k_0^2}{2\beta N^2} \int_{\text{corrugation}} A_m(x) E^2(x) dx \quad (2.35)$$

ここで、 k_0 は波数、 β は伝搬定数、 $E(x)$ は摂動が加えられていない導波路の電界分布に相当する。また、規格化因子 N^2 は次式で与えられる。

$$N^2 = \int_{-\infty}^{\infty} E^2(x) dx \quad (2.36)$$

境界条件はCorrecのモデル¹⁸⁾を適用し、計算される伝搬定数、電界分布等をもとに(2.35)式を解くことでcounter-directionalな結合定数を求めることが出来る。

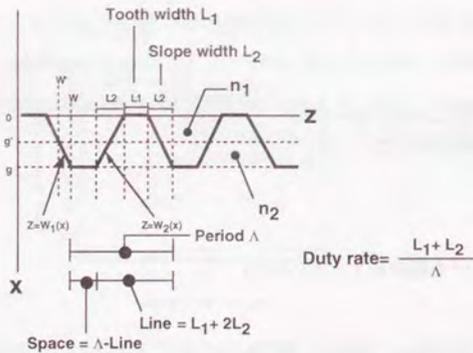


Fig.2.12. Structure of periodic corrugations.

2.2.2 計算

2.2.2.1 DFBレーザ構造

レーザ構造はバルク活性層構造を有するもので、Table2.5にその構成を示す。実際には、最上部にGaAs-cap層、最下部はGaAs基板が存在するが、ここでは上部、下部クラッド層が十分厚いものとして無視した。又、波長は $0.88 \mu m$ とし、不純物ドーピングによる屈折率変化は無視した。

2.2.2.2 解析結果

本スラブ構造はFig.2.13に示すように単一モードであり、その等価屈折率は、TE-mode:3.515、TM-mode:3.513である。次に、結合係数についてレーザ発振に関与するTEモードに関してのみ検討する。

(1) 1次回折格子、2次回折格子、3次回折格子のスロー幅依存性

エッチング深さ $0.1 \mu m$ の場合の解析結果及び回折格子の最適形状をFig.2.14、Table2.6に示す。参考まで、同図には正弦波状に形成された場合の結合係数も付記した。1次の場合、Duty比 50% (Line 50%/Space

Table 2.5. Laser structure.

Layer	Material	x: Al content	Refractive index (0.88 μm)	Thickness
Upper-clad layer	AlGaAs	x:0.35	Nf:3.47	----
Guide layer	AlGaAs	x:0.07	Nf:3.59	0.15 μm
Barrier layer	AlGaAs	x:0.30	Nf:3.49	0.10 μm
Active layer	GaAs		Nf:3.62	0.10 μm
Lower-clad layer	AlGaAs	x:0.35	Nf:3.47	----

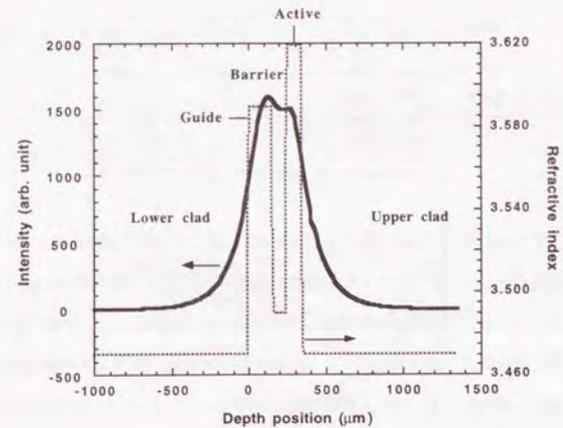


Fig.2.13. Electric field amplitude as a function of depth position.

50%)で矩形形状 ($L_2/\Lambda \sim 0\%$)が最も高い結合効率を有すると共に、高い結合係数を得るための形状許容幅も広い。2次の場合はDuty比75% (Line 75%/Space 25%)で矩形 ($L_2/\Lambda \sim 0\%$)、3次の場合はDuty比80% (Line 85%/Space 15%)で台形形状 ($L_2/\Lambda \sim 5\%$)が最も高い結合を与える。いずれも正弦波状に形成された場合よりも高い結合係数を有する。Fig.2.15に干渉露光により形成した2次回折格子を有するDFBレーザの断面形状を示す。(a)はRIE後、(b)は第2LPE成長後のSEM像である。通常のレジストを用いた干渉露光の場合、そのパターンは正弦波状に形成され、RIEによりその形状はほぼ転写され、同図に示すような三角形状となる。第2成長によりマルチパックが起こり完全な三角形となっている。この場合、Fig.2.14(b)において $L_2/\Lambda:0\%$ 、 $L_2/\Lambda:25\%$ にほぼ相当し、結果的に最大 100cm^{-1} 程度の結合係数を得ることができていたものと予想される。一方、電子線描画においては、Fig.2.16に示す様にほぼ完全な矩形形状が得られるため、Duty比75%の2次回折格子を形成することでも 200cm^{-1} 以上の高い結合係数を得ることが可能である。

(2) 回折格子次数依存性、エッチング深さ依存性

次に $L_2/\Lambda:0\%$ の場合について、回折格子次数依存性を検討した結果をFig.2.17に示す。1次回折格子の有利性が理解できるが、2次回折格子においてもスロープ幅の制御により高い結合係数を得ることが可能である。また、エッチング量についてはFig.2.18に示す様にリニアに推移してゆくことが明らかである。同図には正弦波上に回折格子が形成された場合の結果についても記述した。矩形若しくは台形形状の方が高い結合係数を与えることが分かる。

Table2.6. Optimized corrugation shapes.

	1st order	2nd order	3rd order
Shape			
Duty rate	50%	75%	80%
L_2/Λ	$\sim 0\%$	$\sim 0\%$	$\sim 5\%$

2.2.3 結論

1次、2次、3次の回折格子における結合係数の形状依存性について定量化した。矩形形状を有する1次回折格子の達成が集積化レーザに求められる重要な一要素であることが裏付けられたが、一方で2次回折格子においても75%にDuty比の制御ができれば、同様に高い結合を得ることも可能である。勿論、これらの高次回折格子適用においては、高次放射損失による閾値利得の変動、スペクトル線幅の劣化をも与えるので注意も必要である。結論として、露光/描画技術と反応性イオンエッチング技術を融合させた $0.2\mu\text{m}$ 程度以下の周期を有する高微細回折格子の作製技術の確立が必要とされる。

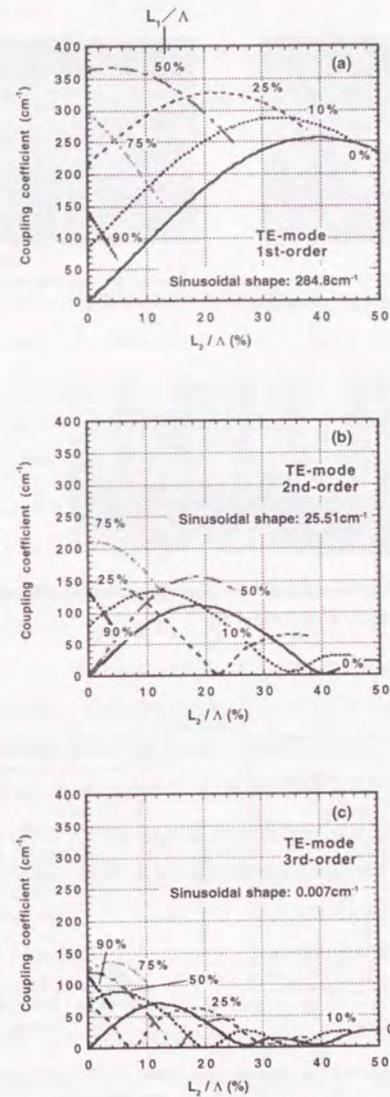


Fig.2.14. Calculated coupling coefficients. Etching depth: $0.1\mu\text{m}$. (a) 1st-, (b) 2nd-, (c) 3rd-periodic corrugations.

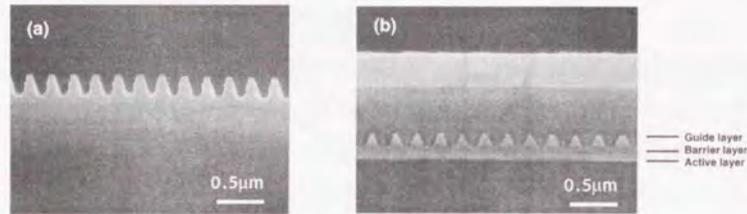


Fig.2.15. SEM micrographs of corrugations (a) after RIE process, (b) after 2nd-LPE process.

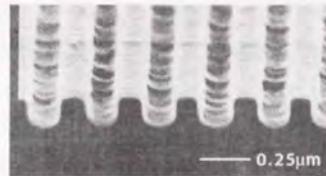


Fig.2.16. SEM micrograph of corrugations after RIE process using electron-beam exposure.

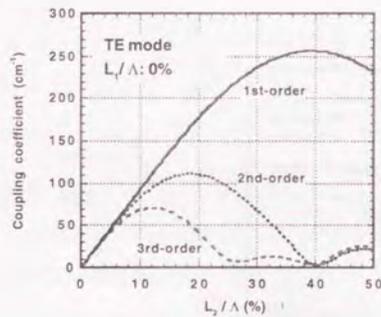


Fig.2.17. Coupling coefficient as a function of slope width.

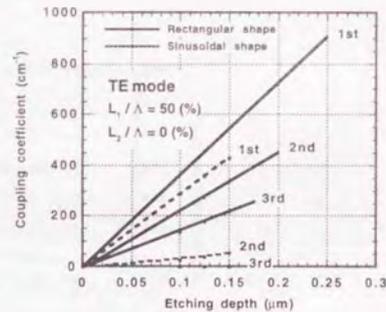


Fig.2.18. Coupling coefficient as a function of etching depth.

2.3 レーザ/導波路集積一体化デバイスの設計

2.3.1 レーザ/導波路結合解析

光計測システム集積化の構築においては、2.1節で述べてきた単一モード導波路によるシステムの形成に加え光源並びに光検出器を集積することで、さらに優れた機能デバイスを構成できる。半導体を基板として用いる以上、このような集積一体化デバイスの形成が求められ、本節ではFP (Fabry-Perot) レーザと導波路との集積結合方式を中心に解析する。

2.3.1.1 PICに要求される項目

半導体レーザ単体の場合、デバイス作製後に結晶の劈開によりレーザ反射端面を形成する。これはGaAsなどIII-V族化合物特有のイオン性に起因し、端面は原子オーダーで平坦な面が容易に形成できることに他ならない。しかしながら、PICにおいては他のデバイスとの共存があるため、この劈開という手段により反射器を構成することは困難である。導波路デバイスの観点からはすでに述べたように、単一モードで伝搬損失が低いことが求められるが、PICに要求される最も重要な項目として「レーザ反射器の形成と光導波路との結合方式の確立」があげられる。これまで報告されている集積化結合方式の中で最も多用されているものが「直接結合方式(突き合わせ結合方式)」である。これはレーザ活性層と導波路端面とを直接に接続させる方法であり高い結合効率に約束されるが、細分化するとFig.2.19に示すように様々な形態に分類できる。

1) DIC (Direct Coupling) 方式: Hurwitzらが提案した方法²⁰⁾で、化学エッチングによりレーザ反射端面を形成し、その後SiO₂薄膜で被覆し選択的な結晶成長を行い、外部に導波路を構成する方法である。Nakamuraらは結合効率は30%程度と低いものの、多波長光源を目的としたDFBレーザとの集積²¹⁾を達成している。また出力導波路上にDBR領域を設けたBJB (Butt-Joint-Built-in) 方式はSuematsuらにより報告²²⁾されている。このタイプにおいて、高効率の結合を得るための条件は、1)光学軸のずれの無いこと、2)導波モードの伝搬定数、界分布を一致させること、である。そのためには多数回の結晶成長と複雑なプロセス工程が要求される。

2) IID (Impurity-Induced Disorder) 方式: 多重量子井戸活性層と導波路層とを共通とし、導波路領域のみを選択的にイオン注入することで混晶化を起こさせ (IID)、レーザ発振波長において導波路領域のみを透明化する方法²³⁾である。簡便な手法ではあるが、不純物導入に伴う導波路の伝搬損失は増加し、25dB/cm程度にも達する場合もある。

3) 面積依存選択MOVPE方式: 有機金属気相成長 (MOVPE) 特有の結合方式で、SiO₂薄膜を用いた選択成長におけるIII族原子のmigrationを利用した方法²⁴⁾である。広義的にはこれも直接結合の分類に入るが、結晶面を利用する以上、導波路のパターン形状に制約が生ずる。また、一般にAlGaAs系においては、SiO₂膜上には多結晶が堆積され、本方式の適用は困難とされる。

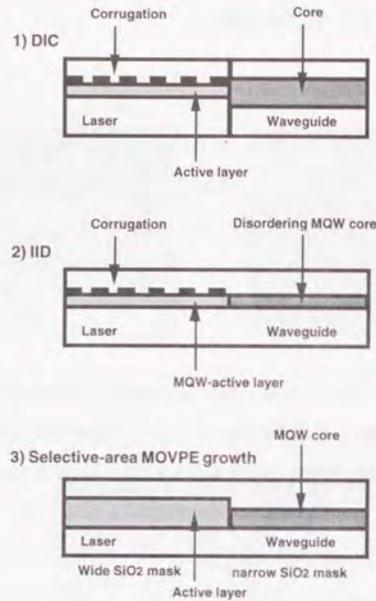


Fig.2.19. Direct coupling configuration.

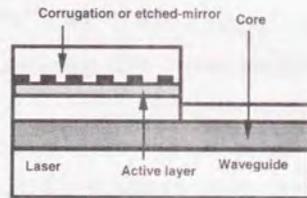


Fig.2.20. Basic structure of an EFC-PIC scheme.

その他の結合法として、「テーパ結合方式」²⁷⁾や以下に述べる「位相整合結合方式」もしくは「エバネッセント波結合方式」²⁸⁾などが報告されている。

本論文においては、レーザ反射器の集積化において次の点を念頭に結合方式を考慮した。

- 1) レーザ/導波路間の結合の確実性。
- 2) 低伝搬損失 (1dB/cm程度以下) なチャンネル型単一モード導波路を集積。
- 3) シンプルなプロセス工程による高再現性と高歩留まりの達成。

これらを総合的に満足する集積デバイス構造に関し、結合方式としてFig.2.20に示すような「エバネッセン

ト波結合 (Evanescent-Field Coupling) 方式: EFC方式」を採用し、さらにレーザ用pn電極配置を横型、導波路を上部クラッド2層の装荷型としたPICの設計を行うこととした。

2.3.1.2 EFC方式PIC (EFC-PIC) の設計

本節では、このEFC方式PIC (EFC-PIC) の設計を行う。設計項目は以下の点である。

- 1) 集積デバイスの層構造設計。
- 2) 装荷型導波路の吸収損失解析。
- 3) 電流密度ベクトル解析。
- 4) DFBレーザとの集積化設計。

以下、順に設計結果について述べるが、レイアウト設計及びトータルなプロセス設計に関しては混乱を避けるため、第6章にて述べることにする。また、ここで設計するEFC-PICには2種類ある。即ち、レーザ領域にエッチドミラー共振器を適用するFP型とレーザ領域に回折格子を形成したDFB型である。後者はレーザの波長安定性と狭スペクトル線幅とを目的としたもので、本研究の最終形態ともいえるデバイスである。設計においては後に述べるように、レーザ/導波路間における2モードの強結合状態を解析し、その前進波と後進波との結合を加味した複合共振器までの解析は行わない。従って、DFB型においても、回折格子形成に伴う、発振モードの等価屈折率の変化として単純に計算できるため、ここではFP型について例を挙げて説明することにする。

1) 集積化デバイスの層構造設計

ここで述べるEFC方式は、本質的にSuematsuらが提案したITG (Integrated-Twin-Guide) レーザ²⁹⁾とその原理を同一にするものである。また、類似する構造として、LOC (Large-Optical-Cavity) レーザ^{30,32)}があるが、この場合レーザ/導波路一体の単一モード仕様であり、従って結合する外部導波路に対し精密な界分布制御が要求されると共に、結合効率も低く最適値でも50%程度とされる。EFC方式においては強く結合した偶/奇の2モードが相互に干渉するため、光波はレーザ/導波路間を往復しながら進行する。単純な2つの導波路が並列に配された結合導波路の特性解析に多用される手法として「モード結合理論」に基づく様々な解析法があるが、EFC構造においては同解析法では厳密解を得ることができない。従って、この2導波路が強く結合した状態においては、結合導波路の特性方程式から2つの固有モードを基にした解析が要求される。一般には2導波路間の結合を考慮する場合5層の解析となるが、本EFC構造においてはFig.2.21に示すようにレーザ/導波路を合わせて11層以上となる。ここでは、AlGaAs/clad1 (0.7 μ m) と clad4 (2.0 μ m) を十分に厚いものと考えて8層とし、以下の計算を行った。この場合のレーザ/導波路間の完全結合長 L_c は次式で示される。

$$L_c = \frac{\lambda}{2[\text{Re}(n_e) - \text{Re}(n_o)]} \quad (2.37)$$

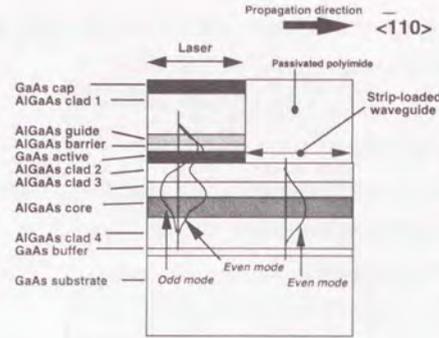


Fig.2.21. Structure of etched-mirror EFC-PIC.

ここで、 $\text{Re}(n_e)$ 、 $\text{Re}(n_o)$ は偶モード、奇モードそれぞれの複素等価屈折率の実数部、 λ は波長である。一方、結合導波路の電磁界方程式を直接解くことで求める2つの固有モードに関して、伝搬方向 z に対するトータルな電界分布 E_{total} は下式で示される¹⁾。

$$E_{\text{total}} = \Psi_e \exp[-jk_0 \text{Re}(n_e)z] e^{j\frac{g_e z}{2}} + \Psi_o \exp[-jk_0 \text{Re}(n_o)z] e^{j\frac{g_o z}{2}} \quad (2.38)$$

ここで Ψ_e 、 Ψ_o は偶モード、奇モードそれぞれの電界振幅である。同式においてレーザ領域の増幅を考慮に入れ、modal gain g_i を含めてある。 g_i は下式で定義される。

$$g_i = \Gamma_i G \frac{n_L}{n_i} \quad (2.39)$$

ここで Γ_i 、 n_i は各モードのレーザ領域の閉じ込め係数及び屈折率実数部である。 n_L はレーザ活性層の屈折率であり、 G は利得である。界分布はスラブ導波路を仮定して、Maxwell方程式を解くことで近似的に求められる。ここでは多層導波路の解析に簡便な転送行列法³⁾を採用した。また、後にGaAs/バルク活性層(厚さ: 0.10 μm)を有するDFBレーザを集積することを考慮し、導波路層膜厚などを変化させることで構造の最適化を行った。ここで求められる構造とは、偶モード、奇モードの界分布が対称性(整合性)を有し、両者のmodal gainがほぼ等しくなる状態を指す。一例として、Fig.2.22(a)には導波路コア厚が0.45 μm 、0.50 μm の場合、Fig.2.22(b)には上部クラッド(AlGaAs-clad2&3)のAl組成 x : 0.35、0.30、0.26の場合の電界分布の差異を示す。Fig.2.22(a)のコア厚0.45 μm の場合(実線)には両モードが良好に整合しているものの、他の場合には整合は見られない。また、コア厚0.45 μm の場合についてmodal gain等のデバイスパラメータの計算結果を

注1) (2.38)式は偶奇モードが1:1で励振された場合の記述である。しかしながら、本節で求めたいレーザ/導波路間の完全結合長は2つのモードの伝搬定数のみに依存するため、両者の励振強度比には本質的に依存しないことを付記しておく。

Table2.7に示す。両モードのmodal gainは極めて近い値を示すことが分かる。Fig.2.23には、Fig.2.22(b)に対応する上部クラッド層のAl組成と偶モード、奇モードのmodal gainとの相関を示す。両モードの界分布不整合にともないmodal gainも大きな差異を有する傾向が理解できる。次に、対応する z 方向への伝搬に伴う光出力移行の様子をFig.2.24(a)~(d)に示す。Fig.2.24(a)においては同期し、レーザ領域で発振した光は良好に導波路に移行しながら指数関数的に増幅して行くことが分かる。一方、他の場合、Fig.2.24(b)-(d)に示すように、このような良好な結合は望めない。結論として、Fig.2.24(a)の構造を本研究では採用するが、完全結合長 L_c の3倍にあたる303 μm をレーザ共振器長としての現実的な値と考え、実効結合長 L_{eff} とここでは定義した。

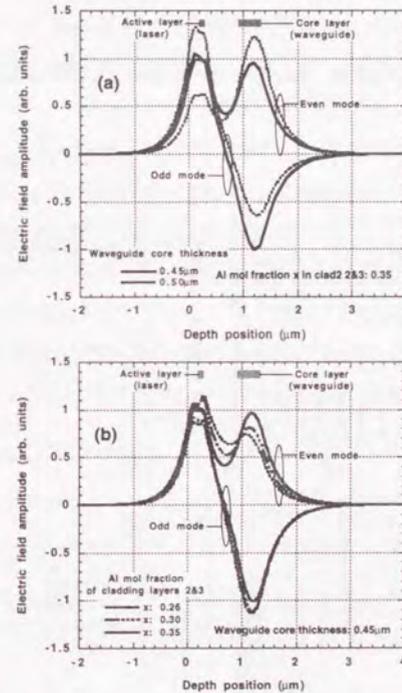


Fig.2.22. Normal modes of the PIC structure for various (a) waveguide-core thicknesses and (b) Al mol fractions in clads 2 & 3.

Table2.7. Calculated parameters for even and odd modes. (core thickness: 0.45 μm , G : 200 cm^{-1} , Al mol fraction x in clads 2&3: 0.35)

	Even mode	Odd mode	
Confinement factor	Γ_i	9.22×10^{-2}	8.82×10^{-2}
Effective refractive index	n_i	3.5175	3.5132
Modal gain (cm^{-1})	g_i	18.9	18.2

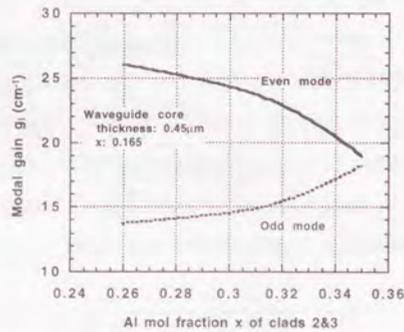


Fig.2.23. Modal gain as a function of Al mol fraction (clads 2&3). G: 200cm⁻¹.

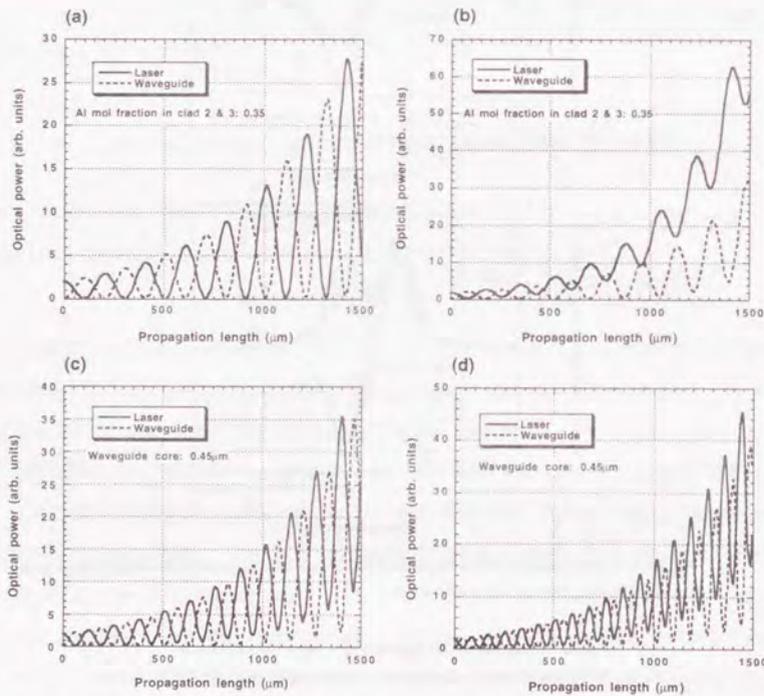


Fig.2.24. Optical power in the laser and waveguide as a function of the propagation length with dependence on waveguide core thickness: (a) 0.45μm (matched case), (b) 0.50μm (mismatched case); and on Al mol fraction x in clads 2 & 3: (c) 0.30 (mismatched case), (d) 0.26 (mismatched case). G: 200cm⁻¹.

2) 低伝搬損失化のためのクラッド層の設計

従来、提案し試作されてきたEFC構造デバイス²⁰⁾ (ITGレーザ等)においては、レーザ発振のためのキャリア注入電極を上面に、接地電極を下面に配する構造であったため、直列抵抗低減などのために導波路層にも不純物ドーピングが必要とされていた。この場合、必然的に光波の不純物/キャリア吸収が発生し、本質的に低伝搬損失なチャンネル導波路の形成は困難である。本研究で提案するEFC-PICは横型電極構造とすることで、導波路並びにクラッド層の不純物をノンドープとすることができる大きな特徴を有する。さらには、全ての集積素子の電極を上面から取ることが可能となり、アセンブリの容易性をも与える。なお、この横型構造とは、キャリア注入電極の横側部に接地電極を配した構成を指す。さて、ここでn型GaAsの光吸収特性について簡単に考察してみる。Fig.2.25(a)に示すように、n型不純物がドーピングされた半導体においては価電子帯から伝導帯への電子の直接遷移に伴う吸収係数 α_{vc} に加え、系には自由キャリアが存在することから、これによるバンド内もしくはバンド間遷移の光吸収を考慮する必要がある。即ち、自由キャリアのバンド間遷移による光吸収係数 α_{ib} 、自由キャリアのバンド内遷移による光吸収係数 α_{fc} を考慮するが、特に α_{fc} は音響フォノンを伴う吸収 α_x 、光学フォノンを伴う吸収 α_{op} 、不純物に関わる吸収 α_{imp} に分けることができる。従って、n型GaAs中での全光吸収係数 α_{TOTAL} は次式で示される。

$$\alpha_{TOTAL} = \alpha_{vc} + \alpha_{ib} + \alpha_x + \alpha_{op} + \alpha_{imp} \quad (2.40)$$

これらの各項に関する詳細な検討もされているが、ここでは最も代表的なSpitzerらの報告 (Fig.2.25(b))²³⁾をもとに α_{TOTAL} を定めることとし、これをもとに複素屈折率虚数部を加味した吸収損失の計算を導波モードの固有値方程式を解くことで行った。計算のモデルとしては、Fig.2.21の構造 (実際の層構造は後のTable2.8に

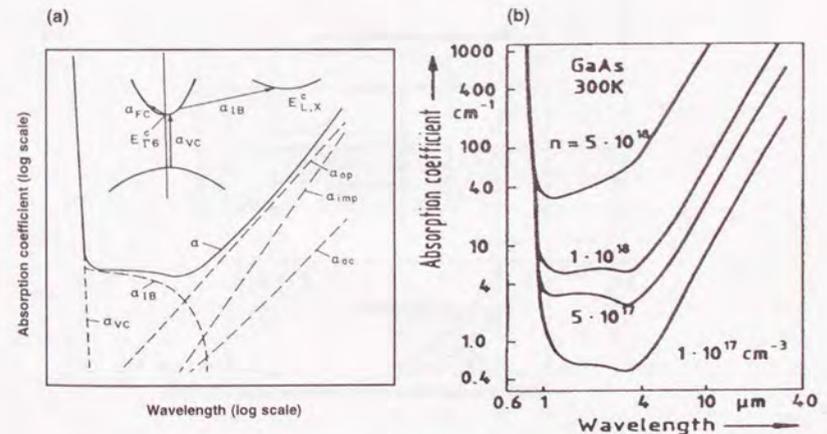


Fig.2.25. Absorption coefficient as a function of wavelength (a) schematic of n-type impurity absorption process, (b) dependence on electron concentration.

示す)に示すように上部第2クラッド層 (AlGaAs-clad2) 電子濃度を $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ とし、上部第3クラッド層 (AlGaAs-clad3)、コア層、下部クラッド層 (AlGaAs-clad4) は全てノンドープ、すなわち虚数部を0と仮定した場合について、上部第3クラッド層の膜厚と伝搬損失との関係を計算することとした。結果をFig.2.26に示す。TEモードについては、上部第3クラッド層膜厚を $0.15 \mu\text{m}$ 以上にすれば、この自由キャリア吸収による伝搬損失は 0.1dB/cm 以下に抑制できることが明らかである。ここでは、結晶成長における再現性とレーザ共振器長の考慮に加え、後述するように極めて強い結合モード下では互いに位相整合する導波路間でも100%の結合が生じ得ないという解析結果⁴⁾を加味し、第2、第3クラッド層膜厚を各 $0.3 \mu\text{m}$ に設定した。但し、横型電極の接地層である第2クラッド層 (nドープ層) についてはコンタクト抵抗低減のため、プロセス工程において局所的にn型ドーピングを施す配慮を加えた。

3) 電流密度ベクトル解析

以上により得たPIC構造に関して、レーザに印加する電圧による電流密度ベクトルの計算を2.1.3.2節で示した3方程式を解くことにより行った。レーザ領域への高濃度キャリア注入 (電流注入) 時には、導波路コア層へのクロストークが問題となる恐れがある。ここでは実際のPIC構造における電流密度ベクトルを解析することで、コア層への影響を検討する。計算結果をFig.2.27(a)に示す。明らかに電流はnドープされた第2クラッド層のみに選択的に流れており、導波路領域への影響は殆どないものと推論される。また、Fig.2.27(b)には電流/電圧特性 (IVプロット) の計算結果を示す。この系の予想される立ち上がり電圧は $0.6 \sim 0.7 \text{V}$ 程度である。ここでキャリア注入により生ずる屈折率変化について、実験値に基づく近似式を用いたモデル⁵⁾を用いて解析した結果をFig.2.28に示す。この場合、「Band filling effect」、「Band shrinkage effect」、「Plasma effect」の3者について個別に計算し、その和を取ったトータルの変化量として示す。同図は実際のEFC-PIC構造に

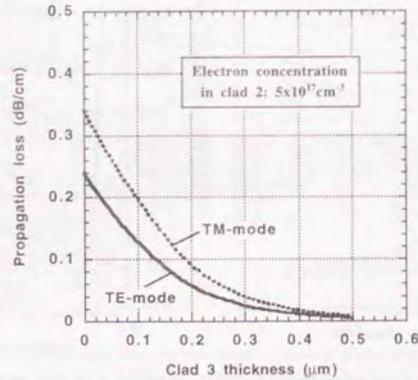


Fig.2.26. Calculated propagation loss as a function of clad3 thickness.

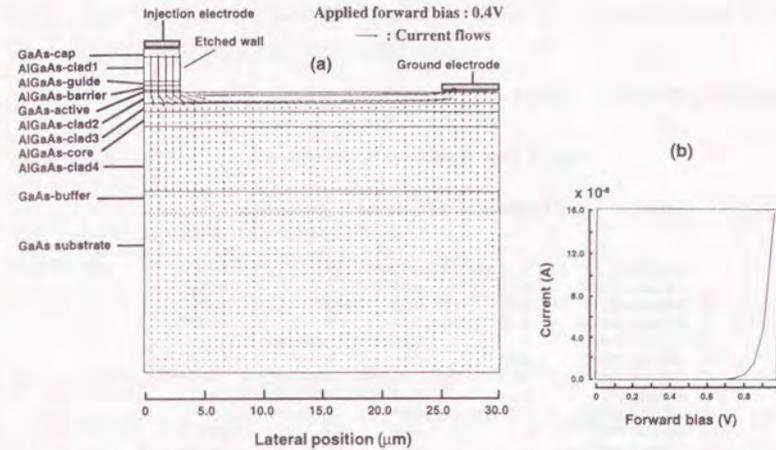


Fig.2.27. Calculated current flow (a) and IV characteristic (b) in the EFC-PIC.

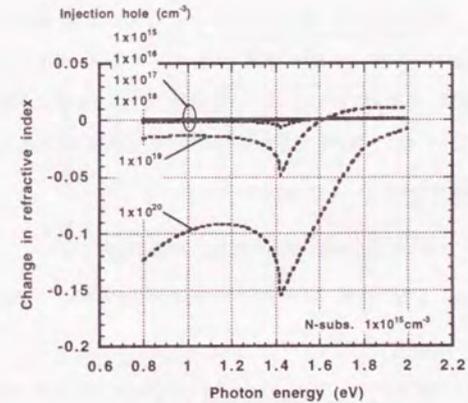


Fig.2.28. Change in refractive index as a function of photon energy with dependence on injection hole concentrations.

準じ、n型GaAs基板（キャリア濃度： $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ）に対し、300K（室温）での少数キャリア（正孔）を注入した場合についての結果である。明らかに吸収端近傍で大きな屈折率変化を与えているが、実際に適用する吸収端よりも長波長帯においては、 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ レベルの高キャリア濃度注入でも殆ど変化を与えないことが分かる。

以上の結果をもとに決定した、本研究で試作するEFC-PICの層構造をTable 2.8に示す。

Table 2.8. Layer structure of the EFC-PIC.

Layer	Al mol fraction x	Thickness (μm)	Doping type Carrier concentration (cm^{-3})
1 GaAs-cap	0	0.30	P 5×10^{18}
2 AlGaAs-clad1	0.35	0.70	P 5×10^{17}
3 AlGaAs-guide	0.07	0.15	P 5×10^{17}
4 AlGaAs-barrier	0.30	0.10	P 5×10^{17}
5 GaAs-active	0	0.10	undoped ---
6 AlGaAs-clad2	0.35	0.30	N 5×10^{17}
7 AlGaAs-clad3	0.35	0.30	undoped ---
8 AlGaAs-core	0.165	0.45	undoped ---
9 AlGaAs-clad4	0.3	2.00	undoped ---
10 GaAs buffer	0	0.50	N 1×10^{18}
11 GaAs substrate	0	---	N 1×10^{18}

Laser section: layer 1 - 6, waveguide section: layer 6 - 9.

次に、Table 2.8に示したFPレーザを集積したEFC-PICにおける、レーザ/導波路間の最大結合係数 C_0 についての見直しを行う。ここでは下部クラッド層（AlGaAs-clad2, AlGaAs-clad3）厚さをパラメータとした。この C_0 とは、モード結合理論で定義されている結合係数とは異なり、レーザ/導波路間をモード干渉により移行する光パワーの振幅で定義したものである³⁴。レーザで発振した光波を効率よく導波路側へ移行するためには、 C_0 は高い方が好ましい。以下、簡単に計算方法を記述する。これまでと同様に、レーザと導波路とからなるダブルモード導波路を考えると、この場合の全電界Eは

$$E = A_e E_e(x) \exp(-i\beta_e z) + A_o E_o(x) \exp(-i\beta_o z) \quad (2.41)$$

と記述できる。ここで $E_e(x)$ 、 $E_o(x)$ は偶モード、奇モードの各電界分布を示す。同様に β は各伝搬定数である。光波が規格化されている場合、

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx E(x) H^*(x) = |A_e|^2 + |A_o|^2 = 1 \quad (2.42)$$

が成立する。また導波路領域の光パワーは

$$\text{Real} \left[\int_{\text{waveguide}} dx E(x) H^*(x) \right] = |A_e|^2 (1 - \xi_e) + |A_o|^2 (1 - \xi_o) - |A_e A_o| \left[\xi_{eo} - \xi_{oe} \right] \cos \left[(\beta_e - \beta_o) L \right] = C + \varepsilon_2 \quad (2.43)$$

と示される。但し、CはLに対する振動項を表し、

$$\xi_e = \int_{\text{laser}} dx E_e(x) H_e^*(x), \quad \xi_o = \int_{\text{laser}} dx E_o(x) H_o^*(x) \quad (2.44)$$

である。ここで、結合係数Cを次式のように定義する。

$$C = C_0 \sin^2 \left\{ \pi L / (2L_c) \right\} \quad (2.45)$$

最大結合係数 C_0 は

$$C_0 = \frac{(\xi_{eo} + \xi_{oe})^2}{\sqrt{(\xi_e - \xi_o)^2 + (\xi_{eo} + \xi_{oe})^2}} \quad (2.46)$$

と記述できる。また L_c は完全結合長であり、次式で示される。

$$L_c = \pi / (\beta_e - \beta_o) \quad (2.47)$$

従って、(2.46)式を計算することにより、最大結合係数 C_0 を求めることができる。

結果をFig. 2.29に示す。今回設計した構造（上部クラッド膜厚 [AlGaAs-clad2+clad3] : $0.6 \mu\text{m}$ ）での C_0 は0.98であり、高効率な結合が達成できる。また、 $0.5 \mu\text{m}$ 以下での C_0 の急激な低下は極めて強い結合モード下では電界分布が大幅に変化し、前述の互いに位相整合する導波路間でも100%の結合が生じ得ないという解析結果³⁰に符合するものである。

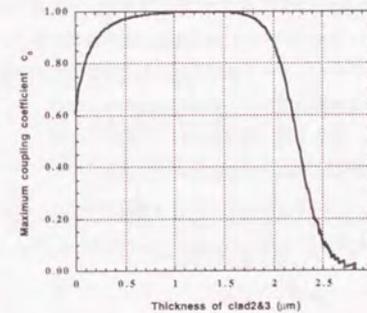


Fig. 2.29. Maximum coupling coefficient C_0 as a function of clad2&3 thickness.

4) DFBレーザとの集積化設計

ここでは、DFBレーザとの集積設計にあたり、回折格子挿入による等価屈折率変化から生ずる、完全結合長変化を見積もることに留め、その他の詳細は第6章で行うこととする。Fig. 2.30には、Fig. 2.14に示す回折格子の L_1/Λ を50%、75%とした場合について、実効結合長 L_{eff} のエッチング深さ依存性を示す。回折格子の

挿入に伴い、結合長も短くなる傾向が分かる。

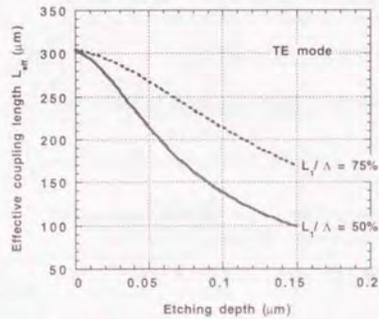


Fig.2.30. Effective coupling length L_{eff} as a function of etching depth.

2.4 まとめ (導波路型光集積デバイスに求められるプロセス研究)

これまでの解析結果をもとに、所期のPIC作製のために求められる重点プロセス研究項目を以下に纏める。

- 1) 回折格子形成工程：DFBレーザ集積に必要
- 2) 不純物ドーピング工程：選択拡散に必要
- 3) フォトリソグラフィ工程 (ポジ型, ネガ型)：微細パターン形成に必要
- 4) 反応性イオンエッチング工程：垂直端面形成に必要
- 5) ショットキーダイオード形成工程：電界印加のための電極として必要
- 6) 表面処理/電極形成工程：低抵抗電極形成に必要
- 7) 結晶成長/評価工程：低損失デバイス形成に必要
- 8) 表面保護工程：デバイス信頼性向上に必要

この中で1) 回折格子形成工程並びに2) 不純物ドーピング工程の2項目については未だ十分に確立していない要素が多い。本論文においては、1) 回折格子形成に関しては、レーザホログラフィック露光法 (第3章)、電子線描画法 (第4章) の2方面からの検討を行うこととする。また、2) 不純物ドーピング工程についてはイオン注入など大がかりな装置を必要とせず、簡便に実施可能なSiO₂薄膜を用いた開管式拡散手法に関し、第5章においてp型、n型両不純物について系統的な検討を行う。また、その他の各プロセス工程の研究については、第6章において述べることとする。

参考文献

- 1) R. G. Hunsperger: *Integrated Optics: Theory and Technology*, (Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo, 1984) 2nd ed.
- 2) E. A. J. Marcatili: *Bell Syst. Tech. J.* **48** (1969) 2071.
- 3) L. M. Walpita: *J. Opt. Soc. Am.* **75** (1985) 595.
- 4) M. D. Feit and J. A. Fleck: *Appl. Opt.* **17** (1978) 3990.
- 5) M. D. Feit and J. A. Fleck: *Appl. Opt.* **18** (1979) 2843.
- 6) J. Van Roey, J. van der Donk and P. E. Lagasse: *J. Opt. Soc. Am.* **71** (1981) 803.
- 7) E. Kuphal and H. W. Dinges: *J. Appl. Phys.* **50** (1979) 4196.
- 8) R. E. Fern and A. Onton: *J. Appl. Phys.* **42** (1971) 3499.
- 9) H. C. Casey Jr., D. D. Sell and M. B. Panish: *Appl. Phys. Lett.* **24** (1974) 63.
- 10) D. T. F. Marple: *J. Appl. Phys.* **35** (1964) 1241.
- 11) D. L. Scharfetter: *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-16** (1969) 64.
- 12) S. Selberherr: *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*, (Springer-Verlag, Wien-New York, 1984).
- 13) S. Selberherr: *IEEE Trans. CAD CAD-3* (1984) 52.
- 14) H. C. Casey Jr. and M. B. Panish: *Heterostructure Lasers*, Academic Press, New York (1978).
- 15) 生駒俊明, 生駒英明: 化合物半導体の基礎物性入門, (培風館, 1992).
- 16) J. E. Sutherland and J. R. Hauser: *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-24** (1977) 363.
- 17) 横山清行, 富沢雅彰, 吉井彰: 電子通信学会論文誌 **J67** (1984) 810 [in Japanese].
- 18) P. Correc: *IEEE J. Quantum Electron* **QE-24** (1988) 8.
- 19) A. Yariv: *IEEE J. Quantum Electron* **QE-9** (1973) 919.
- 20) W. Streifer, D. R. Scifres and R. D. Burnham: *IEEE J. Quantum Electron* **QE-11** (1975) 867.
- 21) W. Streifer and A. Hardy: *IEEE J. Quantum Electron* **QE-14** (1978) 935.
- 22) C. E. Hurwitz, J. A. Rossi, J. J. Hsieh and M. Wolfe: *Appl. Phys. Lett.* **27** (1975) 241.
- 23) K. Aiki, M. Nakamura and J. Umeda: *Appl. Phys. Lett.* **29** (1976) 506.
- 24) Y. Abe, K. Kishino, Y. Suematsu and S. Arai: *Electron. Lett.* **17** (1981) 945.
- 25) T. Hirata, M. Maeda, M. Suchiro and H. Hosomatsu: *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2* **29** (1990) L961.
- 26) M. Aoki, H. Sano, M. Suzuki, M. Takahashi, K. Uomi and A. Takai: *Electron. Lett.* **27** (1991) 2138.
- 27) F. K. Reinhart, R. A. Logan and C. V. Shank: *Appl. Phys. Lett.* **27** (1975) 45.
- 28) J. C. Campbell and D. W. Bellavance: *IEEE J. Quantum Electron* **QE-13** (1977) 253.
- 29) Y. Suematsu, M. Yamada and K. Hayashi: *IEEE J. Quantum Electron* **QE-11** (1977) 457.
- 30) H. Kressel, H. F. Lockwood and F. Z. Hawrylo: *J. Appl. Phys.* **43** (1992) 561.

- 31) G. A. Vawter, J. L. Merz and L. A. Coldren: IEEE J. Quantum Electron. **QE-25** (1989) 154.
 32) J. L. Merz, R. A. Logan and A. M. Sergent: IEEE J. Quantum Electron. **QE-15** (1979) 72.
 33) W. G. Spitzer and J. M. Whelan: Phys. Rev. **114** (1959) 59.
 34) Y. Suematsu and K. Kishino: Radio Science **12** (1977) 587.
 35) B. Banett, R. A. Soref and J. A. D. Alamo: IEEE J. Quantum Electron. **QE-26** (1990) 72.

■ 第3章

レーザホログラフィック露光技術の 最適化に関する研究

3.1 はじめに

DFBレーザ用回折格子の $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 周期の微細パターン形成には、

- A) レーザホログラフィック (2光束干渉) 露光法
- B) 電子ビーム (EB) 直接描画法
- C) X線 (Deep UV) マスクパターン露光法

のいずれかの手法を用いることが必要となる。「B) EB直描法」は精密にパターンニングを行う上で極めて有効な手法であるが、1フィールドの描画サイズに制限があり描画時間の点で不利といえる。従って、導波路型光集積回路の様な特殊用途、すなわち局所的に高微細な回折格子を形成したい場合などには有効であるものの、ウエハ全面に形成を必要とする場合には好ましくない。また、「C) X線露光法」については、波長多重DFB若しくはDBRレーザレイへの応用が考えられる。この場合、ピッチの異なる回折格子を如何に高精度に形成するかが鍵となり、本方法の適用により20波長まで拡張された報告⁹⁾もあるが、時間/コスト共に膨大となり、本質的に特殊な用途への対応に限られる。以上の点から、DFBレーザ単体の開発には 10mm^2 以上の面積を一括に露光できる「A) レーザホログラフィック露光法」¹⁰⁾がスループロットの上で優れ、広く使用されている。また、回折格子周期 Λ も基板入射角度 θ の変更により容易に変化できると共に、集光レンズとピンホールから成る空間フィルタを用いれば、露光面までの距離をかえることで2球面波の干渉により簡易にchirped grating⁹⁾ (傾斜周期回折格子) も形成可能である。また、最近では本露光法をベースとした簡便な「マスク密着露光方法」¹¹⁾も提案されている。

本章では、DFBレーザを集積したPICの作製に向けて、高コントラスト回折格子形成の一手法として、このレーザホログラフィック露光方式を用いた回折格子作製技術について検討する。これまで一般に、g線レジスト、例えば「Microposit-S1400シリーズ (Shipley Far East社製)」を希釈し、スピコート膜厚を $0.07 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 程度 (プリベーク後) に調整し、現像後には $0.05 \mu\text{m}$ 以下の薄い回折格子用レジストマスク作製を行ってきた。しかしながら、実際にはレジストパターン形成後のエッチング工程等において、さら

に厚い膜厚が要求されると共に、プロセス再現性に富みかつアスペクト比の高い「レジストマスク」の形成が必要とされている。この目的のために最近では、干渉光学系の振動、空気の揺らぎなどを検知し、これを光波にactiveに帰還させることで安定性を図ろうとする報告⁹⁾もある。

第2章にて報告したとおり、DFBレーザの光帰還を有効に行わせるパラメータである結合係数の解析から、回折格子形状としては矩形、即ち、高いアスペクト比（横縦比）を与える形状が望まれる。そこでFig.3.1に示すように、これまでの露光光学系を変えることなく、簡便に高いコントラストを与える露光技術について、レジスト材料面からアプローチする手法を構築する。ここではまず、レジストの特性を様々な立場から検討し、実際に露光した回折格子形状をシミュレーションすることとした。それにより、g線レジストにおける問題点ならびにi線レジスト適用への展開について検討した結果について述べる。その手順として、レーザホログラフィック露光法に関して簡単に触れた後、レジストパラメータに関しての考察を行い、さらに現像モデルも取り入れた露光形状解析により最適なレジストの見通しをつける。次に、実際の露光実験を行い理論との整合性に関しての考察を行い、最後に結論づけるものとする。

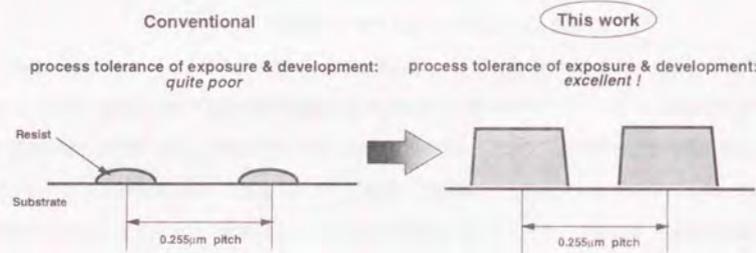


Fig.3.1. Cross-sectional shapes of periodic corrugations by laser holographic exposure.

さて、Fig.3.2に本実験で使用したレーザホログラフィック露光装置の構成を示す。ここで集光レンズとピンホール（5 μm φ）で構成される「空間フィルタ（SF）」は空間高調波成分の除去を目的とする。SFにより光ビームの品質を高めた後、本来はコリメートレンズ（かまぼこレンズ）により2平面波干渉させるべきであるが、レンズ光学系による散乱、多重反射による2光束の波面乱れを危惧しここでは省略している。入射角 θ_a 、 θ_b 及びSFからの入射距離の変化によりレジストの回折格子周期は変調されることは明らかであるが、 $\theta_a = \theta_b$ 、 $L_a = L_b$ においても、この「球面波干渉計」においては無視できるレベルの対称的放物線分布となりうる。フォトレジスト面と入射面の交線方向をz方向とすると、2つの光束の光電界複素振幅 E_1 、 E_2 は次式で示される。

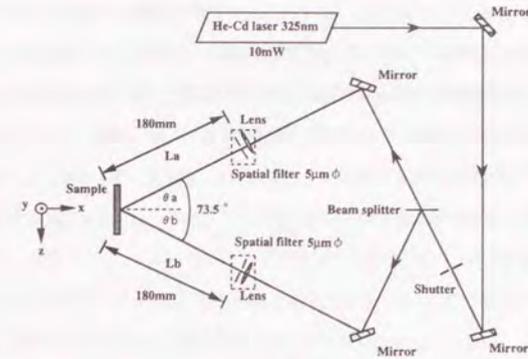


Fig.3.2. Experimental arrangement of laser holographic exposure.

$$E_1 = A \cdot \exp\{-ik(z \sin\theta - x \cos\theta)\} \quad (3.1)$$

$$E_2 = cA \cdot \exp\{-ik(-z \sin\theta - x \cos\theta) - i\phi\} \quad (3.2)$$

よって、フォトレジスト面での光強度は下式になる。

$$|E_1 + E_2|_{x=0}^2 = |A|^2 \cdot \{1 + c^2 + 2c \cos 2(kz \sin\theta - \phi)\} \quad (3.3)$$

ここで、Aは定数、 θ は2光束の入射角度（： $\theta_a + \theta_b$ ）、 ϕ は位相補正項である。上式より光強度はz方向に正弦波状に空間変調され、2光束の電界強度比が $c=1$ のときに変調度（visibility）が最大となる。一方、回折格子の周期（period） Λ は下式で示される。

$$\Lambda = \frac{2\pi}{2k \sin\theta} = \frac{\lambda_0}{2n \sin\theta} \quad (3.4)$$

ここで、 λ_0 ：レーザ波長（真空中）、 n ：空間媒体の屈折率である。従って、He-Cdレーザ（325nm）を利用し、大気中で露光する限り回折格子周期限界は0.163 μm程度となり、GaAs/AlGaAs系DFBレーザに要求される1次回折格子（0.125 μm周期）は達成されないことになる。この高微細周期に関する検討は次章の電子線描画プロセスにて行うこととし、ここでは高いコントラストを有する2次以上の回折格子の形成技術に関する検討を行うこととする。

3.2 レーザホログラフィック露光を用いた高アスペクト比回折格子の解析

3.2.1 単層フォトレジストによる方法

実デバイスのトポグラフィ上において、高解像度パターンを形成する手法として多層レジストプロセスが多用される。解像力向上のためにはバターニングレジストの膜厚を薄くかつ均一にすることが要求され

るが、多層レジスト（特に3層）の場合「厚い下層レジスト／中間層／上層薄いレジスト」から構成される⁹⁾。光吸収特性を持つ「下層レジスト」により平坦化され、露光パターン形成のための「上層レジスト」は理想状態となり、高解像度が達成されるものである。この場合、中間層には薄膜でかつ酸素プラズマ耐性のあるSOG（Spin on Glass）等が、また下層にはポリイミド、ハードバークされたポジ型レジストが多用される。技術的には困難なプロセスとはいえないものの、複雑性に伴う歩留まりの低下、作製コストの増大は避けられない。本研究は、最も簡便な単層レジストプロセスにより上記の高解像度を達成する方法を提案するものである。

高解像度パターン形成に際しては、微細加工性に優れたポジ型フォトレジスト（ポジレジスト）を用いることが前提となる。レジスト膜厚に関しては必要とされる露光エネルギーの他に、試料基板とレジスト界面での反射により生ずる定在波の周期を考慮して決定され、Table 3.1に示すように後述する「Type-gF」レジストの場合、945Å周期で定在波の節が生じ、0.1μm程度以下の膜厚がプロセス上好ましいとされる。また、ポジレジストの露光現像過程は複雑であり、実際には(3.3)式で示した正弦波パターンには単純に形成されない。この方面の解析については詳細な報告⁷⁾があるが、一般的に周期の短い回折格子ほど高アスペクトのパターニングは困難となりうる。従って、単層レジストを用いるパターン形成においては、レジスト自身の光学特性を十分に理解する必要がある。

Table 3.1. Standing-wave period of Type-gF resist.

order	period (nm)
1st	945
2nd	1890
3rd	2735

(λ:325nm, n_{resist}:1.72)

3.2.2 ポジ型フォトレジストの特性

3.2.2.1 基本特性

16M-DRAMの量産が既に開始され、64M-, 256M-DRAMの開発競争が激化する中、この0.5μm以下のデザインルール達成のkey材料の一つが「フォトレジスト」である。1M~4M-DRAMはg線（436nm）、4M~16M-DRAMはi線（365nm）へと短波長移行し、更に64M~1G-DRAMにおいてはKrF（248nm）/ArF（193nm）エキシマレーザを光源とする「フォトリソグラフィ」を利用することがほぼ確実となった現在、このレジストの新たな開発が活発化している。その中で、配線工程に対応する「染料入りレジスト」、更なる高感度／高解像化のための「化学増幅型レジスト」の要求もあり、これらは配線材料の多様化、光学系の短波長化等の動向により複雑化している。本節ではまず、ポジレジストの露光／現像工程を記述する

「Dillの光学パラメータ」⁸⁾について簡単に説明する。

フォトレジストのパターニングの原理は「光化学反応によって生ずる溶解度の差」に帰着する。ポジレジストは一般的に「アルカリ可溶性高分子化合物」と「光化学反応によりアルカリ可溶性となる感光剤の化合物」とで構成される。前者は、フェノール骨格を有するノボラック樹脂（Novolak resin：Fig.3.3(b))であり、後者は、THBP（テトラヒドロキシベンゾフェノン）と1,2,5-DQ（ナフトキノンジアジド）とのエステル（Fig.3.3(a))が多用されている。これが「光活性基」若しくは「溶解阻止剤」、つまり「inhibitor」と称されるものである。後者のうち、1,2,5-DQが感光材料として支配的であり、照射によりケテンが生成し水と反応してアルカリ可溶のインデンカルボン酸になる（Fig.3.3(c)）。

次に、F.H.Dillの光学パラメータを以下の4種類について定義する。

- A : an exposure dependent absorption term (感光成分に関連)
- B : an exposure independent absorption term (非感光成分に関連)
- C : an optical sensitivity term (露光時間と透過特性との相関)
- E : a development rate term (現像/溶解特性に関連)

フォトレジストの光吸収特性を考える場合、無反射でのレジスト透過は一般的なLambert-Beer則を用い、次式で記述される。

$$\frac{dI}{dx} = -I \sum a_i m_i \quad (3.5)$$

ここで、I：光強度、x：レジスト／空気界面からの距離、m_i：i-吸収種の分子濃度、a_i：i-吸収種の分子吸収

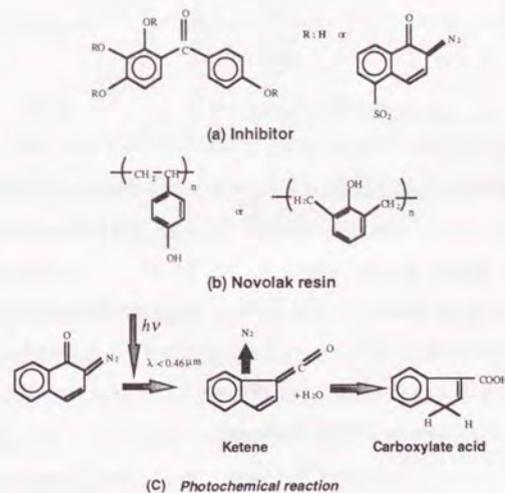


Fig.3.3. Posi-resist structure and photochemical reaction.

係数である。ポジレジストの場合には次の3つの吸収種の特性を考慮すればよい。それが「inhibitor: i=1」, 「base-resin: i=2」, 「reaction-products: i=3」である。露光によりinhibitorは分解し、reaction-productsに変換され、結果的にレジストフィルムの吸収は低減されることになる。露光時間 t を加味した光強度変化及びinhibitorの分解に関しての記述式を下記に示す。

$$\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = -I(x,t)[a_1 m_1(x,t) + a_2 m_2(x,t) + a_3 m_3(x,t)] \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial m_1(x,t)}{\partial t} = -m_1(x,t)I(x,t)C \quad (3.7)$$

ここで C は単位露光強度あたりのinhibitor濃度の変化速度(後述の C パラメータ)である。以下、詳細な説明は省略するが、これまでの式をもとに適当な境界条件を定めることで、レジストの透過率測定から実験的に A , B , C パラメータを求めることができる。内部透過率 T は

$$T = \exp\left[-\int_0^d \{A \cdot M(x,t) + B\} dx\right] \quad (3.8)$$

から

$$T(0) = \exp[-(A+B)d] : \text{Unexposed film} \quad (3.9)$$

$$T(\infty) = \exp[-Bd] : \text{Exposed film} \quad (3.10)$$

となり、露光波長域での露光前後の透過/吸収スペクトルを測定することで、容易に A , B パラメータの抽出が可能となる。なお、(3.8)式で $M(x,t)$ はinhibitorに関する関数⁹⁾である。また、透過率速度変化

$$\frac{dT(0)}{dt} = T(0)[1-T(0)] \frac{A}{A+B} I_0 C \quad (3.11)$$

から前述の C パラメータを求めることが出来る。一方、溶解度特性を与える E パラメータについては数々のモデルがあるが、ここではDillのモデルにより規格化inhibitor濃度 M とアルカリ現像液による溶解速度 R との関係が下式により定められる。

$$R = \exp(E_1 + E_2 M + E_3 M^2) \quad (3.12)$$

このように最も代表的な A , B パラメータとはレジストの現像に関するパラメータであり、レジストをアルカリ現像液に対する溶解の阻止と光吸収の両特性を規定する「光活性基(inhibitor)」により定義されるものと考えてよい。即ち、 A パラメータは感光成分の吸光度、 B パラメータは非感光成分(樹脂と感光剤骨格化合物)の吸光度に相当し、後者は一般的に0.1程度となる。概して A パラメータは B パラメータに比して大きく、光吸収はこのinhibitor濃度に依存することとなる。勿論、実際の露光・現像過程においては種々の要因が関与するため、レジストの特性をこの2つのパラメータだけで記述することは難しいが、レジストの特性を考える上での目安にはなる。さらにレジスト特性、特にパターンコントラストを明確に据える指標として「 γ 値」がある。ここでは γ 値は以下の式により定義した。

$$\gamma = \frac{0.5 - 0.1}{\log(E_{10}/E_{50})} \quad (3.13)$$

上式で、 E_{10} : 残膜率10%の露光時間(エネルギー), E_{50} : 残膜率50%の露光時間(エネルギー)である。この γ 特性は、(3.12)式の $R(M)$ 特性とも密接に関連している。

3.2.2.2 実際のレジストの特性比較

本節では各レジストの光学特性に関して、前節のDillのパラメータから検討する。ここでは、Table 3.2に示すレジスト(10種類: g-line resist; Type-gA~gF, i-line resist; Type-iA~iD)全ての A , B パラメータ値をUV透過スペクトルの実測より求めた。さて、感度曲線に関してはFig 3.4の測定結果(Type-gA, gB, gCの場合)から明らかなように、レジストはUV域においてBroadな吸収を有する。レーザホログラフィック露光では通常のg線(436nm), i線(365nm)波長域よりも短波長であるHe-Cdレーザ(325nm)を利用するため、この波長域でのデータを新たに導く必要がある。ここでは、まずg線, i線対応の両レジストに関して、 A , B パラメータを分光透過率測定より求め比較検討を行う。波長依存性に関して、Fig. 3.5に A パラメータ, Fig. 3.6に B パラメータの結果を示す。図において実線がg線, 破線がi線レジストである。Fig. 3.5において特徴的なのは、いずれのg線レジストもi線近傍では極値をとり、i線レジストは325nm域に向か

Table 3.2. Prepared posi-resists.

TYPE	PEB対応*	Comment
Type-gA	X	一般的
Type-gB	X	一般的
Type-gC	O	高解像度
Type-gD	X	一般的(耐熱性)
Type-gE	O	吸収型
Type-gF	X	一般的

Type-iA	O	新開発
Type-iB	O	新開発
Type-iC	O	旧式
Type-iD	O	旧式

PEB対応* 露光後ベーク (Post exposure baking) を前提とするレジスト

い徐々に増加の傾向を持つ点である。Fig. 3.6の B パラメータは、樹脂吸収、感光剤骨格基(THBPのカルボニル基)に起因するものであり、前述の通り各レジストはg線域において0.1程度の値をとるが、短波長域に向かい増加の傾向が見られる。その中でもType-gFはg線域においても比較的高く、325nmにおいては他と比較して高い値をとる。この場合、感度の点で良好なバターニングは困難であり、レジストを極力薄くして使用することが必要となる。また、g線域で最も高い値(〜0.4)を示すレジストはType-gEであり、フェノール樹脂中に染料を混入することでこの効果を高め、最終的にLSI段差等でのハレーションを防止する意図が理解できる。次に、レジスト屈折率の虚数部 k は(3.14)式に示されるように「 $A+B$ 」で記述されるため、光吸収特性の検討には好都合である。実計算においても同式を採用している。

$$k = \frac{\lambda}{4\pi} (A+B) \quad (3.14)$$

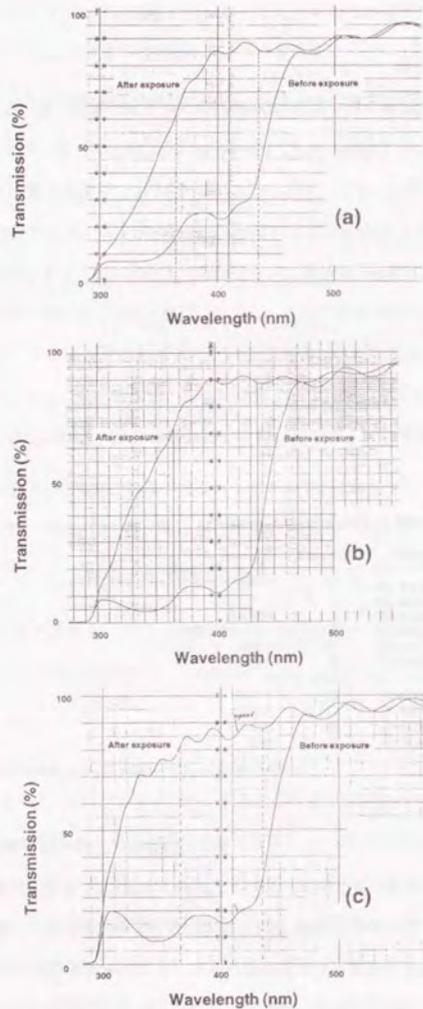


Fig.3.4. UV transmission spectra.
 (a) Type-gA resist,
 (b) Type-gB resist,
 (c) Type-gC resist.

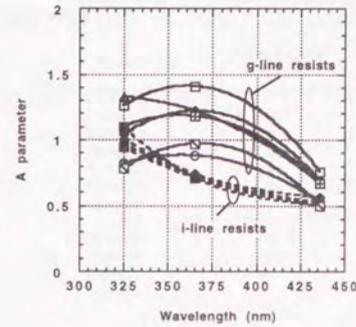


Fig.3.5. A-parameter as a function of wavelength.

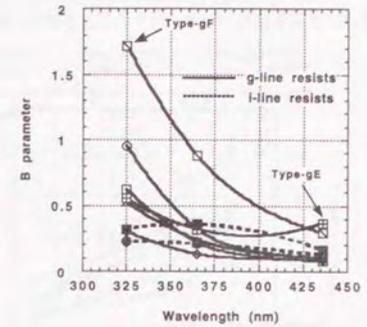


Fig.3.6. B-parameter as a function of wavelength.

Fig.3.7から明らかなように、「A+B」値は短波長化に向かい増加の傾向をとるが、増加率はi線はg線に比して低く、325nmの短波長露光においてはi線レジストが感度の点、解像度の点で有利であることが予想される。

次に、 γ 値については、g線、i線の各波長に関して縮小投影型露光装置（ステッパ：ニコン製）を用い、その露光時間（エネルギー相当）に対する残膜率測定より求めた。実験フローを以下に示す。

1.Si基板	HMDS（ヘキサメチルジシラザン）処理
2.レジストコート	1.26 μm^* ($N_f:1.68$)
	*g線、i線とも定在波のほぼトップとなる膜厚(1.26 μm)に設定
3.プリバーク	90°C 90s (Hot Plate)
4.露光	NSR-1505G7E (NA0.45) : Nikon g線縮小投影型露光装置（ステッパ） NSR-1755i7B (NA0.45) : Nikon i線縮小投影型露光装置（ステッパ）
5.PEB	110°C 90s (Hot Plate)
6.現像	NMD-W (TMAH系) 2.38% 23°C 65s バドル法

得られた結果から γ 値は前述の(3.13)式により算出した。代表的な結果として、Type-gA,gB,gCの3種のレジストについての露光特性結果をFig.3.8に、各レジストの γ 値をTable3.3に示す。結果的には、i線レジストはg線においても γ 値は他に比して高く、前述のType-gFは最も低いことがわかる。また、いずれのレジストも露光後バーク（PEB：Post Exposure Baking）工程により γ 値は向上している。このなかで最新のg線レジストType-gCは極めて高い。さて、「325nm露光波長において、これらパラメータの最適値はどうか」という点については未だ明確になっていないのが実情である。そこでレジストパラメー

夕間の相関関連の考察を行ったところ、Fig.3.9に示す様にg線でのAパラメータが高いほど、i線及び325nmでのAパラメータは高い傾向を有することが新たに発見された。一般に、g線レジストをi線域で適用し

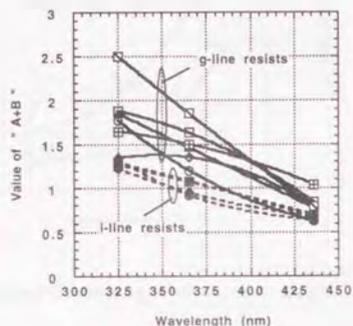


Fig.3.7. "A+B" value as a function of wavelength.

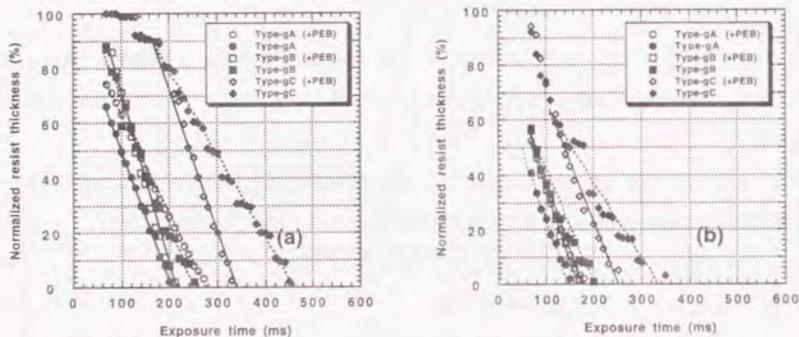


Fig.3.8. Normalized resist thickness as a function of exposure time with and without PEB process. (a) g-line exposure, (b) i-line exposure. Resist: Type-gA, gB and gC.

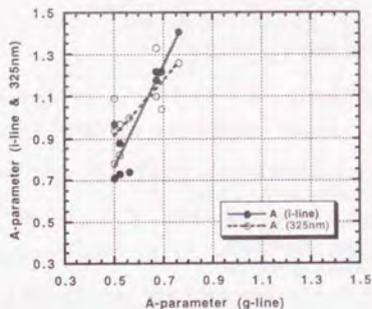


Fig.3.9. A-parameter characteristic.

Table3.3. Measured gamma values for every resist with dependence on PEB process.

Resist	G-line gamma with PEB	G-line gamma without PEB	I-line gamma with PEB	I-line gamma without PEB
Type-gA	1.69	1.49	1.27	1.11
Type-gB	2.27	1.61	1.44	1.21
Type-gC	3.44	2.21	1.86	1.26
Type-gD	1.84	-	1.42	-
Type-gE	2.21	-	1.80	-
Type-gF	-	1.29	-	-
Type-IA	3.42	-	2.79	-
Type-IB	2.49	-	2.27	-
Type-IC	-	-	-	-
Type-ID	-	-	-	-

- : not measured.

た場合、g線露光時よりもγ値が低くプロファイルのテーパが甘くなり、解像度が劣化する。この現象はg線レジストのi線域での光学パラメータが大きいに起因することが、実験的な検討により明らかとなっている。従って、以上を纏めると次のような結論づけができる。

325nmホログラフィック露光における、最適レジストの簡便な選択法として

- 1) Aパラメータは大きすぎても小さすぎても好ましくなく最適値があるが、Fig3.9に示したような傾向から、通常のベンゾフェノン骨格を有するレジストを適用する場合、g線でのAパラメータは極力小さい方が望ましい¹⁾。
- 2) また、g線でのγ値が高いものほどi線のγ値が高い傾向にあり、すなわち325nm露光においてもγ値の点で有利に作用する。

上記2点について、325nmホログラフィック露光で最も有利なのは、i線レジストと結論づけられる。これらレジストの露光特性についての結果は3.3節に示すが、確かに低露光エネルギーで、高いアスペクト比を得る傾向を得ている。しかしながら、現時点においてはこれらレジストの光学パラメータ (C, Eパラメータ) の十分に確立したデータが得られていないため、理論的な側面からのアプローチが困難である。従って、次節以降においては既にパラメータが確立されており、かつその特性が全く異なる代表的な3種

注1) 高性能ポジi線レジストの開発にあたっては「i線での光学パラメータはg線露光でのg線レジストと同等にすること」が要となる。また、i線でのBパラメータは感光剤骨格の吸収特性に大きく依存し、樹脂の吸収による影響は認められない。つまり、通常のレジストは感光剤としてTHBPを用いているが、この分子内のカルボニル基が寄与する。したがって、カルボニル基を含有しないバラスト分子がi線用に適しているといえる。一方、Aパラメータの低下は単純に感光剤使用量の低下でも達成できるが、同時にマスク効果^{*)}を低下させ好ましくない。(*)ここで述べるマスク効果とはレジスト現像時の感光剤による溶解抑制作用と感光剤光分解物による溶解促進作用の差を示し、つまりレジスト膜の露光部と未露光部の溶解速度の差が減少し、結果的に解像度の劣化を与えるものである。))

一方、この解像の劣化を防ぐ手法としてTHBPとNQDとのエステル化率を上げ、全置換体含有量を増やすことも考えられる。しかしながら、この場合はスクラムが発生しやすくなり、また感光剤のレジスト溶媒への溶解性が低下するため粒子が発生しやすくなる欠点も有する。つまり、少ない感光剤量で高い解像度を得るためには高いγ値を与える感光剤骨格を使用することが望まれる。

のg線レジスト (Type-gA, gB, gC) を用いて、理論的な解析及び実際の露光実験を行うこととする。

3.2.3 パターン形状シミュレーション

3.2.3.1 計算手法

これまで抽出したレジストの光学パラメータをもとに、予想される干渉露光パターンの形状シミュレーションを行う。解析プログラムの基本的なコンセプトは以下の通りである。

[I] 2光束干渉露光は、Fig.3.10に示すように位相シフトマスクにより回折される高次回折光を適当なNAを有する対物レンズで除去し、±1次光のみを入射角θで干渉露光する場合とanalogyである。

[II] 次に、レジスト中の光強度分布計算に関しては、縮小投影型露光装置 (ステップ) の場合に考慮される部分コヒーレント結像光学系⁹⁾と異なり、ここで求める空間的な光学像はAbbeの理論¹⁰⁾に基づくコヒーレント光による結像を考えればよい。すなわち、コヒーレント結像系においては、物体とその像は共に複素振幅分布により記述され、ここで計算を要するレジスト/基板の最終像面上ではその絶対値の2乗をとって像の照度分布を得ることができる。

実際には、Debye integral¹¹⁾から求められる(3.15)式により求めることができる。

$$G(x,y) = \left| \iint_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}(x',y') \exp[2\pi i(sx'+ty')] \tilde{u}(x-x',y-y') dx' dy' \right|^2 \quad (3.15)$$

ここで絶対値記号内が、上で述べた様に微小光源 $r(s,t)dsdt$ によるコヒーレント結像の振幅分布を示すものである。なお、(3.15)式では $\tilde{A}(x,y)$ が位相シフトマスクに相当する物体の複素振幅透過率分、 $\tilde{u}(x',y')$ が点像振幅分布、 s,t は有効光源の輝度分布 $r(s,t)$ で示される座標系である。ここで示す s,t は位相シフトマスクに入射するあらゆる方向からの光(斜入射光)を考慮するものであり、ここで考えるホログラフィック露光系ではこの種の成分は無視されるので $s=t=0$ とでき、解くべき式は(3.16)式のように単純になる。

ここで、 $\tilde{a}(f,g)$ は $\tilde{A}(x,y)$ の回折像、つまりFourier spectrumであり、 $\tilde{P}(f,g)$ は投影レンズの瞳関数である。

$$G(x,y) = \left| \iint_{-\infty}^{\infty} \tilde{a}(f,g) \tilde{P}(f,g) \exp[2\pi i(fx+gy)] df dg \right|^2 \quad (3.16)$$

次に、実際のレジスト内の強度分布を求めるにあたり、Dill¹²⁾もしくはMack¹³⁾のスカラモデルが多用されているが、この場合次のような物理現象に起因する計算誤差が発生する。

- 1) 反射光による結像、
- 2) 透過率の入射角、偏光方向依存性、
- 3) ベクトル的な干渉の発生、

4) 定在波周期の入射角依存性、

5) 吸収による減衰の入射角依存性、

ここでホログラフィック露光において、特に留意すべきは項目3)であり、簡単のためにFig.3.11に示すように入射平面内で3光束が干渉露光する場合を考える。電場ベクトルの振動方向が揃っているs偏光の場合にはスカラー的な干渉が生じ、一方、p偏光の場合には $\cos \theta$ の因子を含むベクトル的な干渉が生ずることになる。形成される回折格子形状の偏光依存性は後述することとして、ここではベクトルモデルに基づき、レンズの反射防止コート、狭帯域フィルタ設計等で多用される「多層膜理論」を応用したYeungの手法¹⁴⁾を適用することとした。これにより、偏光依存性に関しても正確な計算が可能となる。次に、簡便な「String model」¹⁵⁾を用いた現象解析を行い、実際の2次元パターンをシミュレーションする。なお、多層

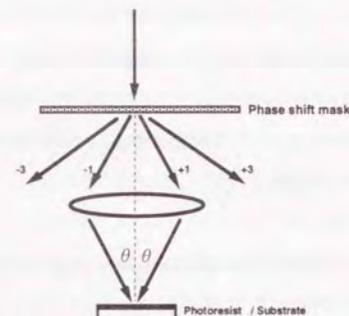


Fig.3.10. Optical system arrangement for simulation.

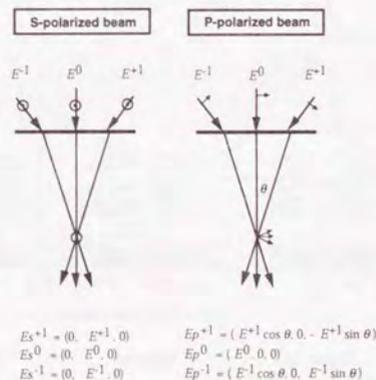


Fig. 3.11. Scalar and vector interference in the incident plane.

膜理論においては、各膜が均一という前提があるため、ここではブリーチング効果（レジストの露光により透過率が増加する性質）等は無視しているが、CEL（コントラスト増強材）を用いたプロセスのように極端にブリーチングが高い場合を除き、計算結果の妥当性は確認されている。

3.2.3.2. 計算結果

3.2.3.2.1 レジスト内光強度分布計算

前節で述べたように本節以降においては、最も光学パラメータ値が確立している3種のg線レジスト「Type-gA」、「Type-gB」、「Type-gC」に関してのみ理論解析を行うこととする。Table3.4にこれらレジストの光学パラメータを示す。まず、レジスト内強度分布計算をレジスト膜厚0.1、0.3μmについて検討した。ここでレジストの屈折率は

$$n = 1.68 - \frac{\lambda}{4\pi} (A+B) \quad (3.17)$$

を用い、レーザーはs偏光、基板はGaAs、回折格子周期は0.255μmを仮定した。計算結果をFig.3.12に示す。計算結果において、等高線は「flat-exposure（レチクル上に何もパターンがない場合）」のエネルギーが1となるように規格化され、最低強度0.1から最高強度1まで0.1ピッチで示されている。ボジ型の場合、現像

Table3.4. Optical parameters of g-line photoresists.

	A (μm ⁻¹)	B (μm ⁻¹)	C (cm ² /mJ)	γ [i-line]	γ [g-line]
Type-gA	0.82	0.95	0.016	1.27	1.69
Type-gB	1.26	0.62	0.015	1.44	2.27
Type-gC	1.04	0.30	0.016	1.86	3.44

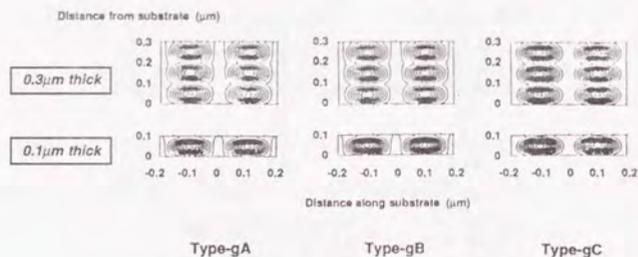


Fig.3.12. Constant-intensity contours for 0.255μm periodic corrugations.

はこの等高線に平行に進行することになるが、0.3μm厚において基板表面からほぼ0.1、0.2μm位置に腹、0.05、0.15μm位置に節が存在する。3種のレジストの中でType-gCは明確な定在波が観察されるが、これはレジストの屈折率虚数部が小さく、結果的に光吸収が抑えられていることに起因するものである。

3.2.3.2.2 回折格子形状シミュレーション

上記の露光分布解析結果をもとに現像解析を行い、最終的に予想されるレジストの形状をシミュレートしてみる。この場合、これまで抽出したA、Bパラメータのほか、Cパラメータ、Eパラメータといった係数を求めることが必要となる。特に、Eパラメータ抽出においては、周知のようにDRM（Development Rate Monitoring）システムを用いた精密な測定が要求される。そこで、C、Eパラメータについては報告値¹⁰⁾を採用した。Eパラメータ抽出に用いられる現像溶解度曲線についての測定例をFig.3.13に示す。横軸が規格化 inhibitor濃度M、縦軸が現像溶解速度Rである。この溶解度曲線からγ値との関係をここで考察してみよう。まず、Type-gAについては、溶解開始点は大きいM値（0.97）をとり、M=1においても比較的高いR値を示す。すなわち、未露光部の膜減りが顕著に起こり、アスペクト比の高い形状を得る上で不適である。しかしながら、溶解度傾斜率、γ値が低いことは露光量が低くともある程度のパターンニングが可能であることを示し、簡便性には長けているレジストとも言える。次に、Type-gBは、傾斜率が高いものの、溶解開始点Mが0.74と比較的大きいため、比較的低エネルギーでパターンニングが可能であることを示唆している。最後に、Type-gCは溶解開始点は0.68と小さく、また傾斜率も高いため微細パターンニングには適するレジストといえるが、γ値が非常に高く容易にはパターンニングできず、柔軟性には富んでいない。さらに、これ

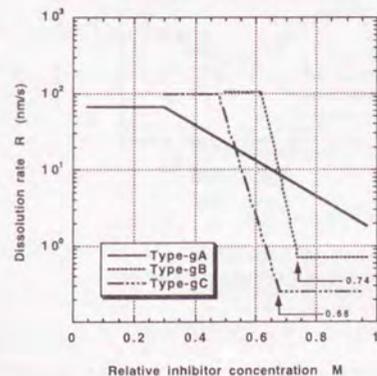


Fig.3.13. Dissolution rate as a function of relative inhibitor concentration for three g-line resists.

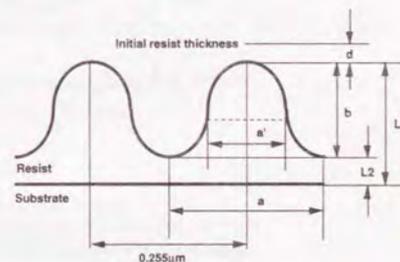


Fig.3.14. Parameter definition of the corrugations.

はPEB工程による感光基拡散を前提とするレジストであるため、プロセスが一工程付加されることも欠点と云える。事実、Type-gCは γ 値比較においてもg線、i線においてPEB有無で大幅に値が変化することがTable 3.3から明らかとなっている。

以上の結果からは、Type-gBが本目的には最も適しているレジストと予想される。以下、解析結果を順に述べる。また、後に検討を加える回折格子の形状パラメータをFig. 3.14に定義しておく。

(1) 偏光依存性

まず、GaAs基板に対するHe-Cdレーザの偏光依存性を考察する。Fig. 3.11より直感的に考察して、基板に対する光波の偏波に関し、垂直方向に位置するp偏光は露光エネルギーが高いがコラゲーションのコントラストは低い。一方、s偏光の場合、回折格子長手方向に偏波は位置するためコラゲーションのコントラストは高いものの露光エネルギーは低くなる。また、無偏光入射の場合は両者の中間を取ることが予想される。計算においては、上記理由により膜減り量 d (Fig. 3.14参照) から両偏光の等価的露光エネルギーを換算し、これからコントラストについて正確に求めることも可能であるが(またこれにより両偏光の等価エネルギーの差異を算出することも可能である)、ここでは簡単にType-gAレジストの場合の計算を行った。レジスト断面のシミュレーション結果をFig. 3.15に示す。露光エネルギーは $50\text{mJ}/\text{cm}^2$ である。予想されるとおり、p偏光の方が露光エネルギーが高く、膜減り量 d は大きいもののコントラスト、即ちアスペクト比は10%ほど低い。従って、コントラストを重視した後述の実験においては、全てs偏光を用いることとした。

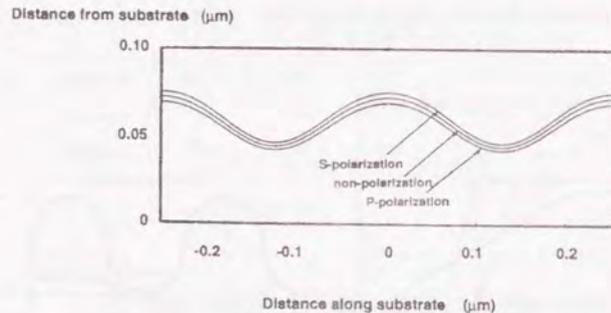


Fig. 3.15. Dependence of cross-sectional shapes of periodic corrugations on polarization of exposure beam. Type-gA resist, Exposure: $50\text{mJ}/\text{cm}^2$.

(2) 基板依存性

GaAs, Si基板両者の差異は主としてその屈折率に起因する。He-Cdレーザの露光波長近傍での複素屈折率 n および計算した反射係数 R を以下に示す。

GaAs	$n(326\text{nm})=3.501 - i1.909$	$R=0.4141$
Si	$n(325\text{nm})=5.052 - i3.211$	$R=0.5695$

SiはGaAsに比較して R が15%ほど高く、従ってパターン形成に必要なとされるエネルギーの点では有利である。Fig. 3.16にはType-gAレジストにおける現像後の残留膜厚と現像時間との関係を示す。コントラストの低い同レジストにおいては、一定の露光エネルギー下においても膜減りが生ずるが、僅かながらSiの方がGaAsに比してその傾向が強いことが分かる。

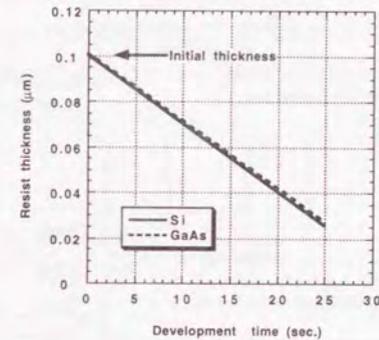


Fig. 3.16. Resist thickness as a function of development time. Type-gA resist, Exposure: $50\text{mJ}/\text{cm}^2$.

(3) 光学パラメータ依存性

次に、光学パラメータの差異、すなわちレジストの差異による形状変化についての考察を行う。計算条件を以下に示す。

- 波長: 325nm (He-Cdレーザ)
- 偏光: s偏光
- 基板: GaAs
- レジスト膜厚: $0.1\mu\text{m}$
- 感光基拡散距離: $0.05\mu\text{m}$ ($\approx \lambda/4n$) と仮定
- 露光時間固定での現像時間変化依存性 (5s-60s)

Fig. 3.17にパターン形成可能な露光エネルギー下における断面形状の計算結果を示す。Type-gAは $50\text{mJ}/\text{cm}^2$ と低露光エネルギーでパターンングが可能となるが、 γ 値が低く断面は正弦波形状に近い。また、現像時間許容幅が低く、現像30s後には回折格子は消失する。一方、Type-gB, gCの場合、露光エネルギーは僅かに高くなるものの、断面形状はコントラストの高い「矩形」を呈すとともに現像時間許容幅も広い。即ち、Type-gBにおいては20s、Type-gCにおいては60sにおいても、ほぼ同等のアスペクト比を有する回折格

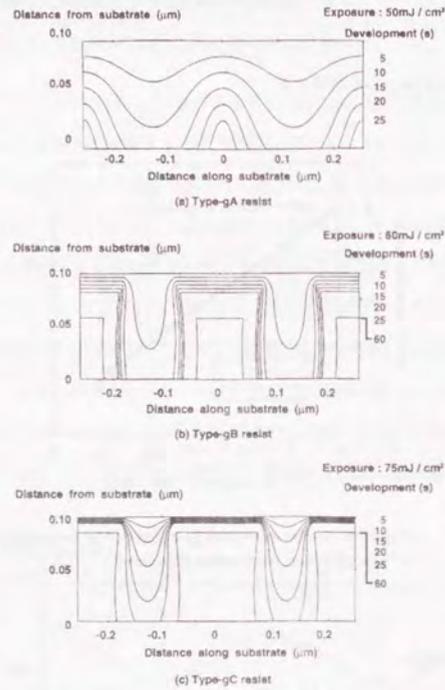


Fig.3.17. Dependence of cross-sectional shapes of periodic corrugations on development time.
(a) Type-gA resist, (b) Type-gB resist, (c) Type-gC resist.

子の形成が期待される。

次に, Fig.3.18には現像時間10s固定下での形成パターンの露光エネルギー依存性を示す。Fig.3.17と同様の結果が理解でき, Type-gAは比較的低エネルギーにおいても回折格子形成が可能であるもののコントラストは低い。一方, Type-gB, gCはいずれも高いコントラストが期待されるが, 高い露光エネルギーが必要とされる。特にType-gCはレジストの γ 値が高く, かつDRM測定から得られるレジストの溶解開始のinhibitor濃度も小さいため, このように極めて高い露光エネルギーが必要とされる。従って, 本レジストは高いエネルギーを得るのが困難なホログラフィック露光へは適さないものと考えられる。次に, 回折格子の形状パラメータについて得られた計算結果を関式化する。望まれるパラメータとしては, 露光領域にレジスト残渣がなく, 未露光領域のレジスト膜減りがなく, 更には高コントラストのために高いアスペクト比を与え, 従って, 矩形形状を保つためにアンダーカットのないことが求められる。これをFig.3.14の形状パラメータをもとに数値化すると以下ようになる。

d	→	0 μ m
L2	→	0 μ m
L1	→	0.1 μ m: in the case of an initial resist thickness; 0.1 μ m
a-a'	→	0 μ m
h=b/a	→	0.8: in the case of 2nd order period; 0.25 μ m and an initial resist thickness; 0.1 μ m

次に, 計算結果から求められたパラメータについて検討する。まず, 膜減り d と現像時間との関係及びレジスト依存性についてをFig.3.19に纏める。これまでの解析どおりType-gCは傾斜が最も小さく, Type-gAは最も大きい。但し, この場合, 各レジストの露光エネルギーは異なることに注意が必要である。次に, 同様に現像時間を10sに固定した場合の, 露光エネルギー依存性について計算した結果をFig.3.20に示す。一方, 露光部残渣L2と露光エネルギーとの相関をFig.3.21に示す。Type-gAは γ 値が低く低露光量でも現像は進行するが, γ 値の高いType-gB, gCにおいては露光エネルギーに対するL2値の変化は急峻である。また, アスペクト比 h との相関をFig.3.22に示すが, Type-gB, gCにおいては立ち上がりは急峻で値も0.6を超越し, a-a'値もほぼ0に近い矩形形状が達成されていることがわかる (Fig.3.18)。但し, Type-gCは高い露光エネルギーが要求される。一方, Type-gAは $h:1.2$ を越える高いアスペクト比も期待されるが, 現実にはFig.3.18に示すように極めて低いDuty比を有する回折格子となるため, 実用上好ましくない。

以上の結果からはType-gBがこの3種の中では最も適したレジストであるものと結論される。

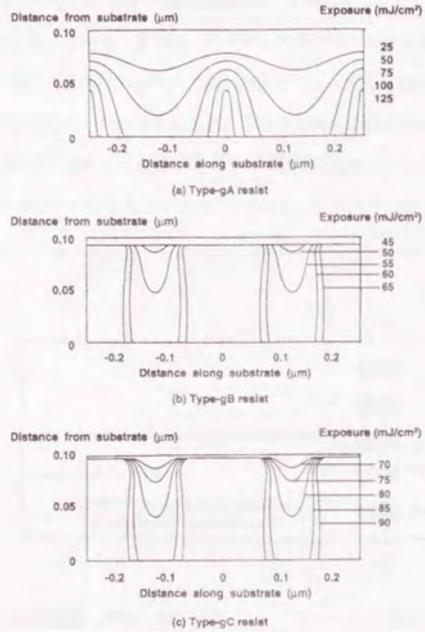


Fig.3.18. Dependence of cross-sectional shapes of periodic corrugations on exposure energy. (a)Type-gA resist, (b)Type-gB resist, (c) Type-gC resist. Development time: 10s.

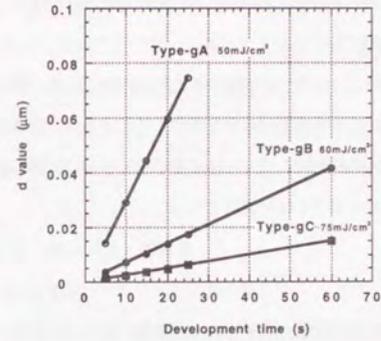


Fig. 3.19. d value as a function of development time on GaAs.

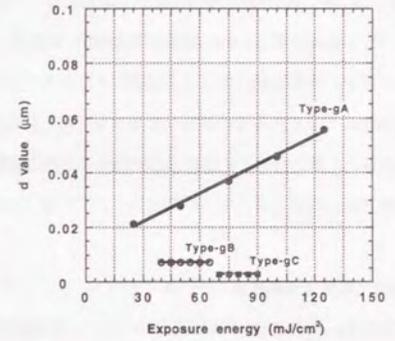


Fig. 3.20. d value as a function of exposure energy on GaAs. Development time: 10s.

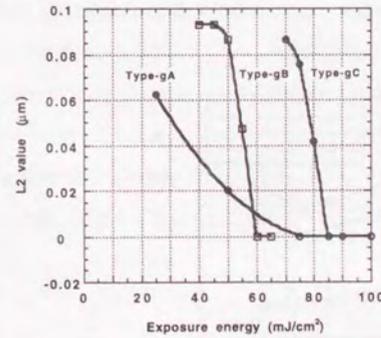


Fig. 3.21. L2 value as a function of exposure energy on GaAs. Development time: 10s.

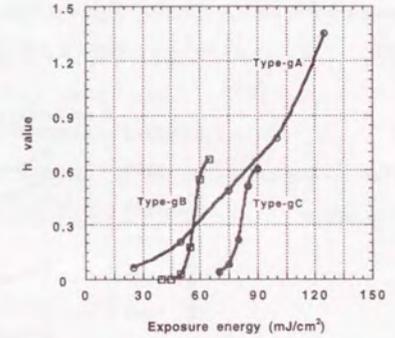


Fig.3.22. h value as a function of exposure energy on GaAs. Development time: 10s.

3.3 レーザホログラフィック露光を用いた高アスペクト比回折格子の作製プロセス

これまで得られた、解析結果をもとに実際の露光を行い、その特性評価を検討する。

3.3.1 露光システム

実験に用いた露光光学系はFig.3.2に示したとおりである。その仕様は以下の通りである。

1. He-Cdレーザ（金門電気製 CD-3041R）：Tube 3kV, 80mAにおいて出力10mW（effuser 1 A）。
2. 焦点位置 $f_1=18\text{cm}$ において出力 $10\mu\text{W}$ 程度、入射角 73.5° 。

これまでの計算においては2平面波の干渉を考えていたが、この光学系では2球面波の干渉となる。既に述べたように、 $5\mu\text{m}$ の空間フィルターを経た後は波面の乱れを極力減らすために、このような光学系を採用した。球面波のため露光後の回折格子周期は放物線の挙動を示すが、 15mm 以下のchip sizeにおいては殆ど単一周と考える問題はなく、これまでの計算結果をそのまま適用できる。

3.3.2 露光/現像結果

レジストは粘度25cpの原液を専用シンナーで希釈することで所望の膜厚（ $0.1\mu\text{m}$ 程度）を得ることとした。参考まで、Fig.3.23にはスピン回転数と膜厚との相関及び希釈率依存性を示す。基板との密着性に起因しレジスト種によりコート膜厚に分散が生ずるものの、希釈率 $1/2\sim 1/3$ では $0.1\mu\text{m}$ の膜厚を得ることが可能となる。GaAs基板を用いた露光現像後の回折格子の観察結果を以下に示す。現像は室温（ 23°C ）で行い、アルカリ現像液は通常のTMAH2.38%原液（室温保存）を適用した。ここでは、3.2節の解析結果に照合した結果のみを示すこととする。Fig.3.24はType-gAの結果である。計算結果通り、低エネルギーでパ

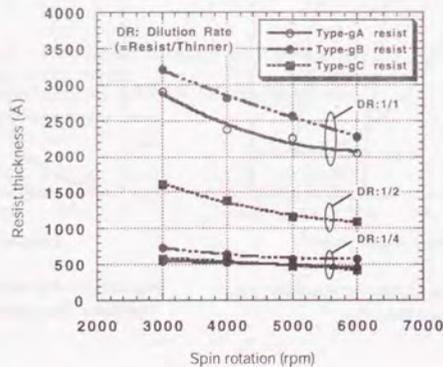


Fig.3.23. Resist thickness as a function of the number of spin rotation.

ターン形成は可能であるが、その形状は正弦波状であり、プロセス許容幅も小さく、現像後20s程度でほぼ回折格子は消失する。また、Fig.3.25はType-gBの結果であるが、 $45\text{mJ}/\text{cm}^2$ と露光エネルギーは若干高いものの現像許容幅は高く、45s現像においてはほぼ矩形形状の高アスペクト比回折格子が形成可能となる。また、Type-gCに関しては、Fig.3.26に示すように $45\text{mJ}/\text{cm}^2$ の露光エネルギーではパターン形成は殆ど見られない。以上の結果をもとに露光エネルギーを増加させ（本質的には露光時間を拡張したことによる）、Type-gA, gBについて最適条件下での露光を行った結果についてFig.3.27に示す。同図(b)に見られるようにこれまでに報告例のない、高いアスペクト比（ $h:0.8$ ）を有し、理想とする形状パラメータ（3.2.3.2節を参照）を満足する回折格子が実現されていることが分かる。

また、Type-gBレジストによる高アスペクト比パターン形成後、第6章で述べる塩素系ドライエッチによる転写を行い、GaAs/AlGaAs系DFBレーザの発振¹⁸⁾を確認したことも付記しておく。

3.3.3 i線レジストの適用

3.2節でのレジストに関する検討から「A, Bパラメータ」から、これまで適用してきたg線レジストに比してi線レジストが極めて有効であることが示唆された。本節では、最も可能性のある前述のType-iAレジストを用い、その露光/現像特性について実験的検討を行った結果について述べる。

3.3.3.1 露光実験・考察

実験系はこれまでと全く同一である。所定のシンナーで希釈後、 $0.1\mu\text{m}$ のスピンコート膜厚により実験を行った。アルカリ現像液も同一のTMAH2.38%原液（室温）を適用した。結果をFig.3.28に示す。 $40\text{mJ}/\text{cm}^2$ という低露光エネルギーであるが、現像時間10sにおいて良好な回折格子の形成が達成されている。この矩形形状はその後の30s現像までは保持することも確認されている。しかしながら、同系列のType-iBにおいては、必要とされる露光エネルギーは高く、プロセス再現性を含め未だ不明確な点も多い。従って、今後、最適レジストの抽出に当たっては、Cパラメータ及びEパラメータ、M-Rプロット（DRM測定）等の正確な把握が必要とされる。ここでは、i線レジストの有用性を見通しは十分に得たものとして結論づけた。

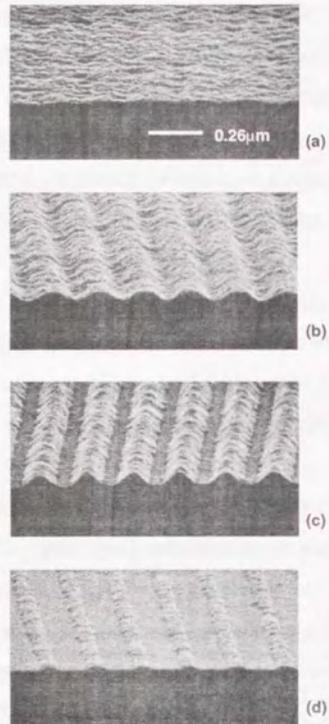


Fig.3.24. SEM micrographs of cross-sectional shapes in Type-gA resist on GaAs. Exposure: $30\text{mJ}/\text{cm}^2$. Development time: (a) 5s, (b) 10s, (c) 15s, (d) 20s.

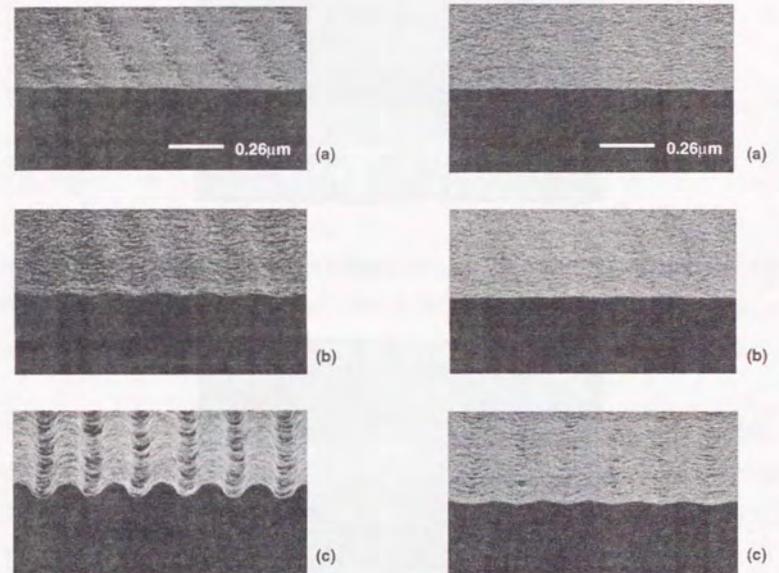


Fig.3.25. SEM micrographs of cross-sectional shapes in Type-gB resist on GaAs. Exposure: $45\text{mJ}/\text{cm}^2$. Development time: (a) 5s, (b) 15s, (c) 45s.

Fig.3.26. SEM micrographs of cross-sectional shapes in Type-gC resist on GaAs. Exposure: $45\text{mJ}/\text{cm}^2$. Development time: (a) 5s, (b) 15s, (c) 45s.

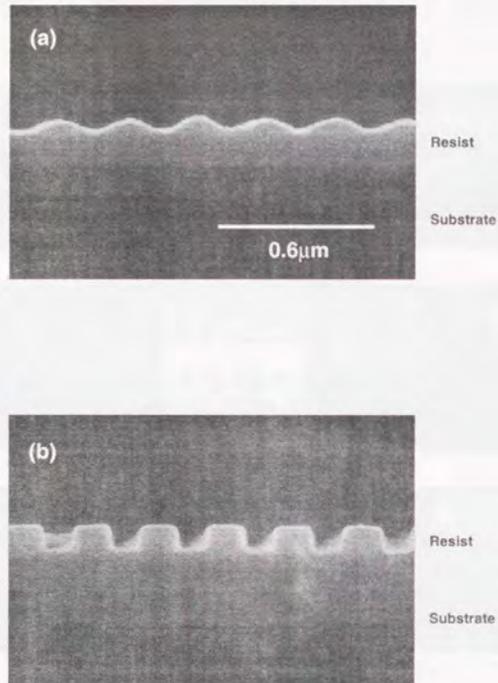


Fig.3.27. SEM micrographs of cross-sectional shapes in (a)Type-gA and (b)Type-gB resists on GaAs under optimized exposure and development conditions.

(a) Exposure: $45\text{mJ}/\text{cm}^2$, Development time: 5s,
 (b) Exposure: $55\text{mJ}/\text{cm}^2$, Development time: 10s.

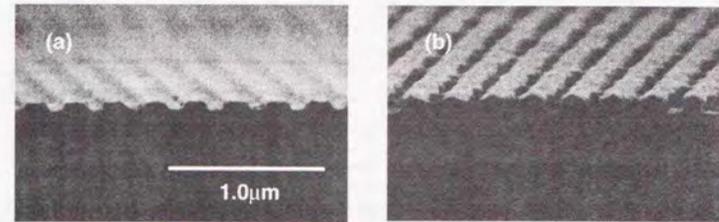


Fig.3.28. SEM micrographs of cross-sectional shapes in Type-iA resist on GaAs. Exposure: $40\text{mJ}/\text{cm}^2$. Development time : (a) 5s, (b) 10s.

3.4 まとめ

本章では、ポジレジストの光学パラメータの最適化により、レーザホログラフィック露光においても従来報告例のない高いアスペクト比（周期 $0.255\mu\text{m}$ でアスペクト比 0.8 の矩形形状）を有し、かつ現像工程においてプロセス許容幅の広い回折格子パターン形成を達成した。以下に得られた結果を纏める。

1. 各種ポジ型レジストの光学パラメータを見直し、従来使用してきたg線レジストは波長 325nm において「A+B」パラメータは極めて高い値を示し、感度の点、レジストプロファイルの点でもマイナスであることが明らかとなった。波長 325nm のレーザホログラフィック露光における最適レジストの目安として、g線における「A+B」パラメータ値が小さいこと、また、 γ 値が高いことがあげられる。
2. レーザホログラフィック露光によるパターン形状を得るため、位相シフト露光のモデルを用いたコヒーレント結像理論による解析手法を構築した。また、ベクトルモデルに基づいた解析を行うことで、入射光の偏光依存性についても精確な計算を可能とした。
3. 代表的なg線レジストについてパターン形状をシミュレーションし、感度の点では「A+B」パラメータ及び溶解度曲線から求められる溶解開始点が影響し、レジストのパターン形状については、レジストの γ 値及び溶解のためのinhibitor濃度が影響することを明らかにした。従って、最適なレジストの選択においてはこれらすべてを考慮した検討が必要である。
4. 現像後のパターン形状の解析結果は、露光実験結果と良好に一致した。結論的に、レーザホログラフィック露光においても従来報告例のない高いアスペクト比（周期 $0.255\mu\text{m}$ でアスペクト比 0.8 の矩形形状）を有し、かつ現像工程においてプロセス許容幅の広い回折格子パターン形成が可能であることを実証した。

5. i線レジストは325nmにおいても「A+B」パラメータの大幅な増加は見られず、良好な特性を与えるものと期待された。実際に、i線レジストの適用を試みたところ、40mJ/cm²程度の比較的低露光エネルギーで所期の回折格子パターン形成の見通しを得た。

参考文献

- 1) M. Nakao, K. Sato, T. Nishida and T. Tamamura: IEEE J. Sel. Areas Commun. **8** (1990) 1178.
- 2) W. W. Ng, C. Hong and A. Yariv: IEEE Trans. Electron Devices **ED-25** (1978) 1193.
- 3) A. Suzuki and K. Tada: Thin Solid Films **72** (1980) 419.
- 4) J. M. Verdiell, T. L. Koch, D. M. Tennant, K. Feder, R. P. Gnall, M. G. Young, B. I. Miller, U. Koren, M. A. Newkirk and B. Tell: IEEE Photon. Technol. Lett. **5** (1993) 619.
- 5) E. H. Anderson, V. Boegli, M. L. Schattenburg, D. Kern and H. I. Smith.: J. Vac. Sci. Technol. B **9** (1991) 3606.
- 6) W. C. MacColgin, R. C. Daly and J. Jech, Jr.: Proc. SPIE **920** (1988) 260.
- 7) L. F. Johnson, G. W. Kammiott and K. A. Ingersoll: Appl. Opt. **17** (1978) 1165.
- 8) F. H. Dill, W. P. Hornberger, P. S. Hauge and J. M. Shaw: IEEE Trans. Electron Devices **ED-22** (1975) 445.
- 9) 鶴田匡夫: 応用光学I (培風館, 1990)。
- 10) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics, 6th ed.*, Pergamon Press, New York, (1980).
- 11) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics, 6th ed.*, Pergamon Press, New York, (1980).
- 12) F. H. Dill: IEEE Trans. Electron Devices **ED-22** (1975) 456.
- 13) C. A. Mack: Opt. Eng. **27** (1988) 1093.
- 14) M. Yeung: Proc. Kodak Microelectronics Seminar **INTERFACE '85** (1986) 115.
- 15) R. E. Jewett, P. I. Hagouel, A. R. Neureuther and T. V. Duzer: Polymer Eng. Sci. **17** (1977) 381.
- 16) A. Sugimoto, T. Ito, S. Okano, M. Nozaki, T. Kato, K. Suko, M. Tsunematsu and K. Kadota: Proc. SPIE **1264** Optical / Laser Microlithography III (1990) 413.
- 17) *Handbook of Optical Constants of Solids*, ed. E.D. Palik (Academic Press, Orlando, 1985).
- 18) N. Chen, Y. Nakano, K. Tada, K. Okamoto, G. Morthier and R. Baets: *Proc. 7th Annual Meeting of Laser and Electro-Optical Society, Boston, 1994*, p.101.

第4章

微細周期回折格子の 電子線描画に関する研究

4.1 はじめに

周期的な回折格子は、従来、分光機器等の波長分散素子など様々な応用が考えられ実用化されている。最近では、光集積回路の分野において、光導波路上へ回折格子を設けることで新しいデバイスへの応用も考えられている。その例として、分布帰還型 (DFB) ¹⁾ もしくは、分布反射型 (DBR) レーザ、光フィルタ²⁾、グレーティング結合器³⁾などがあげられ、回折格子はいずれも1μm以下と極めて短周期であり、これまで用いられてきたルーリングエンジンによる機械的な彫刻技術等の適用は困難である。従って、LSIプロセス等で多用されているphotolithography/etching技術を用いるのが妥当といえ、代表的な作製技術として前章で記述した「レーザホログラフィック露光法」がある。そこでは、露光するphotoresistの光学パラメータの最適化によりプロセス許容幅が広く、高いコントラストを有する回折格子の形成について述べたが、周期は下式で示される値が限界であり、

$$\Lambda = \frac{2\pi}{2k \cdot \sin\theta} = \frac{\lambda_0}{2n \cdot \sin\theta} \quad (4.1)$$

(Λ : 周期, λ_0 : 露光波長, θ : 入射角度, n : 屈折率)

He-Cdレーザ (波長325nm) を光源として用いる以上、0.1μm以下のLine&Space (L/S) もしくは0.2μm以下の周期を有する回折格子の達成は極めて困難である。また、周期を局所的に変調させる場合⁴⁾や本論文で述べる導波路型光集積回路の様に局所的に回折格子を形成させる場合においては、プロセス工程を複雑化させ好ましくない。

これら問題点を凌駕するプロセスとして、電子ビーム露光技術があり様々な研究がなされてきている⁵⁾ものの、近接効果が顕著となる化合物半導体基板上で、以下の3条件を満足し実用レベルに値する報告は筆者の知る限り存在しない。

1. 0.25 μm 以下の短周期かつレーザ共振器程度の作用長を有する回折格子であること。
2. 高いスループットを有し、単純なプロセスであること。
3. ドライエッチング時に要求される、高いプラズマ耐性を有するレジストを用いること。

上記目的のために、まず本研究で適用する電子線描画装置（以下、EB描画装置と称する）の概要を述べた後、化学増幅型ネガ型レジスト「AZ-PN100（ヘキスト製）」を用いて単層プロセスでの検討を試みた結果について述べる。なお、描画特性の解析においては、レジストパラメータ（化学構造、現像特性値など）が明らかな「PMMA系ポジレジスト」について行うことで、EB描画方法に関する最適条件を抽出することとした。また、GaAs上の解析にあたり、Si基板を用いた場合との比較を交えながら述べる。次に、新しく開発された高感度ポジ型プラズマ耐性レジスト「ZEP-520（日本ゼオン製）」を用いた同様の高微細描画条件を抽出し、第6章で述べるPICデバイス開発への初段階とする。また、新たに構築したPICデバイスのためのレジストレーション（アライメント）方式に関しても第6章にて述べる。

4.2 電子線描画装置の概要

4.2.1 装置概要

本研究で使用する装置は、LaB₆電子銃とする3段電磁型レンズ系のEB描画装置（Fig.4.1）であり、GaAs系PICの高微細描画研究に焦点を合わせた様々な仕様を設定している。加速電圧は最高50kVまで1kV-stepで可変とし、走査領域は200 μm から2000 μm までの拡張が可能である。また、周辺部の走査電子の歪み補正も加え、描画領域接続時のエラーを極力排除する工夫もしている。最小ビーム径は0.006 μm ϕ 、最小ビーム電流は5pAで、電流安定度として1%/hourを保証している。試料導入は4インチ口まで可能であるが、PICのサンプルサイズに合わせた帯電防止ホルダーを製作し、様々なチップサイズに対応できる配慮をした。また、描画はビームのベクター走査とステージのステップ&リピート方式による移動で構成される。ビーム走査のインターフェイスとして18Bitのposition-DACを採用し、曲線パターンなどこれまでにない高密度描画ができる工夫をするとともに、デジタルスキャン/アナログスキャン双方の描画方式を選択できる配慮も加えた。装置は描画ユニット本体と排気系、照射系制御システム、排気系制御システム、インターフェイスシステムから構成され、描画命令を与えるWork-Station（WS）並びにデータ処理及びCAD設計を行うWSから構成される。

4.2.2 データ変換方式

EB描画システムの構築にあたっては、CADによる「LSI設計データ」を本装置を用いて、将来において

マスク（レティクル）及びウエハへ直接パターン転写を可能とする配慮もした。ここでは、そのための「データ変換システム」に関して述べる。Fig.4.2にその基本システムを示す。SX系CADで設計されたソースデータは、我々のLSI設計システムにおいてはMEBESフォーマットにて出図、指定のマスク描画装置にてパターン形成される。今回、構築したシステムにおいてはMEBESフォーマットからGDSII（STREAM）フォーマット等への変換も可能であるとともに、EB装置制御用WSに併設された簡易CADシステムにおいて簡単にデータ修正/付加が可能である。これらのCAD-LSI設計データはデータ変換システムにより本描画装置の認識するEBフォーマットへと変換され、実際のパターン描画が可能となる。

4.3 描画プロセスの最適化

電子線リソグラフィにおける解像度は光リソグラフィと異なり、本質的に電子の散乱（前方散乱、後方散乱）によって決定される。本章では、まず「Monte-Carlo法」を用い入射電子の軌跡を解析し、さらにパターン形成シミュレーションを行うことで、GaAs基板の近接効果の状態をSi基板との比較を交えながら検討する。具体的には、高微細パターン形成のために高加速電圧化と電子ビーム径縮小化の効果について検討し、次に化学増幅型レジストを用いての最適化実験へと発展させる。

4.3.1 理論計算

4.3.1.1 Monte-Carlo法による電子線描画計算の概要

まず、今回解析を行った電子線リソグラフィーについての計算手法をFig.4.3に示す。始めに、半導体基板上のレジストへ入射する電子が線ビームの場合について、確率過程を用いてシミュレーションする、いわゆる「Monte-Carlo法」により追跡し、電子の散乱軌跡及び散乱による電子のエネルギー損失量を計算する（point-spread/line-spread計算）⁷⁾。この損失量はレジスト内の蓄積エネルギーに相当する。又、線ビームとは奥行き方向に一樣で、解析断面の表面に沿った強度分布が δ 関数で表現されるビームを示す。次に実際の電子ビーム形状であるGauss分布に沿って、レジスト内の蓄積エネルギーを線ビームのconvolutionを取ることによって抽出する。最後に、レジスト内の蓄積エネルギーをもとにレジストを現像し、レジストプロファイルを求める。Fig.4.4にレジスト内の電子の軌跡のモデル図を示す。ここでは、奥行きy方向に一樣な線ビームをレジストに照射した場合を想定し、x-z平面内のエネルギー蓄積量を計算する。レジストに入射した電子は弾性散乱により角度 (θ_i, ϕ_i) だけ方向を変え、距離 ΔSi を飛行した後、再び弾性散乱により方向を変える。又、飛行中に非弾性散乱によりエネルギーを失う。なお、 θ_i, ϕ_i は同図に定義した角度であり、添字iはi番目の散乱を示す。ここでは入射電子と原子の散乱のみを考慮した単一散乱モデルを適用し、

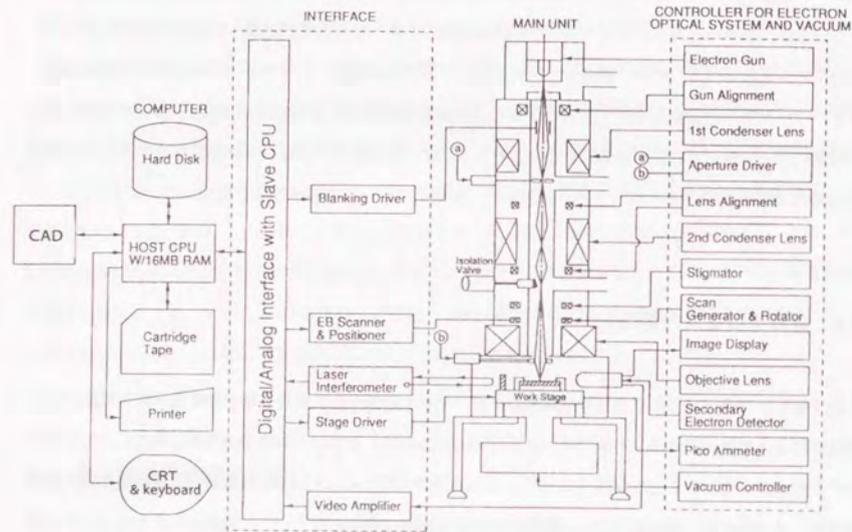


Fig. 4.1. Schematic drawing of EB exposure system.

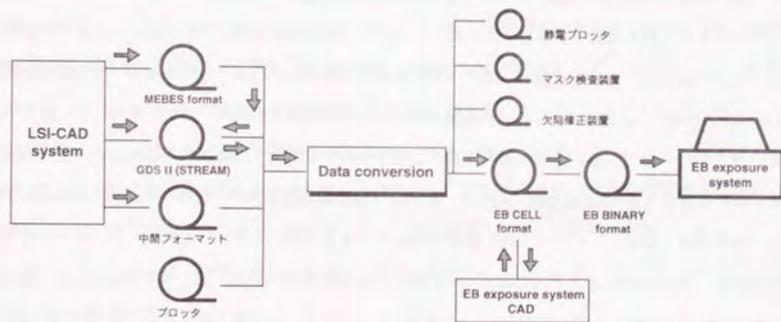


Fig. 4.2. EB-data conversion system.

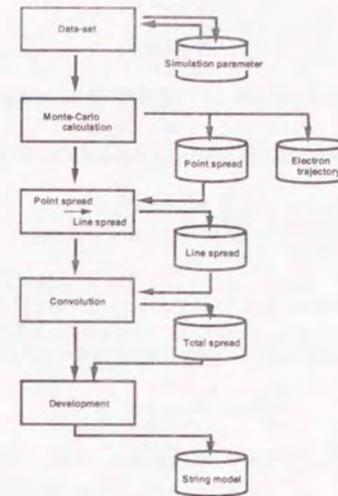


Fig. 4.3. Calculation flow for resist profiles.

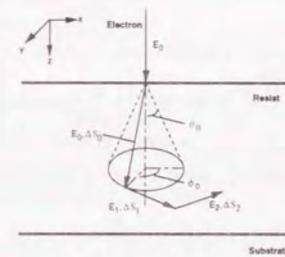


Fig. 4.4. Model of electron trajectory by Monte-Carlo simulation.

電子の散乱角はScreened Rutherfordの散乱公式を適用、エネルギー損失は非弾性散乱のみを仮定しBetheの阻止式を適用した。従って、非弾性散乱により電離した2次電子の散乱や、非弾性散乱による電子の軌跡の変化は無視している。以下、実際の計算項目を示す。

(1) 散乱確率の計算

標的原子の種類を散乱断面積を考慮した面積比計算で決定する。散乱中心として原子iである散乱確率 P_i を次式で決定する。

$$P_i = \frac{\frac{C_i \sigma_i}{A_i}}{\sum_{i=1}^M \frac{C_i \sigma_i}{A_i}} \quad (4.2)$$

ここで C_i は原子 i の重量分布、 A_i は原子質量数、 σ_i は全散乱断面積、 M は原子の全種類数である。この場合、標的原子種の番号 m は S_2 を0から1の一様乱数として次式を満足するものとする。

$$\sum_{i=1}^{m-1} P_i \leq S_2 < \sum_{i=1}^m P_i \quad (4.3)$$

(2) 散乱角の決定

レジストに入射した電子は弾性散乱により方向を変えるが、この散乱には原子内電子による原子核電荷の遮蔽を考慮したRutherford散乱を用いる。この場合の微分断面積は次式で与えられる。

$$\frac{d\sigma_m}{d\Omega} = \frac{Z_m^2 e^4}{16E^2} \left[\sin^2 \frac{\theta}{2} + \beta_m \right]^{-2} \quad (4.4)$$

ここで Ω は立体角、 Z_m は標的原子 m の原子番号、 e は単位電荷、 E は電子エネルギー、 θ は進行方向に散乱される角度、 β_m は原子核の周りの電子雲による遮蔽効果を示す無次元量⁶⁾である。立体角 $d\Omega$ について積分し散乱断面積 σ_m を求める。

$$\sigma_m = \int \left(\frac{d\sigma_m}{d\Omega} \right) d\Omega = \frac{2\pi Z_m^2 e^4}{4E^2} \frac{1}{2\beta_m(\beta_m+1)} \quad (4.5)$$

散乱角 $\pi-\theta$ にある確率 S_3 は

$$S_3 = \frac{\int_{\pi}^{\theta} \frac{d\sigma_m}{d\Omega} \sin\eta d\eta}{\int_{\pi}^0 \frac{d\sigma_m}{d\Omega} \sin\eta d\eta} \quad (4.6)$$

で示され、これに式(4.4)を導入することで、 θ を以下のように得ることができる。

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{2\beta_m S_3}{1 + \beta_m - S_3} \right] \quad (4.7)$$

同様に乱数を利用し、 ϕ を決定することができる。

(3) 散乱後の電子の自由行程

電子の平均自由行程 Λ は

$$\Lambda = \left(\rho N_A \sum_{i=1}^M \frac{C_i \sigma_i}{A_i} \right)^{-1} \quad (4.8)$$

で与えられる。ここで ρ は物質密度、 N_A はAvogadro数である。これに電子が飛行距離 x の位置で、単位長さ通過する間に衝突する確率を考慮して、電子の進む距離(自由行程) ΔS は一様乱数 S_1 を用いて

$$\Delta S = -\Lambda \ln S_1 \quad (4.9)$$

で示される。

(4) 電子のエネルギー損失量計算

非弾性散乱による損失エネルギー ΔS はBetheのエネルギー損失速度式⁶⁾を用いて計算する。

$$\left| \frac{dE}{dS} \right| = \frac{2\pi N_A \rho e^4}{E} \sum_{i=1}^M \left[\frac{C_i \sigma_i}{A_i} \cdot \ln \frac{\gamma E}{J_i} \right] \quad (4.10)$$

ここで S は電子の飛行距離、 e は素電荷、 J_i は原子のイオン化エネルギー、 $\gamma=1.166$ である。自由行程内で一様に電子がエネルギーを損失すると仮定すれば、式(4.9)と(4.10)から電子のエネルギー損失量は次式で与えられる。

$$\Delta E = \left| \frac{dE}{dS} \right|_{E=E_0} \Delta S \quad (4.11)$$

但し、 E_0 は標的原子へ電子が入射したときのエネルギーである。

(5) 分布ビーム電子による蓄積エネルギー

ここでは、実際に使用するGauss型ビームに関して電子線強度分布関数 $f(x)$ を次式で定義した。

$$f(x) = \sum_i f_G(x-x_i, \delta_i) W_i \quad (4.12)$$

$$f_G(x, \delta) = K \exp(-x^2/\delta^2) \quad (4.13)$$

ここで K は規格化因子、 x_i は分布の中心位置、 δ は標準偏差、 W_i は単位奥行き長さあたりの全電荷量である。最終的に強度分布 $f(x)$ に対するレジスト内の蓄積エネルギー分布の $E(x, z)$ は、線ビーム電子に対するレジスト内の蓄積エネルギー $E_L(x, z)$ を用いて次式で示される。

$$E(x, z) = \int f(x') \cdot E_L(x-x', z) dx' \quad (4.14)$$

(6) 現像

現像計算においては、通常の光リソグラフィで多用されている、String model⁹⁾を用いて表面形状を近似することとした。但し、現像速度式に関しては考慮が必要となる。後に詳細に報告するが、本研究の主題であるネガ型化学増幅型レジストは、従来のポリグリシジルメタクリレート(PGMA)等と異なり、露光により発生した酸を触媒とする反応を利用するものであり、そのモデルは十分に確立されていない。ここでは、確立している材料であるポリメチルメタクリレート(PMMA)を用いて現像計算を行い、EB露光の基礎的な見通しを得ることとした。現像速度式として次式を適用した。

$$R(D) = R_1 \left(C_m + \frac{D}{D_0} \right)^{-\alpha} \quad (4.15)$$

ここで α, C_m, D_0, R_1 等は実験的に求められるパラメータである。なお、解析においてはMIBK (methylisobutylketone) :IPA (isopropyl alcohol) =1:1の室温現像、PMMAレジストはDu Pont製Elvacite-2010を仮定して行った。

4.3.1.2 電子軌跡解析による近接効果の傾向の理解

光リソグラフィーにおけるGaAs基板とSi基板との露光条件の相違は、露光波長における複素屈折率から計算される基板表面反射率の差異、即ちレジスト内の定在波状態により主に決定される。一般のg線、i線といった波長域では、両基板にはその条件に大きな差異が見られない。しかしながら、電子の散乱状態が露光に起因するEB描画の場合、基板の原子量、半径、イオン化エネルギー等が全く異なる両者では露光条件に大幅な差異が発生する。これは主として電子の後方散乱に起因し、高微細パターン形成時に問題となりうる近接効果として処理される。勿論、Si基板での短周期回折格子あるいはGaAs基板での孤立した微細パターンの場合、条件抽出は困難とはいえない。Fig.4.5にGaAs, Si基板について、加速電圧 (V_{acc}) 10kVから50kVにて電子を入射した場合の各基板における電子軌跡を示す。明らかにGaAs基板を用いた場合はSi基板に比べて電子散乱が強く、表層に電子が蓄積される傾向が分かる。さらに、Fig.4.6には電子線入射点 ($r=0.0\mu m$) 及び入射点から $0.2\mu m$ 離れた位置 ($r=0.2\mu m$) での深さ方向の電子の蓄積エネルギーの分布を示す。特に、 $r=0.2\mu m$ においては基板最表層から $0.5\mu m$ 程度の位置まで加速電圧30kVにおいて、GaAsとSi基板で蓄積エネルギーに一桁程度の差異が生じており、目的とする回折格子形成の周期に相当するこの領域において近接効果が顕著に寄与する恐れが生ずる。Fig.4.7はこれらの結果を基に、50kV加速の場合の半径方向の蓄積エネルギーを定量化したものである。なお、本計算での入射電子数は10,000である。ここでは、入射ビームの蓄積エネルギーを半径方向位置をパラメータにして算出している。各基板に対し 1×10^{28} , 5×10^{28} , $1 \times 10^{29} eV/cm^2$ のエネルギーを有する深さを示す。換言すれば、入射電子の格子散乱が少なければ基板深くまで電子は到達し、一定の基板半径方向位置において蓄積されるエネルギーは低いものとなる。Siの場合、後方散乱の影響が比較的低く入射電子は基板深さ方向に速やかに進行してゆく。従って、基板内の蓄積エネルギー値 $1 \times 10^{29} eV/cm^2$ は半径 $0.05\mu m$ において $0.181\mu m$ 深さまで検出されている。一方、GaAsにおいては後方散乱の影響が強く同じく $1 \times 10^{29} eV/cm^2$ は半径 $0.05\mu m$ において $0.153\mu m$ 、半径 $0.15\mu m$ においては、 $0.2\mu m$ の深さまでしか存在せず、さらに蓄積エネルギー $5 \times 10^{28} eV/cm^2$ においては、基板深さ $0.2\mu m$ において半径 $1.0\mu m$ 位置まで検出されている。結果的に微細加工にはこの種の基板は極めて不利であることが理解できる。図にも示してあるように、同一蓄積エネルギーを有する半径方向位置を考えた場合、 $5 \times 10^{28} eV/cm^2$ レベルでは $0.05\mu m$ 程度、 $1 \times 10^{29} eV/cm^2$ レベルでは $0.03\mu m$ 程度の差異が両基板で存在している。従って、 $0.1\mu m$ 以下の描画においてはプロセス上の工夫が必要となるものと予想される。

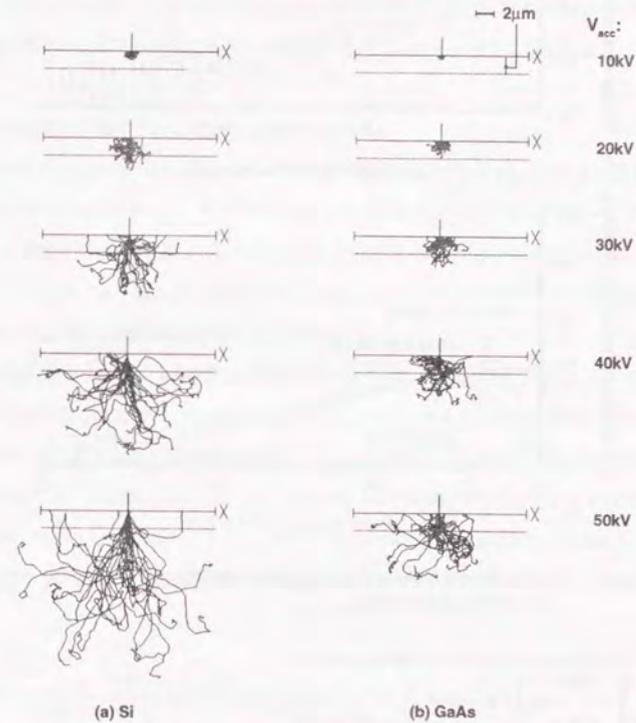


Fig.4.5. Electron trajectories by Monte-Carlo simulation.

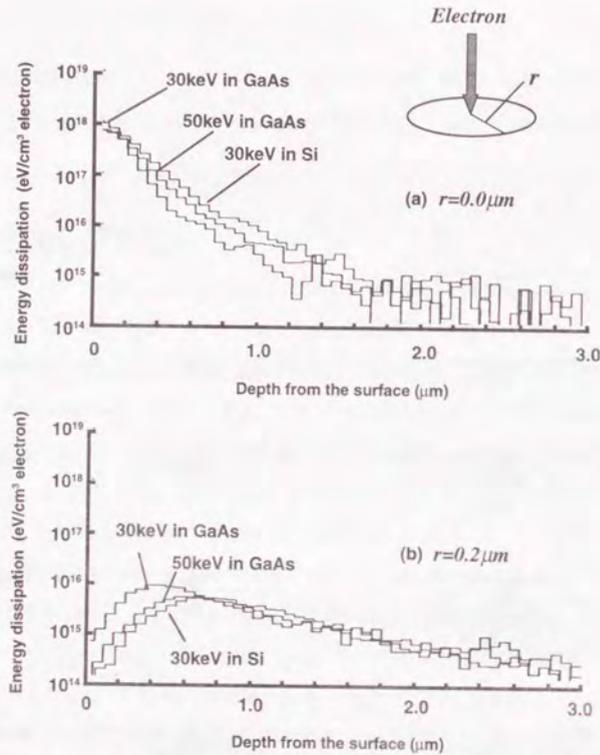


Fig.4.6. Energy dispersion as a function of depth from the surface. (a) $r=0.0\mu\text{m}$, (b) $r=0.2\mu\text{m}$.

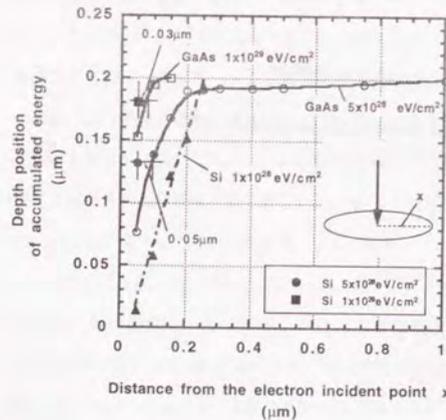


Fig.4.7. Calculation result of accumulated energy.

以上のことから、微細パターン形成には次の3種の方法が考えられる。

手法1) 基板の薄膜化: 基板からの後方散乱電子の寄与を低減。

手法2) 多層レジスト法: パターン形成の上層レジストの薄膜化による高解像度に加え、下層レジストの厚膜化による後方散乱電子の寄与の低減。

手法3) 高加速電圧化: 基板からの後方散乱電子の寄与を低減。

1), 2) は報告はあるが、プロセスは複雑化し実用性に欠ける。ここでは最も簡便な3) を主として適用し、更に他の様々な因子をも検討することで高微細パターンニングを目指すこととする。

4.3.1.3 GaAs基板上高微細パターン形成の加速電圧依存性

まず、脂肪族主鎖切断型の代表的ポジレジストであるPMMAを用い、PMMA/GaAs系及びPMMA/Si系における描画特性の数値解析を行う。ここでは一般的な4line描画により与えられるパターン形状をシミュレートする。計算電子数は10,000個とし、加速電圧依存性の計算においてはdose量を $300\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、 $600\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、さらにビーム径 $0.01\mu\text{m}$ (Gauss分布の $1/e^2$) とし、加速電圧を30kV, 50kVの2種について検討した。参考まで使用した計算パラメータをTable4.1に示す。

GaAs基板の描画線幅について現像時間との相関をFig.4.8に示す。ここではポジ型レジストを用いての計算であるため現像時間の増加に伴いパターン線幅は増加の傾向を取るが、加速電圧が高いほど微細なパターン幅の形成には有利であることが理解できる。次に、後に詳述する化学増幅型ネガレジストについて同様の効果があることを実験的に検証するため、point exposure分布測定^{10,11}を試みた。この分布解析については、4.3.1.2節で述べたMonte-Carlo法で得られた電子散乱の状態の一解析手法として用いられる。電子ビーム入射位置から半径方向に対して規格化された露光量 $f(r)$ は、下式の様な3Gaussian分布関数で近似できる。

$$f(r) = \frac{1}{\pi(1+\eta+\nu)} \left[\frac{1}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\beta^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right) + \frac{\nu}{\gamma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\gamma^2}\right) \right] \quad (4.16)$$

ここで、半径 r に対し、第1項は前方散乱による項、第2項は後方散乱に起因する項、第3項は補正項であ

Table4.1. Material parameters for calculation.

	Density		z	J (eV) *
PMMA (C ₅ H ₈ O ₂)	1.220	C	6	145.598
GaAs	5.307	H	1	18.600
Si	2.340	O	8	126.809
		Ga	31	407.114
		As	33	436.773
		Si	14	153.615

(*J: ionization energy)

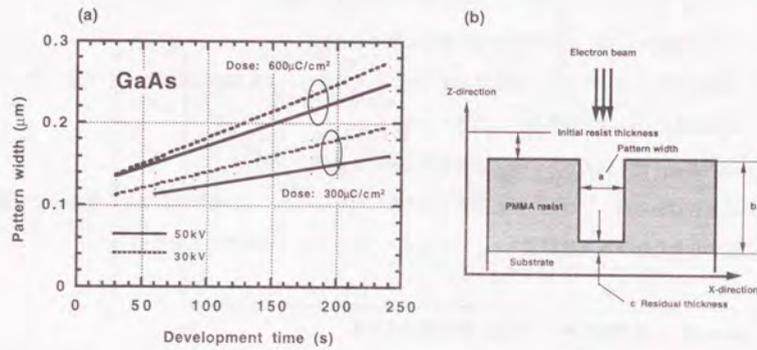


Fig.4.8. Calculated pattern width on GaAs as a function of development time (a) and schematic drawing of the posirest patterning (b).

る。各パラメータは下地材質、レジストの種類、電子ビーム照射加速電圧により異なる値を有する。ここでは実験的にpoint exposure分布を導きだし、上式への簡単なfittingを行った。結果をFig.4.9に示す。本結果から高加速電圧化に伴い、電子は様々な方向に発散し露光エネルギーは分散する。従って、表面近傍の蓄積エネルギーは緩和され、近接効果抑制に有利であるものと結論づけられる。また、同図の右にはpoint-exposure現像後パターンの光学顕微鏡像(規格化露光量: Normalized exposure (N.E.) $0.012 \mu\text{m}^{-2}$ の場合)を挿入した。この顕微鏡像からもその効果は明らかである。

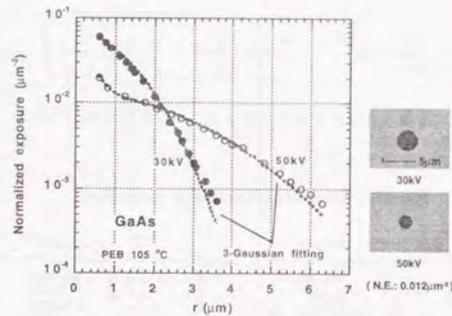


Fig.4.9. Point exposure distribution with 3-gaussian fitting and microscopic images.

4.3.1.4 GaAs基板上高微細パターン形成の電子ビームスポット径依存性

Fig.4.10にはスポット径とパターン線幅との関係をGaAsとSiとの比較を含めて示す。描画条件はこれまでと同様に $0.1 \mu\text{m}$ の4line描画とし、ここでは加速電圧50kV、現像時間は240sとした。この条件においてはスポット径は小さいほど有利であることが分かる。また、現像後のパターン線幅については、近接効果の影響を受けるGaAsはSiに較べて微細パターン形成には極めて不利であることも明らかである。次に、化学増幅型レジストを用いて実験的な検討を行った結果をFig.4.11に示す。これはPEB温度为 105°C 、doseを $101 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ とし、 $0.125 \mu\text{L}/\text{S}$ を目標としてCAD設計し描画を行った結果である。化学増幅型レジストにおいてもPMMAレジストの解析結果 (Fig.4.10) と同様な傾向を示している。

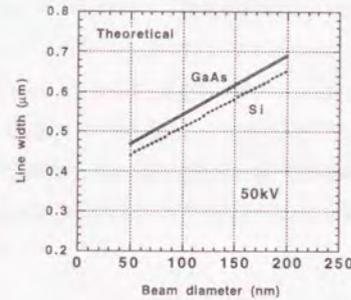


Fig.4.10. Calculated line width as a function of EB diameter.

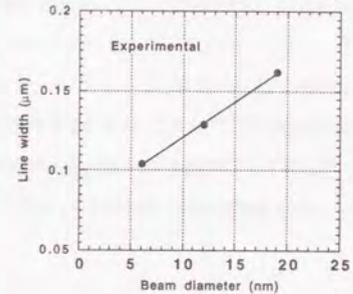


Fig.4.11. Experimental line width as a function of EB diameter using AZ-PN100 resist. PEB temperature: 105°C .

4.4 レジストパラメータの最適化実験

これまでの解析及び実験結果からEB描画面での最適化の方向を纏めると、

- 1) 高加速電圧化
- 2) 微小ビーム径

の2点に集約される。本節では、レジストの特性面についての考察を行い、短周期パターン形成への指針とする。

4.4.1 化学増幅型ネガレジスト

従来の電子線ネガ型レジストにおいては、分子内に $-\text{CH}_2-\text{CH}-$ 等の活性単位を含む高分子が高エネルギー

照射により励起され架橋反応が誘起する。結果的に分子量は見かけ上無限大となり、不溶、不融化する。この系のレジストとしてはポリグリシジルメタクリレート (PGMA) が既に市販されているが、最近、露光により発生した酸を触媒とする反応を利用した、高感度の化学増幅型ネガレジストが開発された。従来のレジストは1光子で最大1反応が約束されるが、この化学増幅型レジストにおいては発生した1つの酸は多くの反応(化学増幅反応)に寄与できるため、本質的に高感度化が期待される。化学増幅型レジストは元来、g線、i線レジストとして多大なる貢献を与えたNQD系NobolacレジストがKrFエキシマレーザ(249nm)において大きな吸収に至り、その対応策として生まれたコンセプトである。今回、検討を行うのは、その3成分系¹⁰⁾である。この場合、レジストは酸発生剤、架橋剤、ノボラック樹脂の3成分から構成される。酸発生剤としてはハロゲン化物、架橋剤としてはヘキサメチロールメラミンがあげられる。レジスト反応機構はFig.4.12に示すように、ハロゲン系酸発生剤から生ずる酸を触媒として熱反応(脱水縮合)により、メラミンを介してノボラック樹脂が架橋/硬化するものと考えられている。反応前はアルカリ可溶、架橋後はアルカリ不溶となりネガパターンが形成される。この特徴は高感度、高解像力、即ち露光部/未露光部のアルカリ溶剤に対する高い溶解度差にある。しかしながら、高微細パターン形成にあたっては、同レジストの酸拡散、即ち露光後ベーク(PEB)条件等を十分に抽出しておく必要がある。ここでは、4.3節までのEB描画の最適条件をもとにPEB温度を変化させ、レジストの γ 値の変動を検討した。

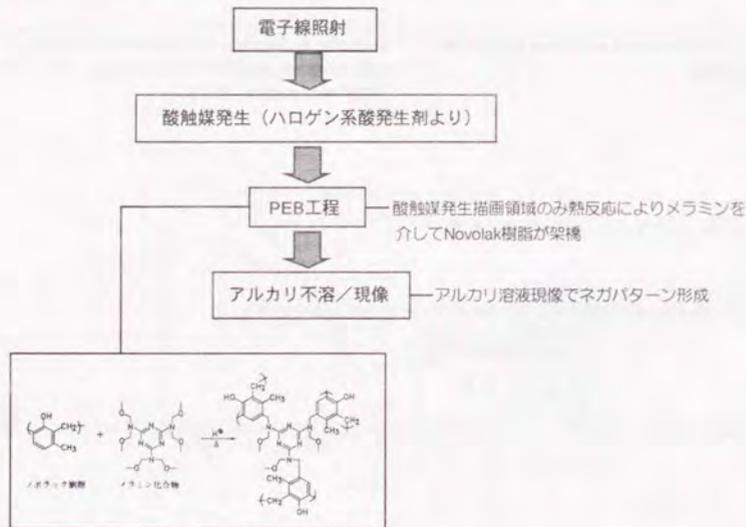


Fig.4.12. Chemical reaction of chemically amplified negative-tone photoresist.

4.4.2 レジストパラメータの最適化実験 (PEB温度低下に伴う γ 値向上の定量的確認)

この系のレジストを用いてのパターン形成は、一般的な光リソグラフィーの流れに準じている。この中で最も重要なのはPEB工程である。繰り返すことになるが、化学増幅型レジストの場合、電子線照射により構成される酸発生剤により酸触媒を発生し、ネガレジストに必要な架橋反応は酸触媒下で促進される。描画後のPEB工程により酸の発生した描画領域のみが選択的に架橋反応を誘起し、結果的に水性アルカリ不溶となる。従って、PEB条件により解像度、感度とも大幅に変化することとなる。ここではPEB温度を $\pm 1.2^\circ\text{C}$ 以内に精密制御し、かつ微細加工に有利な高加速電圧50kVでレジストの γ 値を求めた結果をFig.4.13に示す。露光量と現像後の規格化残膜厚との関係を、PEB温度依存性について検討した結果から得られたものであるが、PEB温度の低下に伴い γ 値は向上する傾向を示す。なお、 γ 値はFig.4.14において下記の式で定義した。

$$\gamma = \left| \log \left(\frac{Q_0}{Q_1} \right) \right|^{-1} \quad (4.17)$$

ここで、 Q_0 は残膜厚率10%から50%までの1次回帰外挿から求めた、レジスト初期膜厚を維持するための最小露光量、 Q_1 は同様に求めた、膜厚が0となる時のJust露光量である。次回帰処理した値を用いた。結果としてPEB温度95 $^\circ\text{C}$ においては γ 値は15.7まで増加し、高コントラストなレジストパターン形成が期待できる。

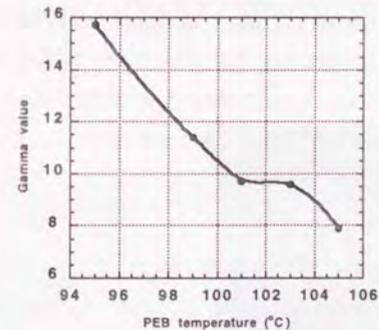


Fig.4.13. Gamma value as a function of PEB temperature.

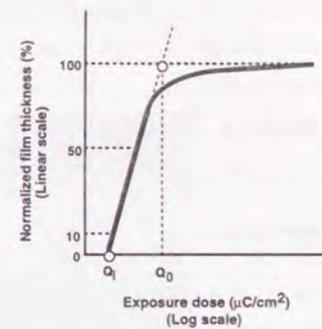


Fig.4.14. Schematic of normalized film thickness as a function of exposure dose.

4.5 描画特性

本節では、これまでの解析・実験結果をもとに実際の描画を行った結果を述べる。

4.5.1 化学増幅型ネガレジスト 描画特性評価

まず、Si 基板上に描画したレジストのパターン形状を評価する。Fig.4.15に示す様に露光時間（ドーズ量）の低下に伴いアンダー露光になる傾向が理解されるが、Siにおいては $0.10 \mu\text{mL}/\text{S}$ レベルにおいても高いアスペクト比（ ~ 3 ）を得ることが可能である（Fig.4.16）。次に、GaAs基板上に描画したレジスト回折格子について、SEM観察像をFig.4.17、Fig.4.18に示す。 $0.1 \mu\text{mL}/\text{S}$ においてはプロセス許容幅が広く、PEB温度を高く据えても問題なく描画は可能である。 $0.06 \mu\text{mL}/\text{S}$ においては既に示したように、高加速電圧（50kV）、微小ビーム径（6nm ϕ ）、微小ビーム電流（2pA）に加え、PEB温度を95℃まで低下させ、 γ 値を高くすることで解像するに至っている。また、これらの評価は最近、SEMを使用せずに金属顕微鏡（ニコン製：新型オプチフォト）により簡単に観察が可能となっている。その原理は解像力の向上の為、1）収差抑制と機械強度の向上を両立、2）観察像を見えにくくする余分な反射光の抑制、の2点を工夫したことにある。実際の顕微鏡像をFig.4.19に示す。ここでは $0.15 \mu\text{m}$ 、 $0.20 \mu\text{mL}/\text{S}$ までの光顕像を示すが、 $0.10 \mu\text{mL}/\text{S}$ 解像までの観察は可能である。

4.5.2 反応性イオンエッチングによるGaAsへの転写特性評価

化学増幅型レジストの塩素ガス系プラズマ耐性を確認するため、レジストパターンニング後に BCl_3/Cl_2 系ガスにてRIE処理を行った。ここではパワー密度 $0.34\text{W}/\text{cm}^2$ 、カソード材料としてSiを用いた（詳細な条件は第6章を参照）、結果をFig.4.20に断面SEM像として示す。良好に転写されており、アンダーカットもない良好な回折格子が形成されていることが明らかである。また、Fig.4.21には酸素プラズマ処理によるレジスト除去後のSEM高倍像（a）と低倍像（b）を示す。コントラストの高い矩形形状の回折格子が広いフィールドにおいて均一に転写されていることが分かる。

4.5.3 化学増幅型レジストの問題点とポジ型プラズマ耐性レジストへの展開

これまで述べてきた化学増幅型レジストは高感度、高微細化に加え、局部的にネガパターンを形成できる点で極めて有用である。しかしながら、一方ではフォトリソ工程間のインターバル条件（時間、温度、雰囲気）がレジスト特性に大きく影響するとの報告もある。その中でも露光からPEB工程までのインターバルが特に顕著な影響を与える。これは「タイムディレイ効果」¹³⁾と称され、様々な検討がなされている。その原因として、次の様なモデルが考えられている。

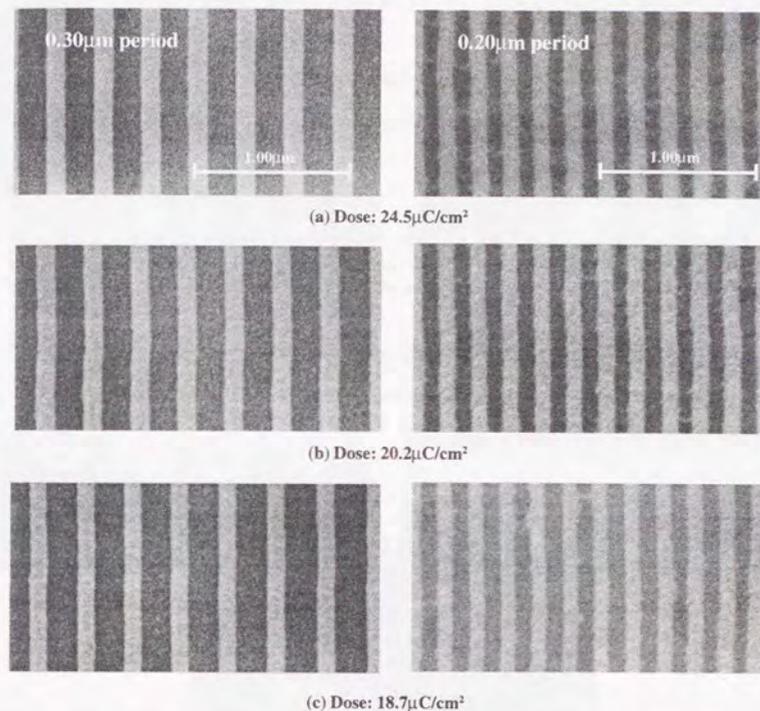


Fig.4.15. SEM micrographs of periodic corrugations by AZ-PN resist with dependence on exposure dose. Resist thickness: $0.28 \mu\text{m}$.

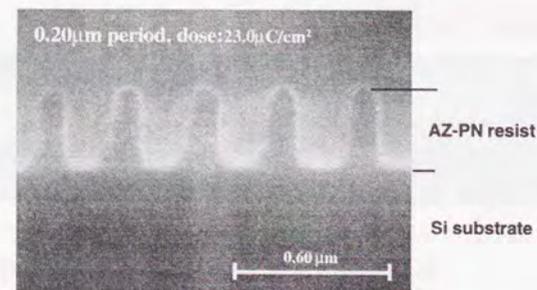


Fig.4.16. SEM cross-sectional micrograph of periodic corrugations.

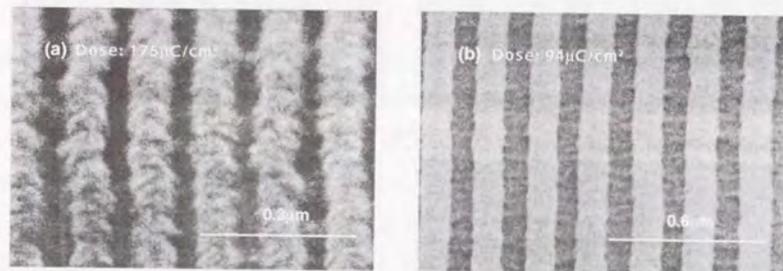


Fig.4.17. SEM micrographs of AZ-PN resist periodic corrugations on GaAs. (a) 0.12 μ m period (resist: 50nm thick), (b) 0.20 μ m period (resist: 100nm thick).

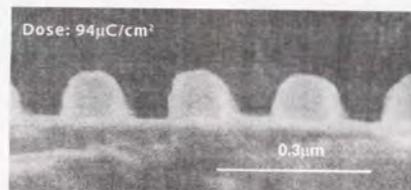


Fig.4.18. SEM cross-sectional micrograph of AZ-PN resist periodic corrugations on GaAs.

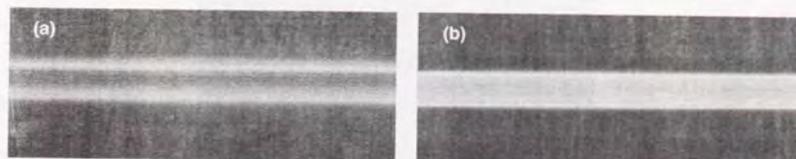


Fig.4.19. Microscopic images using new-type OPTIPHOTO™. (a) 0.15 μ m L/S, (b) 0.20 μ m L/S.



Fig.4.20. SEM micrographs of periodic corrugations in GaAs. (a) cross-sectional shape, (b) low magnification image. Resist thickness: 100nm. Dose: 98 μ C/cm².

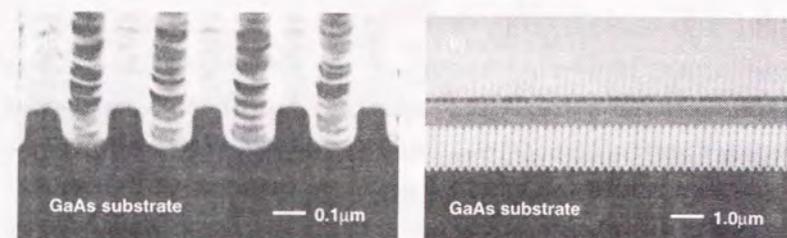


Fig.4.21. SEM micrographs of periodic corrugations in GaAs. (a) high- and (b) low-magnification images. Dose: 98 μ C/cm².

1) 発生した酸が空気中のアミンなどの不純物により失活して、本来の触媒としての機能を失うことに起因するというモデル。

2) PEB処理での酸の揮発が関与するモデル。¹⁴⁾

1) については、アミンの取り込み易さを論じた報告¹⁵⁾ やクリーンルームの微量アンモニアを除去する活性炭フィルタを試作し適用した報告¹⁶⁾ があり、この場合、フィルタ適用によりアンモニア濃度が0.2ng/l (適用無し: 2ng/l) において、通常2分間の大気中放置により0.25 μ mL/S形成が不可能であったのに対し、1時間の放置まで可能となっている。電子線描画においては、パターン描画後も真空中で放置しており、取り出し後PEBまでの放置時間を極力短縮した方法を採用したため、0.1 μ mL/Sレベルまではさほど大きな影響を有していない。しかしながら、それ以下の高密度/高微細描画においては7時間以上の真空中放置により解像度に障害が発生することが、本実験においても定性的に明らかとなったため、ここではGaAsへの短周期回折格子形成のもう一つの方策として、新たに開発された高感度ポジ型レジスト「ZEP-520」を使用した描画特性について、実験的に検討した結果について述べる。

「ZEP-520」は、 α -ジクロロベンゼンを溶媒とした総分子量55,000のレジストである。Fig.4.22の構造式に

示される様に芳香族骨格を有することでプラズマ耐性を向上し、またClを側鎖に結合させることで高感度を実現させたもの¹⁷⁾である。化学増幅型と異なり、一般的な主鎖切断による低分子量構造体形成に基づく本レジストにおいては、描画特性は膜厚に大きく依存する。まず、Monte-Carlo法を用いたレジストの電子阻止能に関する計算を行ったところ、 $0.1\mu\text{m}$ 膜厚レベルにおいては、通常のPMMAとレジスト内の蓄積エネルギーには大きな差異は見られなかった。GaAs上のレジストパターンSEM像をFig.4.23に示す。

$0.12\mu\text{m}$ 周期 ($0.06\mu\text{mL/S}$ 相当)まで解像が確認されている。RIEを用いたGaAsへの転写後のSEM写真をFig.4.24に示す。GaAs系DFBレーザに要求される2次回折格子の周期までは良好に描画されており、形状も

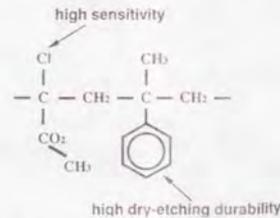


Fig.4.22. Structure of ZEP-520 resist.

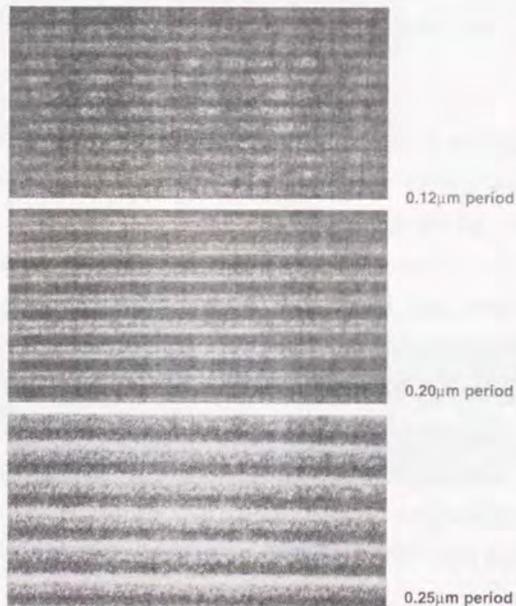


Fig.4.23. SEM micrographs of the periodic corrugations on GaAs using ZEP-520 resist. Resist thickness: 80nm . Dose: $91\mu\text{C}/\text{cm}^2$ to $112\mu\text{C}/\text{cm}^2$. Magnification: $\times 30,000$, Electron beam condition: 50keV , 5pA .

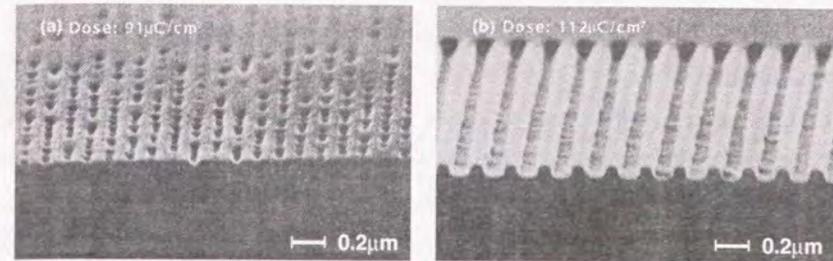


Fig.4.24. SEM micrographs of periodic corrugations in GaAs using ZEP-520 resist. (a) $0.12\mu\text{m}$ period, (b) $0.20\mu\text{m}$ period.

矩形に近く高い結合効率が期待される。また、Dose量もしくはパターン描画方法の変更によりDuty比の制御も容易に行われる。従って、第2章で解析したように2次回折格子において最も高い結合係数を得られる75% Dutyの形状も良好に達成される(第6章を参照)。一方、Fig.4.24(a)に示す様に1次回折格子 ($0.12\mu\text{m}$ pitch) に関しては、本来のレジスト分解能仕様値 ($0.1\mu\text{m}$) を超越するものであるが、僅かにアンダー露光の傾向があるものの描画条件の最適化、もしくはRIE前に酸素プラズマを用いたレジストスカム除去により、達成は十分に可能と思われる。

4.6 まとめ

化学増幅型ネガレジスト (AZ-PN100) を用いた単層プロセスにより、近接効果の影響が強いGaAs基板上において、 $0.2\mu\text{m}$ period以下の周期性回折格子を初めて形成し、基板上に転写した。但し、リソグラフィ工程間のインターバル時間に強く影響を受けることが定性的に明らかになったため、プラズマ耐性ポジレジスト (ZEP-520) も追って同様に検討し、良好な結果を得た。以上の結果をもとに第6章では集積レーザの作製を試みることにするが、以下に本章にて得られた結果をまとめる。

- 1) Monte-Carlo計算法により電子散乱状態をGaAs, Si両者について比較検討し、表面蓄積エネルギーを定量化することで、GaAs基板上で微細周期回折格子形成時に生ずる近接効果の問題を明らかにした。
- 2) 高微細パターン形成における電子線描画条件に関し、ビーム径の縮小化及び高加速電圧化が有利であることをPMMAレジストについて解析を行い、化学増幅型レジストにおいても同様の傾向を有することを実験的に明らかにした。
- 3) 化学増幅型レジストプロセスにおいて重要なPEB工程を実験的に評価し、 95°C までの低温化により