

平成 26 年度 修士論文

金属キャビティ構造を用いた
InP 系多重量子井戸レーザの研究

Research on InP-based multiple-quantum-well laser
with metallic-cavity structure

2015 年 2 月 5 日 提出

指導教官 種村拓夫 准教授

東京大学大学院 工学系研究科

電気系工学専攻

37-136441 沖本 拓也

Abstract

金属キャビティレーザは、オンチップ光インターコネクトやバイオセンシングなど、幅広い分野へ応用できる、非常に微細で、低しきい値電流を実現できる光源として注目を集めてきた。しかし、金属による光の損失が大きくなるという問題から、未だ実用的な素子の実現は報告されていない。そこで、本研究では、高性能かつ実用的な金属キャビティレーザの実現を目指して研究をおこなった。

まず、ダイエレクトリック(TM)モードでのレーザ発振を目的とした素子の設計をおこなった。目的の発振波長である $1.55\ \mu\text{m}$ において TM モードの利得を得られるように、作製に使用するウェハ層構造のコア層に引っ張り歪 MQW 構造を導入した。そのうえでファブリペローレーザのモデルを用いてキャビティ全体の特性の検討を行った。検討の結果、 1000cm^{-1} 以下のしきい値利得を実現できることがわかった。

金属キャビティレーザの作製プロセスおよび測定方法は当研究室では行われてこなかったため、本研究ではこれを確立した。まず、キャビティ構造の光学的特性を評価するための、PL 測定用デバイス構造の設計、および作製プロセスの開発を行った。このとき、基板除去技術を作製プロセスに導入した。つぎに、PL 測定をおこなうための測定システムを構築した。同様に、EL 測定用のデバイスの設計、および作製プロセスの開発、EL 測定システムの構築をおこなった。

構築した作製プロセス、測定系に基づいて、まず PL 測定用のデバイスの作製、および評価を行った。その結果、 $1.06\ \mu\text{m} \times 2.29\ \mu\text{m}$ の構造において、キャビティの共振ピークを観測することに成功した。PL スペクトルを解析した結果、共振ピークはプラズモニックモード(TE)であることが示唆された。また、ドライエッチングによって生じた側壁の傾きがキャビティの特性を劣化させており、励起光として用いたレーザによって大きな発熱が生じている可能性が示された。以上の考察より、設計の改善によるダイエレクトリックモード(TM)でのレーザ発振の実現可能性が示された。

上記の問題点をふまえて、EL 測定用のデバイス作製、および評価を行った。その結果、キャビティ構造の PIN 接合の IV 特性、および電流注入による EL 光の観測に成功した。EL 光を解析した結果、レーザ発振は実現されていないが、LED として動作していることを確認することが出来た。このとき、連続的に 1mA 以上の電流を流すと、ダイオード特性が劣化してゆくことが確認された。また、IV 特性を解析したところ、 $8\sim 10\text{k}\Omega$ という非常に大きな直列抵抗があることが確認された。この直列抵抗は、P コンタクトにおける電極の接触抵抗によるものであり、これによって発熱が生じ、PIN 接合のダイオード特性を劣化させている可能性がある。また、デバイス構造においてリークパスが存在し、PIN 接合に電流注入できているデバイスの数が少ないことがわかった。

以上より、金属キャビティレーザ実現への道筋が示された。まず、光学的特性の向上を

目指して、エッチング形状の向上、構造の最適化を行なう必要がある。次に、電気的特性向上のために、接触抵抗の小さい電極の形成が必要となる。また、熱による影響を考慮した構造の最適化も不可欠である。このような問題を解決することで、キャビティの特性を向上し、電流注入でのレーザ発振が実現されることを期待する。さらに、本研究で確立した作製プロセスを発展させて、金属キャビティの導波路との結合、シリコン基板との集積など、実用的なデバイスの実現を期待することができる。

目次

第1章 序論	9
1.1. 研究の背景	9
1.1.1. オンチップ光インターコネク​​ト	9
1.1.2. バイオセンシング	10
1.2. 金属キャビティレーザ	11
1.2.1. プラズモニックレーザ	11
1.2.2. ダイエレクトリックレーザ	15
1.2.3. 先行研究のまとめ	18
1.3. III V族半導体光デバイスのシリコン基板への集積	19
1.4. 本研究の目的	20
1.5. 本論文の構成	20
第2章 金属キャビティレーザの原理と設計	21
2.1. 金属キャビティレーザの原理	21
2.1.1. 光導波路の原理および解析法	21
2.1.2. 半導体レーザ共振器の原理	36
2.2. 金属キャビティレーザの設計	43
2.2.1. 立体構造と断面構造	43
2.2.2. 決定すべきパラメータ	44
2.2.3. 設計の手順	44
2.2.4. 層構造の設計	45
2.2.5. 立体構造の設計	46
2.3. まとめ	48
第3章 半導体プロセス技術	49
3.1. 薄膜形成技術	49
3.1.1. スピンコート法	50
3.1.2. 真空蒸着法	51
3.1.3. スパッタ法	52
3.1.4. 化学気相堆積法	52
3.2. リソグラフィ	53
3.2.1. フォトリソグラフィ	54
3.2.2. 電子線リソグラフィ	55
3.2.3. リフトオフ	61
3.2.4. トレンチフィリング	62

3.3. エッチング	63
3.3.1. ウェットエッチング	65
3.3.2. ドライエッチング	66
3.4. 基板接合および基板除去	70
3.5. 実装	72
3.5.1. ワイヤボンディング	72
3.5.2. フリップチップボンディング	73
3.6. まとめ	74
第4章 金属キャビティレーザの測定手法	75
4.1. PL測定とEL測定	75
4.1.1. PL測定	75
4.1.2. EL測定	76
4.2. 測定系の構成	77
4.2.1. 表面観察系	78
4.2.2. スペクトル観測系	79
4.2.3. 励起光制御系	80
4.2.4. 温度制御系	81
4.2.5. 電流駆動系	81
4.3. 測定方法	82
4.3.1. 表面観察系による位置の確認	82
4.3.2. 二次元スキヤニング	82
4.3.3. Z軸方向の一次元スキヤニング	83
4.3.4. L-L・I-L特性の取得	83
4.4. 基板除去を行わない場合の測定手法	83
4.4.1. 赤外光を利用した電極パターン観測システム	83
4.4.2. 基板除去を行わないPL測定	84
4.5. まとめ	85
第5章 PL用デバイスの作製と測定	87
5.1. デバイス構造	87
5.1.1. 立体構造	87
5.1.2. 平面構造	87
5.2. デバイスの作製	88
5.2.1. メサ構造の形成	90
5.2.2. 絶縁膜・金属薄膜の形成及び平坦化	95
5.3. 基板除去プロセス	97
5.3.1. 裏面除去の手順	97

5.3.2. 本研究で検討した三つの基板除去プロセス.....	99
5.4. 作製の結果.....	102
5.5. 作製したデバイスの評価.....	103
5.5.1. 測定結果.....	103
5.5.2. 考察.....	104
5.5.3. 改善すべき点.....	108
5.6. まとめ.....	108
第6章 EL用デバイスの作製と測定.....	109
6.1. デバイス構造.....	109
6.1.1. 平面構造.....	109
6.2. デバイスの作製.....	110
6.2.1. メサ構造の形成.....	112
6.2.2. 絶縁膜・金属薄膜の形成及びコンタクトオープン.....	114
6.2.3. 電極パターンの形成.....	116
6.3. 作製の結果.....	117
6.4. デバイス実装.....	117
6.4.1. 劈開とデバイスのマウント.....	118
6.4.2. ワイヤボンディング.....	118
6.5. 作製したデバイスの評価.....	119
6.5.1. IV測定結果.....	119
6.5.2. ダイオード特性の解析.....	119
6.5.3. 金属キャビティレーザの直列抵抗.....	120
6.5.4. EL光の観測.....	122
6.5.5. 改善すべき点.....	123
6.6. まとめ.....	124
第7章 結論.....	125
参考文献.....	127
本研究に関わる発表等.....	133
謝辞.....	134

第1章 序論

1.1. 研究の背景

半導体レーザは 1962 年に発明されて以来、半世紀にわたって新たな構造の提案・実証、それに伴う特性の向上が重ねられてきた¹。1970 年にはダブルヘテロ構造を用いて室温連続発振が、1980 年代には DFB レーザ、DBR レーザの発明による単一スペクトル化が達成された²。現代社会になくてはならない光通信ネットワークは、これら半導体レーザの発展がなければ実現できなかつたと言っても過言ではない。

このような半導体レーザの特性向上と並行して、レーザ本体の微細化も進められてきた。微細化をおこなう利点はたくさん挙げることができるが、基本的なものは高集積度、低しきい値、低消費電力の三つである。サイズが小さければ、フットプリントが小さくなり、注入する電流量も少なくて済み、その結果消費電力も抑えることができる。

今日、一般的に用いられている半導体レーザには、DFB レーザ、DBR レーザ、VCSEL などがあるが、これらはマイクロスケールの構造・大きさをもっている。一方、次世代の半導体レーザとして注目されているのが、ナノレーザと呼ばれる、ナノスケールの構造を持った微小なレーザである。ナノレーザには、フォトリソニック結晶レーザと金属キャビティレーザの二つの種類があり、それぞれ盛んに研究が行われている。

ナノレーザはさまざまな技術への応用が期待されているが、その中でも注目されているものを以下に二つ述べる。

1.1.1. オンチップ光インターコネク

オンチップ光インターコネクは、コンピュータチップ上で光通信を用いる技術である。チップ上の電気通信を光通信に置きかえることで、通信速度の向上、および低消費電力化が実現できると期待されている。

オンチップ光インターコネクが注目されるに至った原因として、マルチコアプロセッサ技術があげられる。マルチコアプロセッサ技術とは、複数のコアをプロセッサ内に封入して、演算速度を向上させる技術である。今日のチップ高性能化はこの技術によって実現されてきたが、問題となっているのがコア間の通信である。コア間の通信には銅配線が用いられてきたが、通信速度に限界があり、消費電力増大の原因となっている。オンチップ光インターコネクは、この解決策として期待されている技術である。

しかし、チップ上で光通信が電気通信よりもよい性能を実現するには、光源として使用するレーザも高性能でなければならない。使用するレーザは、10Gbps 以上の高速変調、1pJ

以下の低消費電力，プロセッサに集積出来る程度の微細化の三つを満たさなければならぬ³。ナノレーザは，この要請を満たすレーザとして注目されている。

1.1.2. バイオセンシング

バイオセンシングは化学物質や有機物，特にタンパク質を検出する技術であり，医療，食品，環境などさまざまな分野で需要が高まっている技術である。タンパク質のセンシング手法で，現在一般的に用いられているのは，タンパク質が蛍光性を持つよう化学処理をしたのち，顕微鏡を用いて解析を行う方法である。しかし，この方法には二つの問題点がある。複雑な化学処理を行なうため非常におおきなコストがかかることと，処理によってタンパク質が本来の性質を失う可能性があることである。

これに変わるセンシング手法として注目されているのが，レーザを用いたセンシングである。レーザの発振波長は，レーザ表面に物質が付着することによって変化する。これは，レーザ共振器の透過屈折率が変化するためである。この特性を利用すれば，化学処理を行わずに，タンパク質を検出することができる⁴。

この方法に用いるレーザには，高感度，低コスト，利便性，高速応答，および高集積度が求められる。ナノレーザは，これを実現するデバイスとして盛んに研究がなされている⁵。

1.2. 金属キャビティレーザ

前節で述べたとおり，ナノレーザにはフォトニック結晶レーザと金属キャビティレーザの二つがある．フォトニック結晶レーザは，フォトニック結晶構造を用いるため，少ない損失でナノオーダーの領域に光を閉じ込めることができるが，フットプリントは μm^2 オーダーとなる⁶．一方，金属キャビティレーザは，金属を用いて光を閉じ込めるため，光の損失は大きくなるが，フットプリントを数 μm^2 以下まで小さくすることができる⁷．本論文では，フットプリントをより小さくすることのできる，金属キャビティレーザに注目した．

金属キャビティレーザは，金属を用いて微細化を実現したレーザの総称である．金属によって得られる効果には，表面プラズモン共鳴による光閉じ込め効果と，高い反射率を活かしたミラーとしての効果の二つがある．金属キャビティレーザにおいて，この二つの効果は同時に起こるため，完全に切り分けることは難しい．本論文では，前者を主に利用したものをプラズモニックレーザ，後者を主に利用したものをダイエレクトリックレーザと呼ぶことにする．

1.2.1. プラズモニックレーザ

プラズモニックレーザは，金属の表面で生じる表面プラズモン共鳴効果を利用して，光の回折限界以下の領域に光を閉じ込めるレーザである．報告されているレーザのほとんどは大きさが $1\mu\text{m}$ 以下であり，現在，世界で最も小さなレーザである．その一方で，金属による光の損失が大きくなるため，室温での電流注入による連続発振を実現した例は未だ報告されていない．本項では，プラズモニックレーザの研究例を三つに分けて紹介する．プラズモンによる光閉じ込めの原理については，2.1.1.②を参照いただきたい．

① 可視光領域における光励起レーザ発振

表面プラズモン効果を用いる場合，可視光のような波長の短い光の方が狭い領域に光を閉じ込めることが出来る(2.1.1.②(iv)参照)．このため，可視光領域を用いたプラズモニックレーザは非常に小さく，大きさが 100nm 以下の実証例も報告されている．また，光の閉じ込めが非常に強いため，金属と半導体を接触させるだけという単純な構造を持つレーザが多い．ここでは，可視光でのレーザ発振に成功したデバイスを二つ紹介する．

一つめはナノワイヤレーザである．ナノワイヤレーザは，fig. 1.1 に示すように，金属の上に誘電体膜を積層し，その上に利得媒質として化合物半導体のナノワイヤをのせた構造を持つレーザである．プラズモン効果によってナノワイヤと金属の界面に光を閉じ込め，ワイヤの軸方向に光を往復させながら増幅してレーザ発振を実現している．2009年に，ナノワイヤレーザの低温下での光励起による 489nm でのパルス発振が報告された⁸．この論文では，金属に銀，誘電体膜に $5\sim 20\text{nm}$ のフッ化マグネシウム，ナノワイヤには直径 100nm ，長さ約 $76\mu\text{m}$ の硫化カドミウムが使用されている．2011年には，同様の材料を用いて，ナ

ノワイヤではなく 1 μ m 角, 厚さ 45nm のパッド状の硫化カドミウムを用いたレーザも報告されている⁹. この研究では, 室温下で光励起による 495.5nm, 508.4nm でのパルス発振に成功している.

二つめは, SPASER (surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation) と呼ばれるデバイスである. SPASER は, 金属の粒子を利得媒質でコーティングした構造を持ち, プラズモン効果によって金属粒子の周囲に光を閉じ込めるレーザの一種である. 2009 年に報告された SPASER は, 直径 44nm という非常に小さな構造で, 光励起によって 13.2 の Q 値を得ることに成功している¹⁰. 中心の金属粒子は直径 14nm の金粒子で, 利得媒質には, ケイ酸ナトリウムと蛍光色素 OG-488 をドーブした二酸化ケイ素が使用されている.

② 赤外領域における光励起レーザ発振

プラズモン効果による光閉じ込め効果が可視光に比べて弱い赤外領域では, 利得媒質を金属で挟み込んだ構造を持つプラズモニックレーザが多く報告されている. このようなプラズモニックレーザの多くは, 電流注入ではなく光ポンピングによってキャリアを励起している. これは, 光励起の場合, 電極構造が必要なく, 作製プロセスが容易になるためではないかと私は考えている. ただし, 光励起をおこなうデバイスの作製には, 励起光の注入を容易にするために基板を除去するプロセスを導入する 경우가多く, その点ではプロセスの煩雑さが増す.

ここでは, 光励起を実現したプラズモンレーザとして, 2012 年に M. Khajavikhan らによって報告されたスレッシュホールドレスレーザを紹介する¹¹. このレーザは, fig. 1.2 に示すようなリング構造のレーザである. 利得媒質には InGaAsP の多重量子井戸 (MQW: Multiple quantum well) が, 利得媒質を覆う金属には銀とアルミの合金が使用されている. このデバイスは測定温度 4.5K において光励起でパルス発振に成功し, 265 程度の Q 値を実現した. また, このレーザでは明確な発振しきい値が観測されなかったため, しきい値ゼロを実現したレーザとして, 彼らはスレッシュホールドレスレーザと呼称している.

この論文において彼らは, パーセル効果がスレッシュホールドレスレーザを実現した原因である, と述べている. パーセル効果とは, レーザの体積を小さくすると自然放出係数が大きくなる効果のことである. パーセル効果を示す式を下に示す¹².

$$\beta_{sp} = \Gamma_{\alpha} \frac{2\pi}{V} \left(\frac{c}{n_r} \right)^3 \frac{1}{\omega_0^2 \Delta\omega} \quad (1.1)$$

自然放出係数 β_{sp} とは, 自然放出光がレーザの発振モードに結合する割合のことである. つまり, 自然放出係数が大きくなれば少ない自然放出光でレーザ発振が起こり, 発振しきい値が小さくなる. この論文では, 測定結果から $\beta_{sp}=0.95$ という非常に高い自然放出係数が算出されている. 彼らは, リング構造を用いたことによる, 利得媒質への高い光閉じ込め Γ_{α} , 小さなキャビティ体積 V , および利得帯域への重ね合わせの良さ, などによって実現したと

述べている.

パーセル効果は, トランジスタにおけるムーアの法則と同じように, レーザの微細化を進めるモチベーションの一つとなっている.

③ 赤外領域における電流注入レーザー発振

プラズモンレーザーは構造が非常に小さいため, 電流注入構造を作製するのは難しい. そのため, 報告例は少ないが, ここでは二つのデバイスを紹介する.

一つめは, 2007年に M. T. Hill らによって報告されたレーザーである⁷. このレーザーは, fig. 1.1 に示すような幅が 260nm という非常に細い円柱状のレーザーである. 円柱構造は, InP および InGaAs のダブルヘテロ構造からなり, その周囲は窒化シリコンと金によってコーティングされている. このデバイスは, 温度 10K において電流注入での連続発振に成功し, Q 値が 200, 閾値電流が 3.5 μ A という高い性能を実現している. このレーザーは, 電流注入が可能な世界最小のレーザーであり, この記録は 2007 年に発表されてから未だに破られていない.

二つめは, おなじく M. T. Hill らによって 2009 年に報告されたレーザーである¹³. このレーザーは一つめのレーザーと材料はほとんど同じだが, 構造は大きく異なり, fig. 1.4 に示すように幅が狭く, 奥行きが極端に長い直方体の構造をもっている. 最も幅の細いものでは幅 90nm, 奥行き 6 μ m である. このデバイスは, 測定温度 10K において電流注入での連続発振に成功し, Q 値が 170, 閾値電流が 75 μ A を達成している.

以上の研究例から, 私は以下のように推測している. プラズモン効果を用いるレーザーでは, 光の損失が非常に大きくなるため, 奥行方向を数 μ m まで長くしたり, リング構造を導入したりすることで, 光の損失を補償する必要があるのではないだろうか.

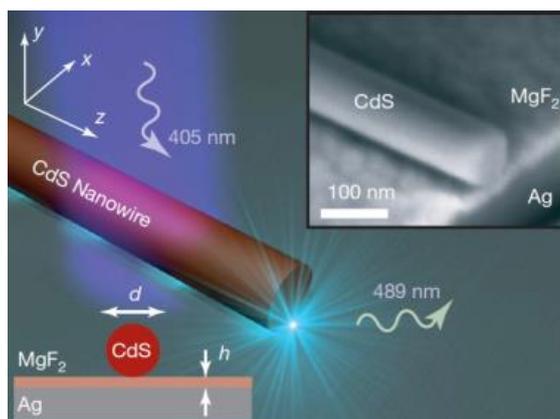
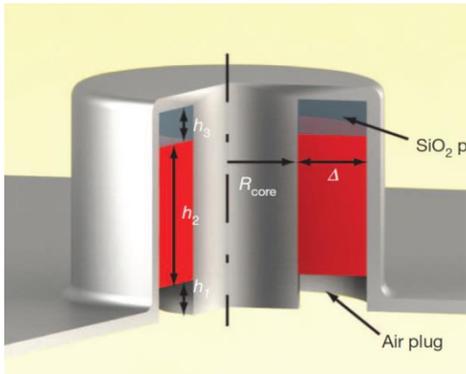
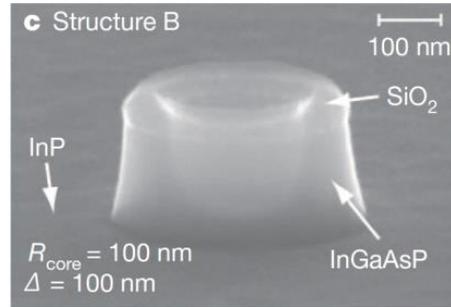


fig. 1.1 Schematic of nanowire-laser⁸.

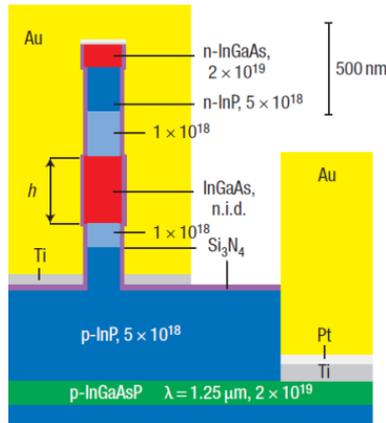


(a) Schematic

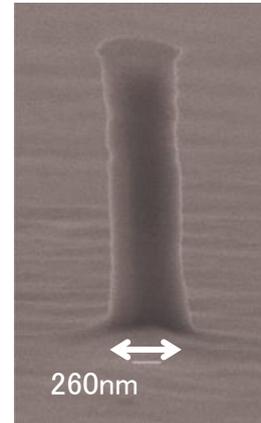


(b) SEM figure

fig. 1.2 Thresholdless laser¹¹.

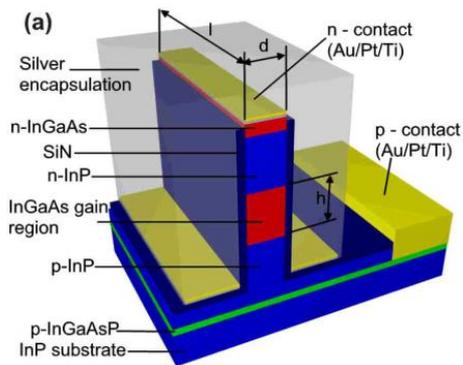


(a) Schematic

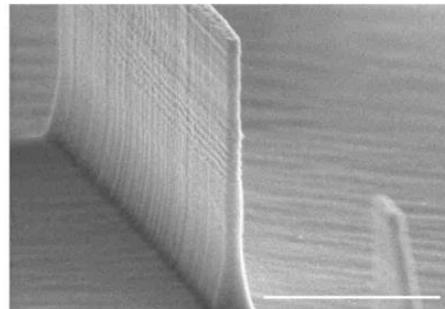


(b) SEM figure

fig. 1.3 First demonstration of metallic-cavity lasers⁷.



(a) Schematic



(b) SEM figure

fig. 1.4 Metal-insulator-metal sub-wavelength plasmonic waveguides¹³.

1.2.2. ダイエレクトリックレーザ

ダイエレクトリックレーザは、全体の構造を数 μm 程度まで大きくすることで、プラズモン効果による光の損失を抑えたレーザである。構造自体は 1.2.1 項で示したプラズモニックレーザとほとんど変わらない。金属は単純に反射率の高いミラーとしてはたらくため、損失の大きいプラズモニックレーザによりも高い特性を実現することができる。室温での電流注入による連続発振を達成しているのは、金属キャビティレーザのなかではダイエレクトリックレーザのみである。本項では、赤外領域におけるダイエレクトリックレーザの研究例を二つに分けて紹介する。

① 赤外領域における光励起レーザ発振

ここでは、2010 年に M. P. Nezhad らによって報告された、ダイエレクトリックレーザの光励起レーザ発振を紹介する¹⁴。このレーザの構造を fig. 1.5 Metallo-dielectric laser 14fig. 1.5 に示す。利得媒質は円柱状の MQW で、 SiO_2 とアルミでコーティングした構造を持つ。この論文では、直径 490nm のデバイスの、室温下、光励起によるパルス発振を報告している。

このレーザの特徴を以下に二つ述べる。一つめは、キャビティを構成する金属にアルミを用いている点である。金・銀のような貴金属を使用しない場合でも、レーザ発振が実現できることがこの研究によって示された。二つめは、絶縁膜の厚みが比較的大きい点である。このレーザの構造における最適な絶縁膜の厚みは、シミュレーションの結果 200nm となった、と彼らは述べている。プラズモニックレーザでは、プラズモン効果を利用するために絶縁膜を数十 nm 以下まで薄くしたものが多いが、ダイエレクトリックレーザは、プラズモン効果による光の損失を抑えるために絶縁膜を厚くしたものが多い。

② 赤外領域における電流注入レーザ発振

光の損失が小さく、デバイス構造も大きいダイエレクトリックレーザは、電流注入による発振が複数報告されている。ここでは、二つのデバイスを紹介する。

一つめは、J. H. Lee らによって 2011 年に報告された Pedestal pillar レーザである¹⁵。このデバイスは、fig. 1.6 に示すようにコアの部分がやや膨らんだ円柱構造をもっている。コア部分の直径が $1.5\mu\text{m}$ のデバイスは、測定温度 77K において、電流注入下で連続発振に成功し、0.9nm という非常に細い線幅を実現した。測定温度を 140K まで上昇させても発振は確認されたが、それ以上の温度では発振を確認できなかった。これは、温度の上昇による金属キャビティにおける光損失の増大が原因であると彼らは述べている。

二つめは、K. Ding らによって 2012 年に報告されたレーザである¹⁶。この論文において、金属キャビティレーザは、初めての電流注入による室温連続発振を達成した。このレーザの構造を fig. 1.7 に示す。直方体のダブルヘテロ構造は、窒化シリコンと銀でコーティング

されている。この論文において、幅 340nm、奥行き 3 μ m のレーザが、電流注入下での室温連続発振を達成した。閾値電流は 1mA 以下、線幅は 4nm であると報告されている。

この研究の特徴は、プラズモニックレーザに対するダイエレクトリックレーザの優位性を、実験的に示したところにある。詳しい原理は 2.1 節で述べるが、幅の狭い直方体構造では、TE (Transverse electric) 偏光をもつプラズモニックモードと、TM (Transverse electric) 偏光を持つダイエレクトリックモードの二つ断面の導波モードが存在する。プラズモニックレーザは前者を、ダイエレクトリックレーザ後者を利用している。

この論文では、幅 280nm、奥行き 6 μ m のレーザに電流注入を行ったところ、二つのピークを観測している。二つのピークはそれぞれ、TE 偏光と TM 偏光を持ち、電流注入量を大きくするにつれ TM 偏光を持つピークが強まってゆき、レーザ発振を達成することが確認された。すなわち、プラズモニックモードではなく、ダイエレクトリックモードによってレーザ発振が実現できることが実験的に示されたのである。

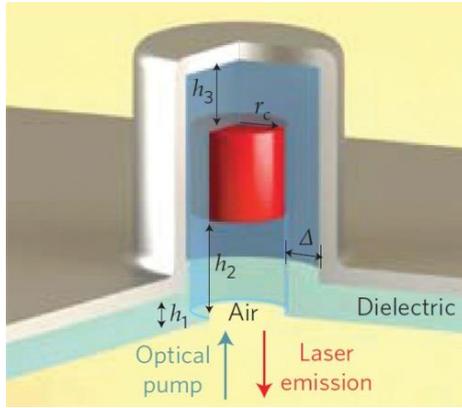


fig. 1.5 Metallo-dielectric laser¹⁴.

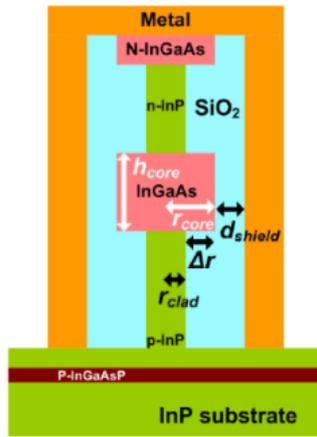
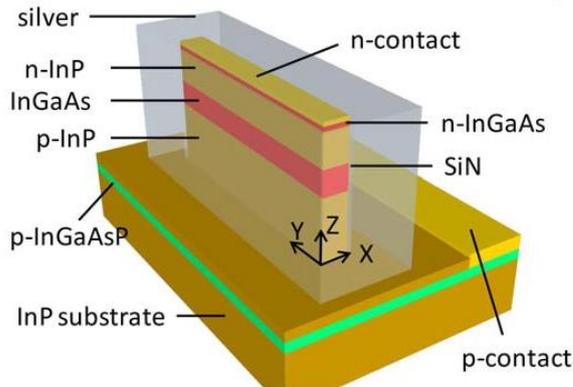
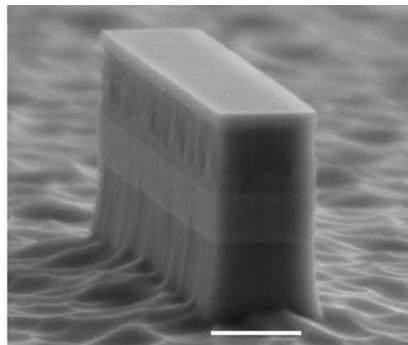


fig. 1.6 Metallo-dielectric pedestal pillar lasers¹⁵.



(a) Schematic



(b) SEM figure

fig. 1.7 First demonstration of CW lasing at RT under electrical injection¹⁶.

1.2.3. 先行研究のまとめ

ここまでで紹介した金属キャビティレーザの特性をまとめた表を下に示す。

Table 1.1 Comparison of metallic-cavity lasers

	PL / EL	Author	Year	Structure	Size	Temp. [K]	Pulse / CW	Threshold	Q factor	Ref.
Plasmonic	PL	M. A. Noginov	2009	Particle	D = 44nm		Pulse		13.2	¹⁰
		R. F. Oulton	2009	Nanowire	129nm x 10μm	<10	Pulse			⁸
		R. M. Ma	2011	Nanobelt	1 x 1μm	R.T.	Pulse		97,38	⁹
		M. Khajavikhan	2012	Ring	D = 400nm, W = 100nm	4.5	Both	Threshold -less	265	¹¹
	EL	M. T. Hill	2007	Pillar	D = 260±25nm	10	CW	4μA	200	⁷
		M. T. Hill	2009	Wave guide	90 ± 20nm x 6μm	10	CW	75μA	170	¹³
Dielectric	PL	M. P. Nezhad	2010	Disk	D = 490nm	R.T.	Pulse	700Wmm ⁻¹	1590	¹⁴
	EL	J. H. Lee	2011	Pedestal	D = 1500nm	77	CW	50μA	1656	¹⁵
		K. Ding	2012	Rectangle	340nm x 3μm	R.T.	CW	< 1 mA	388.5	¹⁶

PL: photo-luminescence, EL: electro-luminescence, D: diameter, W: width, R.T: room temperature, CW: continuous wave, Q-Factor: quality factor

プラズモニックレーザは、1μm 以下という非常に小さな構造を実現できるレーザであるが、光励起や低温下での報告例が多く、実用性の面では問題の多いレーザである。一方、ダイエレクトリックレーザは、構造は数 μm 程度と大きくなってしまいが、電流注入下での室温連続発振を達成している唯一のレーザである。

また、K. Ding らの研究によって、TE 偏光を持ったプラズモニックモードではなく、TM 偏光を持ったダイエレクトリックモードによって、室温連続発振を達成したことが、実験的に示されている。

1.3. III V 族半導体光デバイスのシリコン基板への集積

様々な研究が行われてきた金属キャビティレーザであるが、その応用を考えたときに重要となるのがシリコン基板への集積である。金属キャビティレーザの”高集積度”という利点を活かすには、CMOS チップのようなシリコン基板との集積が必要である。特に、光インターコネクタへの応用を考えた場合、この問題を避けて通ることはできない。

しかし、金属キャビティレーザを含め、発光デバイスをシリコン基板と集積することは非常に難しい。これは、一般的に発光デバイスの材料としてIII V 族半導体を使用されているからである。特に通信用レーザに用いられる InP 系材料は、シリコンと格子定数が約 8% 異なるため、シリコン基板上に成長することは困難となる。この問題を解決するために世界中で様々な研究が行われているが、本節ではその中でも代表的な三つの技術を紹介する。

① 結晶成長技術

一つめは、結晶成長技術である。さきほど述べたとおり、シリコン基板上へのIII V 族材料の成長は難しい。しかし、特殊な成長法を用いてこれを解決する試みが、盛んにおこなわれている。シリコン基板上に InP/InGaAsP を直接成長した場合、質のよい薄膜を得るには、非常に厚いバッファ層が必要となる¹⁷。これに対し、成長する基板に特殊な処理をおこなうことで、選択的に成長をおこなう方法が報告されている¹⁸。結晶成長技術は、実用的なデバイスを作製するにはまだ至っていないが、実現されればこの問題を根本的に解決することができる。

② ウェハボンディング技術

二つめは、ウェハボンディング技術である。この技術は、シリコン基板とIII V 族半導体基板を直接貼り付けることで集積をおこなう技術である。詳しい原理や手法については3.4 節を参照いただきたい。この技術は光デバイスのみならず、III V 族半導体を用いたトランジスタの作製にも利用されている¹⁹。光デバイスの集積報告として多いのが、シリコンフォトニクスとの集積を目的として、導波路を作製した SOI 基板上へのデバイス作製をおこなった研究である。ファブリペローレーザや、マイクロディスクレーザをシリコン導波路に結合させた研究例が報告されている^{20,21,22}。結晶成長を用いた技術に比べ、結晶欠陥のない質の良い材料を使用することができるが、ウェハボンディングプロセスが必要となるためコストが大きくなるという問題点を抱えている。

③ フリップチップボンディング技術

三つめは、フリップチップボンディング技術である。この技術は、III V 族半導体基板を、金属バンプを作製したシリコン基板上に貼り付けることで電氣的に接続を取る方法である。前述の二つと異なり、シリコン基板上へのモノリシックな発光デバイスの集積は実現できないが、容易でコストのかからないプロセスである。実際、フリップチップボンディングを用いた光デバイスのシリコン基板への集積は多くの実証例が報告されており²³、三つの中で最も実用的な技術だといえる。

1.4. 本研究の目的

本研究は、高性能・高機能で、かつ実用的な金属キャビティレーザの実現を目指すものである。具体的な目標は、次の四つである。

- フットプリントを数 μm^2 以下とすること。
- しきい値電流を 1mA 以下とすること。
- 電流注入下での室温連続発振を達成すること。
- シリコン CMOS チップとの集積を行なうこと。
- 導波路と集積を行うこと。

以上の目標を達成するために、本研究では以下のことを行なう。まず、ダイエレクトリックモードでの発振を達成するために、TM モード引張歪み MQW の活性層への導入、およびキャビティ構造の最適化をおこなう。次に、設計に基づいてデバイスを作製する。このとき、より実用的なデバイスの実現を目指すために、よりよい作製プロセスの模索する。最後に、完成したデバイスの測定をおこなう。このとき、デバイスに適した測定システムを構築すると同時に、測定結果の考察を行うことで、金属キャビティにおいて重要となる要素が何かを検討する。

1.5. 本論文の構成

本論文は、以下のように構成されている。本章では、序論として研究の背景、先行研究、応用における問題、および本研究の目的を述べた。第二章では、金属キャビティレーザの原理を解説し、それに基づいた構造の設計について述べる。第三章では本研究で使用した作製プロセスの原理、第四章では本研究で構築した測定システムについて述べる。第五章では、PL 測定に向けたデバイスの作製および評価について述べる。第六章では、EL 測定に向けたデバイスの作製および評価について述べる。最後に、第七章で本研究のまとめとして結論を述べる。

第2章 金属キャビティレーザの原理と設計

本章では、金属キャビティレーザの原理および設計について述べる。まず2.1節において、金属キャビティレーザの基本的な原理を述べる。次に2.2節において、金属キャビティレーザの構造を示したうえで設計指針を述べ、その上でシミュレーションによっておこなった設計の結果を述べる。

2.1. 金属キャビティレーザの原理

本節では、金属キャビティレーザの設計において重要となる基本的な原理について解説をおこなう。まず、2.1.1項において光デバイスにおいて最も基本的な導波路の原理について解説する。その上で、2.1.2項において半導体レーザの原理について解説する。

2.1.1. 光導波路の原理および解析法

光デバイスにおいて最も基本的な構造が光導波路である。本項では、まず①広く用いられている誘電体を用いた導波路の原理および解析法を述べ、次に②近年盛んに研究されている金属を用いた導波路について述べる。

① 誘電体を用いた導波路

ここでは、誘電体を用いた導波路の原理を解説する²。まず、(i)光線光学的に導波路の原理を解説し、(ii)マクスウェル方程式を用いて導波路一般での光波の振る舞いを示す式を導出し、(iii)スラブ型導波路における光波の振る舞いを考察し、(iv)スラブ導波モードの解析法を解説する。最後に、(v)二次元導波路などの解析に用いる有限要素法について解説する。

(i) 光線光学に基づく導波路の原理

レーザや光ファイバなどの、光を閉じ込めて制御する素子には、導波路とよばれる構造が用いられる。一次元の導波路構造を fig. 2.1 に示す。この構造では、屈折率の高い誘電体が、屈折率の低い誘電体にはさまれており、屈折率の高い部分をコア、低い部分をクラッドとよぶ。金属キャビティレーザにおいても、高さ方向においてはこの導波路構造をもちいて光を閉じ込めている。

導波路の原理を光線光学的に考えてみる。fig. 2.1 の赤線で示すように、光がコア層に入ったとする。コア層からクラッド層へ光が入射したとき、入射角が臨界角よりも大きいと全反射が起こる。このため、この臨界角よりも大きな角度で入射した光は、全反射を繰り返してコア層からもれることなく z 方向に進んでゆく。これが導波路の基本原理である。

実際に光が安定して導波路を伝搬するには、光がコア層を一往復して位相が 2π の整数倍になるような入射角を持たなければならない。言いかえれば、 y 方向に固定端の定在波が立つときのみ導波路を光が伝搬する。このような離散的な光の伝搬様式をモードとよぶ。

このとき、波数の z 方向成分をモードの伝搬定数 β ，伝搬定数を光の波数 k_0 で割った値をモードの等価屈折率 n_{eff} と呼び、それぞれ式 (2.1)，(2.2) で表すことができる。

$$\beta = k_0 n \sin\theta \quad (2.1)$$

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k_0} \quad (2.2)$$

$$\text{ただし、} k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

ここで、 n はコア層の屈折率、 θ は光の入射角である。等価屈折率は、導波路を伝搬するとき光を感じる仮想的な屈折率であり、導波路とモードの特性を表す重要な指標である。定在波の山がひとつのモードを 0 次モード、山が二つのモードを 1 次モードと呼ぶ。fig. 2.1 の右側に示したのは 0 次モードの光の分布である。モードの次数が増えるごとに入射角は小さくなる。基本的に、コアの厚みが光の半波長 $\lambda/2n$ よりも小さくなるとモードは立たず、光は導波路を伝搬しない。この値は回折限界よばれ、誘電体を用いた光導波路の微細化の限界値となっている。

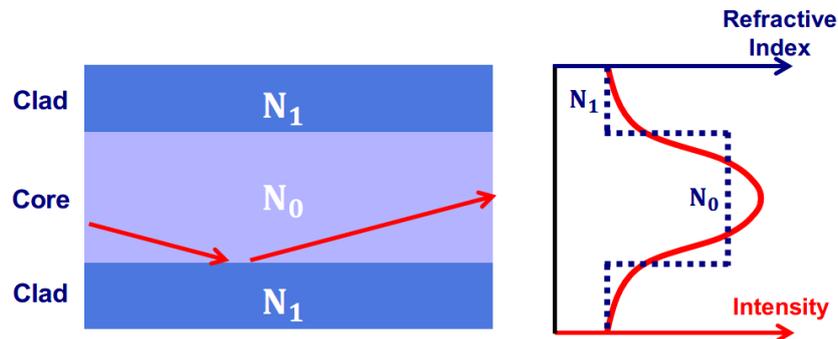


fig. 2.1 Diagram of waveguide.

(ii) 導波路における光波のふるまい

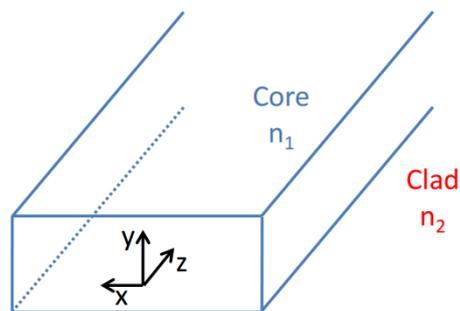


fig. 2.2 Schematic of optical waveguide.

ここまで、光線光学を用いて導波路の原理を説明してきたが、ここから、マクスウェルの方程式を用いた波動光学に基づいて導波路を考えてみる。マクスウェル方程式は以下の四つの式からなる。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.6)$$

ここで、 \mathbf{E} : 電界 [V/m], \mathbf{H} : 磁界 [A/m], \mathbf{D} : 電束密度 [C/m²], \mathbf{B} : 磁束密度 [T], \mathbf{J} : 電流密度 [A/m²], ρ : 電荷密度 [C/m³]である。光導波路において電荷は基本的に存在しないため、 $\rho = 0$, $\mathbf{J} = 0$ とすることができる。また、通常の光学材料では比透磁率が1であるため、以降 $\mu = \mu_0$ として議論を進める。

fig. 2.2 に示すような、 z 軸方向に一様な屈折率分布を持った導波路を光が伝搬するとき、その電磁界は複素形式で次の二つの式で表せる。

$$\tilde{\mathbf{e}}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad (2.7)$$

$$\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad (2.8)$$

ただし、 ω : 光の角周波数、 β : 伝搬定数である。ここで、式(2.7), (2.8)をマクスウェル方程式に代入すると、式(2.3)から以下の三つの式を得る。

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x \quad (2.9)$$

$$-j\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_y \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \quad (2.11)$$

また、式(2.4)から以下の三つの式を得る。

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\omega\epsilon_0 n^2 E_x \quad (2.12)$$

$$-j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\epsilon_0 n^2 E_y \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon_0 n^2 E_z \quad (2.14)$$

以上の六つの式が，導波路における光の振る舞いを表す基本式となる．

(iii) スラブ導波路における光波の振る舞い

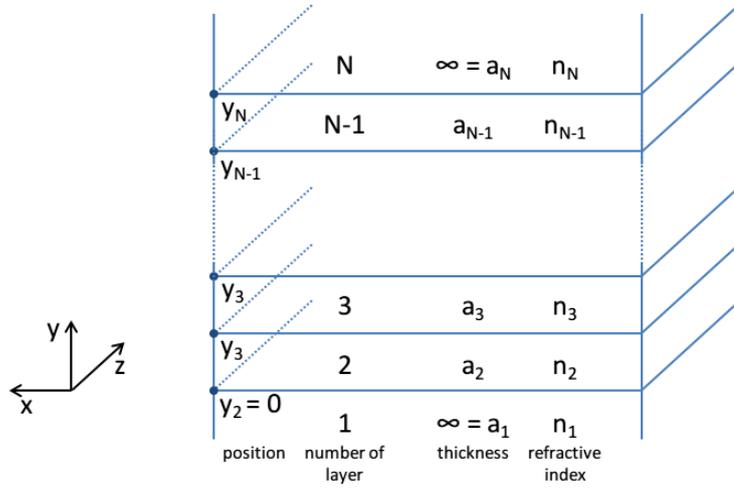


fig. 2.3 Multilayer slab optical waveguide.

ここから，fig. 2.3 に示すような，x，z 軸方向に同じ屈折率分布を持った，多層スラブ光導波路内を伝搬する光について考えてゆく．媒質は x 方向について一様であるから， $\partial/\partial x = 0$ であり，式(2.9)～(2.14)に適用すれば以下の六つの式を得る．

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x \quad (2.15)$$

$$-j\beta E_x = -j\omega\mu_0 H_y \quad (2.16)$$

$$-\frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\omega\epsilon_0 n^2 E_x \quad (2.18)$$

$$-j\beta H_x = j\omega\epsilon_0 n^2 E_y \quad (2.19)$$

$$-\frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon_0 n^2 E_z \quad (2.20)$$

この六つの式をよく見てみると, $[E_x H_y H_z]$ のみを持つ式(2.16), (2.17), (2.18)と, $[H_x E_y E_z]$ のみを持つ式(2.15), (2.19), (2.20)の二種類に分けることができる. この二種類は, それぞれ独立な波動の振る舞いを表す式であり, 前者は電界が x 成分のみを, 後者は磁界が x 成分のみを持っていることがわかる. x 軸方向はスラブ導波路の層構造に対して水平であることから, この二つの光波はそれぞれ TE 波 (transverse electric wave), TM 波 (transverse magnetic wave) とよばれる.

式(2.17)に $\partial/\partial y$ を作用させ, 式(2.16), (2.18)の二式を用いて H_y と H_z を消去すると式(2.21)を, 式(2.16), (2.18)を整理すると式(2.22), (2.23)の二式を得る.

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + (k^2 - \beta^2)E_x = 0 \quad (2.21)$$

$$H_y = \frac{\beta}{\omega\mu_0} E_x \quad (2.22)$$

$$H_z = -\frac{j}{\omega\mu_0} \cdot \frac{\partial E_x}{\partial y} \quad (2.23)$$

同様に, 式(2.20)に $\partial/\partial y$ を作用させ, 式(2.15), (2.19)の二式を用いて E_y と E_z を消去すると式(2.24)を, 式(2.15), (2.19)を整理すると式(2.25), (2.26)の二式を得る.

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + (k^2 - \beta^2)H_x = 0 \quad (2.24)$$

$$E_y = -\frac{\beta}{\omega\epsilon_0 n^2} H_x \quad (2.25)$$

$$E_z = -\frac{j}{\omega\epsilon_0 n^2} \cdot \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (2.26)$$

つまり, TE 波と TM 波のふるまいはそれぞれ式(2.21), (2.24)の波動方程式を解くことで知ることができる. 残りの二つの成分は, 波動方程式の解が決まれば TE 波の場合は式(2.22), (2.23)から, TM 波の場合は式(2.25), (2.26)から求めることができる.

(iv) スラブ導波モードの解析法

ここから, 式(2.21)~(2.26)に基づいた, スラブ導波路におけるモードの解析法について述

べてゆく. fig. 2.3 に示すような, N 層からなるスラブ導波路を仮定する. このとき, TE 波・TM 波の i 層での $E_{xi} \cdot H_{xi}$ の分布は, 波動方程式(2.21), (2.24)の一般解として, 次の式で表すことができる.

$$\left. \begin{array}{l} E_{xi} \\ H_{xi} \end{array} \right\} = A_i \exp[-jk_0 n_{yi}(y - y_i)] + B_i \exp[-jk_0 n_{yi}(y - y_i)] \quad (2.27)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N)$$

このとき, 以下の式を満たす.

$$n_{yi} = \begin{cases} \sqrt{n_i^2 - n_{\text{eff}}^2} & (n_{\text{eff}} < n_i \text{ のとき}) \\ j\sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_i^2} & (n_i < n_{\text{eff}} \text{ のとき}) \end{cases} \quad (2.28)$$

ただし, 便宜的に $a_1 = 0$, $y_1 = 0$ とした. ここで, $y = \pm\infty$ において $E_{xi} \cdot H_{xi}$ は 0 に収束すること, $n_i, n_N < n_{\text{eff}}$ となることを考慮すると, 以下の条件が定まる.

$$B_1 = A_N = 0 \quad (2.29)$$

また, 電磁界の境界条件より, $i-1$ 層と i 層の界面における条件が以下のように求まる.

$$E_{xi} = E_{xi-1}, \quad H_{zi} = H_{zi-1} \quad (\text{TE 波}) \quad (2.30)$$

$$H_{xi} = H_{xi-1}, \quad E_{zi} = E_{zi-1} \quad (\text{TM 波}) \quad (2.31)$$

ここで, TE 波の場合は式(2.30)に式(2.27), (2.23)を, TM 波の場合は式(2.31)に式(2.27), (2.26)を代入することによって $A_i \cdot B_i$ と $A_{i-1} \cdot B_{i-1}$ の関係を漸化式の形で求めることができる. つまり, $y = y_2, y_3, \dots, y_N$ において, 以下の式が得られる.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{i1} & C_{i2} \\ C_{i3} & C_{i4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{i-1} \\ B_{i-1} \end{bmatrix} \quad (i = 2, 3, \dots, N - 1) \quad (2.32)$$

$$C_{i1} = \frac{n_{yi} + n_{yi-1} m_i^2}{n_{yi}} \exp(-jk_0 n_{yi-1} a_{i-1})$$

$$C_{i2} = \frac{n_{yi} - n_{yi-1} m_i^2}{n_{yi}} \exp(jk_0 n_{yi-1} a_{i-1})$$

$$C_{i3} = \frac{n_{yi} - n_{yi-1} m_i^2}{n_{yi}} \exp(-jk_0 n_{yi-1} a_{i-1})$$

$$C_{i4} = \frac{n_{yi} + n_{yi-1} m_i^2}{n_{yi}} \exp(jk_0 n_{yi-1} a_{i-1})$$

$$m_i = \begin{cases} 1 & (\text{TE 波}) \\ \frac{n_i}{n_{i-1}} & (\text{TM 波}) \end{cases}$$

この式より、 $A_1 \cdot B_1$ と $A_N \cdot B_N$ の関係を以下の式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} A_N \\ B_N \end{bmatrix} = C_N \cdots C_3 C_2 \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

この式(2.33)を式(2.29)に注意して解くことによって、スラブ導波路における各モードの等価屈折率 n_{eff} を求めることができる。各モードにおける $E_{xi} \cdot H_{xi}$ の分布は、式(2.27), (2.28)によって求めることができる。

スラブ導波路において重要な指標となるのは、等価屈折率 n_{eff} と光閉じ込め係数 Γ である。光閉じ込め係数とはコア層へ光がどれだけ閉じ込められているかをあらわす値であり、TE モードについては以下の式から求めることができる。

$$\Gamma = \frac{\iint_{\text{Core}} |E_x|^2 dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} |E_x|^2 dy} \quad (2.34)$$

TM モードの場合は、 E_x を H_x におきかえれば良い。2.1.2.②で述べるが、金属キャビティレーザの場合、光閉じ込め係数 Γ が大きくなるように導波路構造を設計する必要がある。

(v) 有限要素法による光波解析

ここまで、スラブ導波路におけるモードの界分布を解析的に導出してきた。しかし、二次元導波路や三次元構造でのモード解析においては、解析的な導出が難しいため有限差分法や有限要素法などの計算機解析が一般的に用いられる。ここでは、本研究で使用した有限要素法について、簡単な解説をおこなう²⁴。

有限要素法は、変分法をベースとして発展してきた解析手法である。2.1.1.①(ii)で述べたとおり、光の振る舞いはマクスウェル方程式(2.3)~(2.6)に従う。この四つの式から、以下の式が導出される。

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.35)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.36)$$

この二式は、ヘルムホルツ方程式と呼ばれる波動方程式であり、導波路内外のあらゆる場所で成り立っている。つまり、これらの式がすべての座標で成り立つような条件を求めることで、電界分布 $\mathbf{E}(\mathbf{x})$ 、磁界分布 $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ 、すなわちモードを求めることができる。

これを変分法に基づいて考えてみると、式(2.35)の左辺を関数 $\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{E}(\mathbf{x}), \partial \mathbf{E}(\mathbf{x})/\partial t)$ として、汎関数 $J(\mathbf{u})$ を以下の式で表すことができる。

$$\mathbf{J}(\mathbf{u}) = \oint_{\Omega} \mathbf{F}\left(\mathbf{x}, \mathbf{E}(\mathbf{x}), \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{x})}{\partial t}\right) d\Omega \quad (2.37)$$

ただし， Ω はすべての領域である，この式を用いて， $\mathbf{J}(\mathbf{u}) = \mathbf{0}$ となる条件を求めれば，電界分布 $\mathbf{E}(\mathbf{x})$ を求めることができる．しかし，実際に汎関数 $\mathbf{J}(\mathbf{u})$ を解析的に求めることは非常に困難である．そこで，関数 $\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{E}(\mathbf{x}), \partial \mathbf{E}(\mathbf{x})/\partial t)$ に重み付けをおこなって，近似的に解を求めようとするのが重み付け残差法である．すなわち，重み付け関数を \mathbf{W} として，

$$\oint_{\Omega} \mathbf{W} \cdot \mathbf{F} d\Omega = \mathbf{0} \quad (2.38)$$

を満たす条件を考えれば良い． \mathbf{W} は任意の関数であるが，有限要素法ではガラーキン法という方法を用いる．ガラーキン法では，求めたい電界を式(2.39)のように，基底関数の和によって表せるものと仮定して， \mathbf{W} にこれと同一の基底関数を用いる．

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \sum_i^N A_i \mathbf{e}_i(\mathbf{x}) \quad (2.39)$$

この方法を用いると，電界の計算を行列計算に置き換えることができ，計算機による解析が可能となるのである．

② 金属を用いた導波路

2.2.1①で述べたとおり，誘電体を用いた導波路は回折限界よりも構造を小さくすることができない．この問題を解決するために，金属を用いた光導波路が注目を集めている．ここでは，まず，(i)物質内における光波のふるまいをローレンツモデルを用いて考え，(ii)そのときに重要となるプラズマ周波数を導出し，(iii)それらに基づいて金属と誘電体の誘電率について考察する．つづいて，(iv)金属の誘電率に起因して生じる表面プラズモン効果について述べ，最後に(v)金属を用いた導波路について解説する．

(i) ローレンツモデルの描像

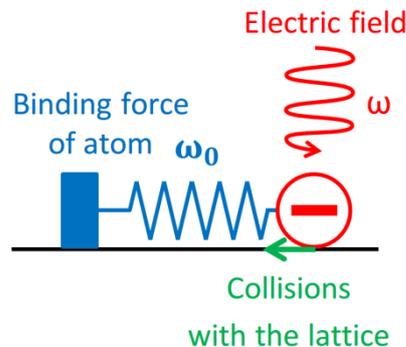


fig. 2.4 Lorenz model.

物質内における電磁波のふるまいを説明するときに用いるのがローレンツモデルである²⁵．ローレンツモデルにおいて，物質は電気双極子の集合とみなされる．原子を電子と正イ

オンの二つに分けて、この一組を電気双極子とみなすのである。

ローレンツモデルの描像を fig. 2.4 に示す。電気双極子は、固定された正イオンとバネでつながった電子で表現される。ここにおけるバネは、正イオンによる電子の拘束を表している。電子は、外部から入射した光、つまり電界に応答して振動する。振動した電子は周囲の分子と衝突してエネルギーを失うが、この描像においては電子と接触面との摩擦で表されている。このような電子の運動は、以下の運動方程式で表すことができる。

$$m \cdot \ddot{\mathbf{r}} + \frac{m}{\tau} \dot{\mathbf{r}} + m\omega_0^2 \mathbf{r} = -e\mathbf{E} \quad (2.40)$$

ただし、 \mathbf{r} : 電子の変位, \mathbf{E} : 光の電界成分, m : 電子の質量, τ : 平均衝突時間, ω_0 : ばねの固有角振動数である。ばね定数を k とすると $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ で表すことができる。この式では、第二項が衝突による摩擦, 第三項がバネによる束縛, 右辺が入射した光によるクーロン力を表している。

変位 \mathbf{r} は、強制振動によって光と同じ角振動数で振動すると考えることができる。よって、光の電界成分を、

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(-j\omega t) \quad (2.41)$$

とおくと、電子の変位は、

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 \exp(-j\omega t) \quad (2.42)$$

と表すことができる。これを式(2.40)に代入すると、以下の式を得る。

$$-m\omega^2 \mathbf{r} - j\omega \frac{m}{\tau} \mathbf{r} + m\omega_0^2 \mathbf{r} = -e\mathbf{E} \quad (2.43)$$

これを \mathbf{r} について整理して、

$$\mathbf{r} = \frac{(-e/m)\mathbf{E}}{\omega_0^2 - \omega^2 - j\omega/\tau} \quad (2.44)$$

を得る。以上によって、外部から入射した光によって電子の変位が生じることを数式的に示すことができた。

双極子において変位が生じると、 $\mathbf{p} = -e\mathbf{r}$ で表すことのできる双極子モーメントが生じる。物質内においては、この双極子モーメントが電子の数だけ存在するため、これらを全て足し合わせることで、物質内における分極 \mathbf{P} を算出することができる。すなわち、物質内の電子密度を n とおいたとき、分極は、 $\mathbf{P} = n\mathbf{p} = -en\mathbf{r}$ によって、

$$\mathbf{P} = \frac{(ne^2/m)\mathbf{E}}{\omega_0^2 - \omega^2 - j\omega/\tau} \quad (2.45)$$

と表すことができる。

(ii) プラズマ周波数

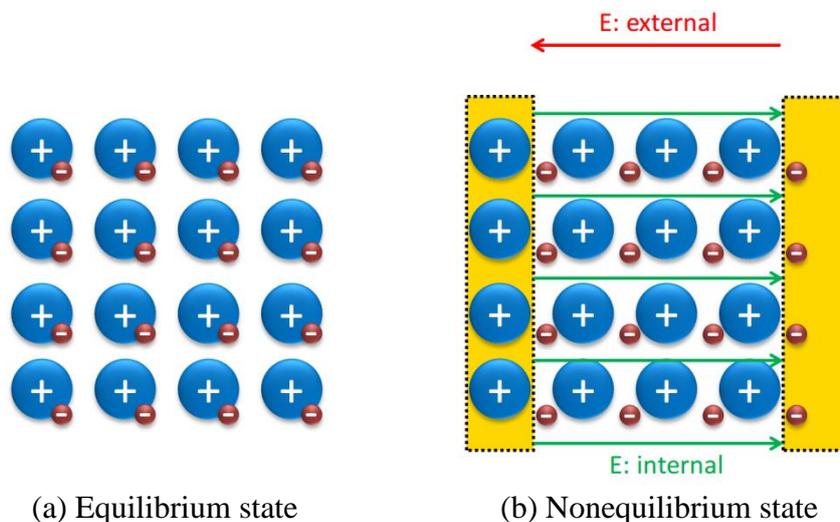


fig. 2.5 Distribution of positively charged ions and negatively charged electrons

ここから，双極子モーメント単体ではなく，物質全体を巨視的に考えてゆく．物質の内部では，正イオンと電子が fig. 2.5 (a)に示すように分布している．この電氣的に平衡な状態から，電子に変位が生じて平衡が崩れると，fig. 2.5 (b)のように物質全体がキャパシタとしてはたらく，内部に電界が生じる．このとき生じる電界は，以下の式で表すことができる．

$$\mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \cdot \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|} = (ne/\epsilon_0)\mathbf{r} \quad (2.46)$$

この電界によって，電子には変位を小さくしようとする力がはたらく．つまり，物質全体を巨視的に考えることで，式(2.40)の左辺第三項で表される電子・正イオン間の復元力とは別の，正イオンの格子と電子群の間に復元力が存在することがわかるのである．

このような電子群のふるまいを表す運動方程式は，電子群をひとつのまとまりとして考えると，

$$\mathbf{n} \cdot m\ddot{\mathbf{r}} = -\mathbf{n} \cdot e\mathbf{E} \quad (2.47)$$

で表すことができる．ただし，このとき外部から入射する光の影響は考慮していない．これに式(2.46)を代入して，

$$m\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{ne^2}{\epsilon_0}\mathbf{r} \quad (2.48)$$

を得る．この式より，電子群の固有振動数は，

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{m\epsilon_0}} \quad (2.49)$$

と求めることができる。 ω_p はプラズマ周波数とよばれ、物質内における電子群のふるまいをあらわす値である。 ω_p よりも高い周波数の光が入射すると、電子群は光の振動についていくことができなくなる。

(iii) 誘電体と金属の誘電率

以上の議論に基づいて、物質の誘電率について述べてゆく。電束密度 \mathbf{D} 、電界 \mathbf{E} 、分極 \mathbf{P} 、誘電率 ϵ の関係は、以下の式で表される。

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2.50)$$

ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率である。 ϵ を ϵ_0 で割ったものを比誘電率とよび、電気感受率 χ を用いて以下の式であらわすことができる。

$$\epsilon_r \equiv \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \chi = 1 + \frac{\mathbf{P}}{\epsilon_0 \mathbf{E}} \quad (2.51)$$

この式に、式(2.45)、(2.49)を代入して、

$$\epsilon_r = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega/\tau} \quad (2.52)$$

を得る。これが、ローレンツモデルによって導出された比誘電率の式である。これを実部と虚部に分けると、

$$\text{Real}(\epsilon_r) = 1 + \omega_p^2 \cdot \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2} \quad (2.53)$$

$$\text{Imag}(\epsilon_r) = \omega_p^2 \cdot \frac{\omega/\tau}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2} \quad (2.54)$$

となる。この式に基づいて、誘電体・金属の誘電率を考えてゆく。

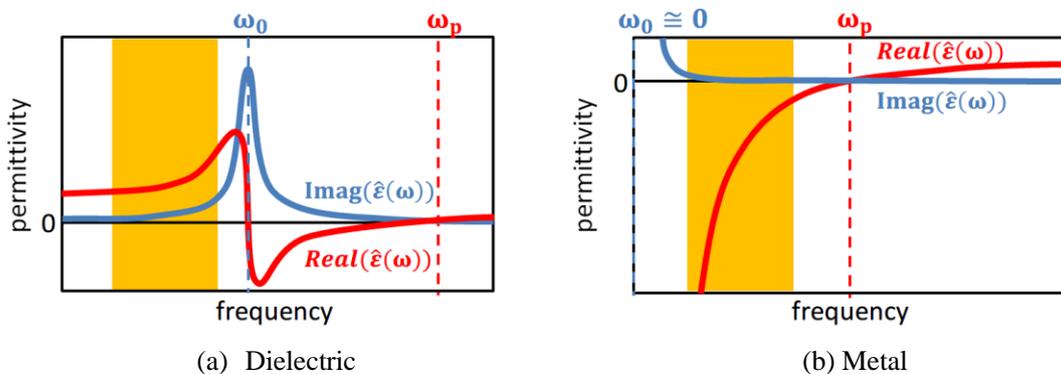


fig. 2.6 frequency dependence of relative permittivity

まず、誘電体について考えてみる。fig. 2.6 (a)は、誘電体の比誘電率の実部、虚部を電磁波の周波数についてプロットしたものである。実部は、 ω_0 において正負が反転して負になり、周波数が大きくなるにつれて徐々にふえてゆき、 ω_p でゼロとなる。虚部は、 ω_0 においてピークを持った凸型の分布を持つ。誘電体の多くは絶縁体であり、電子が正イオンに束縛される力が大きいため、固有振動数 ω_0 が大きくなる。fig. 2.4 の描像でいえば、バネの力が非常に強いということである。 ω_0 の値は光の周波数に比べて大きいため、光デバイスに用いられる誘電体の誘電率は、実部、虚部ともに正の値とする。

つぎに、金属について考えてみる。fig. 2.6 (b)は、金属の比誘電率の実部、虚部をプロットしたものである。実部は、 ω_p 以下では負、以上では正となる。虚部は周波数が大きくなるにつれて減少する分布を持っている。(a)と(b)をよく見比べると、(a)の ω_0 よりも高周波の領域を拡大したものであることがわかる。これは、金属の固有周波数 ω_0 はほとんどゼロであるためである。金属は正イオンによる電子の束縛が弱く、多くの自由電子をもつ物質である。fig. 2.4 の描像でいえば、バネの力が非常に弱いということである。 ω_p の値は光の周波数に比べて大きいため、光の領域における金属の誘電率は、実部は負、虚部は正の値となることがわかる。

以上より、ローレンツモデルを用いて、金属の誘電率が負となることを示すことができた。

(iv) 表面プラズモン共鳴効果

ローレンツモデルによって、金属が負の誘電率を持つことを導出した。ここから、負の誘電率を持つ金属と、正の誘電率を持つ誘電体の界面で生じる、表面プラズモン共鳴効果について述べてゆく。

表面プラズモン共鳴効果とは、金属のような自由電子を持つ物質表面における電荷の集団振動のことである。この表面プラズモンが、外部から与えられた電磁波と結合した系のことを表面プラズモンポラリトンと呼ぶ²⁶。表面プラズモンポラリトンを用いることで、誘電体導波路構造を用いずに、金属の界面に光を局在させて伝搬することができる。以降、表面プラズモンポラリトンは簡単のためプラズモンと表記する。

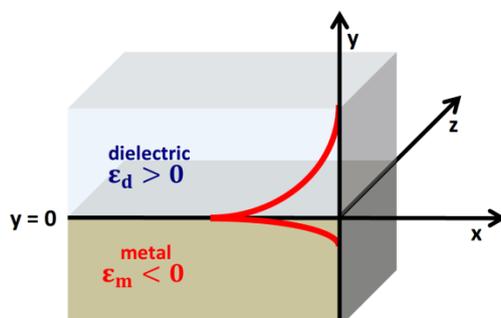


fig. 2.7 Metal-Insulator waveguide.

プラズモンがなぜ金属の界面に局在することができるのか、まず、2.1.1 項①(iv)のスラブ

導波路解析の手法を用いて解析してゆく。fig. 2.7 に示すような、 $y < 0$ が金属、 $y > 0$ が誘電体の二層スラブ導波構造を考える。2.1.1 項①(iv)と同様に、 z 軸方向に進行する光を仮定すると、式(2.27)～(2.29)より、金属層、誘電体層の各層で以下の式を満たすことがわかる。ただし、金属の比誘電率を ϵ_m 、誘電体の比誘電率を ϵ_d とした。

まず、金属層では、以下の二式を満たす。

$$\left. \begin{array}{l} \text{(TE 波)} \quad E_{x1} \\ \text{(TM 波)} \quad H_{x1} \end{array} \right\} = A_1 \exp[-\kappa_m y] \quad (2.55)$$

$$\kappa_m = \sqrt{\beta^2 - \omega^2 \cdot \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_m} \quad (2.56)$$

つぎに、誘電体層では、以下の二式を満たす。

$$\left. \begin{array}{l} \text{(TE 波)} \quad E_{x2} \\ \text{(TM 波)} \quad H_{x2} \end{array} \right\} = B_2 \exp[\kappa_d y] \quad (2.57)$$

$$\kappa_d = \sqrt{\beta^2 - \omega^2 \cdot \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_d} \quad (2.58)$$

ただし、2.2.1(iv)とは異なり n_{eff} ではなく β を用いているため注意していただきたい。また、 $y = 0$ の E_x 、 H_x の境界条件によって、

$$A_1 = B_2 \quad (2.59)$$

であることがわかる。

式(2.55)、(2.57)を満たし、界面に光が局在する伝搬モードの解分布は、fig. 2.7 に赤線でしめすような界面で鋭く上がったモードしかない。つまり、界面において傾きの符号が反転するときのみ、モードが存在する。TE波の場合、式(2.23)および H_z の境界条件から、

$$\left. \frac{\partial E_{x1}}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial E_{x2}}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (2.60)$$

となる。つまり、境界で傾きが一致するため、fig. 2.7 に示すようなモードが立つことはない。一方、TM波の場合、式(2.26)および E_z の境界条件から、

$$\left. \frac{1}{\epsilon_m} \cdot \frac{\partial H_{x1}}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{1}{\epsilon_d} \cdot \frac{\partial H_{x2}}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (2.61)$$

となる。(iii)で示したとおり、金属は負、誘電体は正の誘電率を持っているため、 H_x の傾きは界面の前後で反転する。よって、TM波のみがfig. 2.7 に示すような、金属界面に光の局在したモードを持つことがわかる。以上より、マクスウェル方程式を用いた解析によっ

て TM 波の場合のみ，プラズモンによる光の伝搬が生じることを示した．

ここから，プラズモンの特徴を示すために分散関係を求めてゆく．式(2.61)に，式(2.55)～(2.59)を代入すると，

$$-\frac{\kappa_m}{\epsilon_m} = \frac{\kappa_d}{\epsilon_d} \quad (2.62)$$

という条件が求まる．ここで，式(2.62)に κ_m ， κ_d の定義である式(2.56)，(2.58)を代入し， β を k におきかえると，以下の分散関係を得る．

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d} \quad (2.63)$$

ただし， k はプラズモンの伝搬方向への波数である．ここで， k の実部は，以下の式であらわすことができる．

$$R(k) = \frac{\omega}{c} \cdot R \left(\sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \right) \quad (2.64)$$

この式に基づいてプラズモンの分散関係をプロットしたのが fig. 2.8 である．この fig. 2.8 の破線は，一般的な光の分散関係 $k = \omega/c$ を表している．プラズモンの分散関係を見てみると， $\omega \approx \omega_p/\sqrt{2}$ において波数 k が無限大に発散していることがわかる．つまり， $\omega \approx \omega_p/\sqrt{2}$ に近づくにつれて，光の空間的な閉じ込めが強くなってゆくということである．つまり，プラズモンのこの特性を利用すれば，光の回折限界以下まで光閉じ込めることができることがわかる．

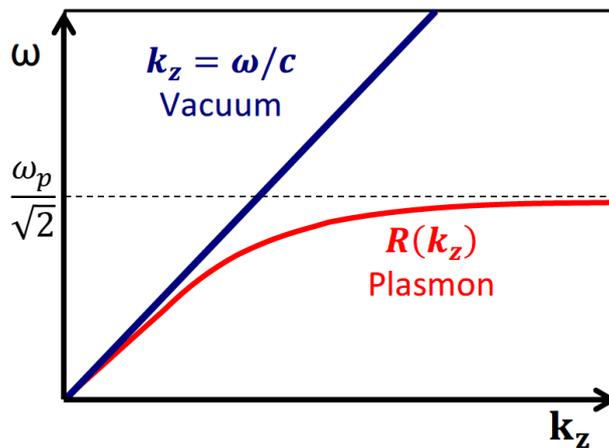


fig. 2.8 Dispersion relation of surface plasmon polariton

(v) MIM 導波路

以上より，プラズモンを利用すれば回折限界以下の狭い領域に光を局在させることができる，ということがわかった．このようなプラズモンを利用したデバイスでは，金属で誘電体を挟み込んだ導波構造がよく用いられる．このような導波路を，MIM

(Metal-insulator-metal) 導波路とよぶ。金属キャビティレーザではこの MIM 導波路を用いるのが一般的であり、本研究でもこの構造を利用する。MIM 導波路における導波モードの解析は、2.1.1①(iv)と同様の手法で算出することができる。ここでは導出方法は省略し、MIM 導波路における二つの導波モードの特徴について述べる。

MIM 導波路では、TE 波、TM 波の両方でモードが立つことが知られている。二つのモードの強度分布を fig. 2.9 に示した。

まず、TE モードを見てみる。2.1.1②(iv)で述べたとおり、TE 波ではプラズモンは生じないため、誘電体導波路と同じような、上に凸な界分布を持つモードが立っている。この時、金属は単純に効率のよいミラーとみなすことができる。金属とモードの重なりが小さいため、光の損失は小さくなるが、誘電体層の厚みを回折限界以下まで小さくすることはできない。

次に、TM モードを見てみる。金属との界面でプラズモンが生じるため、TE モードとは異なる M 字状の界分布を持っていることがわかる。プラズモンが生じるため、誘電体の厚みを回折限界以下まで小さくすることができるが、金属とモードの重なりが大きいため光の損失が大きくなってしまう。

ここで注意しなければならないのが、TE・TM モードの定義である。スラブ導波路では、層構造を基準として TE・TM を定義した。しかし、二次元構造をもった導波路では、x 軸、y 軸どちらの層構造を基準にするかによって、TE・TM モードの定義が反転してしまう。このような混同を避けるため、本論文では、TE・TM モードをそれぞれ Dielectric mode, Plasmonic mode と呼ぶこととする。

金属を用いた導波路では、等価屈折率が複素数となる。MIM 導波路では金属による光の損失が生じるため、導波路を伝搬するに従って光が減衰する。この減衰を表すのが減衰定数であり、等価屈折率の虚部を κ としたとき、以下の式で表すことができる。

$$\alpha = 2\kappa k_0 \quad (2.65)$$

この値を小さくすることが、MIM 導波路設計においては非常に重要になる。

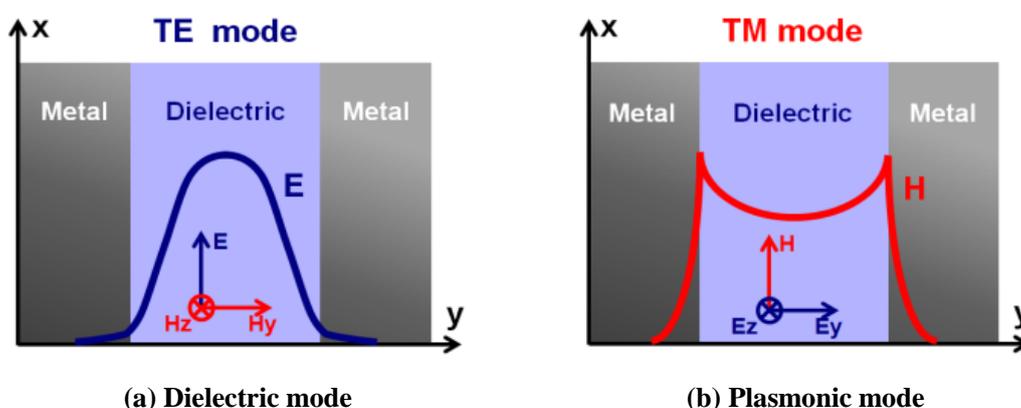


fig. 2.9 Field distribution in MIM waveguide

2.1.2. 半導体レーザ共振器の原理

半導体レーザは、光を増幅する利得媒質と、光を閉じ込める共振器構造の二つから構成されている。本項では、まず①利得媒質でどのように光を増幅するかを述べ、次に②共振器構造として代表的なファブリペロー共振器について解説する。最後に、③レーザの振る舞いを表すレート方程式について簡単に述べる。

① 半導体レーザの利得媒質

ここでは、半導体レーザが利得媒質によってどのように光を増幅してゆくかを解説する。まず、(i)半導体レーザになぜ化合物半導体であるIII-V族半導体が用いられるかを述べ、(ii)レーザで利用する発酵過程である誘導放出について解説し、(iii)誘導放出によって増幅を起こすための構造であるダブルヘテロ構造について述べ、最後に(iv)レーザの発光効率を上げるために用いられる多重量子井戸構造について解説する。

(i) III-V族半導体材料

レーザを含め、発光デバイスの材料として一般的に用いられているのが、III-V族半導体材料である。III-V族半導体とは、III族・V族の二種類の元素からなる半導体材料である。この材料が半導体レーザの材料として使用される理由は二つある。

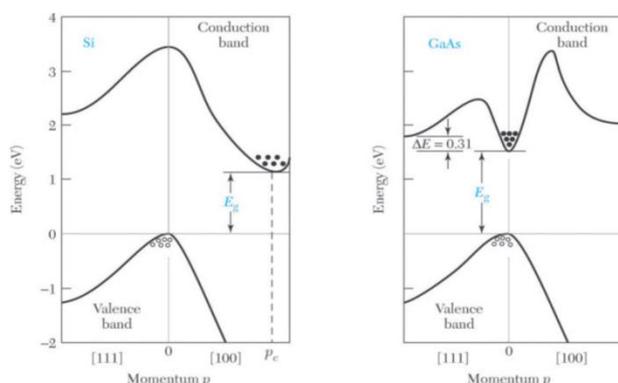


fig. 2.10 Energy band structures of (a) Si and (b) GaAs.²⁷

一つめは、その多くが直接遷移材料であるからである、半導体には、発光効率のよい直接遷移材料と、発光効率の悪い間接遷移材料がある。これは、半導体のバンド構造に起因する。

fig. 2.10 (b) に示すように伝導帯の下端と価電子帯の上端で電子の波数 k が一致する場合、運動量保存則を満たして効率的な電子の遷移が行われる。これを直接遷移と呼ぶ。一方、fig. 2.10 (a) のように k が一致しない場合、発光に際してフォノンを介在させる必要があるため、遷移確率が非常に小さい。このような遷移を間接遷移とよぶ。III-V族半導体はバン

ド端で k の一致したバンド構造をもつ材料が多いことから、発光効率が重要な半導体レーザーに一般に用いられている。

二つめは、組成比を変えることでバンドギャップや格子定数を変化させられるためである。半導体レーザーでは、導波路構造を作製するために屈折率の異なる材料の層構造を、結晶成長法を用いて作製しなければならない。しかし、結晶成長においては、基板に用いる材料と格子定数の一致する材料しか基本的に成長させることができない。III-V族半導体は組成比を変えることで、同じ格子定数で異なるバンドギャップの材料を作ることができるため、導波路構造を容易に作製することができる。

(ii) 自然放出と誘導放出

半導体において生じる発光過程には、自然放出と誘導放出の二つがある。半導体レーザーでは自然放出によって生じた光を種として、特定の波長の光を誘導放出による増幅を繰り返す。この二つの発光過程について順番に解説する。

自然放出は、伝導帯の電子が価電子帯の正孔と自然に再結合して光を放出する発光過程である。自然放出の生じる確立は、伝導帯の電子の密度、および価電子帯の正孔の密度に比例する。つまり伝導帯に電子を、価電子帯に正孔を注入して熱力学的に非平衡な状態を作れば、自然放出を人工的に誘発することができる。このような状態を、反転分布と呼ぶ。発光ダイオード(LED)は、電流注入によって反転分布を作ることによって自然放出を発生させるデバイスである。自然放出によって放出される光はインコヒーレントな光であり、波長や位相がまちまちであり、指向性が低い。

誘導放出は、入射した光に誘導されて、伝導帯の電子が価電子帯の正孔と再結合して光を放出する発光過程である。一個の光子が入射すると、それに誘導されて同じエネルギーを持った光子が放出され、光子の数が二個になる。誘導放出の生じる確立は、伝導帯の電子の密度、価電子帯の正孔の密度、および入射するおなじエネルギーを持った光子の量、の三つに比例する。つまり、自然放出と同様に反転分布を作り、誘導放出によって生じた光子を逃がさないよう閉じ込めてやれば、誘導放出を繰り返して光が増幅されてゆく。半導体レーザーはこれを利用して光を増幅するものであり、レーザーとは **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** の略である。誘導放出によって放出される光はコヒーレントな光であり、波長、位相が一致していて指向性が強いいため、レーザー光もこの特性を持つ。

(iii) ダブルヘテロ構造

半導体レーザーでは、誘導放出を利用することで光を増幅している。先程述べたように誘導放出を起こすには反転分布を作り、光を閉じ込める構造を作る必要がある。これに用いられるのが、ダブルヘテロ構造である。ダブルヘテロ構造とは、バンドギャップの小さい材料を、バンドギャップの大きな材料で挟み込んだ構造のことである。バンドギャップの大きい層を活性層、バンドギャップの小さい層をクラッド層と呼ぶ。この構造を用いるこ

とで、注入したキャリアを活性層に閉じ込めて効率的に反転分布を維持することができる。また、バンドギャップが大きいと屈折率が小さく、バンドギャップが小さいと屈折率が大きくなる。つまり、ダブルヘテロ構造は導波路としての役割も果たしており、活性層に光子を閉じ込めることができる。つまり半導体レーザーは導波路のコア層に利得媒質を用いて、キャリアと光子の両方を閉じ込めているのである。

(iv) 多重量子井戸 (MQW: Multiple Quantum Wells)

半導体レーザーでは、量子井戸構造が活性層に用いられることが多い。これは、量子井戸構造では状態密度が小さくなるため、少ないキャリアで効率的な発光を起こすことができるからである。一方、活性領域が狭くなってしまいうため光閉じ込めが難しくなる。これを解決するために、量子井戸を多重した多重量子井戸構造や、量子井戸を光キャリア分離閉じ込め形(SCH: Separate-confinement hetero-structure)で挟み込んだ構造が用いられている。

量子井戸を利用した時に重要となるのが歪みによる偏光依存性である。量子井戸構造にひずみが生じた時のバンド構造を fig. 2.11 に示す。ひずみが生じると、軽い正孔(LH)と重い正孔(HH)の縮退が解かれて、fig. 2.11 のようなバンド構造となる。これは、量子井戸での LH バンドと HH バンドの基底関数の形状に起因している。二つの基底関数を fig. 2.12 に示す。引っ張り歪では LH バンドの重なり積分が大きくなるため、LH による利得が大きくなる。一方、圧縮歪みでは HH バンドの重なり積分が大きくなるため HH に拠る利得が大きくなる。LH は TM 光、HH は TE 光の発光に寄与する。よって、引っ張り歪では TM 光が、圧縮歪みでは TE 光の利得が大きくなる。

この性質を利用すれば、量子井戸構造を利用することで特定の偏光をもった利得を得られるようになる²⁸。本研究では、引張歪み量子井戸を利用することで TM 光の利得を $1.55\mu\text{m}$ で得られるように設計を行った。

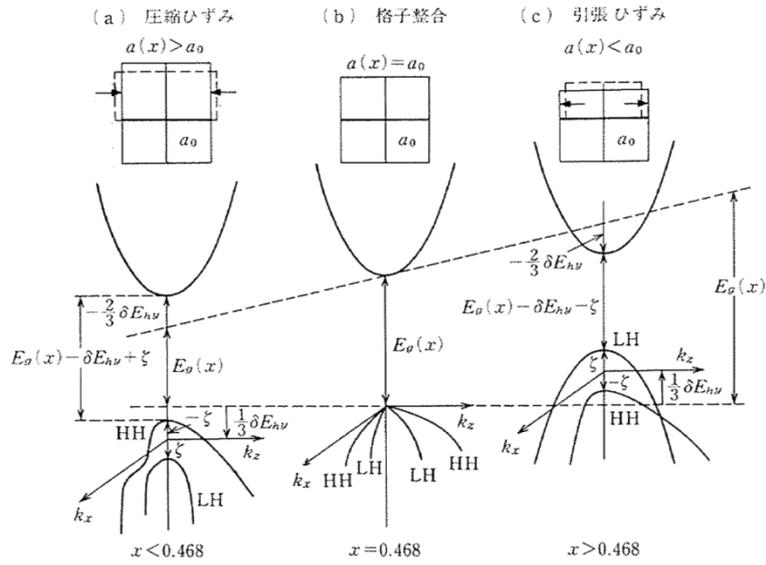


fig. 2.11 Band-structure of (a) compressive-strained, (b) lattice-matched and (c) tensile-strained quantum wells²

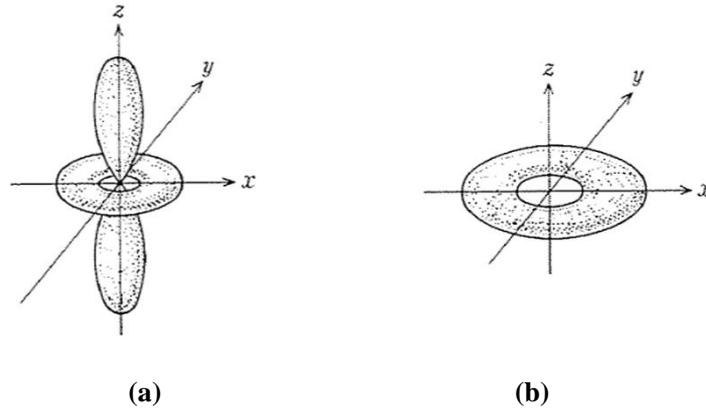


fig. 2.12 Basic function of (a) LH band and (b) HH band²

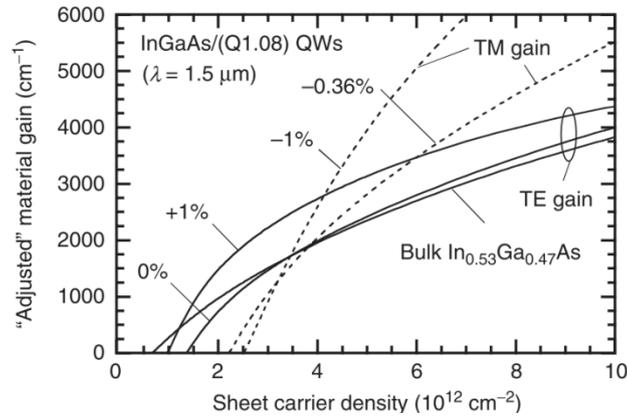


fig. 2.13 Peak TE and TM gain versus sheet carrier density in InP based materials²⁸

② 導波路レーザーの発振条件

①では、レーザーにおいてどのようにして光を増幅するかについて述べてきた。ただし、①で述べたとおり、レーザーは誘導放出によって光を増幅するものであるから、導波路を用いた共振器構造によって光を閉じ込める必要がある。共振器構造として代表的なものに、ファブリペロー、DBR、DFB などがあげられるが、ここでは一番単純な構造であるファブリペロー共振器を用いたレーザーについて解説する。

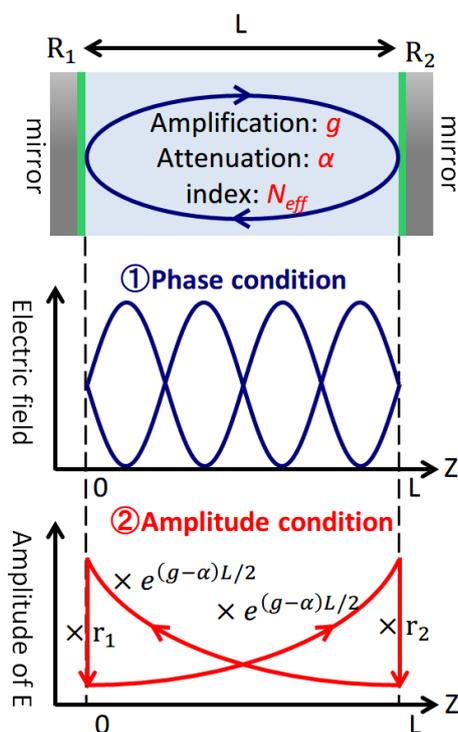


fig. 2.14 Oscillation condition of Fabry-Pérot laser.

ファブリペローレーザーの概観を fig. 2.14 に示した。ファブリペローレーザーでは、二枚の鏡に挟まれた利得媒質の中を光が往復を繰り返し、誘導放出によって光を増幅してゆく。一般的な半導体レーザーの場合、ダブルヘテロ構造の導波路を劈開して端面を作ることによって空気との界面での反射を鏡として利用している。

ここで、共振器内の電界を時間的に定常な場合について考えてみる。共振器内の電界は、進行波 E_r と後退波 E_s を用いて次式で表す。

$$\mathbf{E}(z) = \mathbf{E}_r(z)e^{-j\beta z} + \mathbf{E}_s(z)e^{j\beta z} \quad (2.66)$$

ここで、 β は利得媒質として用いている導波路構造の伝搬定数を表しており、導波路の等価屈折率 n_{eff} を用いて、

$$\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} \quad (2.67)$$

で与えられる。また、 \mathbf{E}_r および \mathbf{E}_s は、利得媒質での単位長さあたりの増幅率を g 、導波路損を α とおくと、以下の式で表すことができる。

$$\mathbf{E}_r(z) = \mathbf{E}_r(0)e^{(g-\alpha)z/2} \quad (2.68)$$

$$\mathbf{E}_s(z) = \mathbf{E}_s(0)e^{-(g-\alpha)z/2} \quad (2.69)$$

ここで、両端面の反射率をそれぞれ R_1 , R_2 とすると、両端での境界条件から、以下の二式が得られる。

$$\mathbf{E}_r(0) = r_1 \mathbf{E}_s(0) \quad (2.70)$$

$$\mathbf{E}_s(L)e^{-j\beta L} = r_2 \mathbf{E}_r(L)e^{j\beta L} \quad (2.71)$$

ただし、 R は光パワーに対する反射率、 r は電界に対する反射率であり、 $r = \sqrt{R}e^{j\theta}$ で与えられる。ここで、式(2.70), (2.71)を式(2.68), (2.69)に代入すると、以下の行列式をえる。

$$\begin{bmatrix} -r_2 e^{[(g-\alpha)/2-j\beta]L} & e^{[-(g-\alpha)/2+j\beta]L} \\ 1 & -r_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_r(0) \\ \mathbf{E}_s(0) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.72)$$

ここで、電界振幅が 0 以外の解をもつには、左辺の 2x2 行列の行列式が 0 である必要がある。よって、以下の式を満たさなければならない。

$$r_1 r_2 e^{(g-\alpha-2j\beta)L} = 1 \quad (2.73)$$

ファブリペローレーザでは、共振器内を光が一周して電界の振幅と位相が一致しなければ、レーザ発振を実現することは出来ない。式(2.73)はこの二つの条件を表したものである。この式の数値をとって、実部と虚部に分離すると、電界の振幅・位相の整合を表す式を以下のように導出することができる。

$$2\beta L = 2m\pi \quad (m = 1, 2, 3, 4 \dots) \quad (2.74)$$

$$g = -\frac{\ln(r_1 r_2)}{L} + \alpha = -\frac{\ln(R_1 R_2)}{2L} + \alpha \equiv g_{th} \quad (2.75)$$

式(2.74)が位相整合条件、式(2.75)が振幅整合条件を表している。式(2.75)の右辺は、共振器の特性によって決まる光の損失をあらわしている。この損失を補償するだけの利得が得られた時、レーザは発振を実現することができる。この値はしきい値利得 g_{th} と呼ばれ、この

値が利得媒質から得られる利得よりも大きくなるのがレーザ発振の条件である。

③ レート方程式

ここまで、半導体レーザの光学的な原理について述べてきた。ここでは、半導体レーザの動作を電氣的な視点を含めて解析する上で重要となる、レート方程式について簡単に解説する¹²。

レート方程式とは、キャリア密度 n とレーザ光の光子密度 S の時間変化の様子を表す方程式であり、以下の二式で表される。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{ed} - G(n)S - \frac{n}{\tau_n} \quad (2.76)$$

$$\frac{dS}{dt} = G(n)S - \frac{S}{\tau_{ph}} + \beta_{sp} \frac{n}{\tau_r} \quad (2.77)$$

ここで、 J : 注入電流密度, e : 電気素量, d : 活性層厚, $G(n)$: 誘導放出に関する係数, τ_n : キャリア寿命, τ_{ph} : 光子寿命, β_{sp} : 自然放出光結合係数, τ_r : 発光再結合寿命である。

式(2.76)はキャリア密度の時間変化を表す微分方程式である。右辺の J/ed は外部から注入されるキャリア密度, $-G(n)S$ は誘導放出によって消費されるキャリア密度, $-n/\tau_n$ はキャリア寿命で失われるキャリアを表している。

式(2.77)は光子密度の時間変化を表す微分方程式である。右辺の $G(n)S$ は誘導放出による光子の増加, $-S/\tau_{ph}$ は光子の吸収や外部への放出による減少, $\beta_{sp}n/\tau_r$ レーザのモードに結合する自然放出光を表している。

ただし、 $G(n)$ は、近似的に以下の式で表すことができる。

$$G(n) = \Gamma_a g_0 (n - n_0) \quad (2.78)$$

ここで、 Γ_a : 活性層への光の閉じ込め, n_0 : 媒質が透明になるキャリア, g_0 : 便宜的に設定した係数 である。

上記のレート方程式を用いることによって、レーザの動的な特性を評価することができる。

2.2. 金属キャビティレーザの設計

2.1 節では、金属キャビティレーザの基本原理について解説してきた。本節ではまず、2.2.1 項でそれらに基づいて金属キャビティレーザの構造を解説し、2.2.2 項でその構造の中でどのパラメータが重要となるかを解説する。そのうえで、設計の指針を 2.2.3 項で示し、続く 2.2.4、2.2.5 項でシミュレーションによる設計の結果について述べる。

2.2.1. 立体構造と断面構造

金属キャビティレーザには様々な構造があるが、本研究であつかうのは直方体構造である。本研究で提案するデバイスの立体構造を fig. 2.15 (a) に示す。屈折率の高いコア層を屈折率の低いクラッド層で挟み込んだ、ダブルヘテロ構造の直方体がレーザの心臓部である。直方体の側面および基板の表面は絶縁膜におおわれており、金属はその上から直方体全体をコーティングしてキャビティ構造を形成している。断面構造を fig. 2.15(b) に示す。直方体は、P 型にドーパされたクラッド層、中央に MQW をもつコア層、N 型にドーパされたクラッド層の三層によって PIN 接合を形成している。その上下には、電極とコンタクトをとるために高くドーパされた、P コンタクト層と N コンタクト層がある。キャビティを形成する金属は P コンタクト層と接触して、P 電極の役割を果たす。N 電極は、キャビティから離れた部分で基板上をけずって、N コンタクト層を露出した部分で接触している。この二つの電極を通じて、PIN 接合に電流注入し、レーザを駆動する。絶縁膜が直方体の側壁をおおっているため、PIN 接合を介さずに電流が流れることはない。

この構造は、2.1 節で述べた原理に基づいて説明すれば、MIM 導波路を用いたファブリペローレーザであるといえる。金属キャビティレーザの場合、一般のレーザに比べて α が大きく、 L が小さいため g_{th} が増大するが、金属を用いたことによる反射率 R の向上によってこれを補償している(2.1.2.②参照)。

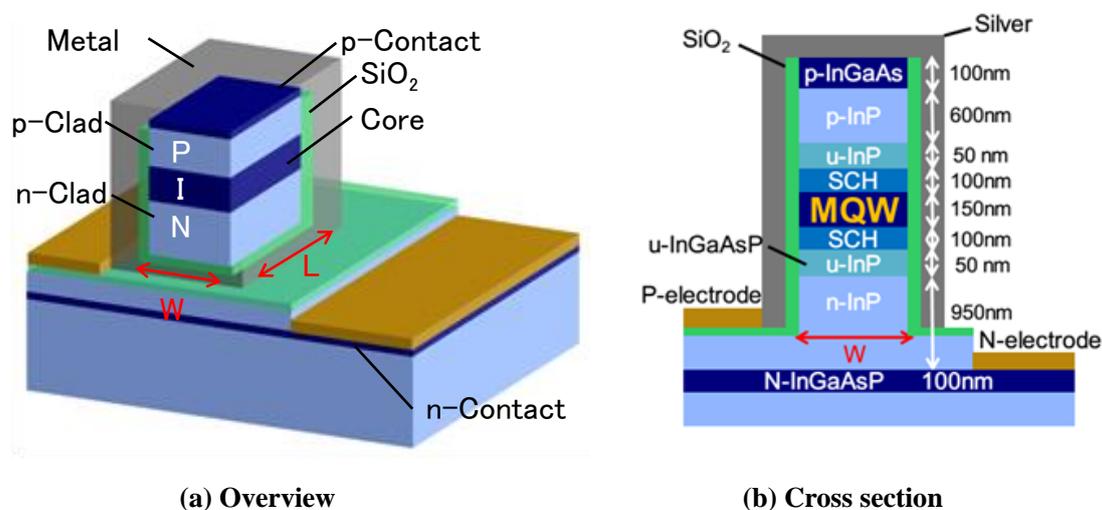


fig. 2.15 Our proposed design of metallic-cavity lasers.

2.2.2. 決定すべきパラメータ

金属キャビティレーザの特性をよりよいものとするためには、構造の最適化をおこなう必要がある。本項では、構造の最適化において重要となるパラメータを、材料、立体構造について述べる。

① 材料

最適化において重要となる材料は以下の二つである。一つめは、コア層の材料である。コア層には、レーザ光の種となる光を放出する材料が用いられる。発振を実現したい波長帯において、高い発光効率をもつ材料を選択する必要がある。二つめは、キャビティを形成する金属である。2.1.1.②(iii)で述べたとおり、金属は反射率が高く、光の吸収が大きい材料である。光を効率よく増幅するには、できるだけ反射率が高く、光の吸収の小さい材料を選択する必要がある。

② 立体構造

立体構造の設計において重要なパラメータは以下の三つである。一つめが層構造である。層構造は、コア層に光を強く閉じ込めると同時に、キャリアを効率よく注入できる構造でなければならない。二つめは直方体の大きさ、つまり幅・奥行き・高さである。幅と奥行きは集積度を上げるためには小さほうがよいが、プラズモン効果による光の損失を抑える上では大きくしたほうがよい。また、発振波長に合わせて幅・奥行きを適切に設定しなければならない。高さは、層構造に合わせて光の閉じ込めが強くなるように選択する必要がある。三つめは、直方体をおおう絶縁膜、および金属の厚みである。特に絶縁膜の厚みは、プラズモン効果の特性への影響を制御する上で重要となる。

2.2.3. 設計の手順

本研究では、以下の三つの手順を踏んで設計を行った。第一に、金属として銀を使用し、コア層に引張ひずみ MQW を導入することを決定した。銀よりもよい材料がある可能性はあるが、本研究では先行研究¹⁶を踏襲した。MQW を導入したのは、ダイエレクトリックモードでの発振を目指すためである。第二に、層構造の設計をおこなった。キャビティの断面構造を導波路とみなして導波モードを解析し、その結果に基づいて層構造を決定した。第三に、立体構造の決定をおこなった。決定した層構造に基づいて改めて導波モード解析をおこない、その結果から直方体の幅、高さ、絶縁膜の厚みを決定した。その上で、古典的なファブリペローレーザのモデルを利用した解析をおこない、奥行きを決定した。

層構造の設計は2.2.4項で、立体構造の設計は2.2.5項で述べる。

2.2.4. 層構造の設計

ここでは、私が学部四年生においておこなった、導波モード解析に基づいたエピウェハ層構造設計について記述する。詳細に関しては、私の卒業論文²⁹を参照いただくことにし、層構造の設計で重要となるパラメータについて簡単に述べる。

fig. 2.15 (b)の断面図をもう一度見ていただきたい。この構造のなかで重要となるのが、コア層とクラッド層の厚みである。コア層の厚みは、光の閉じ込めを考える上で重要となる。コア層が厚いほど、クラッドへの光の漏れを防ぐことができる。その一方で、コア層はドーピングされていないため厚みが大きいと電氣的な伝導性が悪くなる。以上を考慮した上で、本研究では当研究で利用された多重量子井戸構造³⁰を踏襲してコア層の厚みを 150nm とすることとした。

クラッド層の厚みは、金属による光の損失、光の閉じ込めの両方の観点から重要となるパラメータである。上部、下部のクラッドともに、厚いほど特性が良くなるということがわかっている。しかし、クラッドの厚みを大きくするとキャビティ全体の高さが大きくなり、作製プロセスが難しくなるという問題がある。そこで上部クラッドの厚みを 600nm に設定した。

以上の考察より、デバイス作製に用いるウェハの層構造を決定した。層構造を Table 2.1 に示す。本研究で使用したエピ基板はすべてこの構造を用いている。

Table 2.1 Layer structure of epitaxially grown wafer.

Definition	Material	Thickness (nm)	Doping (cm ⁻³)
P-contact	P-InGaAs	100	>1×10¹⁹ P
Upper cladding	P-InP	600	5×10¹⁷ P
Etch stop	U-InGaAsP	8	
Upper buffer	U-InP	50	
SCH	U-InGaAsP	100	
MQW layer	6×u-InGaAs (well) 5×u-InGaAsP (barrier)	6×15nm (well) 5×12nm (barrier)	150
SCH	U-InGaAsP	100	
Lower buffer	U-InP	50	
Lower cladding	N-InP	700	5×10¹⁷ N
Etch stop	N-InGaAsP	8	5×10¹⁷ N
Lower cladding	N-InP	250	1×10¹⁸ N
N-contact	N-InGaAsP	100	>5×10¹⁸ N
Buffer	N-InP	100	>5×10¹⁸ N
Substrate	Semi-insulating InP		

2.2.5. 立体構造の設計

前項で決定した層構造に基づいて、金属キャビティレーザの立体構造を設計した。三次元的な立体構造における光のふるまいを調べるには、有限差分法を用いた FDTD (Finite-difference time-domain)法を利用するのが一般的である。しかし、FDTD 法による構造の解析は非常に時間がかかるという問題点がある。そこで、本研究では幅方向に対して奥行方向の長さが十分に長いということを仮定して、断面方向と導波方向を独立に考えることとした。すなわち、断面方向に関しては、2.1.1 項に基づいて二次元導波モードの解析を行い、導波方向に関しては2.1.2 項にもとづいてファブリペローモデルによるレーザ構造全体の特性の評価を行った。

① 断面モードの解析

本研究では、断面構造の解析に有限要素法ソフトウェア COMSOL³¹ を利用した。このとき、対称面上において、対称面と電界が垂直になる条件をおくことでプラズモニックモードを、対称面と磁界が垂直になる条件をおくことでダイエレクトリックモードを算出した。

ここでは、学部四年生においておこなった断面モード解析について簡単に述べる。Table 2.2 に示すような断面構造において、二つのモードの特性が導波路幅に対してどのような依存性をもっているかを計算によって求めた。前項で決定した層構造とは異なるが、金属キャビティ導波路の一般的な特性を表すものとみなすことができる。

幅に対する減衰定数 α (式(2.65)参照)、およびコア層への光の閉じ込め Γ (式(2.34)参照)の変化をプロットしたのが fig. 2.16 である。ただし、減衰定数、およびコア層への閉じ込めはそれぞれ、式(2.65)、式(2.34)で定義される。

Table 2.2 Cross section of waveguide for 2D simulation.

	Definition	Material	Thickness (nm)	Complex Refractive Index
	Metal cover	Ag	200	0.469-9.32i
SiO ₂ ; thickness=20nm	p-Contact	P-InGaAs	100	3.6+0.0984i
	p-Clad	P-InP	500	3.16+0.0002i
	buffer layer	U-InP	50	3.16
	SCH	U-InGaAsP	100	3.39
	MQW layer		150	3.53
	SCH	U-InGaAsP	100	3.39
	n-Clad	N-InP	700	3.17

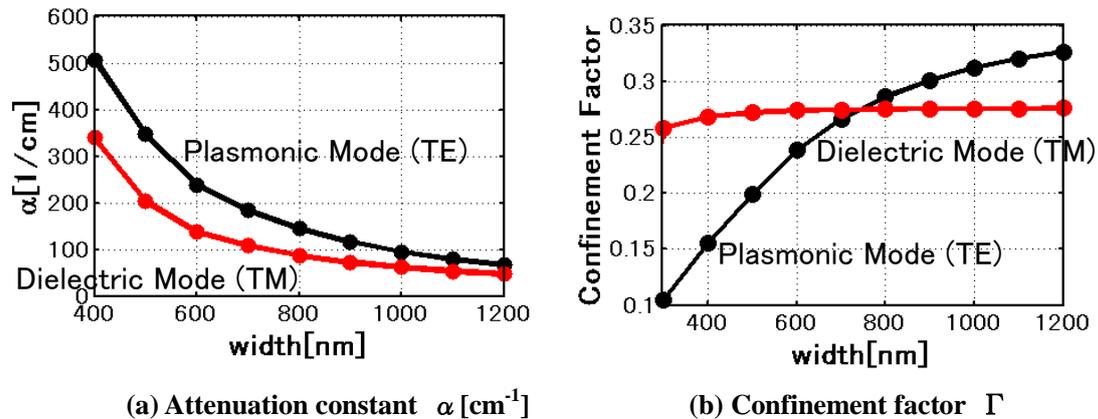


fig. 2.16 Property dependence on width of waveguides.

この結果から、サブマイクロの領域においては、プラズモニックモードよりもダイエレクトリックモードの方が、 α が小さく Γ の大きい、良い特性が得られることが確認された。以上より、キャビティ構造の幅は500nm~2 μ m程度と決定した。

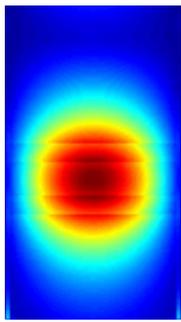
ここでは省略するが、導波路の高さ、および絶縁膜の厚みは、導波モード特性への影響が小さいことがシミュレーションから確認された。よって、プロセスにおける要請に基づいて、導波路の高さは2 μ m程度、絶縁膜の厚みは100nm程度を基準とした。

② 発振条件を満たすキャビティ構造

以上によって算出した導波路特性に基づいて、発振の実現に必要なキャビティ構造はどのようなものか、ファブリペローレーザの原理(2.1.2.②)を用いて考えてゆく。

ここでは、一例として幅800nmのキャビティ構造において、長さほどの程度必要になるかを考えてみる。2.2.5.①において算出された幅800nmの導波路での、ダイエレクトリックモードの特性をTable 2.3に示す。この値を用いて、ファブリペローレーザの発振条件を満たす長さ L と g_{th} をプロットしたのがfig. 2.17である。

Table 2.3 Property of dielectric mode in MIM waveguides (width:800nm).

Mode distribution E	α : attenuation constant [cm^{-1}]	Γ_{core} : Confinement factor	N_{eff} : Effective index	R: Power reflectivity
	86.9	0.28	3.16	0.95

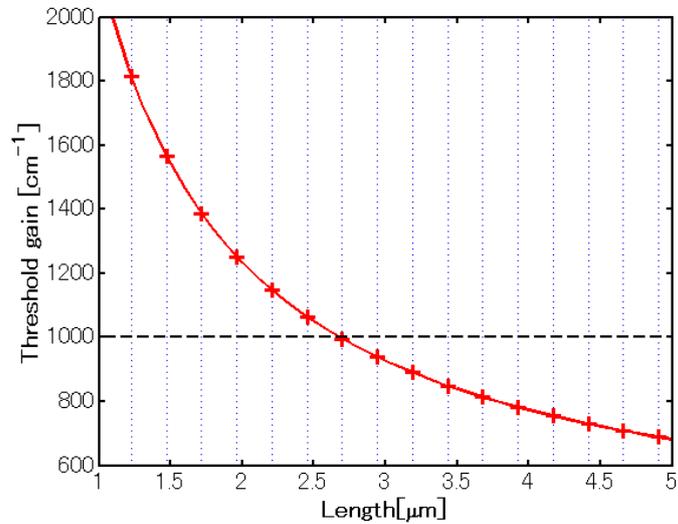


fig. 2.17 Threshold gain versus length of cavity.

fig. 2.17 に赤い線で記されているのが式(2.75)で表される振幅整合条件, 青い破線で記されているのが式(2.74)で表される位相整合条件である. この二つの条件を満たす点を赤い十字で示してある. このとき, キャビティのしきい値利得は活性層において得られる利得よりも十分小さくしなければならない.

fig. 2.17 をみると, 長さが約 $2.7\mu\text{m}$ において, g_{th} が 1000cm^{-1} 以下となることがわかる. 1000cm^{-1} という値は, 一般的な引張ひずみ MQW で十分実現できる値である³². 以上より, 幅が 800nm の場合には, 長さは $2.7\mu\text{m}$ 以上かつ位相整合するものでなければならないということがわかる.

以上より, 幅に応じて必要な長さが決まってくることがわかったが, このモデルは非常に単純なものであるため, 厳密な解析をおこなうためには, FDTD 法によって得られた解析結果と比較しなければならない. 特に, このモデルでは単純なミラーとして扱っているキャビティの端面での光のふるまいをよく考慮する必要がある. よって, 本研究では厳密な長さ構造の決定は行わず, 実際にキャビティを作製してその特性を評価することでモデルとの比較をおこなうことにした.

2.3. まとめ

本章では, 金属キャビティレーザの基本原理を解説し, 構造を示し, その上で設計をおこなった. 層構造の決定, 立体構造のおおまかな決定を行ったが, 厳密な設計は本研究では行わなかったため, 実際に金属キャビティ構造を作製し, それを考察することで, 本章で利用したモデルの妥当性を考える必要がある.

第3章 半導体プロセス技術

本章では、デバイス作製に使用した半導体プロセス技術について解説する。まず、半導体プロセスにおいて中心的な三つの技術、薄膜形成技術・リソグラフィ技術・エッチング技術を順番に解説する。次に、基板接合および裏面除去と、実装技術について解説し、最後に簡単なまとめを述べる。本研究でおこなった具体的なプロセスの手順については、第4章および第6章を参照いただきたい。

3.1. 薄膜形成技術

薄膜形成技術は、デバイス表面に保護膜や絶縁膜を形成したり、リソグラフィ技術と組み合わせて薄膜パターン構造を作製したりするときに用いる技術である。本節では本研究で用いたスピコート法、真空蒸着法、スパッタ法、化学気相成長法の四つについて述べる。

具体的な技術の説明に入る前に、薄膜形成を行うときに注意すべき点を二つ挙げたい。第一に、応力の問題である。成膜が高温下で行われる場合、室温に戻すと基板と薄膜の間で熱膨張係数の差による応力が発生する。本研究で使用した主な材料の熱膨張係数一覧を表1に示す。この応力は薄膜の剥離、デバイスの特性変化、破損を引き起こす可能性がある。第二に、密着性の問題である。密着性が悪いと薄膜が容易に剥離し、本来の構造を維持できない。薄膜の基板に対する密着性は、基板と薄膜の材料の相性、表面の洗浄性に左右されるため、十分注意を払う必要がある。

Table 3.1 Thermal expansion coefficient of materials.

Material	Thermal expansion coefficient [ppm/K]	Temperature
InP	5 ³³	RT
Si	2.6 – 3.3 ³⁴	RT – 100°C
SiO ₂	0.5 ³⁵	
Ag	19 ³⁴	RT – 100°C
Au	14 ³⁴	RT – 100°C
Ti	8.4 – 8.6 ³⁴	RT – 100°C
BCB (CYCLOTENE 3000 series)	42 ³⁶	
Polyimide (Photoneece UR-3100)	40 ³⁷	

3.1.1. スピコート法

スピコート法は、溶液を塗布した基板を高速回転させて、遠心力によって均一な成膜を行う技術である。半導体プロセスにおいては、主にフォトレジストやポリイミドのような高分子材料（ポリマー）の薄膜形成に用いられる。ポリマーは有機溶媒に溶かした状態で塗布され、高速回転ののち加熱で溶媒を揮発させて成膜される。本研究ではリソグラフィに用いるレジスト、保護膜として使用したポリマーの薄膜形成に利用した。

スピコート法を使用する際に注意すべき四つの点を以下に述べる。

① 膜厚の制御

形成される薄膜の厚さは基本的に、高速回転の速度と塗布する溶液の粘度の二つによって決まる。粘度が大きいほど、回転が遅いほど厚くなる。所望の膜厚を得るためには適切な回転速度と適切な溶液を選択する必要がある。レジストのようなスピコートを前提としたポリマー材料の場合、スピカーブと呼ばれる回転速度と膜厚の依存関係を記したグラフがデータシートに記載されているため、これを参照するとよい。

② ベーク

高速回転によって塗布したポリマー材料は、加熱されて溶媒が揮発することで安定した薄膜を形成する。加熱が不十分の場合、本来の特性を発揮できないことがある。低温下で保存しているポリマー材料を使うときは、室温に戻してから塗布をおこなう必要がある。

③ 密着性

スピコートする基板表面が酸化膜で覆われている場合、密着性が低下することがある。これは、酸化膜は親水性であるのに対し、ポリマー材料はおおむね有機材料で疎水性をもつためである。密着性が低下すると、ウェットエッチング中に剥がれるなどいろいろな問題が生じる可能性がある。これを防ぐために、界面活性剤をスピコートして表面を疎水性にすることで密着性を高める必要がある。

④ 均一性

形成される薄膜の厚さは、高速回転の中心点からの距離が遠いほど厚くなる傾向がある。そのため、近接露光リソグラフィのような均一性が求められるプロセスを行う際には、基板の縁の厚い部分を除去する必要がある。特に基板が長方形など角を持つ形状の場合は角周辺の厚みが増すため、注意が必要である。

上記以外に均一性が悪くなる原因は二つある。一つめは基板上に乗ったチリやホコリである。チリやホコリの周囲は膜厚が増加するため、スピコートの前には十分な洗浄とブローによる表面のごみの除去をしなければならない。二つめは基板上のメサ・トレンチ構造である。基板上に凹凸があると、fig. 3.1 に示すような厚みの変化が生じることを留意しなければならない³⁸。

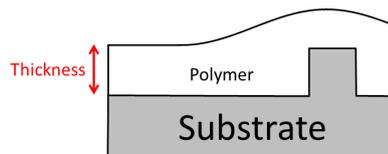


fig. 3.1 Uniformity of spincoated thin film.

3.1.2. 真空蒸着法

真空蒸着法は、高真空下で金属や酸化物を蒸発させることで薄膜を形成する技術である。真空蒸着装置の簡単な構造を fig. 3.2 に示す。蒸着される材料は蒸着源と呼ばれ、 10^{-3} Pa 以下の高真空に引かれたチャンバー内で加熱されて蒸発する。蒸発した材料は相対的に低温である基板上で冷やされ、付着し、薄膜を形成する。蒸着源の加熱方法には、抵抗加熱直熱式、傍熱型加熱式、電子ビーム加熱式などがあるが³⁹、本研究では電子ビーム加熱式の装置を用いて Ag, Au, Ti, Cr の積層に用いた。

電子ビーム加熱式は、蒸着源をハースライナーと呼ばれる容器に入れ、電子ビームを照射して加熱する。蒸着源の種類によって、融点、沸点、ハースライナーへの濡れ性、磁性などが違うことに留意しなければならない。また、ハースライナーの材料には、融点・沸点が十分に高く、蒸着源と合金を形成しないものを選択する必要がある。

真空蒸着法では、fig. 3.3 (a)に示すように水平な面に薄膜が積層される。これは、加熱されて蒸発した蒸着源の分子は、高真空下であるためほとんど散乱されずに直進するからである。このため、メサ構造の上に蒸着をおこなうと側壁に薄膜が形成されない。この性質は後述するリフトオフプロセスにおいては有利に働くが、側壁に薄膜を形成したい場合には、fig. 3.3 (b)に示すように基板の角度を変化させる必要がある。

真空蒸着法によって成膜された薄膜は一般的に密着性が悪いといわれる。ここで、金属薄膜の密着性に関する研究を紹介したい⁴⁰。この研究では、さまざまな金属をガラス基板上に蒸着して密着性を測定している。その結果、酸化物を形成しやすい金属は密着性が良く、酸化物を形成しにくい貴金属は密着性が悪いこと、時間の経過に従って密着性が変化することが示唆された。これは、金属とガラスの界面に金属酸化物が形成されるほど密着性がよくなるためだと述べられている。貴金属の密着性向上の手法には、成膜後にアニールと呼ばれる高温熱処理をおこなう方法⁴¹、基板と貴金属薄膜の間に Ti などの密着性の良い中間層をはさむ方法、イオン照射による基板表面処理を行う方法などがある^{2,42}。

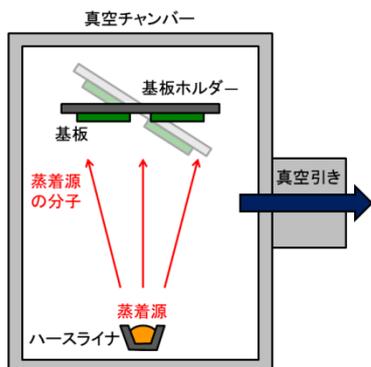


fig. 3.2 Mechanism of vacuum evaporation.

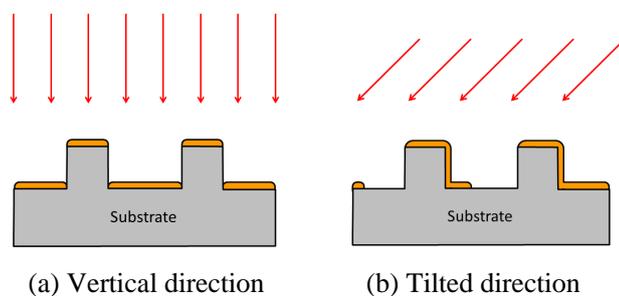


fig. 3.3 Thin film on mesa structure by vacuum evaporation.

3.1.3. スパッタ法

スパッタ法は、スパッタリング現象を用いて金属や酸化物の成膜をおこなう手法である。高エネルギーの粒子が物質に衝突するとその物質が粒子として叩き出される。これをスパッタリング現象とよぶ。スパッタ法ではアルゴン等の不活性ガスのプラズマを利用してスパッタリング現象を発生させ、叩きだされた粒子を基板の上に堆積させることで成膜を行う。本研究では SiO_2 と Au の積層に用いた。

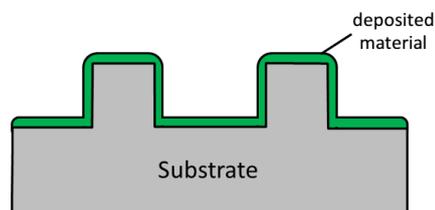


fig. 3.4 Thin film on mesa structure by sputtering.

真空蒸着法と異なり、スパッタ法を用いると基板ホルダーの角度を変えなくても、メサ・トレンチ構造の側壁にも成膜を行うことが出来る。スパッタ法ではプラズマを維持するためにガス圧を高く保つため、スパッタリングされた粒子はガス分子による散乱を受けて平均自由行程が短くなるからである。

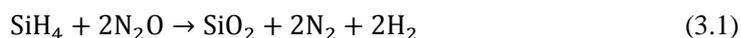
一方、プラズマによる基板へのダメージが生じるため、アクティブ素子を作製する際は長時間の使用を避けたほうがよい⁴³。

3.1.4. 化学気相堆積法

化学気相堆積法（CVD: Chemical vapor deposition）は原料をガスで供給し、化学反応を利用して基板表面に薄膜を形成する技術である。化学反応を活性化させるエネルギーを供給する方法によっていくつかの種類があるが、本項では本研究で用いたプラズマ CVD 法（PECVD: Plasma enhanced chemical vapor deposition）と原子層堆積法（ALD: Atomic layer deposition）をについて述べる。本項では省略するが、本研究で使用した半導体エピ基板は CVD 法の一つである有機金属気相成長法（MOCVD: Metal organic chemical vapor deposition）によって作製したものである。

① PECVD 法

PECVD 法は、プラズマによって化学反応を起こして基板の上に薄膜を形成する方法である。本研究では SiO_2 の成膜に使用した。 SiO_2 の積層は、下記の化学式で表すことが出来る⁴⁴。



実際には複数の反応が組み合わさったより複雑な反応が起こっていると考えられている。スパッタと同様に PECVD についてもメサ・トレンチ構造の側壁にも成膜を行うことが出来る。スパッタと同様にプラズマを使用するため基板へのダメージが懸念されるが、堆積速度が約 10 倍であるためプラズマにさらされる時間が短くなり、より少ないダメージに抑え

ることができると考えられる。

② ALD 法

ALD 法は、CVD 法の一つで、原子層を一層ずつ積み重ねることで薄膜を形成する方法である。本研究では使用しなかったが、絶縁膜の形成などに今後使用すべき方法であると考え、紹介する。この方法は 1 サイクルで 1 層を形成するため、膜厚の制御が容易である。また基板表面に沿って成膜するため、メサ・トレンチ構造の側壁にも均一な膜が形成される。アルミナや SiO_2 のような酸化膜の形成がよく知られているが、銀のような金属薄膜の形成も可能である⁴⁵。

3.2. リソグラフィ

リソグラフィは、 $10^9\sim 10^4$ m オーダーのパターン構造を作製するときに用いる手法である。リソグラフィの基本原理を説明するために、フォトリソグラフィのプロセスフローを fig. 3.5 に示す。まず、レジストと呼ばれる感応性の物質を基板の上にスピコート法を用いて塗布する。次に、パターンを作製したい部分だけに光や電子線などのエネルギーを与えてレジストを変質させる。最後に、現像液を用いてパターンを現像する。変質した部分が現像液に溶けるレジストをポジ型レジスト、変質していない部分が現像液に溶けるレジストをネガ型レジストと呼ぶ。完成したパターンはエッチングやリフトオフのときにマスクとして働き、使用後は除去される。

本節では、本研究で用いたフォトリソグラフィ、電子線リソグラフィ、リソグラフィを用いた薄膜パターン作製手法であるリフトオフ、及びフォトリソグラフィ装置を用いたトレンチフィリングについて述べる。

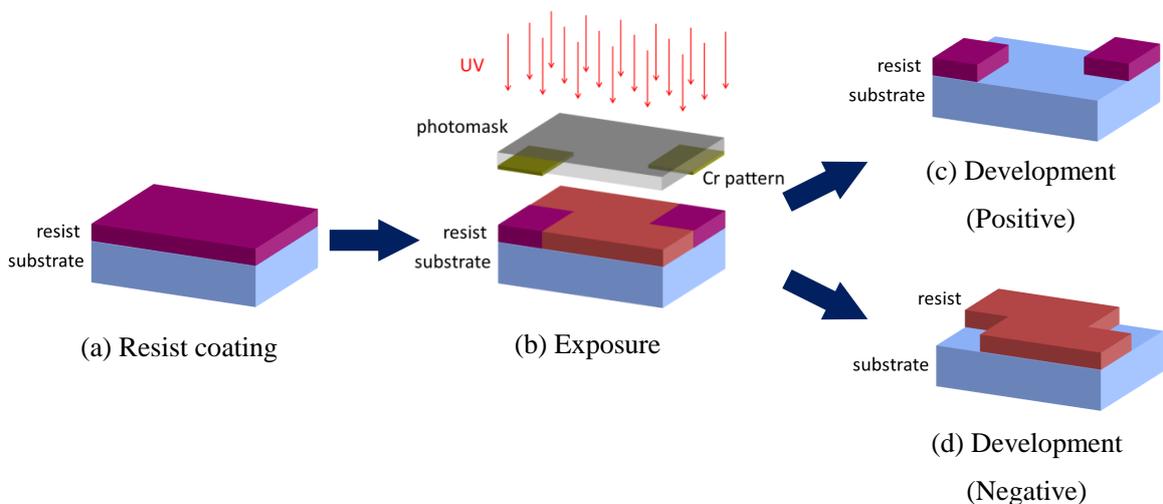


fig. 3.5 Process flow of photolithography.

3.2.1. フォトリソグラフィ

フォトリソグラフィは、光によってレジストを変質させるリソグラフィ手法である。本研究では、電極パターンなど大きさが $50\mu\text{m}$ 以上のパターンの作製に使用した。

フォトリソグラフィでは、パターン状に光を照射するためにフォトマスク——クロム等の金属でパターンが描かれたガラス基板——を利用する。これを通して露光することで、クロムパターンのない部分のみを光が透過してレジストを変質させる。感光したレジスト膜の現像には、主にアルカリ溶液を使用する。

フォトリソグラフィの露光時間は秒単位であり、フォトマスクを一度作れば何度でも繰り返し使えるため、大量生産に向けた手法だといえる。しかし、光を利用するため光の波長より小さなパターンの作製が難しいという欠点がある。そのため、波長の短い紫外線を露光に用いるのが一般的である。

露光の方式には様々なものがあるが、本研究では近接露光方式を用いた。この方式は、fig. 3.5 (b) のようにフォトマスクと基板を重ねてその上から平行な紫外光を照射する方式である。簡便で露光面積の制限も少ないため研究室レベルでよく用いられる²。照射した光はマスクと基板の間でフレネル回折を起こして像のぼけを生じさせる。この影響を少なくするためにはレジスト膜厚を小さく、マスクと基板の距離を小さくして密着させる必要がある。密着の実現には、以下の二つに注意が必要である。

- 基板のふちはレジストが厚くなる (3.1.1 項参照) ためアセトン等で除去する。
- ゴミが乗らないようにする。

基板上にゴミが乗ると、ゴミの部分が露光されず意図しないパターンが形成されるのでその意味でも重要である。一方、密着させ過ぎるとフォトマスクがレジストによって汚染されたり、基板がフォトマスクに張り付いたりするので注意を要する。

露光を行うときに重要となるのが露光時間である。レジストに照射される紫外光の照射エネルギー密度は、

$$\text{(単位時間あたりの照射光パワー密度)} \times \text{(照射時間)}$$

で決まる。一般的にはこの値が、レジストが感光するしきい値エネルギーと一致するように照射時間を設定する。

しかし、これを意図的にずらすことでレジストの断面形状を変化させることができる。Table 3.2 にネガ型レジストとポジ型レジストにしきい値よりも強いパワーを照射した場合と、しきい値より弱いパワーを照射した場合のレジストの形状を示す。マスクの縁ではフレネル回折によって光が散乱される。パワーが強い場合には散乱光が蓄積されてマスクの内側まで感光されるのに対し、パワーが弱い場合には散乱光が弱いためマスクの外側も感光しなくなるため、Table 3.2 に示したような形状がえられる。

すでに作製されたパターンの上に重ねてパターンを作製する場合、基板を移動させてフ

オトマスクとの位置合わせをおこなう。この位置合わせは、基板の表面に作製されたパターンを基準としておこなうのが一般的だが、装置によっては裏面にあるパターンを基準しておこなうこともできる⁴⁶。

Table 3.2 Cross section of developed resist pattern.

Resist	Under-exposure	Over-exposure
Positive		
Negative		

3.2.2. 電子線リソグラフィ

電子線リソグラフィは、電子線によってレジストを変質させるリソグラフィ手法である。本研究では、キャビティ構造など、大きさが 10 μm 以下のパターンの作製に使用した。

電子線リソグラフィ装置の原理を fig. 3.6 に示す。高真空下で電子銃から放出された電子は、電子光学系によってビーム形状に収束される。このビームが基板上を走査することによってパターン状にレジストを感光させる。感光したレジスト膜の現像の方法はレジストによって異なるが、本研究では有機溶媒を用いて現像をおこなった。

電子ビームを走査させてレジストを感光させるため、フォトリソグラフィに比べて描画にかかる時間が長い。その一方で電子の波長はド・ブロイの式、

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} \quad (3.2)$$

によって決まるため、加速電圧を高めて E を大きくすることで短波長を実現できる。このため、電子線リソグラフィはフォトリソグラフィに比べて高い解像度を実現することが出来る。フォトリソグラフィと電子線リソグラフィの解像度比較を Table 3.3 に示す⁴⁷。

本項では、まず、ビーム形状と走査方式にもとづいて描画方式を解説する。つづいて、描画パラメータ、散乱、電子光学系について述べる。

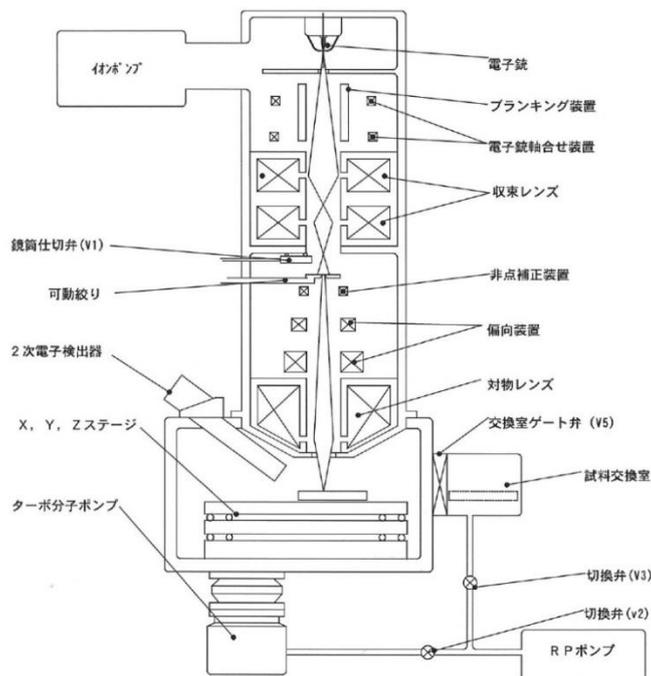


fig. 3.6 Schematic of electron beam lithography machine⁴⁸.

Table 3.3 Exposure wavelength and resolution of lithography techniques⁴⁷.

線源	名称 / 条件	波長 [nm]	解像度 [nm]
光	Hg, g 線, RET	436	~ 200
	ArF エキシマレーザ, 液浸	193	~ 50
	EUV, NA=0.25	13.5	~ 30
X 線	近接露光, 間隔 10 μ m	1.0	~ 60
電子線	加速電圧 10kV, 薄膜レジスト	0.012	~ 100
	加速電圧 50kV, 超薄レジスト	0.005	~ 10

① ビーム形状

電子光学系によって収束されるビームの形状には、大きく分けてポイントビーム型と成形ビーム型の二つがある⁴⁷。ポイントビーム型はビームを小さなスポットに絞ってパターンを直接描画する方式で、微細なパターンを描画するのに適している。CRESTEC CABL-9000 シリーズはこの方式を用いている。成形ビーム型は、ビームを矩形や円型などに成形して描画する方式で、描画時間の短縮が実現できる。ADVANTEST F5112 はこの方式を用いている。本項では、本研究で使用したポイントビーム型について述べる。

② 走査方式

電子線リソグラフィは、フィールドと呼ばれる領域で行われる。フィールドとは、基板を動かすこと無く、電子光学系を用いて電子ビームを走査することの出来る領域のことである。広い領域で描画を行う場合は、描画パターンを複数のフィールドに分割し、フィールドごとに基板を移動させて描画を行う。描画したいパターンが二つ以上のフィールドをまたいでいる場合にはフィールド間でパターンがきれいにつながるように設定しなければならない。

フィールド内を電子ビームが走査する方式にはラスタ方式とベクタ方式がある。ラスタ方式では、フィールド全面をビームが走査し、パターンのある部分だけビームをオンにすることで描画を行う。ベクタ方式はパターンのある部分だけをビームが走査する。描画時間の短縮という観点から、最近ではベクタ方式が主流である。ただし、ベクタ走査の場合ビームをオン・オフするときの待機時間がパターンの形状に影響を与える場合があるので注意が必要である。(fig. 3.9 参照)

また、ビーム走査方式は、ビームの位置決め方法によってアナログ方式とデジタル方式にも分類できる。アナログ方式はなめらかな描画が可能であり、デジタル描画は精度の高い描画が可能である。

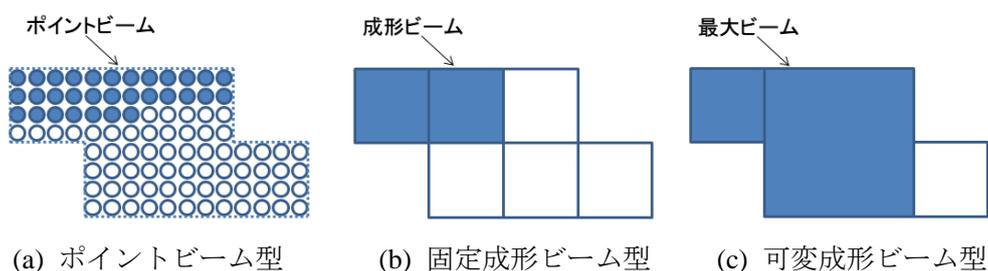


fig. 3.7 Form of electron beam⁴⁷.

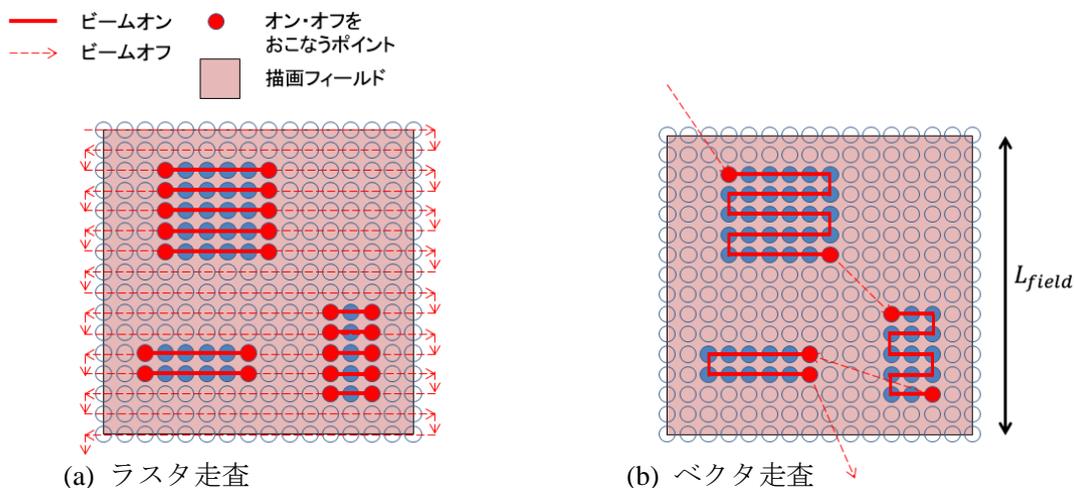


fig. 3.8 Methods of electron beam scanning⁴⁷.

③ 描画における重要なパラメータ

描画においてどのようなパラメータが重要になるか，デジタル方式でのビーム走査の仕組みを解説することで見てゆく．ビーム走査の仕組みを fig. 3.8(b)に示す．ビームスポットは fig. 3.8 (b)の各点で一定時間だけ停止して電子線を照射する．一つのフィールドあたりの点の数をステップ数，照射する時間をドーズタイムとよぶ．このとき，レジストに照射される単位面積当たりの電荷量（ドーズ量）は以下の式で表すことができる．

$$Q_{dose} = \frac{I_{beam} \times t_{dose}}{(L_{field}/N_{step})^2} \quad (3.3)$$

ただしここで，

Q_{dose} : 単位面積当たりドーズ量 [C/m²]

I_{beam} : ビーム電流 [A]

t_{dose} : ドーズタイム [sec]

L_{field} : フィールドサイズ [m]

N_{step} : ステップ数

である．このドーズ量をレジストが感光するしきい値になるよう各パラメータを設定しなければならないが，ドーズ量が同じでも，各パラメータの選び方によって描画の特性が変わってくる．たとえば，フィールドサイズを小さく，ステップ数を大きく設定すると，1ステップのサイズが小さくなるため，描画の精度を上げることが出来る．

描画において最も重要となるのが I_{beam} と t_{dose} である．同じ Q_{dose} を得たいとき， I_{beam} を大きく設定すれば t_{dose} が短くなり， I_{beam} を小さくすれば t_{dose} は長くなる．したがって，描画時間を短縮したい場合には I_{beam} を大きく設定するとよい．ただし， I_{beam} とビーム径には fig. 3.10 に示すような正の相関がある．そのため，より精度の高い描画を行いたい場合には電流を小さく設定する必要がある．

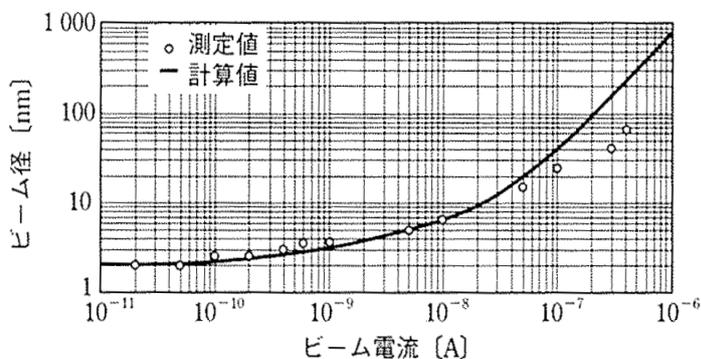


fig. 3.10 Beam spot size versus current⁴⁷.

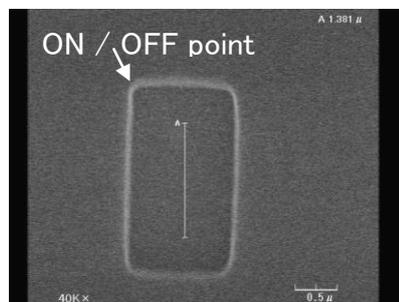


fig. 3.9 Effect of beam switching.

④ 電子ビームの散乱

電子線リソグラフィの特性を大きく支配するのが電子ビームの散乱である。レジスト膜に入射した電子ビームは、散乱されて基板の横方向に広がるため、ビームスポットよりも広い範囲のレジストにエネルギーをあたえる。波長の短い電子を用いる電子線リソグラフィでは、散乱が解像度を決定する要因となっている。

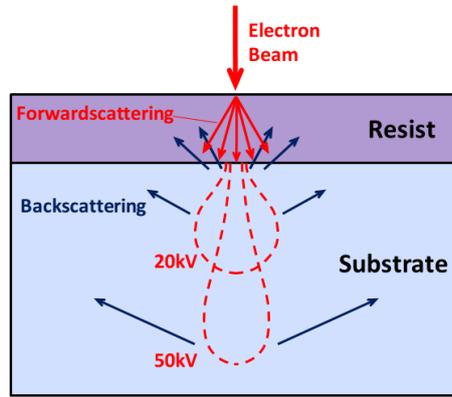
散乱には、入射方向に向かって広がる前方散乱、入射方向とは逆の方向に向かって広がる後方散乱の二つがある。これらの散乱があたえるエネルギーは fig. 3.11 に示すように二つのガウス分布の重ねあわせで近似することが出来る。前方散乱は幅が狭くするどいガウス分布で、後方散乱は幅が広くなだらかなガウス分布で近似される。

散乱の広がりを決めるのはビームの加速電圧である。加速電圧が低いと電子はすぐに横方向に広がってしまうため、前方散乱は大きくなるが、入射と逆方向に跳ね返される確立は低いため後方散乱は小さくなる。一方、加圧電圧が高い場合、電子は基板深くまで侵入するため、前方散乱は小さくなるが、そのぶん後方散乱は大きくなる。前方散乱が少ない分、必要となるドーズ量は低電圧のときに比べて多く必要になる。

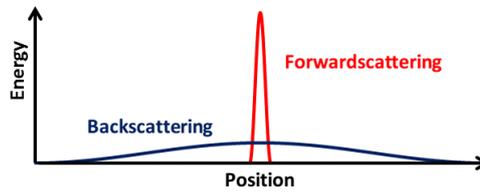
前方散乱が大きいと、パターンの解像度は下がり、レジスト断面はアンダーカットの大きなものとなる。後方散乱はエネルギーが小さいので解像度に影響をあたえないが、大きくなると近接効果の原因となる。近接効果とは、後方散乱によって与えられたエネルギーが蓄積されることによってビームを照射していない部分までレジストが感光してしまう現象である。サイズの大きなパターンや、密集したパターン、レジストが孤立したパターンを描画するときには、近接効果が現れやすい。fig. 3.12 に示すように、大きなパターンの場合、パターンが設計値よりも大きくなり、孤立パターンの場合はドーズ量の設定が非常にシビアになる。微細なパターンの場合は、ある一定のドーズ量を超えるとパターン形状はほとんど変化しなくなるが、大きなパターンの場合ドーズ量を大きく設定すると近接効果が顕著に表れる。ドーズ条件近接効果を防ぐためには、ドーズ量を抑え、パターンに合わせた露光量の補正を行う必要がある⁴⁷。

⑤ 電子光学系について

最後に、電子光学系の設定について注意すべき点を述べる。精度の高い描画を行うためには、レジスト膜の上で電子ビームが収束するように設定しなければならない。フォーカスが合っていないければビーム径が大きくなり、描画精度が落ちる。基板が傾いている場合、ステージを移動するとレンズと基板の距離が変化してフォーカスがずれるため、基板の高さのズレを検出して補正する機能を使うとよい。

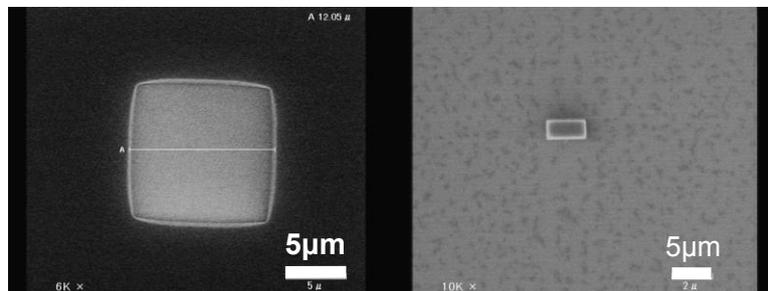


(a) Scattering of electron beam



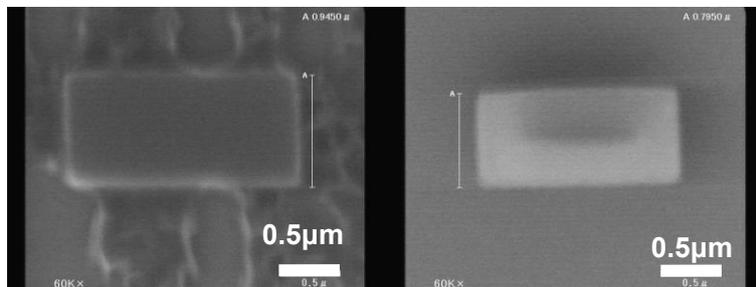
(b) Energy distribution of scattered electrons

fig. 3.11 Effect of scattered electrons.



(a) Large pattern

(b) Isolated pattern



(c) Isolated pattern ($t_{\text{dose}}=0.6\mu\text{s}$)

(d) Isolated pattern ($t_{\text{dose}}=0.9\mu\text{s}$)

fig. 3.12 Proximity effect.

3.2.3. リフトオフ

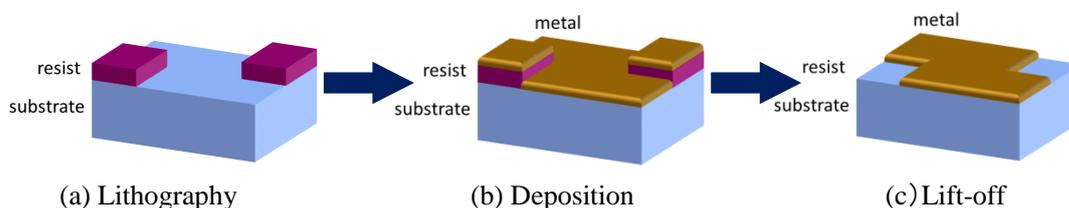


fig. 3.13 Process flow of lift-off.

リフトオフは、電極などの金属パターンの作製に頻りに用いられる手法である。リフトオフによる金属電極の作製プロセスを fig. 3.13 に示す。まず、リソグラフィによってレジストパターンを作製する。つぎに、その上から真空蒸着法などを用いて金属を積層する。この時、金属薄膜の厚さはレジスト膜厚の2分の1以下であることが望ましい。最後に、レジストを溶解させることによってレジストの上に積層された金属は除去する。以上のプロセスをへて、金属配線パターンが形成される。

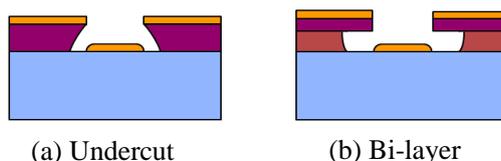


fig. 3.14 Undercut for lift-off process.

リフトオフを行うときに重要となるのが、リソグラフィ後のレジスト断面形状である。fig. 3.14 に示すように、十分なアンダーカットが入っていないと、レジストの側壁を通じて薄膜がつながり、レジストといっしょに電極が剥がれることがある。密着性の悪い金属を積層するときや、斜めから真空蒸着を行うときには注意が必要である。

レジストの断面形状をアンダーカットの入ったものにする方法としては、リソグラフィの条件を最適化する方法 (3.2.1 項参照)、有機溶剤によって処理する方法²、バイレイヤーリフトオフ法を使用する方法などが挙げられる。本研究では、斜め蒸着を行うときにバイレイヤーリフトオフ法を使用した。

バイレイヤーリフトオフ法とは、現像条件の異なる二種類のレジストを重ねてリフトオフする方法である。上の層に用いるのは一般的なレジストであるが、下の層は犠牲層と呼ばれ、感光性がなくウェットエッチングによって溶かせるものを用いる。本研究では、斜め蒸着を行う際にバイレイヤーリフトオフを使用した。

バイレイヤーリフトオフ法を用いてアンダーカットを作製するプロセスは以下のとおりである。犠牲層とレジストを順番に塗布したのち、上の層のみをリソグラフィによってパターンニングする。つぎに、ウェットプロセスによって下の層を溶かしてアンダーカットを

作製する。アンダーカットの深さはエッチング時間によって制御できるが、上の層のパターンがあまりに小さい場合、溶液が侵入せずアンダーカットを作れない場合があるので注意しなければならない。

3.2.4. トレンチフィリング

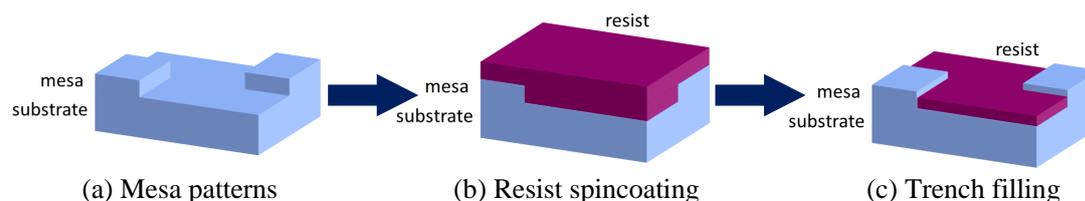


fig. 3.15 Process flow of trench filling.

トレンチフィリングとは、トレンチ構造をレジスト等によって埋める手法である。プロセスフローを fig. 3.15 に示す。メサ・トレンチ構造のある基板の上に、構造全体が埋まるようにレジストをスピンドコートする。そして、メサ構造の上面が出るまでレジストを除去してゆく。この工程を頭出しと呼ぶ。

本研究では頭出しにドライエッチングを使用した。が、フォトリソグラフィ装置を使用する手法があるため、今後利用可能な手法として紹介する³⁸。

フォトリソグラフィに用いるフォトレジストは、紫外線を照射されると表面から徐々に感光されてゆく。リソグラフィの場合は照射時間を十分長くすることで基板までのすべてのレジストが感光されるが、照射時間が不十分であるとレジスト膜の途中で感光が止まる。すなわち、表面からどれだけの深さまでレジストを感光させるかは、照射時間によって制御することが出来る。この論文では、現像時間を十分長くすることで、感光するレジスト厚を制御できることが示されており、彼らはこの方法を **Underexposure and Overdevelopment Technique** と呼んでいる。

本研究でもこの手法を用いてトレンチ構造をレジストで埋める実験を行った。しかし、本研究で作製するトレンチ構造は深さが $2\mu\text{m}$ 程度であるため、上記の論文に比べて非常に小さく、照射時間の設定が非常にシビアになることがわかった。これが、本プロセスではこの手法は採用しなかった理由である。しかし、紫外線照射強度を調節できる装置を用いれば照射時間の設定が容易になると考える。

3.3. エッチング

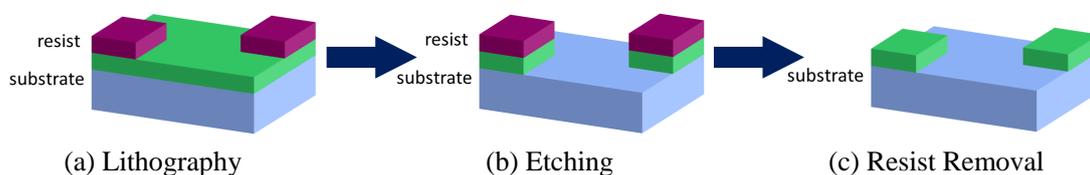


fig. 3.16 Process flow of etching.

エッチングとは、化学薬品やガスを用いて基板・薄膜を削るプロセス手法である。fig. 3.16 にプロセスフローを示した。リソグラフィによって作製したパターンを保護膜（マスク）としてエッチングを行うことによって、マスクを基板上に転写し、立体構造を作製する。本節では、エッチング速度、選択性、ダメージ、異方性の四つを、エッチングを評価する指標とする。

(i) エッチング速度

単位時間あたりにエッチングされる深さのこと。エッチング速度が速いとエッチング時間を短縮できるが、エッチング深さの制御が難しくなる。

(ii) 選択性

特定の材料のみを選択的にエッチングする性質のこと。選択性の評価には選択比という値が用いられる。例えば、レジストをマスクとして SiO_2 をエッチングしたとき、 SiO_2 とレジストのエッチング速度がそれぞれ $100\text{nm}/\text{min}$ と $2\text{nm}/\text{min}$ だったとすると、レジストの SiO_2 に対する選択比は 50 となる。この値が大きいほど選択性が良いといえる。選択性が良いほど、長時間のエッチングが行える。

(iii) ダメージ

エッチングによって基板に与えられる損傷のこと。電氣的ダメージ、物理的ダメージ、光照射ダメージの三つを原因とする結晶欠陥の発生や、イオン分子が基板に注入されることによる不純物準位の形成が問題となる⁴³。

(iv) 異方性

エッチングがある一方向のみに進行する性質のこと。エッチングがあらゆる方向に均等に進行する性質は等方性と呼ぶ。等方性エッチングと異方性エッチングによって作製されたエッチング断面形状を fig. 3.17 に示す。等方的にエッチングが進行すると、マスクの下部までエッチングが進行するため、パターンの精度が下がる。異方性のエッチングを用いれば、fig. 3.17 (b)に示すような基板に対して垂直なエッチング形状を実現することが出来る。

エッチングを進行させる反応には、化学的な反応と物理的な反応がある。両者を上記四つの指標で評価したものを Table 3.4 に示す。化学反応を用いた化学エッチングはダメージが少なく、選択性がよく、エッチング速度も早いですが非等方的なエッチングは難しい。物理反応を用いた物理エッチングはスパッタリング現象を用いており、異方性のエッチングが可能だが、選択性が悪く、エッチング速度が低く、ダメージが大きくなる。

エッチングは、溶液を用いるウェットエッチングと、ガスを使用するドライエッチングの二つに分けられる。ウェットエッチングは化学エッチングのみを利用するエッチングで、ドライエッチングは化学エッチングだけでなく物理エッチングも利用したエッチング手法である。本節では、ウェットエッチングとドライエッチング両者の原理と特徴について述べる。

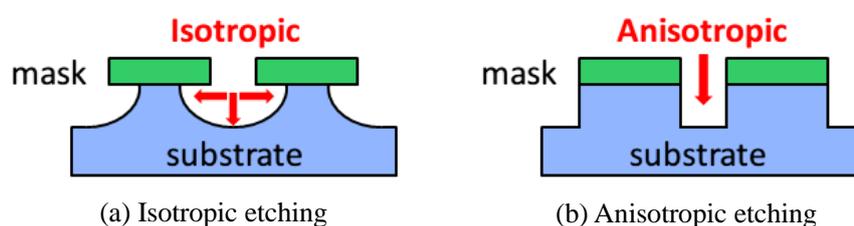


fig. 3.17 Etching profile.

Table 3.4 Comparison between chemical and physical etching.

	Chemical	Physical
(i) Etching rate	○	△
(ii) Selectivity	○	×
(iii) Damage	○	×
(iv) Anisotropy	△	○

3.3.1. ウェットエッチング

ウェットエッチングは、溶液の中に基板を浸し、化学反応で表面を溶かす手法である。この溶液はエッチャントと呼ばれ、エッチングしたい材料にあわせて適切に選択される必要がある。本プロセスで使用した材料とエッチャントの組み合わせ一覧を Table 3.5 に示す。

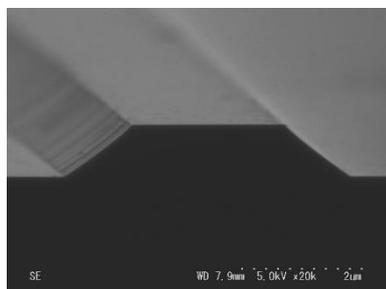
ウェットエッチングは化学エッチングのみを利用するため、Table 3.4 に示した通り、選択性が良く、ダメージが少ない。高い選択性を利用して、薬品と反応性のない層(エッチストップ層)を基板に導入しておけば、そこでエッチングを簡単に止めることができる。

一般に、ウェットエッチングは等方的に進行する。しかし、InP のような化合物半導体では、化学反応の進行が結晶構造に大きく支配されるため等方的にエッチングが進行しない。化合物半導体の場合、エッチングが進むとエッチング速度の遅い面方位が現れるため、単元素半導体結晶や非結晶半導体酸化物とは大きく異なったエッチング断面となる。エッチャントの種類によってエッチング速度の面方位依存性が異なるため、エッチャントの選択には十分注意が必要である。

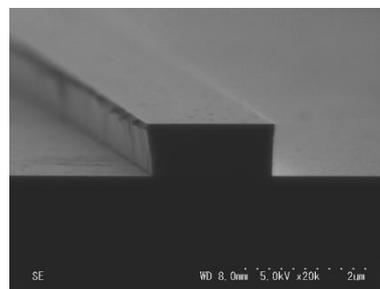
本研究で使用した $\text{HCl}+3\text{H}_3\text{PO}_4$ による InP(100)基板のエッチングを例として挙げよう。マスクが (01-1) 方向に平行なパターンの場合、fig. 3.18 (a) に示すような、なだらかなエッチング断面を持つが、(011) 方向に平行なパターンでは、fig. 3.18 (b) のような急峻なプロファイルを持つ。この上に電極を這わせるときは断線しないように注意する必要がある。

Table 3.5 Typical wet etching materials and etchants.

Material	Etchant	Etching rate
InP	HCl	7~9 $\mu\text{m}/\text{min}$ (R.T.)
InP	$\text{HCl}+3\text{H}_3\text{PO}_4$	200~300 nm/min (R.T.)
InGaAs	$\text{H}_2\text{SO}_4+\text{H}_2\text{O}_2+5\text{H}_2\text{O}$	800 nm/min (5°C) ⁴⁹
InGaAsP Q1.25	$\text{H}_2\text{SO}_4+\text{H}_2\text{O}_2+5\text{H}_2\text{O}$	50 nm/min (5°C) ⁴⁹
SiO_2	Buffered HF	500 nm/min ⁴⁹



(a) Mesa lines along (01-1) direction



(b) Mesa lines along (011) direction

fig. 3.18 Cross-section images of (100) InP substrate etched by $\text{HCl}+3\text{H}_3\text{PO}_4$ ⁴⁹.

3.3.2. ドライエッチング

ドライエッチングはガスを使用するエッチング方式である。ウェットエッチングとは異なり、化学的なエッチングだけではなく物理的なエッチングも同時に行うことができる。主要なドライエッチングの方式を Table 3.6 に示す。表の下上に行くほど化学的な反応が、下に行くほど物理的な反応が支配的になるように並べられている。

現在注目されている手法として、収束イオンビーム（FIB: Focused ion beam）エッチングを紹介する。FIB は、ガリウムイオンをビーム状に収束させて基板に照射することで物理的なエッチングを行う手法である。光デバイスの作製にも使用されているが、Ga イオンの侵入、結晶へのダメージによって光の損失が大きくなることが知られている⁵⁰。

現在の主流はプラズマエッチングのなかでも反応性イオンエッチング（RIE: Reactive ion etching）である。RIE は、化学エッチングと物理エッチングをうまく組み合わせることで高い異方性と選択性を実現したエッチング方式である。本項では本プロセスで使用した誘導結合プラズマ RIE（ICP: Inductively coupled plasma）方式の原理、重要なパラメータ、注意すべきドライエッチング特有の現象について順番に解説し、最後に具体的なエッチング材料とガスについて述べる。

Table 3.6 Comparison of dry etching methods⁵¹

方式		特徴		
ダウンフローエッチング		中性ラジカルで等方性エッチング, 照射損傷なし		
プラズマエッチング	プラズマモード	パレル型	主に中性ラジカルで等方性エッチング	
		平行平板型	イオン. 中性ラジカルで加工, 異方性加工可能	
	RIEモード	平行平板型	RIE	イオン. 中性ラジカルで加工, 異方性加工可能
			マグネトロン RIE	磁界でプラズマ密度高めてエッチング速度向上
		生成/バイアス分離型	ICP 方式	コイルから電磁波をプラズマへ導入, 高密度化が容易
		ECR 方式	共鳴作用で高プラズマ密度を実現	
反応性イオンビームエッチング (RIBE)		高真空下でハロゲンのイオンビーム照射し高方向性加工		
スパッタエッチング		希ガスプラズマからのイオン衝撃でスパッタ, 選択比低		

① ICP-RIE 方式の原理

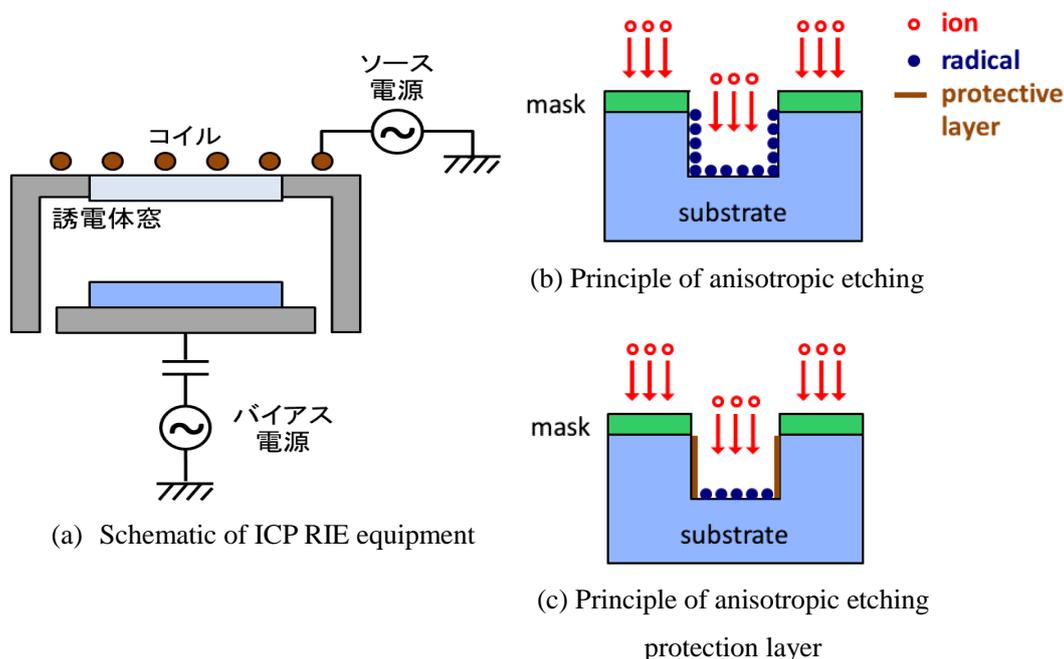


fig. 3.19 Principle of ICP-RIE method⁵¹.

ICP-RIE 方式の装置の構成を fig. 3.19 (a) に示す. ICP-RIE 方式の装置では, 二つの高周波電源があり, 上部のソース電源でプラズマを発生させ, 下部のバイアス電源でイオンを引き出している. 上部でプラズマ化されたガスは, イオンとラジカルを生成する. 電氣的に中性で, 化学的に反応性の高いラジカルは, 基板表面に達して化学エッチングを起こす. 一方, イオンは正に帯電しているため, バイアス電源によって負に帯電した基板に垂直に衝突し, スパッタリング現象による物理エッチングを起こす. イオンによるスパッタリングは, 基板に損傷や欠陥を与えて化学的な反応性を高めると同時に, 反応生成物を除去する. そのため, 基板に垂直な方向にエッチングが促進される. 基板に平行な方向にもエッチングは進行するが, 垂直方向に比べると小さい. このような機構によって選択的かつ非等方的なエッチングが実現される. また, 側壁に保護膜を形成して平行方向のエッチングを抑制する手法もある.

② ドライエッチングにおいて重要なパラメータ

実際のエッチングでは, パラメータを適切に設定しなければ化学エッチングと物理エッチングのバランスがとれた理想的なエッチングは実現できない. 注意すべきパラメータ五つを以下に述べる.

- (i) **ソース電圧:** プラズマを生成するソース電圧を大きく設定すると, ラジカルとイオンの生成が促進され, 各粒子の運動エネルギーが増加する. このため, 化学エッチ

ングの増大によるエッチング速度の増加と同時に、物理エッチングの増大による基板へのダメージが増加する

- (ii) **バイアス電圧:** イオンを引き出すバイアス電源を大きく設定すると、イオンが受け取るエネルギーが増加して物理エッチングの影響が大きくなる。
- (iii) **チャンバー内圧力:** チャンバー内の圧力を大きく設定すると、発生するラジカルが増えて化学エッチングの影響が大きくなる。
- (iv) **ガス比:** 反応性ガスに Ar のような安定したガスを混ぜることによって物理・化学エッチングの調節ができる。反応性ガスの比率が大きいと、チャンバー内におけるラジカルの割合が増えて化学エッチングの影響が大きくなる。
- (v) **流量:** 流量を大きく設定すると、ラジカルの供給が増えて化学エッチングが促進される。

③ ドライエッチングの問題点

ドライエッチングにおいて生じる問題点を以下に三つ述べる。

一つ目はマイクロローディング効果である⁵¹。マスクのパターン形状によってエッチング特性が変化する現象をこう呼ぶ。これは、パターンの形状によってイオンやラジカルの供給量が変わることによって起こる。特にパターンが密集している部分と孤立している部分では特性が変わるため比較する際には注意を要する。

二つ目はブルズアイ効果である。エッチング速度が基板の中心部では遅く、周縁部では大きくなる現象をこう呼ぶ。大きな基板を使用するとき顕著に現れるため、基板の周囲に同じ材料の小さな基板を周りに敷き詰めるとよい⁵²。

三つ目は、物理エッチングによる基板の荒れである。物理エッチングが支配的になると、エッチングされた表面に凹凸が目立つようになる。顕著なのは、マスク付近におけるトレンチの発生である。fig. 3.20 に示すように、エッチングされた側壁に衝突したイオンは側壁にそって滑り落ち、基板に衝突する。このイオンによってマスクの側方にトレンチが生じる。表面の荒れは光の損失や表面再結合による電気的な損失を増大させるため、物理エッチングの過剰な促進は控えなければならない。

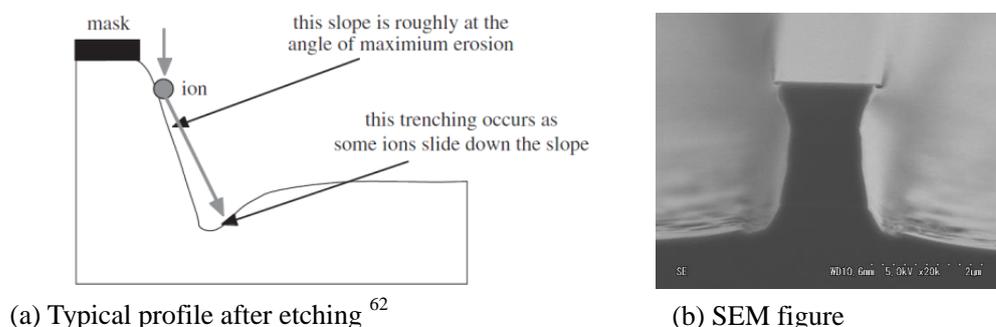


fig. 3.20 Trench beside mesa patterns.

④ エッチング材料と使用ガス

最後に、具体的なエッチングの材料とガスの一覧を Table 3.7 に示す。シリコンを含む材料では、塩素系とフッ素系ガスの二種類があるが、本研究ではフッ素系を使用した。III V 族半導体材料では、塩素系ガスとメタン・水素ガスを用いる二種類のエッチング方法がある。以下、本研究で行った InP のエッチングについて解説する。

InP のエッチングでしばしば用いられるのが塩素系ガスである。塩素ガスは InP の構成元素であるインジウムと反応して InCl_4 を生成する。 InCl_4 は沸点が高いため、チャンバー内を高温にしてエッチングする必要があるが、活発な化学反応が生じるためエッチング速度は非常に速い。

塩素と同様によく用いられるのが、メタン・水素によるエッチングである。メタンガスはインジウムと反応して有機金属を生成する。有機金属は室温で揮発するためチャンバー内を高温にする必要はない。しかし、エッチング速度は塩素エッチングに比べて遅く、エッチングが進むにつれて側壁にメタンの重合した膜が形成され、エッチングの進行を阻害する。このため、メタン・水素によるエッチングと、酸素エッチングによる保護膜の除去とを交互に行う必要がある。この方法を用いると、エッチング時間は長くなるが、塩素エッチングに比べて選択性がよい。また、サイクルの間隔を短く設定すれば、滑らかな垂直なエッチング断面が実現できる。ただし、水素が基板内部に侵入すると不純物準位を形成するという問題点があるため、注意しなければならない⁵³。

本研究では塩素・アルゴンの混合ガスを使用してエッチングを行った。しかし近年では、塩素エッチング・メタン水素エッチングの両者の利点を組み合わせたエッチング手法が頻繁に用いられており、注目に値する。塩素・アルゴンにさらに水素を混合し、シリコン基板上でエッチングを行うことで SiO_2 の酸化膜を側壁に形成し、それを保護膜として垂直なエッチングを実現した例⁵⁴ や、メタン・水素・塩素をすべて混合することによって非常に滑らかなエッチングを実現した例⁵⁵ が報告されている。

Table 3.7 Typical etching gas for materials

Materials	Etching gas
レジスト, ポリマー	O_2 , O_2+CHF_3 , etc.
SiO_2	$\text{CF}_4/\text{CHF}_3+\text{Ar}$, etc.
InP	Cl_2+Ar , CH_4+H_2 , $\text{Cl}_2+\text{H}_2+\text{Ar}$, $\text{Cl}_2+\text{CH}_4+\text{H}_2$, etc.
Au	Ar, etc.

3.4. 基板接合および基板除去

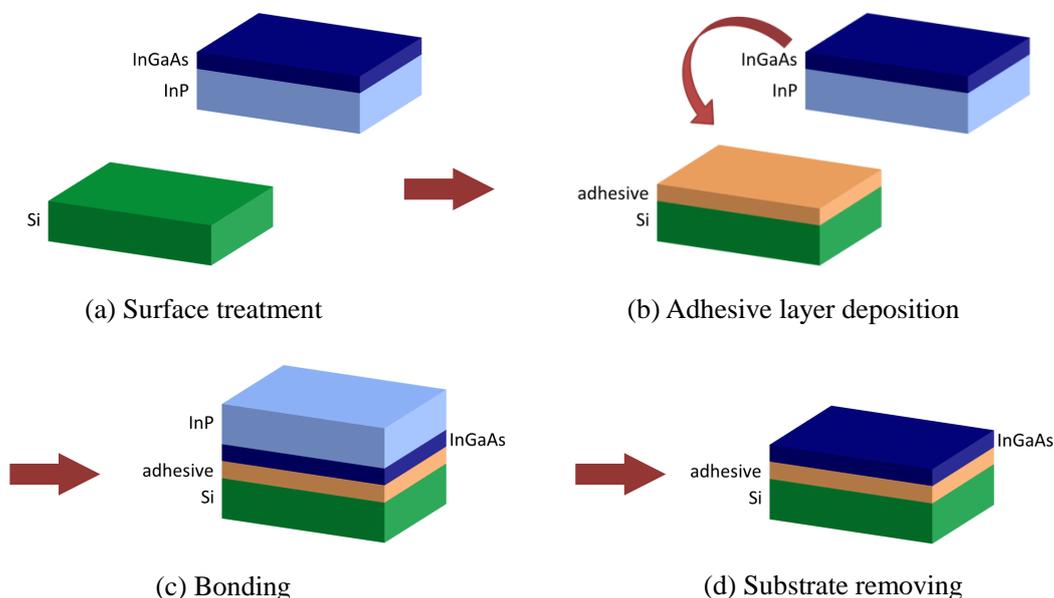


fig. 3.21 Process flow of wafer bonding and substrate removing.

近年、半導体基板同士を接合する技術が注目を集めている。3.1節で述べたような薄膜形成技術では、格子定数が基板と異なる材料を積層することは非常に難しい。しかし、基板接合と裏面除去をおこなえば、格子定数の全く異なる材料でも積層することができる。

fig. 3.21 に、一例として、Si 基板上に InGaAs 薄膜を形成するプロセス手順を示した。まず、基板に接着層として薄膜を形成しておく。次に、接着したい基板の両面を処理し、接合をおこなう。最後に、貼り付けた基板をウェットエッチング等によって除去を行うことで、薄膜を形成することができる。

本研究では、PL 測定用のデバイス作製においてこの技術を使用した。金属キャビティレーザのような基板方向に光を放出するデバイスにとって、基板除去は非常に重要なプロセス技術であるといえる。

半導体接合技術には非常に様々な種類があるため、本項では接着層を用いて接合・基板除去を行う方法を接着層の種類に分けて三つ紹介する。

(i) 酸化膜

基板の両面もしくは片面に酸化膜を形成して貼り合わせたのち、簡単な熱処理等を経て接合する。この方法は表面の化学的結合を利用したものである。酸化膜としてはアルミナや酸化シリコンが一般的である。アルミナを用いた接合では、シリコン基板上の III V 族半導体 MOSFET の作製と動作が報告されている¹⁹。

(ii) 金属

基板の両面に金属を成膜して貼り合わせたのち、加熱しながら圧力を掛けることで接合する。使用される金属として主要なのは金であるが、Si と Au の合金を形成して接着する方法⁵⁶や、融点の低いインジウムを用いた例も報告されている⁵⁷。接着層に導電性が必要な場合にはこの手法を用いることが多い。

(iii) ポリマー

基板の片面もしくは両面に粘着性のあるポリマーを塗布して貼り合わせたのち、熱処理によって溶媒を揮発させて接合する。前者二つと違って、基板の接着面が平坦でなくても接合が可能である。ポリアミド、エポキシ樹脂、熱可塑性樹脂、フォトレジストなど様々な材料が接着層として使用されてきたが、近年注目されているのがベンゾシクロブテン (BCB: Benzo-Cyclo-Butene) である。他の材料に比べ、接着力が強く、空孔のない良質な接合が得られると報告されている⁵⁸。BCB による接合では、シリコン基板上における III V 族半導体レーザの作製と動作が報告されている¹⁷。

光デバイスの作製では酸化膜とポリマーを用いた例が多い。金属を用いる場合は、基板除去に使用するエッチャントと反応性のないものを選択するとよい。反応性がある場合はエッチャントが接触しないようレジスト等で十分保護する必要がある。ポリマーを使用する場合、接合面が平坦である必要が無いため、あらかじめデバイスを作製しておいた基板の接合が可能である。その場合、基板除去を行ったとき作製した構造にどのような応力が加わるかを十分考慮しなければならない。

ウェットエッチングで基板除去を行う場合、エッチング時間が長時間となるとエッチャントが内部に侵入してデバイス構造を破壊することがある。この解決法として、あらかじめ接着後の基板を裏面から研磨してエッチングする基板の厚みを薄くすることでエッチング時間を短縮する方法がある。

3.5. 実装

プロセスを経て完成したデバイスは、他の半導体基板もしくはプリント基板と電氣的に接続して動作を行う。このプロセスを実装と呼ぶ。実装技術はVLSIの発展とともに大きく発展し、様々な技術が開発されてきたが、研究室レベルで使用されているのは主にワイヤボンディングとフリップチップボンディングの二種類である。本節では、ワイヤボンディングとフリップチップボンディングについて順に述べる。

3.5.1. ワイヤボンディング

ワイヤボンディングは、金属の細いワイヤを使って電極間をつないで導通をとる技術である。電極とワイヤを接続させる方式には熱圧着を使う方法、超音波を使う方法、その両方を使う方法があるが、本研究では超音波を使う方法を利用した。超音波を使う場合、超音波が周囲へあたるダメージに注意しなければならない。

ワイヤの接続の方式にはボールボンディングとウェッジボンディングの二種類があるが、本研究では金ワイヤを用いたボールボンディングを行った。ボールボンディング方式を用いたワイヤボンディングの手順と注意点を fig. 3.22 にそって解説する。

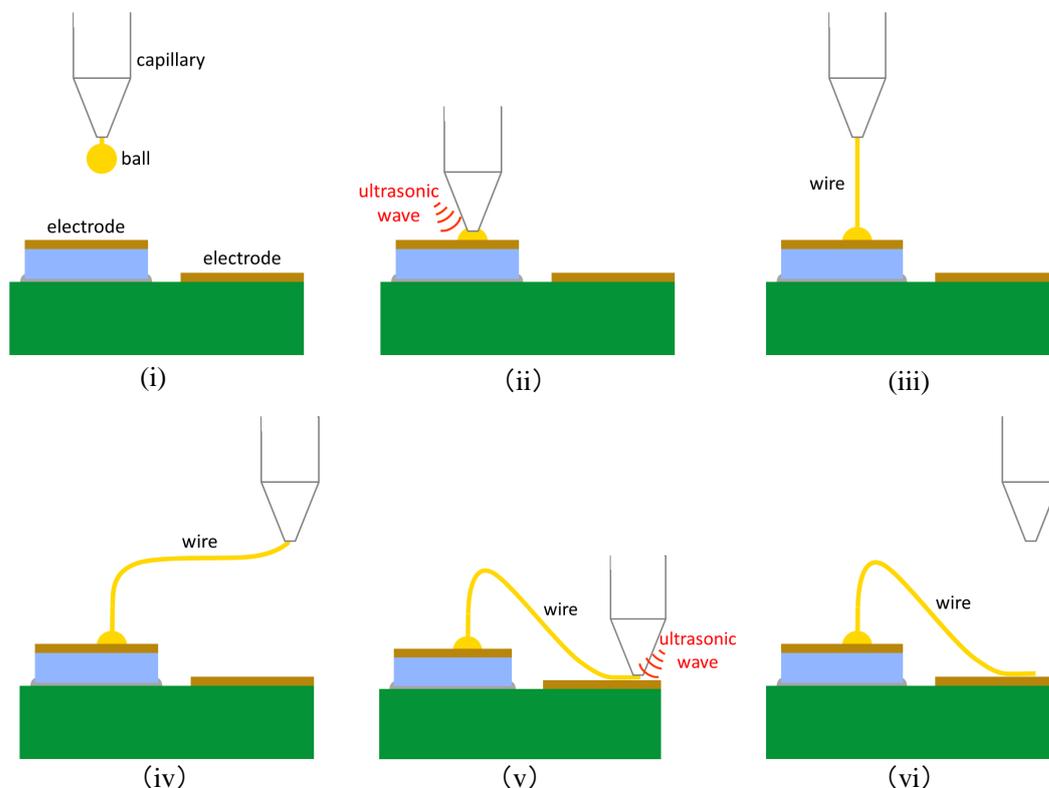


fig. 3.22 Procedure of ball-bonding.

- (i) 高電圧を印加してワイヤの先端にボール形状を作る．このとき，キャピラリが適切な高さに設置されていないとボールを作ることは出来ない．
- (ii) ボールを電極に押し付け，超音波でボールを溶解させて電極と接続する．このとき，基板表面が汚れていたり，成膜から時間が経っていたりするとボールが電極に付きにくくなる．また，この時にキャピラリが左右にずれるとボールが剥がれてしまうのでずれないように注意が必要である．
- (iii) ボールが電極に着いたら，キャピラリを左右にずれないようにゆっくりと上にあげる．
- (iv) キャピラリを十分上にあげたら，ワイヤがたるまないように二番目の接続を行いたい場所までキャピラリを水平移動する．
- (v) キャピラリが電極の上に来たら，キャピラリをゆっくり下ろして電極に軽く押し付ける．ワイヤが電極に付いたらキャピラリを上にとっとあげる．金ワイヤは癖をもっているため，ワイヤが長くなるほど力がかかって剥がれやすくなる．これを避けるためには，fig. 3.22 (vi) のように2番目の電極を這うようについたり，折り目をついたりするとよい．

接続するときに加える超音波のパワーと時間は，接続する電極に合わせて調節しなければならぬ．電極に加わるエネルギーはパワーと時間の積で決まるため，プリント基板上の電極のような厚く安定した電極には大きく，半導体基板上的電極のような，薄く剥がれやすい電極には小さく設定する必要がある．接着しても電極すぐに剥がれてしまうときはパワー不足，接着すると下の電極まで剥がれてしまう場合はパワー過多だと推測できる．歩留まりが悪い場合には，パワーを小さめに設定して時間を長くすると点くようになることが多かった．

3.5.2. フリップチップボンディング

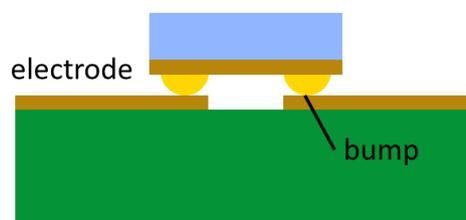


fig. 3.23 Flip-Chip bonding.

フリップチップボンディングは，fig. 3.23 に示すように，基板を反転させて，金属のパンプを通じて電氣的接続を取る手法である．本研究ではデバイス作製には使用しなかったが，

今後使用すべきプロセスとして紹介する。

フリップチップボンディングは VLSI の実装技術として発展してきたが、光デバイスの実装技術として近年注目を集めている。この技術を用いて、光デバイスと CMOS 基板を集積した例が多数報告されている²³。

フリップチップボンディングで接合した基板は、貼り合わせた基板同士の空間に耐薬品性のある非導電性のペーストを流し込むことで、3.4 節で示した基板除去を行うことができる。電流注入を行なうデバイスの作製プロセスに基板除去を導入するには、この方法を用いなければならないため、今後挑戦すべき技術であると私は考えている。

3.6. まとめ

本章では、本研究で使用した半導体プロセス技術の原理および注意点について述べてきた。まず、プロセス技術において最も重要となる、薄膜形成技術・リソグラフィ技術・エッチング技術について解説した。そののち、基板接合および裏面除去と、実装技術について解説した。

第4章 金属キャビティレーザの測定手法

本章では、本研究で確立した金属キャビティレーザの測定手法について述べる。まず、本研究でおこなった PL・EL 測定の基本的な事項について述べる。つぎに、本研究で構築した測定系の構成、および測定方法について述べる。つづいて、構築した測定系のさらなる改善および高機能化を試みたのでこれについて述べ、最後に簡単なまとめを述べる。

4.1. PL 測定と EL 測定

本研究では金属キャビティレーザの特性を評価するために、PL(photoluminescence)測定と EL(Electroluminescence)測定の二種類を試みた。

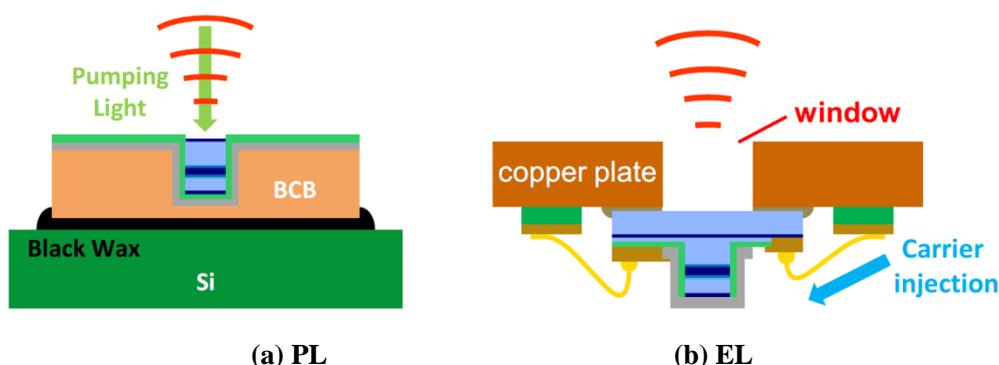


fig. 4.1 Measurement method for metallic-cavity lasers.

4.1.1. PL 測定

PL 測定は、活性層のバンドギャップよりも大きなエネルギーの光を外部から注入して反転分布を作り、励起されたキャリアが再結合するときに生じる発光を観測する方法である。PL 測定の概略図を fig. 4.1 (a)に示す。金属キャビティレーザはキャビティの表面が金属で覆われているため励起光の入射、および PL 光の集光ができるのは基板方向しかない。そのため、fig. 4.1 (a)のようにデバイスを反転させて Si 基板に貼り付け、上から励起光を入射することで測定を行った。

PL 測定の場合、キャビティの位置に正確に励起光を入射する必要がある。そこで、本研究では、作製プロセスに基板除去(3.4 節参照)を導入することで、励起光の位置合わせが容易におこなえるようにした。実際に行ったプロセスについては、5.2, 5.3 節でくわしく述べる。基板除去という手間は増えるが、キャビティに電氣的な接続が必要ないため、簡易な作製プロセスでデバイスを作製できる。

本研究では、まず PL 測定によって光学特性の評価を行った。この詳細は第 5 章で詳しく解説する。

4.1.2. EL 測定

EL 測定は電氣的にキャリアを注入して反転分布を作り，発光を観測する方法である．EL 測定の概略図を fig. 4.1 (b)に示す．PL 測定と同様，基板方向からしか発光を観測することが出来ないため，基板を反転させて穴の空いた銅板に貼り付けて発光観測を試みた．

EL 測定は，キャビティに電氣的な接続が行われていれば容易にキャリアを注入することができる．そのため，EL 用のデバイスでは基板除去は行わなかった．ただし，電流注入のための電氣的コンタクトを作製しなければならないため，作製プロセスはその分複雑となる．

本研究では，PL 測定に続いて EL 測定をおこなった．この詳細は第 6 章で詳しく解説する．

4.2. 測定系の構成

本研究では金属キャビティ構造の PL 測定および EL 測定をおこなうための測定系を構築した。本研究で使用した測定系の概観を fig. 4.2 に示す。

本研究で構築した測定系は機能という観点から、表面観察系、励起光制御系、スペクトル観測系、温度制御系、電流駆動系の五つに分割して考えることができる。これら五つの系について、順番に解説をおこなってゆく。ただし、それぞれの系は装置および光学系を共有しているため、互いの関係性に注意していただきたい。

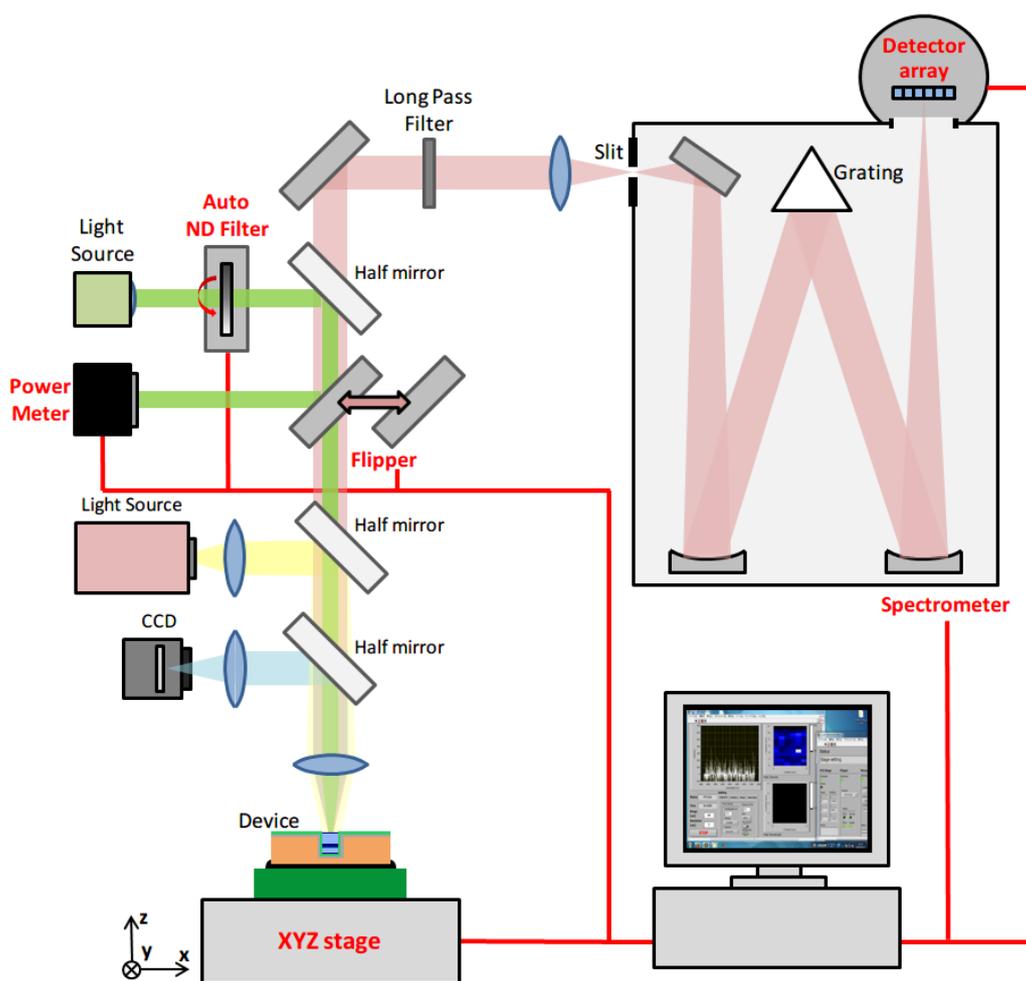


fig. 4.2 Overview of our measurement system.

4.2.1. 表面観察系

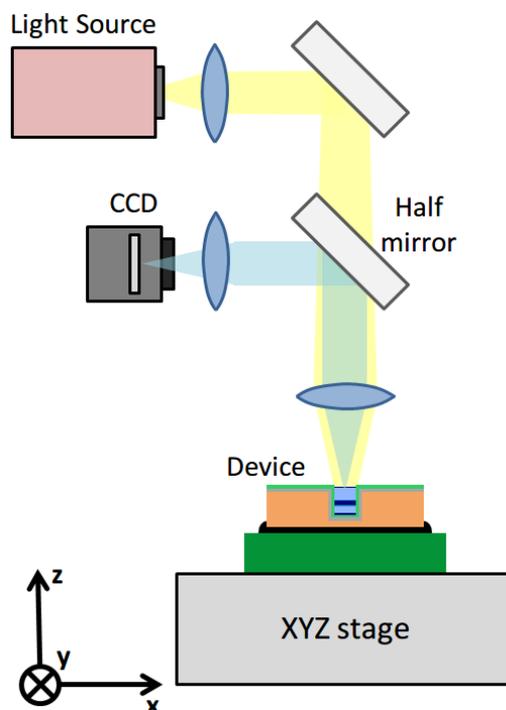


fig. 4.3 Surface observation system.

表面観察系は、PL、EL 測定を行う前に、サンプル上のどこにキャビティがあるか、およそその位置を把握するための光学系である。この系は、照明用ハロゲン光源、CCD カメラ、XYZ 移動ステージ、対物レンズ、および複数のレンズによって構成される。

系の概観を fig. 4.3 に示す。まず、照明用のハロゲン光源から出射した光はレンズを通ったのち、対物レンズによってサンプル上に照射される。次に、ステージを移動してサンプルを対物レンズの焦点距離にだけ離れた位置に移動させる。光源によって照らされたサンプル表面の像は、対物レンズによって平行光となり、CCD カメラの前に設置されたレンズに入射する。CCD チップはレンズから焦点距離だけ離れた位置に設置されているため、サンプル表面の像が CCD チップ上に結像する。これによって、サンプル表面の像を CCD カメラによって観察することができる。

ここで注意しなければならないのはチップ表面を照らす光源のスポットが小さくなり過ぎないようにすることである。光源とその前にあるレンズの距離が焦点距離に近いと、チップ表面上で小さなスポットになってしまい、基板上のパターンが見づらくなる。よって、照明用の光源はレンズからの距離が焦点距離から少しずれるように設定するとよい。

4.2.2. スペクトル観測系

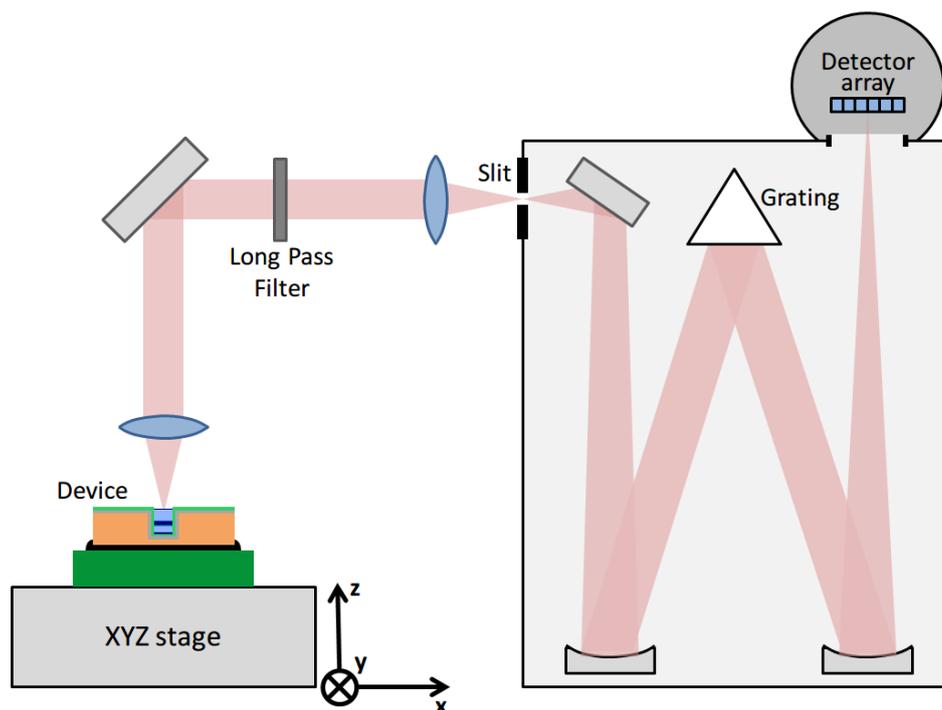


fig. 4.4 Spectrum analysis system.

キャビティから放射される PL 光および EL 光は，スペクトル観測系によって集光され観測される．この系は，分光器，ディテクターアレイ，XYZ ステージ，対物レンズ，およびレンズから構成される．

系の概観を fig. 4.4 に示す．キャビティから出射した PL・EL 光は，対物レンズによって平行光となる．平行光は二枚のミラーを経て分光器のスリットの前に設置されたレンズに入射する．平行光はレンズによってスリット上で焦点を結び，分光器に入射する．分光器に入射した光は，回折格子によって波長ごとに空間的に分散され，分光器に接続されたディテクターアレイ上に入射する．ディテクターアレイのどのピクセルが，どれだけ受光しているかを検出することによって，PL・EL 光のスペクトルを知ることができる．

このとき，発光しているキャビティが，対物レンズの直下かつ焦点距離だけ離れた位置になるようにステージを移動することで，効率よく出射光を集めることができる．表面観察系等を利用して位置合わせを行なう必要がある．

この光学系においてはスリットに入射する部分の調節が非常に重要となる．スリット前に設置されたレンズはあくまで補助的なものなので，まずレンズ無しでスリットに光が入り，スペクトルが観測できるように光軸を調節したのち，レンズを設置してよりよく光が入射するように調節すると良い．

4.2.3. 励起光制御系

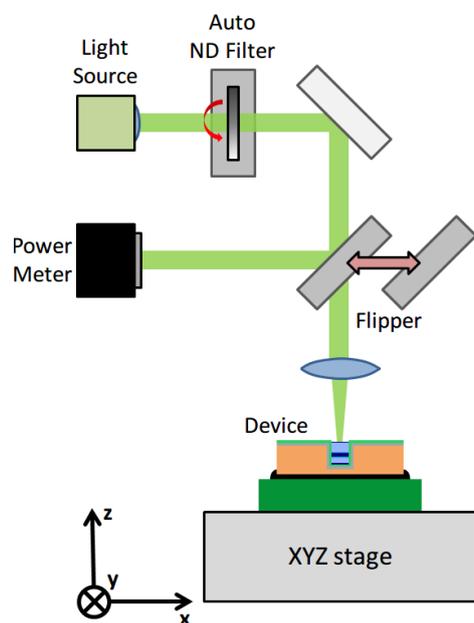


fig. 4.5 Pump power operation system.

PL 測定を行う場合、キャビティに入射する励起光を制御するのが励起光制御系である。この系は、励起用光源、ND フィルタ、可動式ミラー、パワーメータ、対物レンズ、XYZ ステージによって構成される。本研究では、532nm の励起光源を使用した。

系の概観を fig. 4.5 に示す。励起用の光源はコリメートされてビームとして出射される。ビームは ND フィルタを通ることによって所望のパワーに調節される。調節されたビームはハーフミラーを経て、空間を伝搬して対物レンズに入射し、キャビティに入射してキャリアを励起する。光路の途中には可動式のミラーが設置されており、ミラーを開けるとキャビティに励起光が入射、ミラーを閉じるとパワーメータに励起光が入射して励起光のパワーをチェックすることができる。この機能を使うことで、長時間キャビティが励起光にさらされて破損するのを防ぐことができる。

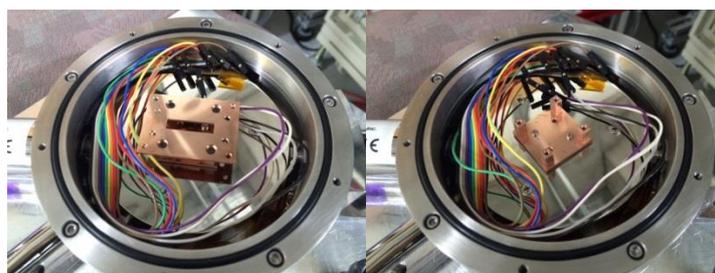
この系で注意すべき点は、スペクトル観測系と光路を一致させなければならないことである。励起光が入射したスポットから PL 光は放出されるため、励起光がサンプル表面で収束する点と、スペクトル観測系によって集光する点が、一致するように光学系を調節しなければならない。スペクトル観測系と光路が一致するために生じる問題点は二つある。まず、fig. 4.5 に示すように励起光を入力するためのハーフミラーを設置しているため、PL・EL 光が減衰してしまう点である。もう一つは、サンプル表面で反射した励起光がスペクトル観測系によって集光されて分光器に入射してしまう点である。この反射光が、正確なスペクトルの観測を阻害する可能性がある。励起光に用いる光源は PL・EL 光よりも短波であるから、反射光をカットするロングパスフィルタを分光器の前に設置しておくといよい。

4.2.4. 温度制御系

PL・EL 測定では，キャリアを励起する過程で熱が発生する．本測定系では，温度制御系を用いてサンプルの温度を安定させながら測定を行った．

0°C～室温での測定には，ベルチェ素子を利用して温度調節を行った．ベルチェ素子はXYZ ステージ上に設置されており，その上にサンプルを設置した．このとき，熱伝導性がよいように，サンプルは銅板上に導電性ペーストを用いて貼り付けた．

273K 以下，77K 以上の低温測定には，低温測定用の系を用いた．低温測定の手順を以下に記す．まず，サンプルをクライオスタット内に設置する．このとき，基板を反転して設置できるように fig. 4.6 (b)に示すような専用の治具を用意した．サンプルを設置したクライオスタットは，ターボ分子ポンプによって内部を真空引きする．真空度が 10^{-3} Pa オーダーになったら，液体窒素を内部に流すことによって 77K まで温度を下げる．クライオスタット内に設置されたヒータを動作させることで77K 以上にも温度調節を行なうことができる．



(a) With copper plate

(b) Without copper plate

fig. 4.6 The inside of the cryostat.

4.2.5. 電流駆動系

EL 測定を行なう場合，電流駆動系を用いてデバイスに電流注入をおこなった．本研究では半導体パラメータアナライザを用いて IV 特性の測定および電流駆動をおこなった．実装されたデバイスには圧着端子を通じて，実装していないデバイスにはプローブを用いて電流注入をおこなった．いまだ系と呼べるほどのシステムが確立されていないため，今後発展が必要な部分である．

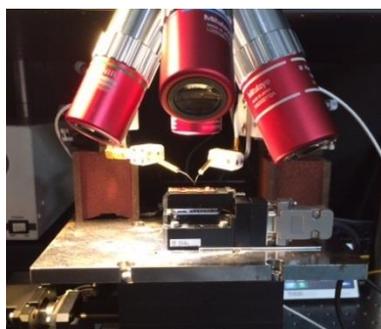


fig. 4.7 Electrical injection with probes.

4.3. 測定方法

本節では、前節で述べた測定系をもちいた測定の手順を述べてゆく。ただし、金属キャビティレーザは非常に小さいため、測定を行う前にまずキャビティの位置を把握しなければならないことに注意していただきたい。PL・EL 測定の方法はほとんど同じであるが、異なる点に関しては適宜述べてゆく。

4.3.1. 表面観察系による位置の確認

まず、表面観察系を用いてキャビティの位置を確認する。基板を除去していない場合には4.4節で述べるシステムを用いて位置を確認することができる。このとき、弱く励起光を入射することで対物レンズによって集光する位置を把握することができる。

4.3.2. 二次元スキャンニング

おおよその位置がつかめたら、二次元スキャンニングを行なう。PL の場合は励起光を弱く入射しながら、EL 測定の場合は弱い電流を注入しながら、XY ステージを移動させて各点での発光スペクトルを観測して、XY 座標・波長の三次元データを取得する。これによって得られた三次元データを解析することで、どの座標にキャビティがあるかを探ることができる。本研究では、XY ステージ、分光器、ディテクターアレイを同時に制御することで二次元スキャンニングを自動的に実行するプログラムを LabVIEW⁵⁹ によって開発した。また、取得した三次元データの視覚的な解析を行なうことのできるプログラムも開発した。

実際に二次元スキャンニングをおこなって取得したデータを fig. 4.8 に示す。これは、励起光を入射しながら XY ステージを移動させて取得した三次元データから、波長 1550nm について抜き出した二次元マッピングである。この図の赤くなっている部分が発光している部分であり、これによってキャビティの座標を正確に把握することができる。

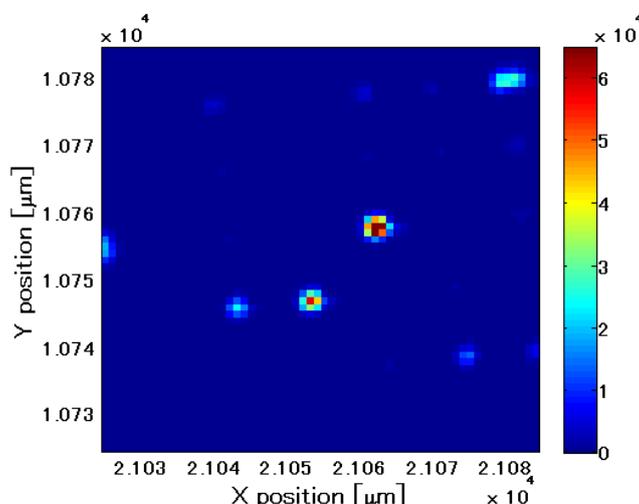


fig. 4.8 2D map of PL intensity at 1550nm.

4.3.3. Z 軸方向の一次元スキャンニング

キャビティの XY 座標を把握したら、Z 座標について一次的にスキャンニングを行うことで水平方向の位置合わせを行なう。実行方法は二次元スキャンニングと同様である。このスキャンニングについても、自動実行、データ解析を行なうプログラムを LabVIEW によって開発した。スキャンニングによって最も発光が強くなる位置に座標を移動することで、効率のよい測定を行うことができる。

4.3.4. L-L・I-L 特性の取得

キャビティの XYZ 座標を把握したら、キャビティの特性を注入するパワーを変化させてキャビティの発光がどのように変化するかを観測する。PL の場合は励起光を、EL の場合は注入電流量を変化させてスペクトルの変化を確認する。PL 測定に関しては、ND フィルタ、分光器、ディテクターアレイを制御して自動的に励起光強度を変化させてスペクトルを取得するプログラムを LabVIEW によって開発した。

4.4. 基板除去を行わない場合の測定手法

本研究では、PL 測定用のデバイスについては基板除去を行ったが、EL 測定用のデバイスでは行わなかった。基板除去を行わない場合、表面観察系では基板の裏面が見えるだけでキャビティの位置を把握することは出来ない。本節では、基板除去を行わずにキャビティの位置を把握する手法を開発したため、これを報告する。

4.4.1. 赤外光を利用した電極パターン観測システム

まず、赤外光を用いて反転したサンプルの電極パターンを観測するシステムを開発したため、これを報告する。金属キャビティレーザの作製に使用した InP 基板は、 $0.92\mu\text{m}$ 以上の赤外領域では透明である。そこで、デバイスの方から $0.92\mu\text{m}$ 以上の赤外光を入射することで、デバイス上に作製した電極パターンの影を観測することに成功した。

このシステムの概観を fig. 4.9 に示す。まず、一般的なハロゲンランプから光を出射する。ハロゲンランプは十分赤外成分をもっているため特別な光源を利用する必要はない。ただし、そのままでは可視光成分が強くて正確な観測ができないため、フィルタを用いて可視光をカットする必要がある。フィルタを通して可視光をカットした光は、プリズムミラーを介して基板下部に照射される。これによって生じた電極パターンの影を、表面観察系によって観察することができる。CCD カメラは一般に近赤外領域まで感度をもっているため、 $1\mu\text{m}$ 程度の光であれば検出することができる。ただし、製品によっては赤外成分をカットするフィルタが内蔵されている場合があるため、そのときはフィルタを除去する必要がある。

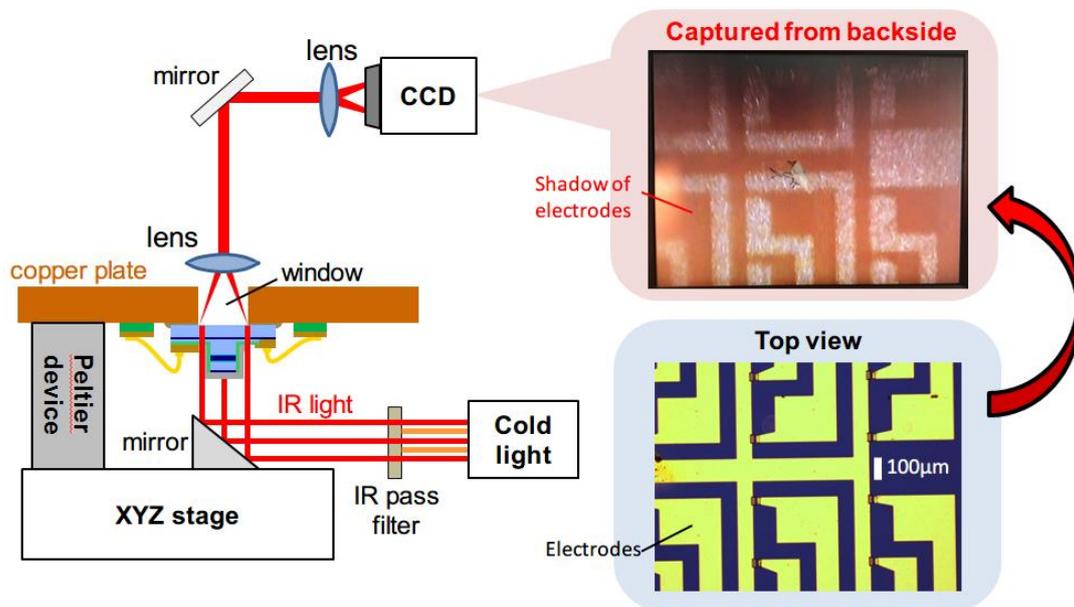


fig. 4.9 IR viewing system.

4.4.2. 基板除去を行わない PL 測定

本研究では、基板除去を行ったデバイスで PL 測定を行ったが基板を除去していない状態での PL 測定も試みたため、その測定結果について報告する。

本研究では、532nm の励起光を PL 測定に用いてきたが、InP は可視領域では吸収が大きく不透明であるため、532nm の励起光を基板に入射してもキャビティに到達することはない。しかし、先程述べたとおり 0.92µm 以上の赤外領域では透明であるため、0.92µm 以上の光を励起光源として利用すれば、基板があっても励起光をキャビティに入射することができる。本研究では、1050nm の SLD(Super-luminescent diode)を励起光源として用いることで、基板除去を行わないで裏面にある利得媒質からの発光を観測することに成功した。しかし、数 µm 以下の微細なキャビティの発光を捕捉することは出来なかった。

基板がある状態で行った二次元スキニングの結果を fig. 4.10 に示す。これは、50µm×50µm のメサ構造があるパターンについておこなったスキニングの結果である。この図を見ると分かるように、正確な形状は把握することができていない。これは、基板裏面に凹凸があるためここで入射光が散乱されているためではないかと考えている。

また、この方法を用いて基板の電極パターンを把握することも可能である。電極パターンが有る部分では、入射した光の反射光が強くなる。そのため、反射光強度の分布を調べることによって電極パターンを把握することができる。実際に行った反射光強度の二次元スキニングの結果を fig. 4.11fig. 4.11 2D scanning result to obtain the electrode pattern.に示す。実際のパターンとよく一致していることが確認できるが、こちらでも裏面の凹凸によ

って形状が正確に得られていないことが分かる。

基板除去を行わないで PL 測定を行うには、基板の裏面を研磨して凹凸をなくす必要があると考えられる。

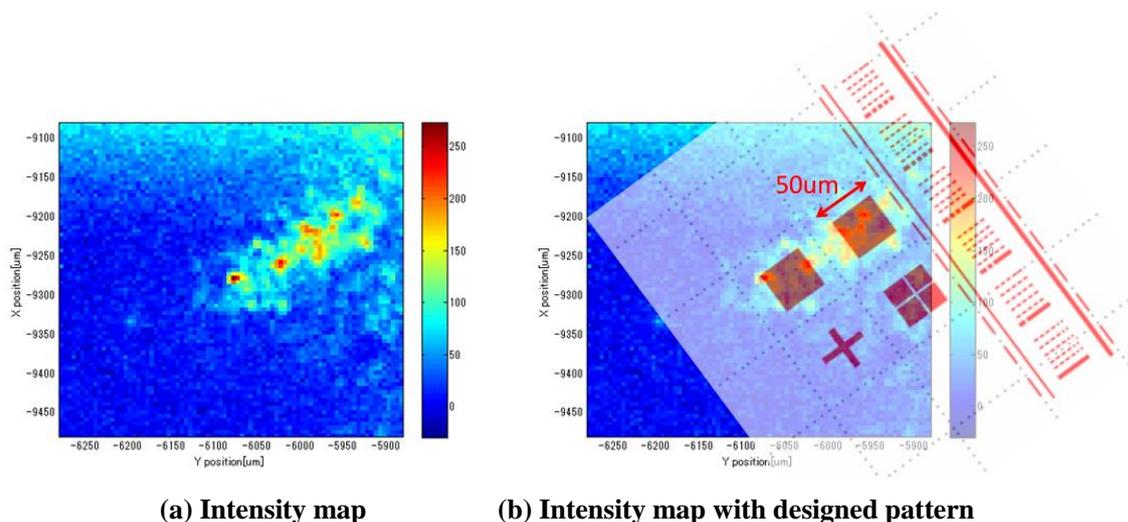


fig. 4.10 2D scanning result without substrate removing.

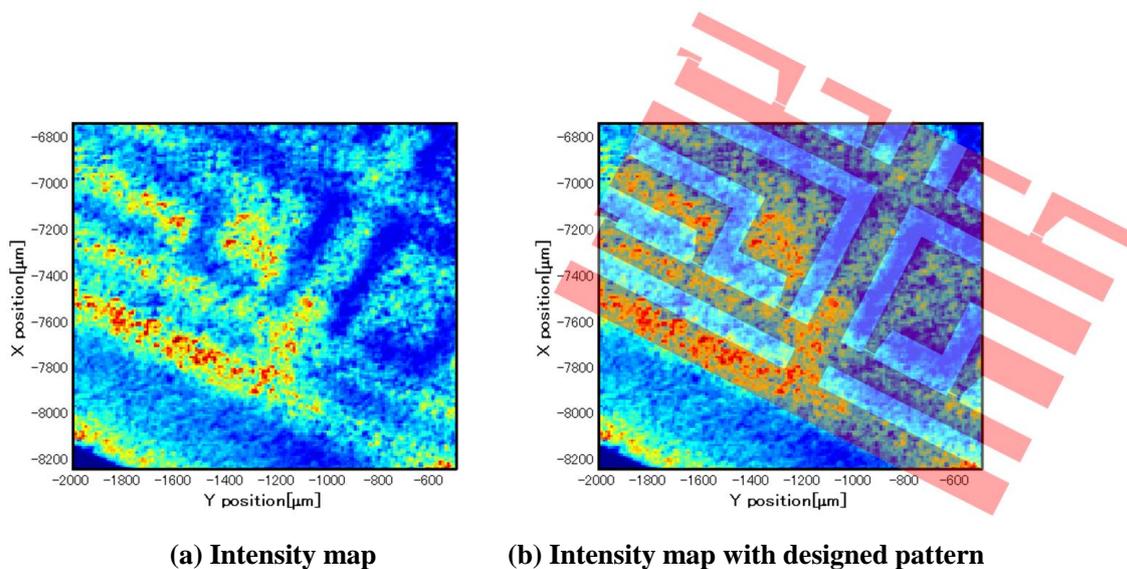


fig. 4.11 2D scanning result to obtain the electrode pattern.

4.5. まとめ

この章では、本研究で確立した金属キャビティレーザの測定手法について解説してきた。PL 測定および EL 測定を行うためのシステムの構築について述べ、その上でシステムを用いた測定法について解説した。最後に、基板除去を行わない場合の測定法について述べた。基板除去を行わない測定法については未だ改善の余地があり、さらなる発展が望まれる。

第5章 PL 用デバイスの作製と測定

本研究では、まず PL 測定を目的としたデバイスの作製を行って、金属キャビティ構造の光学的特性の評価をおこなった。本章ではまず、5.1 節で PL 測定用に設計したデバイスの構造について述べる。次に、5.2 節でデバイスの作製について、5.3 節で基板除去プロセスについて述べ、5.4 節で作製の結果をしめす。そのうえで 5.5 節においてデバイスの評価をおこない、最後に 5.6 節で簡単なまとめを述べる。

5.1. デバイス構造

本研究では、PL 測定を前提としたデバイスの、その作製プロセスと測定に適した立体構造、および平面構造の設計を行った。使用したエピウェハの層構造は Table 2.1 に示したとおりである。本節ではデバイスの立体構造、および平面構造について述べる。

5.1.1. 立体構造

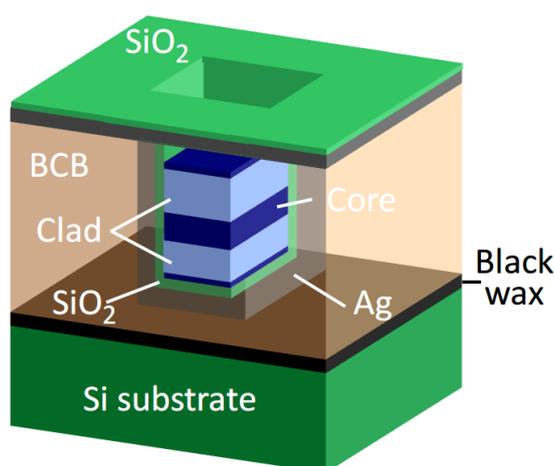


fig. 5.1 Structure of metallic-cavity lasers for PL measurement.

本研究で作製した PL 測定用のデバイス構造を fig. 5.1 に示す。これは 4.1.1 項で述べたとおり、反転させることで PL 測定における励起光の注入と PL 光の観測を容易にするためである。レーザの心臓部である半導体部分は、直方体で独立しており、上から見るとキャビティの部分が窪んでいる。このような構造になった理由は二つある。一つは、測定するとき、キャビティの部分がくぼんでいるため、上から見てどこにあるか見つけやすいためである。もう一つは、基板除去プロセスが容易になるためである。詳しくは、5.3 節で述べる。

5.1.2. 平面構造

PL 測定を行うとき、測定したキャビティの構造（長さ・幅）が正確に把握できなければ

ならない．異なる構造のキャビティが近接していると，得られた PL 光がどのキャビティの特性を示しているのか判別が難しくなる．そのため，本研究では，fig. 5.2 に示すような平面構造を，CAD を用いて設計した．

この構造では，5×5 個のキャビティのマトリクスを 1 セクションとして，セクションが 10×10 個並んだ構造をもっている．一つのセクションに含まれるキャビティはすべて同じ構造をもっていて，セクションが何列目，何行目にあるかによって決められている．この構造によって，キャビティの場所の特定が容易になる．

また，行ごとに数字，列ごとにアルファベットのメサ構造を作製して場所をわかりやすくしている．同時に，セクションの間に長方形のメサ構造を作製することで行・列を間違えずたどれるようにした．本研究で用いた構造では，Table 5.1 に示したように，行・列に対応して長さ・幅がそれぞれ変化するように設定してある．

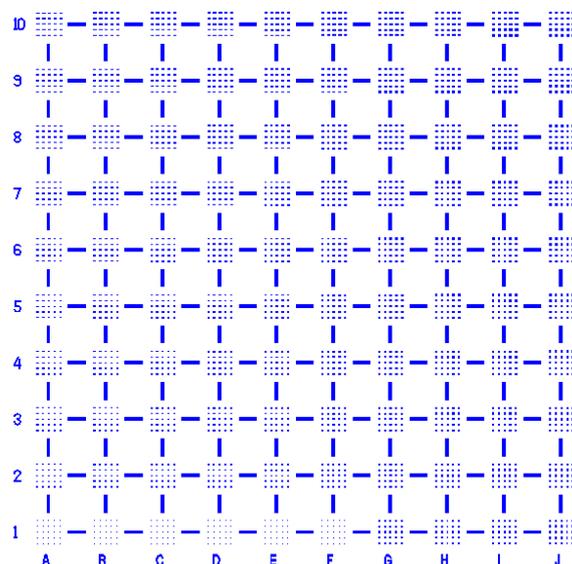


fig. 5.2 Geometry of PL devices.

Table 5.1 Length and width of cavities in each section.

Length	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
[μm]	1.6	1.8	2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	4.0
Width	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
[μm]	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4

5.2. デバイスの作製

本節では，PL 用デバイスの作製プロセスについて，具体的におこなったこと，注意すべきことについて解説を行なう．fig. 5.3, fig. 5.4 に作製プロセスフローを示した．この図に示した順番で解説をおこなってゆく．

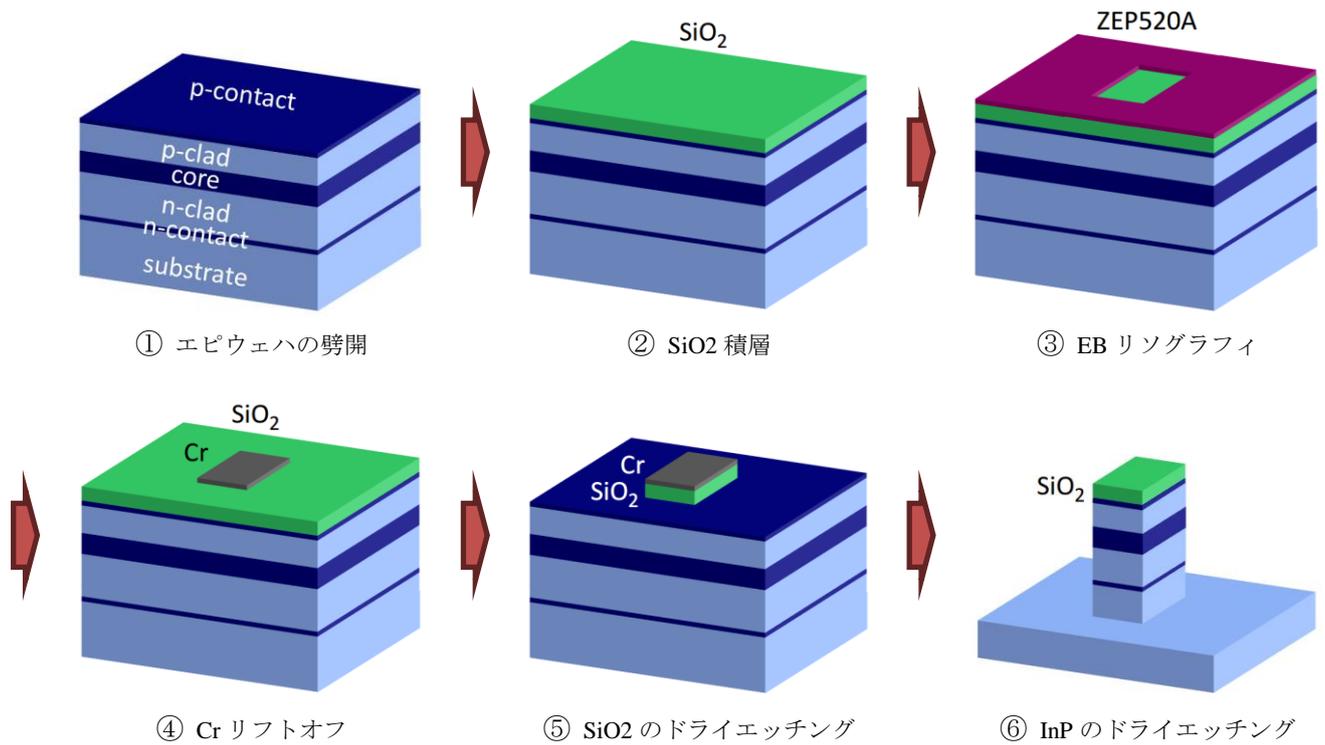


fig. 5.3 Process flow of mesa fabrication for PL devices.

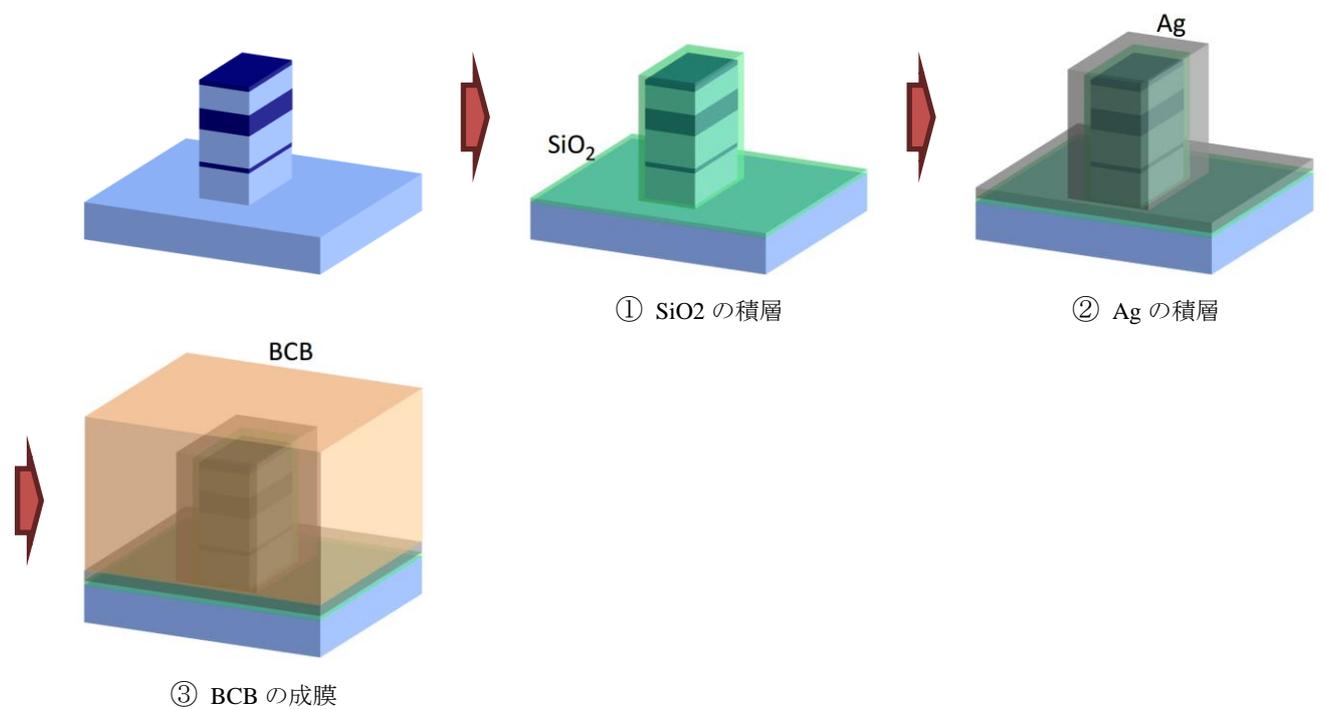


fig. 5.4 Process flow of coating process for PL devices.

5.2.1. メサ構造の形成

① エピウェハの劈開

まず、エピウェハの劈開をおこなった。基板表面にメスで軽い力を加えて数ミリほどの傷をつけ、反転させて裏からピンセットで押すことによって、2インチウェハを1/6チップに劈開した。本プロセスでは劈開方向に特別注意する必要はない。

② SiO₂積層

劈開したチップ上に、スパッタ装置によってSiO₂を積層した。このSiO₂は、InPをドライエッチングするときマスクとしてはたらく。そのため、ドライエッチングにおけるInPとSiO₂の選択比を考慮した上で厚さを決定しなければならない。本プロセスで使用した条件および結果をTable 5.2に記す。ドライエッチング後に除去されるため、膜質に気を使う必要はあまりない。ただし、プラズマにさらされる時間を短縮するためには、PECVD装置を用いた方がよいと私は考える。

Table 5.2 Condition and result of sputtering.

Parameter	Source	Gas	Pressure	Time	Thickness
Condition	200W	Ar: 12sccm	0.5Pa	40min	388nm

③ EBリソグラフィ

つづいて、EBリソグラフィによってパターンニングをおこなった。まず、ZEP520Aを4000rpm×60sでスピコートによって成膜したのち、180℃で3分加熱して溶媒を揮発させた。このチップに、EB描画装置をもちいてEBリソグラフィをおこなった。このときの描画条件をTable 5.3に示す。描画されたサンプルはZED-N50に二分間浸けることで現像をおこなった。このプロセスで注意すべき点を以下に三つ述べる。

Table 5.3 Condition of EB lithography.

(a) Cavity patterns					
Parameter	Voltage	Probe current	Field size	Dose time	Scan mode
Condition	50kV	50pA	100 μ m/20000dot	2.0 μ s	ANALOG
(b) Dummy patterns					
Parameter	Voltage	Probe current	Field size	Dose time	Scan mode
Condition	50kV	400pA	500 μ m/60000dot	0.2 μ s	ANALOG

一つめは、描画するパターンについてである。描画するパターンは、5.1.2 で作製したパターン、およびラインパターン、 $100\ \mu\text{m}$ 各以上の正方形パターンである。ラインパターンは、プロセスの途中でパターンに垂直に劈開することで、断面形状を SEM で確認し、プロセスがうまく行っているか確認するためのものである。そのため、直線パターンはできるだけ多く、手でへき開できるようにある程度の長さ (2~5mm) であることが望ましい。幅の異なるラインパターンを用意しておけば、本プロセスの幅に対する依存性を確認することもできる。また、へき開しやすいようにチップの端にあるとなおよい。正方形のパターンは、PL 測定を行う際にリファレンスとして必要となるものである。小さなキャビティの測定を行う前に、このキャビティで PL 光を観測することによって、測定条件を確認することができる。上記三つのパターンを組み合わせ、実際の描画パターンを決定した。

二つめが、描画条件についてである。パターンの面積が大きいと、描画時間が長くなってしまう。そのため、本プロセスでは精度の要求されるキャビティ構造部分はフィールドサイズを $200\ \mu\text{m}$ で電流を 50pA で、制度の要求されないアラインメントマーク、ラインパターン等にはフィールドサイズを $500\ \mu\text{m}$ で電流を 400pA に設定した。(3.2.2 参照)これによって、描画時間の短縮を実現することが出来た。ただし、電流量を変えるとビームの座標がずれることがあるため注意しなければならない。また、本研究では 1/6 カットのチップで描画をおこなったが、より小さなチップに分割して描画してもよい。

描画条件においもうひとつ重要なのが、電子ビームの加速電圧である。本研究では 50kV の加速電圧を用いたが、これは解像度を上げるためである。前方散乱の大きい電圧が低い方がアンダーカットの形成によってリフトオフが容易になる(fig. 5.5)が、今回は解像度を優先して 50kV を使用した。このように、解像度とリフトオフの容易さの間にはトレードオフがあるためよく検討する必要がある。

三つめが現像についてである。現像時間は短すぎなければ基本的に問題は無いが、長すぎるとレジストの断面形状が劣化する可能性があるため注意が必要である。また、冷却して現像すると精度が上がるという研究例も報告されている⁶⁰。

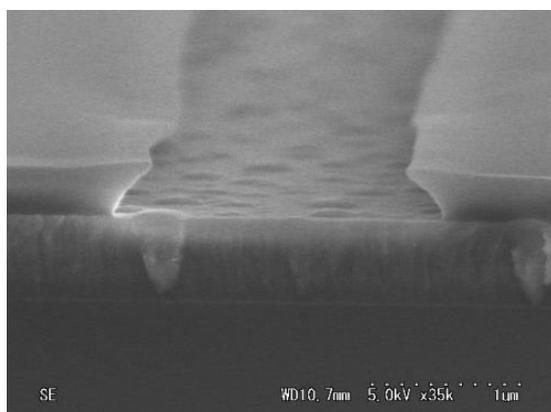


fig. 5.5 Resist pattern by EB lithography applying 10kV.

④ Cr リフトオフ

EB レジストによってパターンニングされたチップ上に, EB 蒸着装置によって Cr を約 20nm 積層した. その後, 70°C に温められた ZDMAC に数分間浸すことでリフトオフをおこない, Cr パターンを形成した. このプロセスにおける注意点を以下に三つ述べる.

一つめは, Cr の厚さについてである. このプロセスで形成される Cr パターンは SiO₂ をドライエッチングするときのマスクとなる. ⑤におけるドライエッチングでは, Cr と SiO₂ の選択比が非常に良いので, うすい Cr パターンでも数百 nm の SiO₂ を削ることができる. よって, 本プロセスでは 20nm の Cr を積層することとした.

二つめは, リフトオフの難しさについてである. ③で述べたとおり, ZEP-520A は高い精度で描画をおこなうとアンダーカットが小さくなり, リフトオフが難しくなる. 本研究ではバイレイヤーリフトオフ法(3.2.3 参照)を用いてこの解決に取り組んだが, キャビティ構造のような 1 μm 以下のパターンでは, 開口部から犠牲層へエッチャントが侵入しないという問題が生じたため断念した. 先ほど述べたとおり, Cr と SiO₂ の選択比が非常に良いため, Cr パターンの厚みは小さくすることができる. よって本プロセスでは, バイレイヤー法を用いず, Cr を薄くすることによってリフトオフを容易にした. また, 薄いほうが Cr パターン形状も綺麗になることがわかった.

三つめは, Cr のパーティクルの問題である. リフトオフを行なうとき, リフトオフされた Cr のパーティクルが基板表面に付着して残ってしまうことがある. パーティクルは, SiO₂ のドライエッチングのときにマスクとしてはたらいいて, fig. 5.6 に示すような孤立パターンを形成する. 以上の理由から, パーティクルが表面に残らないように表面をきれいに洗浄することが重要である.

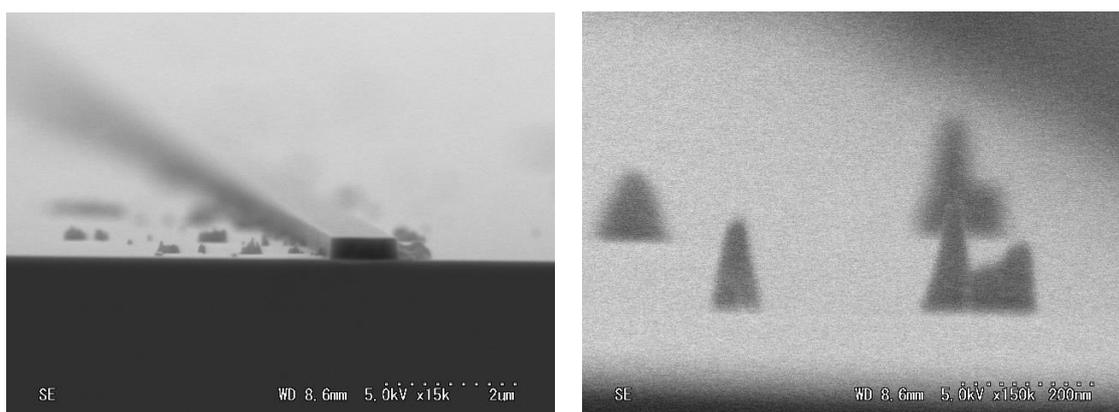


fig. 5.6 Islands of SiO₂ caused by Cr particles.

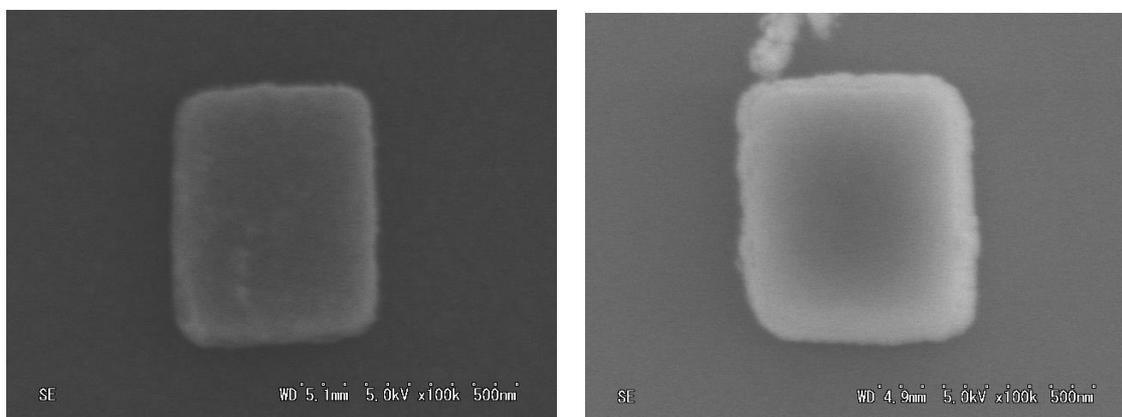
⑤ SiO₂ のドライエッチング

つぎに, Cr をマスクとして, CHF₃ と Ar の混合ガスによる SiO₂ のドライエッチングをおこなった. このときの条件を Table 5.4 に記す. ただし, Condition 7 が本番エッチング前の

バッファ, Condition 8 が本番エッチングを表しており, Condition 7, 8 を連続して実行した。ここで注意すべき点を以下に二つ述べる。

一つめはダミーランについてである。ドライエッチングにおいては, サンプルを導入してエッチングを行う前に, サンプルを導入しないでおなじレシピを実行するダミーランと呼ばれるプロセスがある。これは, チャンバー内の状態を安定させるためのものであり, ドライエッチング全般で行われる。

二つめは, エッチングによるパターンの肥大化である。エッチング条件によって, エッチング断面は垂直になるときとなだらかになる場合がある。なだらかな場合, 設計値よりもやや大きいメサ形状ができるため, より正確な寸法で作製したい場合にはこれを考慮した上で大きさを決めなければならない。



(a) Cr pattern

(b) SiO₂ pattern

fig. 5.7 Cr and SiO₂ pattern for mesa.

Table 5.4 Recipe of SiO₂ dry etching.

Condition 7						
Parameter	Source power	Bias power	Gas pressure	Ar flow rate	CHF ₃ flow rate	Time
condition	100W	25W	5Pa	5sccm	5sccm	5sec
Condition 8						
Parameter	Source power	Bias power	Gas pressure	Ar flow rate	CHF ₃ flow rate	Time
condition	100W	25W	1Pa	5sccm	5sccm	20min

⑥ InP のドライエッチング

作製した SiO₂ パターンをマスクとして, InP, InGaAsP, InGaAs の Cl₂・Ar の混合ガスに

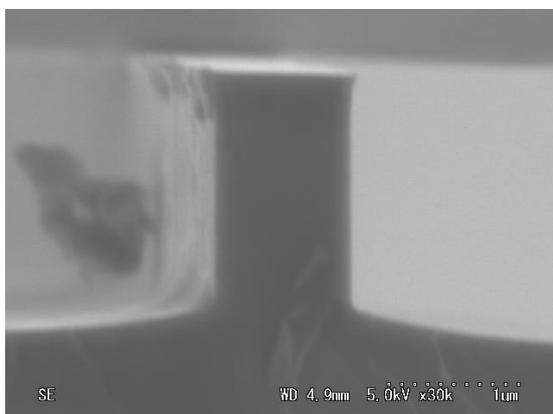
よるドライエッチングをおこなった。このとき、エッチングの深さが $2\mu\text{m}$ 以上となり、Nコンタクト層よりも下までエッチングされるようにした。エッチング後には、BHFに10分以上つけることで SiO_2 マスクを除去した。このときの実行したレシピの条件をTable 5.5に示す。ただし、Condition 1が本番エッチング前のバッファ、Condition 2が本番エッチングを表しており、Condition 1, 2を連続して実行した。また、このレシピを実行する前に十分ダミーランを行なう必要がある。

この条件によって得られたエッチング結果の断面図をfig. 5.8に示す。(a)がInP基板、(b)がMQWを含むエピ基板における結果である。この図より、InP基板では垂直なエッチングが実現されているのに対し、エピ基板では傾いた断面形状になっていることが分かる。

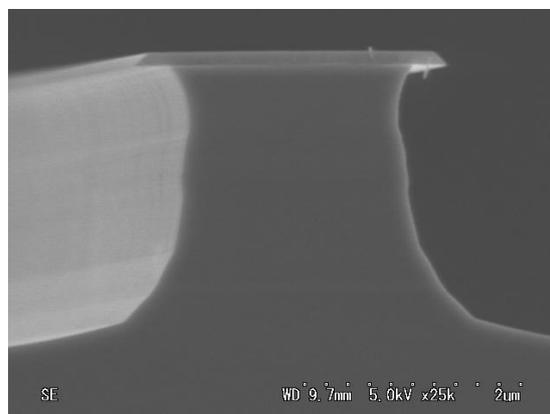
MQWウェハのエッチングが行われる際にどのような現象が起こっているのか、私は以下のように考えている。本研究で用いたウェハの場合、まずInPのエッチングが垂直に進行する。しかし、エッチング下端がInGaAsやInGaAsPになると、エッチング速度が遅くなる。その間に、InPの側壁への化学的エッチングが進行するため、InPの層に非等方的な断面が形成される。この問題の解決には、両者のエッチング速度が一致するように条件を調節しなければならない。

Table 5.5 Recipe of InP dry etching.

Condition 1						
Parameter	Source power	Bias power	Gas pressure	Ar flow rate	Cl ₂ flow rate	Time
condition	140W	110W	4Pa	8sccm	2sccm	3sec
Condition 2						
Parameter	Source power	Bias power	Gas pressure	Ar flow rate	Cl ₂ flow rate	Time
condition	140W	110W	1Pa	8sccm	2sccm	5min



(a) InP substrate



(b) Substrate with MQW

fig. 5.8 Etching profile.

5.2.2. 絶縁膜・金属薄膜の形成及び平坦化

① SiO₂の積層

形成したキャビティ構造の表面に、スパッタ法によって絶縁膜を形成した。積層の条件を Table 5.6 に示す。この絶縁膜は、基板除去プロセスにおいてエッチングを停止させる層である。あまりに薄い場合、エッチャントが侵入してキャビティ構造を破壊する可能性があるため、本プロセスでは 100nm 程度の絶縁膜を形成した。

Table 5.6 Condition and result of sputtering.

Parameter	Source	Gas	Pressure	Time	Thickness
Condition	200W	Ar: 12sccm	0.5Pa	10min	~ 100nm

② Ag の積層

キャビティ構造を作るために、EB 蒸着装置を用いて銀の積層をおこなった。このとき、キャビティの側壁まで銀が積層されるように、基板を±45° 傾けて 500nm ずつ銀を積層した。銀の積層後、同じ要領で金の薄膜を積層した。これは、銀の酸化などを防ぐ保護膜の役割を果たす。特に銀はフッ素と反応してフッ化銀を形成するため、フッ素系のガスを使用する場合には必ず保護膜を積層する必要がある。このプロセスにおいて注意すべき点を二つ挙げる。

一つめは、銀の密着性が非常に悪い点である。貴金属は密着性が悪いため、アニールなどをおこなって密着性を向上する必要がある(3.1.2 参照)。銀の薄膜を積層した後にチップをへき開すると、へき開した面から銀が剥がれやすくなる。そのため、蒸着をおこなう前にあらかじめ細かくへき開しておくとうい。

二つめは、銀と金の保護膜が重なった状態でアニールを行うと、熱膨張係数のちがいによってふくらみが生じることである。この膨らみがキャビティ構造へ影響がある場合には、銀を積層してから一度アニールし、その上で金を積層すると良い。

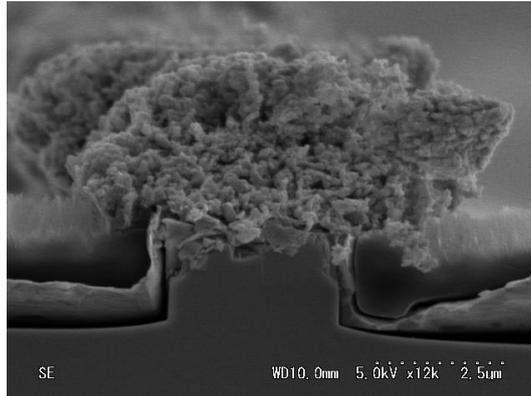


fig. 5.9 Silver reacted with CHF₃.

③ BCB の成膜

裏面除去をおこなうときに接着面を平坦にするため、BCBによるコーティングをおこなった。BCBには、CYCLOTENE 3022-46を用いた。3000rpm×60sでスピコートによる塗布をおこなったのち、まず120℃で二分間ソフトベークをおこなう。そののち、アニール炉を用いて250℃一時間の焼成をおこなう。ここで注意すべき点を二つ述べる。

一つめは、チップの裏面にBCBが付着しないようにすることである。BCBが付着していると、アニールの際にステージに付着して剥がれなくなる。このため、アニール前に裏面を確認し、BCBが付いているようであればアセトンを浸した綿棒で除去をおこなう。

二つめは、アニールによる金属への影響である。詳しくは確認していないが、長時間の加熱によって金属膜へ影響が出る可能性があるので注意が必要である。

5.3. 基板除去プロセス

作製したデバイスは，シリコン基板に貼り付けられ，ウェットエッチングによって基板を除去した．この手順についてまず述べる．その上で，なぜこの方法を用いることにしたか解説を行なう．

5.3.1. 裏面除去の手順

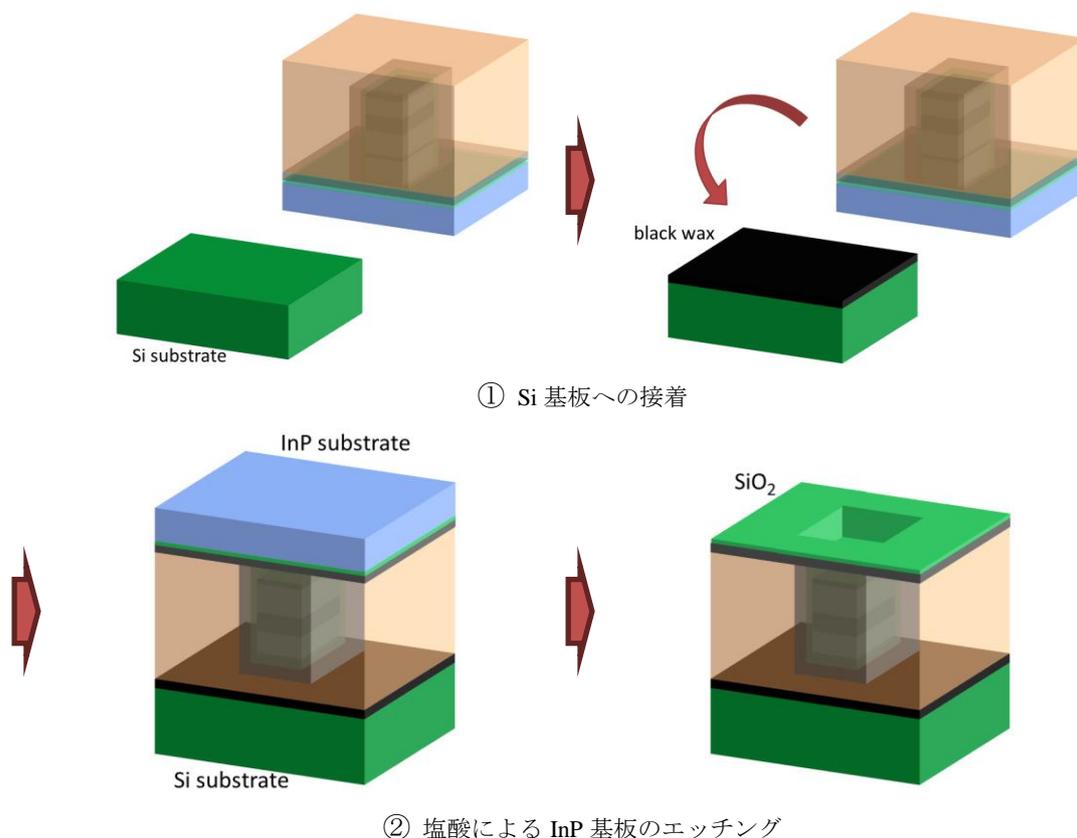


fig. 5.10 Process flow of substrate removing.

① Si 基板への接着

作製したデバイスを，シリコン基板上にブラックワックスによって接着した．ブラックワックスは耐薬品性の強いワックスであり，長時間のウェットエッチングをとこなうプロセスに適している．接着の手順を以下に述べる．

まず，120℃まで温めたホットプレート上に，デバイスチップ，Si 基板，アルミカップに入れたブラックワックスの三つをのせる．ブラックワックスは熱可塑性であるため，十分に温まると柔らかくなる．これを綿棒ですくって Si 基板上に塗布し，デバイスのチップを反転させて貼りつける．このとき，デバイスチップの貼り付け面にもブラックワックスを塗布してもよい．貼り付けたのち，チップを上から綿棒で軽く押してやることで基板を密着させる．ただしこのとき押す力が強すぎるとチップを破損する可能性があるので注意す

る。次に、fig. 5.11 に示すように、基板のエッジがブラックワックスで保護されるようにする。これによって、横方向からのエッチングの進行を防ぐことができる。ブラックワックスの塗布が終わったら、ホットプレートから外して室温で冷却し、ブラックワックスを固める。このとき、デバイスチップが浮き上がらないように上から綿棒でおさえてもよい。ただし、この場合にも強く押し付けて基板を割らないよう注意する。

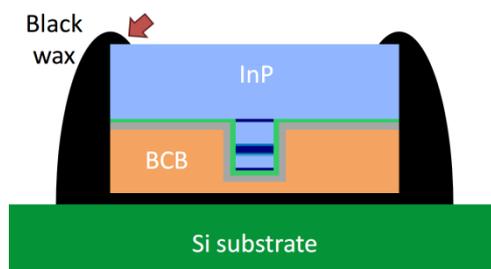


fig. 5.11 Black wax protection.

② 塩酸による InP 基板のエッチング

シリコン基板に接着されたデバイスチップは、塩酸に約 40 分間浸してウェットエッチングを行い、基板を除去される。InP は塩酸と反応してホスフィンという非常に有毒な気体を発生するため十分注意しなければならない。

ウェットエッチングにおいて、注意しなければならないのはエッチングが終了したことを確認したらできるだけ早く塩酸から取り出すことである。必要以上長いエッチングをおこなうと、キャビティ内部まで塩酸が侵入して内部構造を破損する可能性がある。エッチングが終わると、チップの表面の色が変化するため、それを見極めたら取り出せばよい。

5.3.2. 本研究で検討した三つの基板除去プロセス

本研究では, 5.3.1 の方法を含めて三つの基板除去プロセスの方法を検討した. ここでは, その三つについて解説しながら, なぜ 5.3.1 の手法を用いたかを解説する.

(i) インジウムを用いた接着

本研究で最初に検討したのはインジウムを用いた接着法である. この方法の手順を fig. 5.12 に示す. この手法が 5.3.1 と違うのは, ドライエッチングを N コンタクト層の上で止めている点, 接着にインジウムを用いている点である. これら二点の違いは, 電流注入が可能なデバイスを目的として作製を試みる際には必要となる要素である.

このプロセスを利用しなかった理由は, 基板除去に用いるエッチャントである塩酸が, インジウムと高い反応性をもつためである. fig. 5.12 に示すように, インジウムが塩酸と反応しないようにフォトリソストで保護しているが, 少しでも隙間があるとそこから塩酸が侵入して気泡が発生して, チップを破壊する. 実際に破損したチップの写真を fig. 5.13 に示す. インジウムと塩酸が反応した部分で気泡が発生して InGaAsP 層を破壊していることが分かる. 最終的にこのプロセスを用いることはなかったが, インジウムではなく導電性のポリマー材料を使うことで塩酸との反応性をなくせば, この手法も利用可能であると考えられることができる.

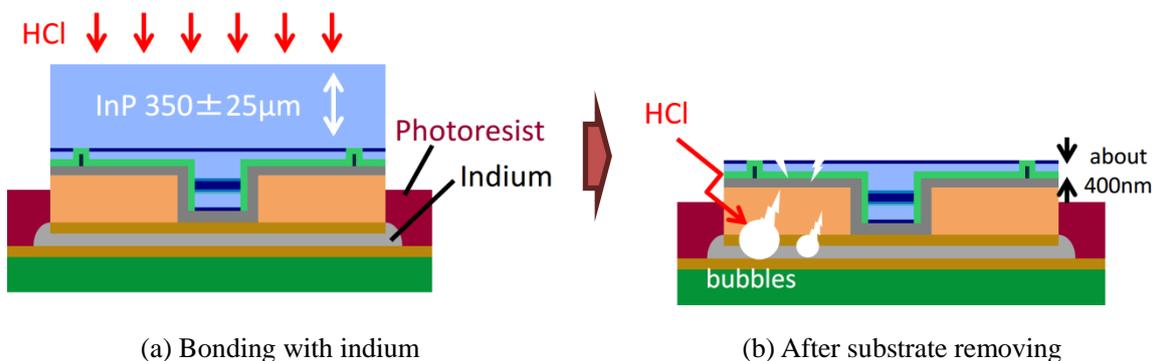


fig. 5.12 Process flow of substrate removing with indium.

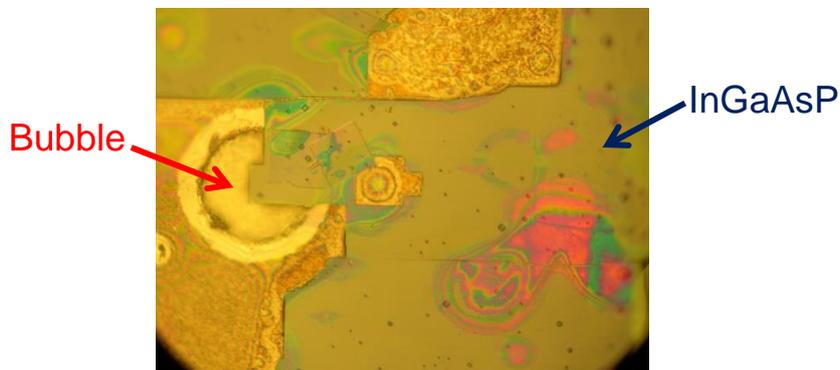


fig. 5.13 Top view of device after substrate removing.

(ii) ブラックワックスを用いた接着・N層一面でエッチストップ

インジウムを用いた接着では以上のような問題が生じたため、ブラックワックスで接着を行なうことでこの問題の解決を試みた。しかし、この手法においても問題が生じることがわかった。この手法の手順を fig. 5.14 に示す。この手法が 5.3.1 と違うのは、ドライエッチングを N コンタクト層の上で止めている点である。この手法において問題となるのは、以下の二点である。

一つめが、熱膨張係数によるチップの破損である。チップ表面に積層されている銀は、高温化で蒸着されているため、室温に戻すと縮み、応力がはたらく。基板が除去されていないときにこの力は無視できるが、基板を除去すると 400nm 程度の薄い層しか残らないため、この応力によって容易に破損し、内部に塩酸が侵入する。実際に破損したチップの写真を fig. 5.15(b) に示す。ヒビが入って、エッチストップ層が浮き上がっていることが確認できる。これによってデバイスの歩留まりが大きく低下してしまうことがわかった。

二つめが、測定上の問題である。この構造では、キャビティ構造の上部に N コンタクト層があるため、励起光を注入した時にキャリアがこの層に吸収されてしまい、キャビティ内部に入らない。そのため、PL スペクトルを見ると、N コンタクト層として用いている InGaAsP の 1.25 μm 付近の発光が強くなり、MQW 層からの発光が弱まってしまう。実際におこなった二次元スキヤニングの画像を fig. 5.16 に示す。このスキヤニングで見える正方形のパターンはアライメントマークとして MQW 層を 50 μm 角に残したものである。MQW のある部分で 1.25 μm の発光が弱まるため構造を把握することはできるが、1.55 μm での発光は非常に弱いものとなっている。InGaAsP のウェットエッチングによる除去も試みたが、キャビティの破損をまねく場合が多かったため断念した。

以上の問題を解決する方法としては、まずエッチストップ層と銀の層との厚みが大きくなるようにウェハの層構造を改善する方法が考えられる。

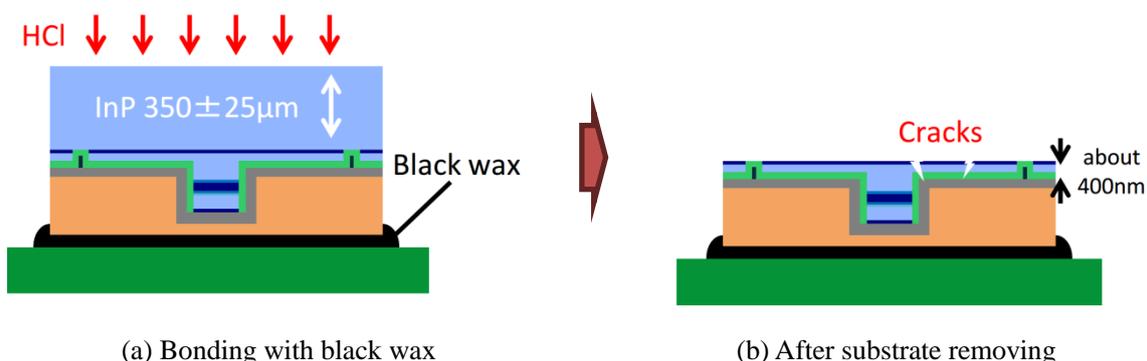


fig. 5.14 Process flow of substrate removing with black wax.

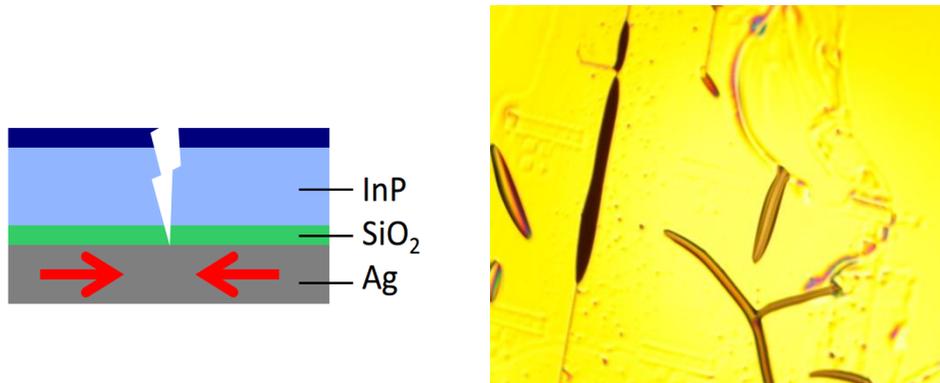


fig. 5.15 (a) Stress caused by silver (b) Top view of devices after substrate removing.

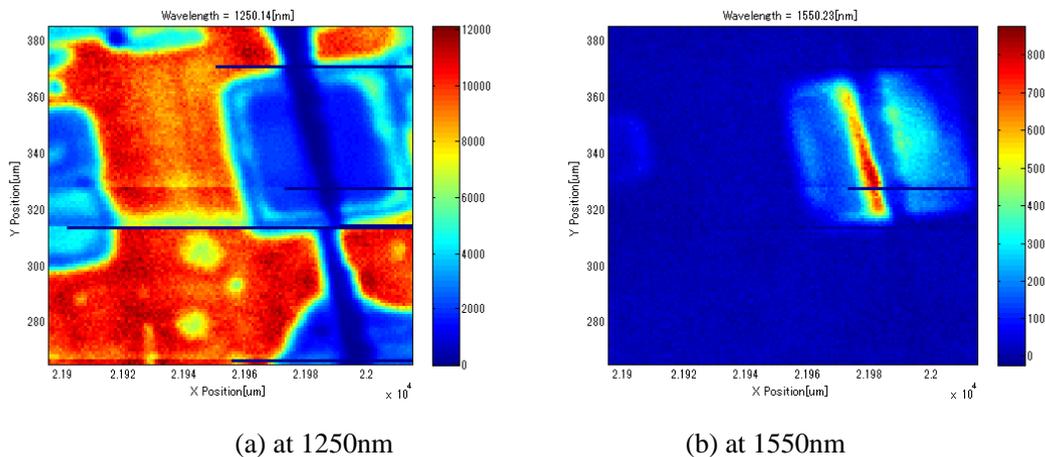


fig. 5.16 2D scanning result.

(iii) ブラックワックスを用いた接着・キャビティ各面でエッチストップ

本研究では N コンタクト層よりも下までドライエッチングで削ることによって以上の問題を解決した。手順は 5.3.1 でのべた通りであるが、断面図を fig. 5.17 に示す。この方法を用いる場合、N コンタクト層はキャビティの部分にしか残らないため、銀の応力による破損はなく、N コンタクト層でのキャリア吸収の問題も生じることはない。以上の理由から、本研究ではこの手法を採用した。

ただし、ここで注意しなければならないのは絶縁膜に用いる SiO_2 の厚みである。この厚みが小さいと、銀の応力によって破損してしまう。キャビティ構造の付近でなければそこまで影響はないが、キャビティ付近で生じるとキャビティ破損の原因となるので注意しなければならない。

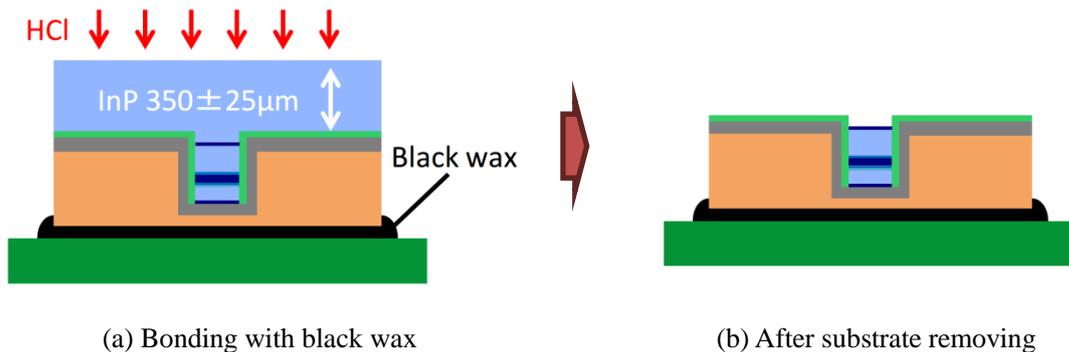
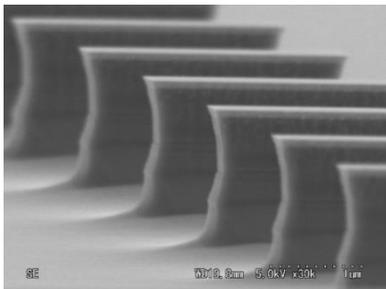


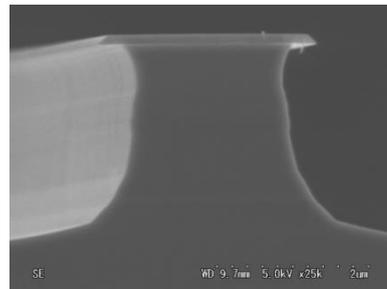
fig. 5.17 Process flow of substrate removing with black wax all the way to the mesa.

5.4. 作製の結果

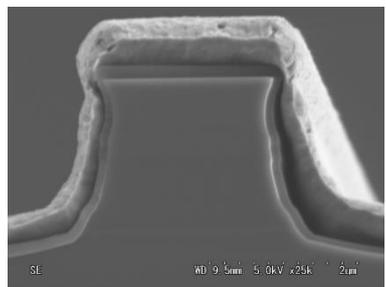
PL デバイス作製の結果を SEM 像で以下に示す.



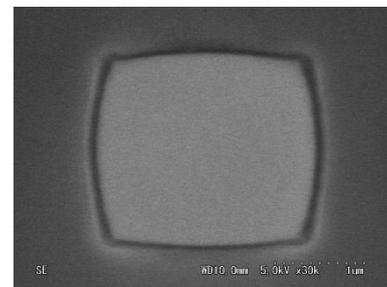
(a) After dry etching



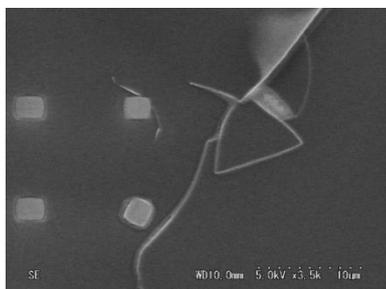
(b) After dry etching



(c) After deposition of SiO₂ and Silver



(d) Top view of devices after substrate removing



(e) Top view of devices after substrate removing

fig. 5.18 Fabrication result.

5.5. 作製したデバイスの評価

本節では、作製した PL 用デバイスの評価について述べる。測定方法に関しては、第 4 章を参照いただきたい。

5.5.1. 測定結果

本研究で作製した幅 $1.06\ \mu\text{m}$ 、奥行き $2.29\ \mu\text{m}$ の金属キャビティ構造からえられた PL 光のスペクトル特性を fig. 5.19 に示す。5 本の曲線はそれぞれ異なる励起光強度を入射したときの PL スペクトルである。赤い破線で示されているのがコア層に導入した MQW そのものの発光スペクトルである。このスペクトルは、作製に使用したエピ基板の p-Contact 層を硫酸過水によって除去したものに励起光を入射して得られた PL 光のスペクトルである。

キャビティから得られた発光スペクトルは MQW の発光スペクトルとは異なり、複数の共振ピークをもっていることが確認できる。本節では、最も強度の大きい波長 1500nm 近傍のピークを peak1, peak1 より短い波長に観測されるピークを、波長の長い順番に peak2, peak3 と呼称する。

peak1 について、半値幅(FWHM)・ピークの強度の励起光強度依存性をプロットしたのが fig. 5.20 (a),(b)である。ピーク強度は、 0.08mW 付近で傾きが変わるが、 0.6mW までほぼ線形に単調増加する。 0.6mW を超えると、飽和してそれ以上増加しなくなる。FWHM は、 0.05mW 付近までは 34nm 程度で変化がないが、 0.05mW を超えると急激に減少し、そののちゆるやかに 16nm 付近に漸近してゆく。また、励起光強度を 1mW 以上まで大きくしたところ、キャビティの特性が不可逆な劣化を生じることが確認された。

今回の測定結果では、明確なしきい値を確認できなかったことから、レーザ発振は実現されていないと判断できる。

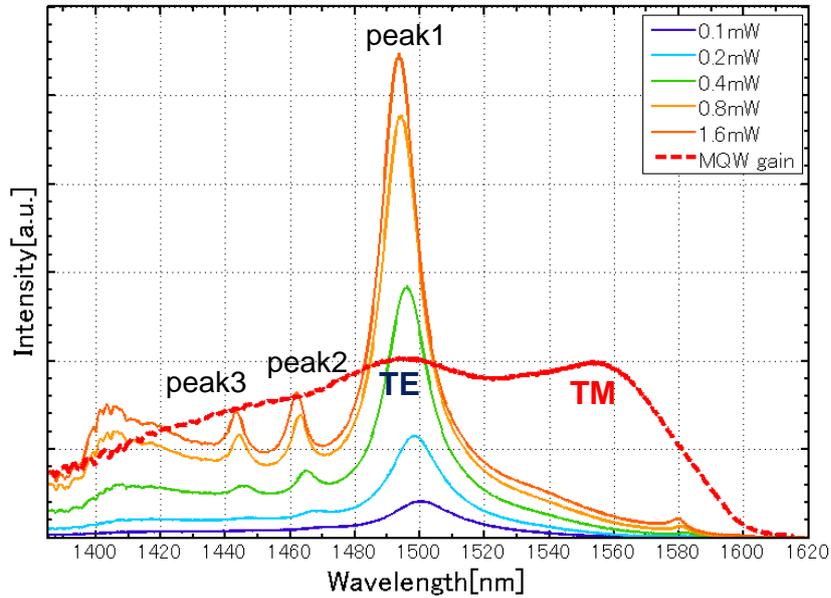


fig. 5.19 PL spectrum from $1.06 \mu\text{m} \times 2.29 \mu\text{m}$.

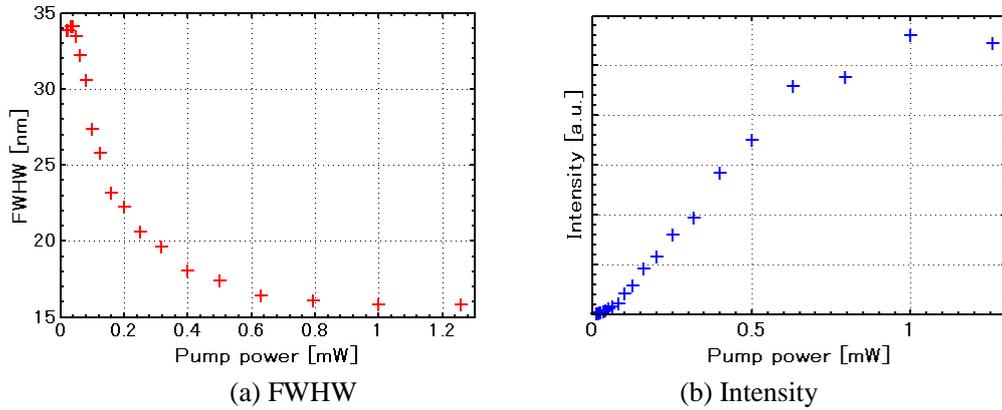


fig. 5.20 Property dependence on pump power.

5.5.2. 考察

以上の測定結果について以下の考察をおこなった。

① 共振ピークにおけるモード特性に関する考察

本研究で用いた MQW は引張歪み構造を導入したものであるため、1500nm 近傍でプラズモニック (TE) モードの利得が、1550nm 付近でダイエレクトリック (TM) モードの利得が最も得られるように設計されている(2.1.2.①(iv)参照). MQW の利得スペクトルにある二つのピークは、左側がプラズモニック (TE) モードの利得、右側がダイエレクトリック (TM) モードの利得が最大となっていることを表している。

測定によって得られた PL スペクトルと MQW の利得スペクトルを比較してみると, MQW に二つあるピークの左側と peak1 の波長がおおよそ一致していることがわかる. ここから, 私は peak1 の共振モード特性は, プラズモニック(TE)モードではないかと推測した. この仮説を実証するために, このキャビティの断面において, プラズモニック(TE), ダイエレクトリック(TM)の導波モードがどのような特性を持つか, 有限要素法による計算を行った. 計算の結果を Table 5.7 にしめす.

Table 5.7 Simulation result.

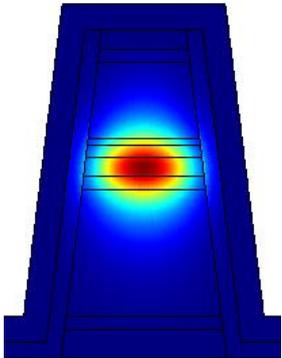
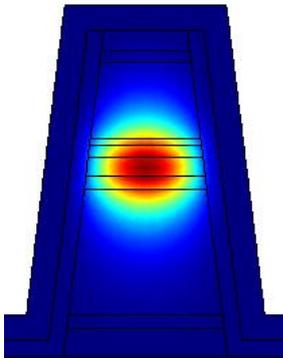
Mode	Plasmonic (TE)	Dielectric (TM)
Mode dispersion		
N_{eff}	3.21	3.21
α	400	633
Γ	0.35	0.28
g_{th}	1761	3049

Table 5.7 より, プラズモニック(TE)モードの方がダイエレクトリック(TM)モードよりも低いしきい値利得を実現していることが分かる. 両モードの等価屈折率はほぼ一致しているため, キャビティ内でピークをもつ波長は一致すると考えられる. 以上より私は, 最大ピークは断面においてプラズモニック(TE)モードをもっていると考え.

第 2 章において, 導波路の幅がサブマイクロの領域では, ダイエレクトリック(TM)モードの方がプラズモニック(TE)モードにくらべて良い特性を持つと述べた. これは同時に, サブマイクロ領域よりも幅が大きくなるとダイエレクトリック(TM)モードの優位性が失われることを表している. 今回の構造では幅が $1\mu\text{m}$ 以上であるため, プラズモニック(TE)モードが優越したと考えることができる.

以上の考察を踏まえ, 共振ピークのもつ三次元モードをファブリペローのモデルを用いて推測した. 2.1.2.②で述べたとおり, ファブリペローの位相整合条件は式(2.74)で表される. これをモード数 m について整理すると以下の式を得る.

$$m = \frac{2L}{\lambda} n_{eff} \quad (m = 1, 2, 3, 4 \dots) \quad (3.4)$$

今回測定を行ったキャビティの奥行きは $2.29 \mu\text{m}$ であるから、この式を用いて peak1 の伝搬方向の次数は 10 だと推測できる。よって、peak1 の共振モードは $\text{TE}_{1,1,10}$ だと推定することができる。同様の推定方法で、peak2 および peak3 の共振モードはそれぞれ $\text{TE}_{2,1,9}$, $\text{TM}_{2,1,9}$ だと推測した。

ただし、この推定方法は正確さに欠ける。2.2.5 項で述べたとおり、ファブリペローのモデルは幅に対して奥行きが十分長いことを仮定した時に成り立つモデルである。本研究で作製した構造は長さが幅に比べて二倍程度であるため、ファブリペローのモデルだけで単純に考えることは難しい。正確な特性の把握を行なうためには、FDTD 法等を用いた三次元電磁界解析を行い、ファブリペローモデルとの比較を行なう必要がある。

以上の考察から、金属キャビティレーザについて示唆される問題点は、発振波長がキャビティの構造に非常に敏感に反応するという点である。これは、ファブリペローレーザの位相整合条件の式から分かる。一般的なレーザでは L が非常に大きいため次数 m も大きく、 L の変化に対する波長の変化は小さい。これに対し、 L の小さなキャビティレーザでは、 m が小さいため L が少し変化しただけでも発振波長が大きく変化する。つまり、目的の発振波長でピークをもつためには精密なデバイス作製が必要となる。また、本研究で利得媒質として用いた MQW は利得の帯域が狭いため、ピーク波長が変化すると利得も大きく変化してしまうという問題点もある。

② レーザ発振が実現されなかった原因

以上から、peak1 が TE モードをもつことが推測されたが、それはプラズモニック(TE)モードがダイエレクトリック(TM)モードに比べて良い特性を持った結果であり、レーザ発振が実現されなかった理由ではない。この金属キャビティがレーザ発振を実現しなかった理由として、私は以下の二つが大きいと考えている。

(i) ドライエッチング形状による光学特性の劣化

5.2.1.⑥で述べたとおり、ドライエッチングによってキャビティの側壁には傾きが生じている。この傾きがキャビティの光学的特性にどのような影響をあたえるか考えてみる。

まず、二次元導波モード解析をおこなって、傾きによる光学特性の変化を調べたが、傾きは導波路特性には大きな変化をもたらさないことがわかった。つぎに、三次元の共振器構造の光学特性を、共同研究者とともに計算をおこなった。その結果、fig. 5.21 に示すように傾きによって共振器の特性を表す Q 値が大きく減少することが確認された。

以上の結果をファブリペローのモデルを用いて考えると、傾きによってミラー間の媒質の特性は変化しないが、ミラーそのものの特性が劣化してしまっていると考えられる。以上より、ミラーの反射率 R が小さくなるとキャビティのしきい値利得が増大する

ことから、キャビティの光学特性が傾きによって劣化することが分かった。

(ii) 熱の影響

もう一つの問題の原因は、熱の影響ではないかと考えている。PL 測定では、電子を励起するために利得媒質のバンドギャップよりも大きなエネルギーをもつ光を照射している。励起されたキャリアは再結合するまでにバンド内で緩和されてエネルギーを失う。特に、今回使用した光源は 532nm であるため、この発熱の影響でキャビティ構造の温度が上昇していると考えられる。

熱によって生じる問題としては、利得の減少、非発光再結合の増加による発光効率の低下、金属による損失の増大、高温による半導体そのものへのダメージ等があげられる。測定前と測定後のサンプルの表面の SEM 像を fig. 5.22 に示す。表面に結晶のようなものが生じていることが確認できる。このような現象がキャビティの破損を招いているのではないかと考えている。

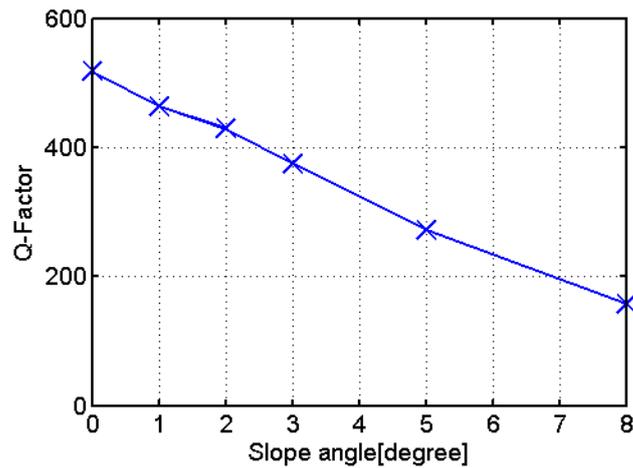
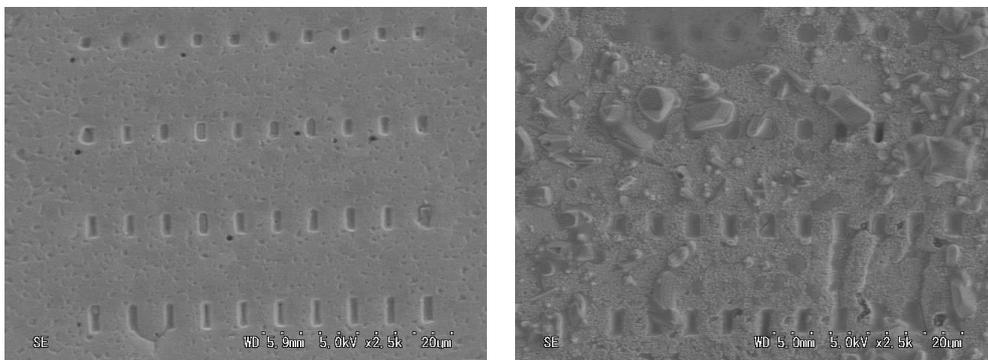


fig. 5.21 Q-factor versus slope angle of cavities.



(a) Before measurement

(b) After measurement

fig. 5.22 Surface of PL devices before and after measurement.

5.5.3. 改善すべき点

以上をふまえて、PL デバイスの作製・および測定において何を改善すべきか、以下の三つの観点から考える。

第一に、キャビティの特性という観点から考えてみる。キャビティの特性は、光学特性と電気特性の二つに分けて考えることができる。光学特性の向上のためには、キャビティの形状の改善、金属の光学特性の改善が必要である。形状は、先程述べたとおりエッチング断面をより垂直にしなければならない。金属は、蒸着条件やアニール条件を最適化し、光の損失の小さい金属膜を形成する必要がある。電気特性については、非発光再結合を減少させる必要がある。非発光再結合は表面準位・不純物準位・欠陥準位による再結合やオージェ再結合などがある。ドライエッチングによって表面に不純物や欠陥が生じている可能性があるため、表面をウェットエッチング等で処理することで特性が向上する可能性がある。

第二に、プロセスの歩留まりという観点から考えてみる。今回作製したデバイスは、歩留まりが 10%以下と非常に悪かった。この原因はおそらく基板除去プロセスにおいてエッチャントである塩酸がキャビティ内に侵入しているためではないかと私は考えている。これを確認するには、FIB 装置等でキャビティ構造内部を観察し、壊れているキャビティと壊れていないキャビティを比較する必要がある。また、エッチャントの侵入を防ぐためには、ドライエッチングの深さをより深くする必要がある。

第三に、測定方法という観点から考えてみる。今回、熱によってキャビティの特性が劣化している可能性が示唆された。これを確認するためには、測定温度によるキャビティ特性の変化を観測し、熱の効果がどの程度の影響を与えているか考察を行う必要がある。また、光源をキャリア生成効率のよい長波のものとしたり、パルス光源等を用いたりすることで、熱の影響を抑える必要がある。

5.6. まとめ

本章では、PL 測定を目的としたデバイスの作製、および評価について述べてきた。まず、デバイス構造および作製プロセスについて述べてきた。特に、基板除去を導入したため、その注意点について詳しく解説した。作製したデバイスは、PL 測定によって光学特性を評価した。その結果、キャビティのピークを観測することが出来たが、本研究の意図しないプラズモニック(TE)モードでの共振が示唆された。本研究の目的とするダイエレクトリック(TM)モードでの発振を実現するためには、構造の改善が必要であることが示唆された。

第6章 EL 用デバイスの作製と測定

前章において PL 測定の手法を確立したため、つづいて電流注入を目的としたデバイスの作製を行った。本章ではまず、EL 測定用に設計したデバイスの構造について述べる。次に、デバイスの作製について順番に述べ、作製の結果をしめす。そのうえでデバイスの測定を行い、EL 光を観測したためこれについて述べる。

6.1. デバイス構造

EL 測定を前提としたデバイスの、その作製プロセスと測定に適した立体構造、および平面構造の設計を行った。使用したエピウェハの層構造は Table 2.1 に示したとおりである。立体構造については、2.2.1 項に記述したためそちらを参照いただきたい。

6.1.1. 平面構造

本研究では、fig. 6.1 に示すような EL デバイスの平面構造を、CAD を用いて設計した。また、このデザインに基づいて作製プロセスに必要なフォトリソマスクを作製した。1 チップのデザインの全体像を fig. 6.1 (a) に示す。青い部分が P 電極、赤い部分が N 電極である。キャビティ付近の構造は fig. 6.1 (b) に示した。濃い青で示した部分は銀をパターニングする領域、濃い赤で示した部分は N コンタクト層との接続を行う領域 (N オープン) である。この平面構造を設計する上で注意した点は以下の三つである。

一つめは、チップの大きさおよび電極の長さである。6.4 節で述べるが、本研究では穴の空いた銅基板に橋を渡すような形でチップを貼り付けた。そのため、穴の幅よりも長く、安定して貼り付けることのできる大きさにする必要があった。本研究で使用した銅板の穴は幅が 5mm であるため、チップの長さはそれよりも長い 10mm とした。また、銅板の穴から発光を観測できるように、キャビティをチップの中央部分に集め、その両側に長い電極を配置した。

二つめは、キャビティと N オープンとの距離である。この二つの距離が離れすぎていると、抵抗が増え、電流が別のパスを通ってしまう可能性がある。一方、二つの距離が近すぎると作製プロセスの難易度が上がる。パターニングに失敗して両者の電極が重なってしまうと P・N の電極が短絡してキャビティ構造に電流を注入できなくなる。これを考慮して、本研究ではキャビティの中心部から N オープンまでの距離を $20\ \mu\text{m}$ 、P 電極と N 電極の間隔を $8\ \mu\text{m}$ とした。

三つ目は N オープンと N 電極との重ねあわせである。N オープンは、InP のウェットエッチングによって N コンタクト層を露出させる。このとき、N オープンの縁にある四辺は

InP の面方位の影響で結晶方向に依存した傾斜が生じる．そこでこのデザインでは，N オープンの長方形の長辺・短辺の両方で電極が接するように設計を行って，断線を防いでいる．

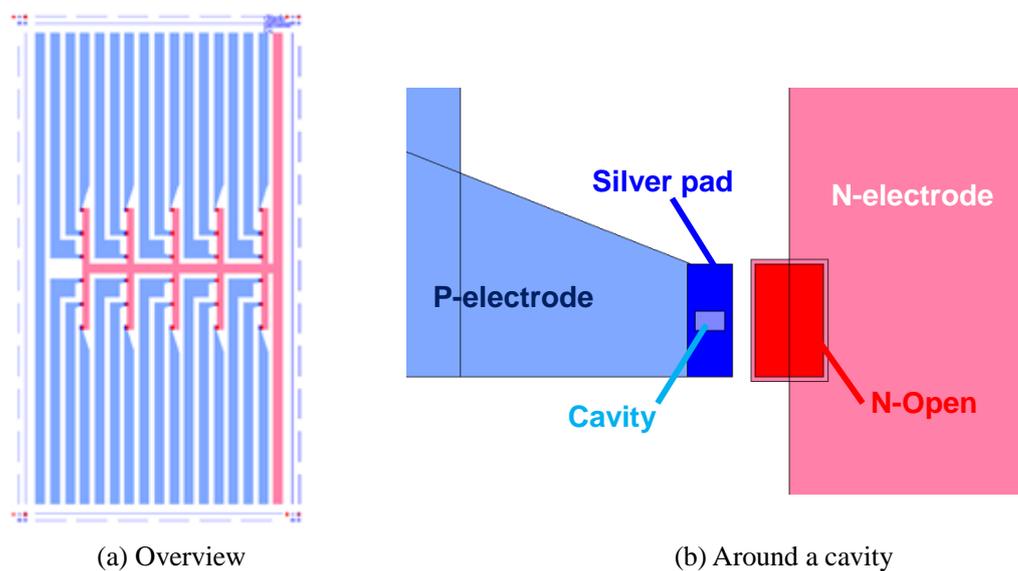


fig. 6.1 Geometry of EL devices.

6.2. デバイスの作製

EL 用デバイスの作製プロセスについて，具体的におこなったこと，注意すべきことについて順にのべてゆく．fig. 6.2～fig. 6.4 に作製プロセスフローを示した．ここに示された順番で作製プロセスについて述べてゆく．

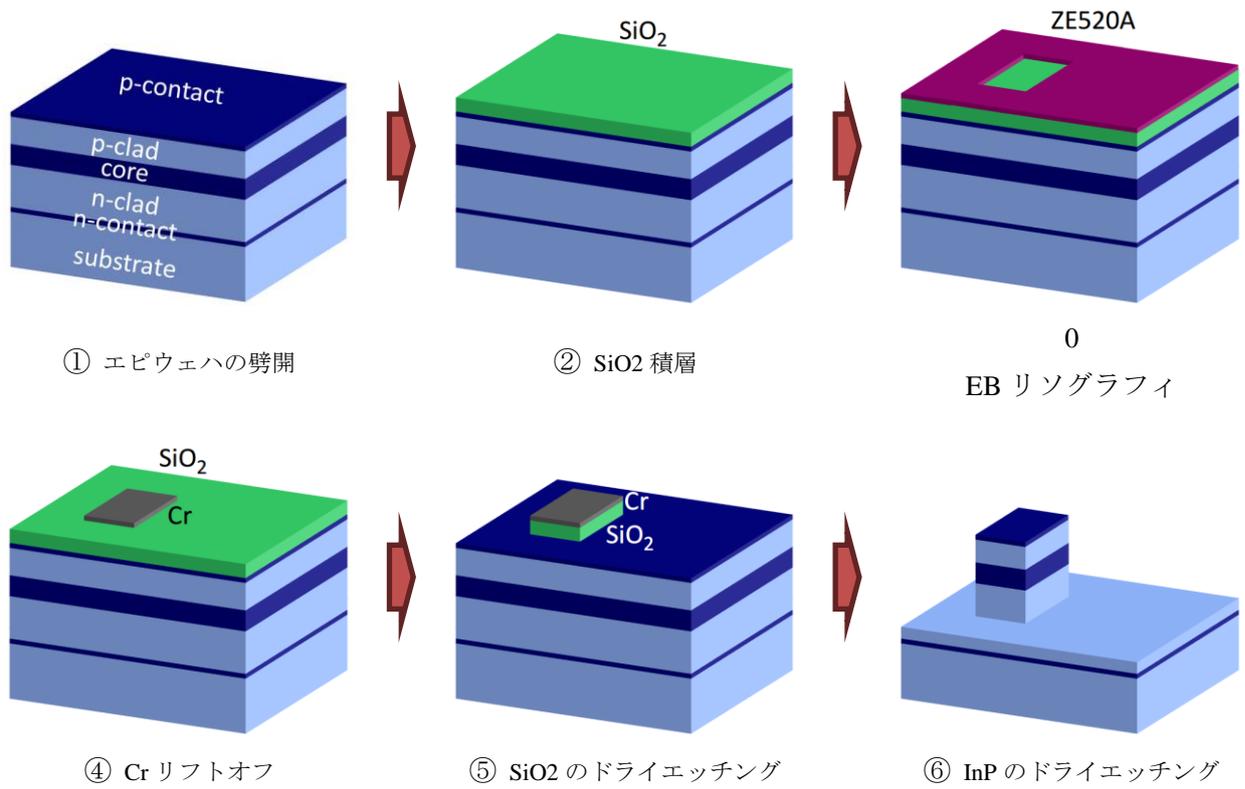


fig. 6.2 Process flow of mesa fabrication for EL devices.

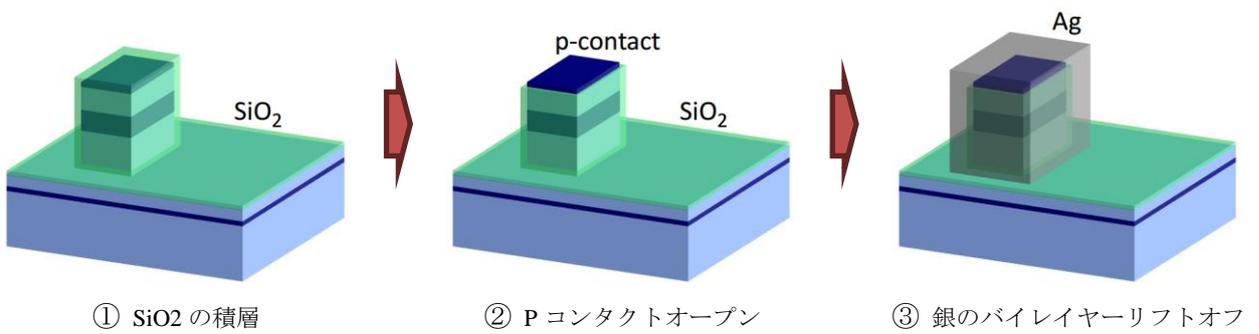


fig. 6.3 Process flow of coating and p-contact open for EL devices.

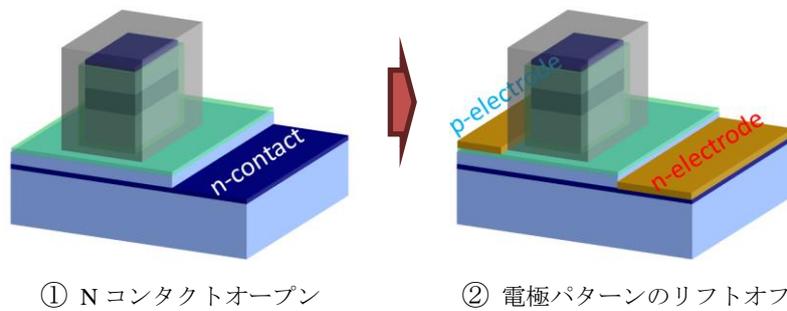


fig. 6.4 Process flow of coating and n-contact open and electrode patterning for EL devices.

6.2.1. メサ構造の形成

① エピウェハの劈開

まず、エピウェハの劈開をおこなった。PL プロセスと同様の手順で、2 インチウェハを 1/6 チップに劈開した。6.1.1 項で述べたとおり、このデバイスは劈開方向に依存しないように設計されているが、劈開方向を記憶しておくといよい。

② SiO₂ 積層

PL プロセスと同様に、劈開されたウェハに SiO₂ を積層した。本プロセスでは PECVD 装置を用いた。本プロセスでは、約 300~400nm 程度になるように Table 6.1 の条件を用いた。

Table 6.1 Condition and result of PECVD deposition.

Parameter	5%SiH ₄ /He	N ₂ O	Pressure	RF Power	Temp.	Time	Thickness
Condition	150sccm	700sccm	133.3Pa	30W	160°C	5min	388nm

③ EB リソグラフィ

つぎに、EB リソグラフィによってキャビティ構造のパターニングをおこなった。描画するパターンはキャビティ構造用のメサ、アライメントマーク、頭出し確認用メサ、ラインパターンの四つである。アライメントマークは以降のプロセスでフォトリソグラフィを行なう際に位置合わせに使用するパターンである。頭出し確認用メサは、キャビティの周囲に配置して頭出しプロセスにおいて頭出しが完了しているか確認するためのメサ構造である。本プロセスでは、大きさ 10μm 角の正方形パターンを利用した。ラインパターンは、PL 測定るとき同様にプロセス条件を確認するためのダミーパターンである。

Table 6.2 Condition of EB lithography.

(a) Cavity patterns					
Parameter	Voltage	Probe current	Field size	Dose time	Scan mode
Condition	50kV	50pA	100 μ m/20000dot	1.0 μ s	DIGITAL
(b) Alignment patterns					
Parameter	Voltage	Probe current	Field size	Dose time	Scan mode
Condition	50kV	50pA	100 μ m/20000dot	0.5 μ s	DIGITAL
(b) Dummy patterns					
Parameter	Voltage	Probe current	Field size	Dose time	Scan mode
Condition	50kV	400pA	500 μ m/60000dot	0.2 μ s	DIGITAL

描画に用いた条件を Table 6.2 に記す. 基本的に PL デバイス作製プロセスと同じであるが, 注意すべき点がある. それは, PL デバイスでは時間短縮のためキャビティ構造を 50pA, アライメントマークを 200pA で描画したが, EL プロセスでは両方とも 50pA で描画した点である. 前章で述べたとおり, 電流量を変えるとビームの座標がずれることがある. EL プロセスでは, アライメントマークを用いてフォトリソグラフィを行なうためキャビティとアライメントマークの位置関係が設計からずれてしまえば設計通りのデバイス作製ができない. 以上の理由から, EL プロセスではアライメントマークについてもキャビティと同じ電流量, フィールドサイズで同時に描画をおこなっている. ただし, アライメントマークはキャビティに比べて大きいいため, 同じドーズ量で描画を行うと近接効果が表れることがある. そこで, アライメントマークとキャビティでは異なるドーズタイムを用いた.

描画されたサンプルは ZED-N50 に二分間浸けることで現像をおこなった.

④ Cr リフトオフ

EB リソグラフィの後に, Cr を作製するためのリフトオフプロセスをおこなった. この工程は PL デバイスとほぼ同一であるため詳細は 5.2.1.④を参照のこと.

⑤ SiO₂のドライエッチング

作製した Cr パターンをマスクとして SiO₂ をドライエッチングした. この工程についても PL デバイスとほぼ同一であるため詳細は 5.2.1.⑤を参照のこと.

⑥ InP のドライエッチング

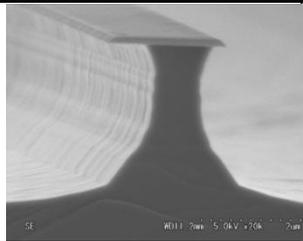
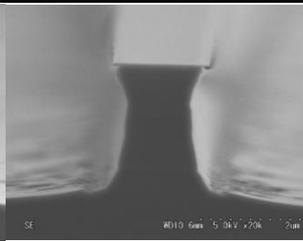
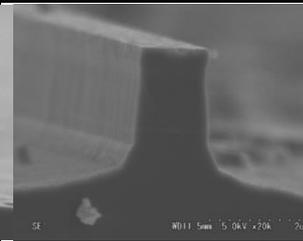
次に, SiO₂ パターンをマスクとして, 塩素ガスを用いた InP, InGaAs, InGaAsP のドライエッチングをおこなった. ここで, エッチングされたサンプルは硫酸に十分間, つづいて BHF に十分間つけてウェットエッチングをおこない, SiO₂ マスクの除去, および表面の処理を行った. このプロセスで使用した条件を Table 6.3 に示す.

Table 6.3 Recipe of InP dry etching.

Condition 1						
Parameter	Source power	Bias power	Gas pressure	Ar flow rate	Cl ₂ flow rate	Time
condition	140W	110W	4Pa	9sccm	1sccm	3sec
Condition 2						
Parameter	Source power	Bias power	Gas pressure	Ar flow rate	Cl ₂ flow rate	Time
condition	140W	110W	1Pa	9sccm	1sccm	5min

このプロセスにおいて PL プロセスと異なる点は、エッチングを、N-InGaAsP 層の上で止めなければならないことである。また、本プロセスではエッチングの条件を調節することによって PL プロセスにおいて問題となったスロープの解消を試みた。Table 6.4 に、条件を変化させた時のエッチング断面形状の一覧を載せる。一番左側が PL プロセスで使用した条件での結果、中央が塩素の割合を小さくした条件での結果、右が塩素の割合を小さく、バイアスパワーを 180W に設定した時の結果である。3.3.2 で述べたとおり、反応性ガスの比率を小さく、バイアスパワーを大きくすると、非等方性が増すと同時に、選択性の悪化、ダメージの増加が生じる。右端の SEM 像を見ると、選択性の低さからエッチングマスクが消失してしまい、メサの表面が削り取られていることが確認できる。以上より、本プロセスでは中央の条件を利用することとした。

Table 6.4 Etching profile dependence on gas ratio and bias power

SEM figure			
Cl ₂ :Ar	2:8	1:9	1:9
Bias power	110	110	180

また、本プロセスではウェットエッチングによるキャビティ表面の処理を行った。このプロセスでは、硫酸によって表面を酸化し、それをフッ酸によって除去することで、ドライエッチングによるダメージを受けたキャビティの表面部分を除去した。ただしこのとき、InP と InGaAsP 層の除去される割合が異なるため、10 分間という長時間の酸化処理をおこなうと断面の形状が変化してしまうことがわかった。断面形状の変化を避けたい場合は、酸化処理の時間を減らすか、希リン酸による処理¹⁶など、の異なる方法で表面処理をおこなう必要がある。

6.2.2. 絶縁膜・金属薄膜の形成及びコンタクトオープン

① SiO₂の積層

まず、形成したキャビティ構造の表面に PECVD を用いて絶縁膜を形成した。この絶縁膜は、P 電極と N 電極が短絡しないようにするために形成する絶縁膜であり、すこしでも穴があるとそこでリークが生じてしまう。よって本研究では厚さ 160nm 程度の SiO₂ を積層した。積層した際の条件は 6.2.1.②と基本的に同じで、時間を今回は 100 秒に設定した。

② Pコンタクトオープン

次に、SiO₂によって形成した絶縁膜をキャビティの上面の部分だけ除去して、Pコンタクト層を露出させるPコンタクトオープンおこなった。この手順を以下に記す。

まず、スピコートおよびベークによってチップ上にAZ5200NHの薄膜を形成した。つぎに、酸素によるドライエッチング（アッシング）によってキャビティの上面が露出するまでレジストを除去した（頭出しの工程）。キャビティの上面が露出したら、上面の絶縁膜をドライエッチングによって除去してPコンタクト層を露出させた。このとき、キャビティの側壁はレジストによって保護されているため絶縁膜が除去されることはない。Pコンタクト層が露出したら、アッシングで残ったレジストをすべて除去した。ただし、アッシングだけではレジストが全て除去されない場合があるため、最後にアセトンによって表面の洗浄をおこなった。

以上の工程において、最も注意しなければならないのが頭出しの工程である。頭出しにおいて注意すべき点は以下の二点である。まず、レジストの均一性による影響を考える必要がある点である。レジストがチップ上で均一に塗布されていないと、頭出しをおこなうために必要なアッシング時間が場所によって変化してしまう。3.1.1で述べたとおり、メサの上部ではレジストの厚みが増す。この厚みはメサの大きさによっても変化するため注意が必要である。つぎに、頭出しが達成されたかどうかの確認方法である。本研究では光学顕微鏡を用いて表面を観察することで上面が露出したか確認を行った。このときの判別方法について簡単に触れる。アッシングが足りない場合には、メサの周囲とメサ上の色はほとんど同じに見える。アッシングが進んでメサ上面のレジストが薄くなってくると、メサ上面に干渉縞が見えるようになる。さらにアッシングを進めると干渉縞が消えて、メサ表面の色が確認できるようになる。これで頭出しが完了したと確認できる。

③ 銀のバイレイヤーリフトオフ

Pコンタクトオープンが完了したら、金属キャビティ構造、および電極の役割を果たす銀のパターニングをおこなった。本研究では、バイレイヤーリフトオフ法を用いて銀のパターニングをおこなった。これは、斜めエッチングによるリフトオフの失敗を防ぐためである。この手法について詳しくは3.2.3を参照いただきたい。本プロセスでの手順を以下に述べる。

まず、LOR7BおよびAZ5200NJを順番にスピコートによる塗布およびベークをおこなった。この時の条件は、LOR7Bが3000rpm×60s・180℃×5minで、AZ5200NJが3000rpm×60s・90℃×1minである。このチップをフォトリソグラフィによるパターニングをおこなった。このとき、現像時間を調節することで犠牲層のエッチング距離を変化させ、アンダーカットの深さを調節することができる。本プロセスでは70秒の現像によって適切なアンダーカットを作製した。レジストパターンの形成されたチップ上には、銀がEB蒸着法によって積層された。ただし、積層する際に±45°傾けて150nmずつ積層することでキャビティ

の側壁が金属で覆われるようにした。銀を積層したのち、金も同様に±45°傾けて積層した。この金は酸化しやすい銀の保護膜としての役割を果たしている。金属を積層したチップは、アセトンに一晩つけたのち、ZDMACに10～20分浸し、リフトオフによって金属パターンを形成した。ここでアセトンおよびZDMACを使用したのは、アセトンによってAZ5200NJを、ZDMACによってLOR7をそれぞれ除去するためである。

このプロセスにおいて、注意すべき点は二つある。一つめは、犠牲層に使用するLOR7がフォトリソグラフィにおいてマスクとのコンタクトを阻害する問題である。LOR7をスピコートすると、チップの角で固まってこぶ状のかたまりを作る。このかたまりはレジストの厚みよりも大きいため、フォトマスクとチップのコンタクトを阻害する。そのため、レジストを塗布した後はチップの縁、特に角をNMD3やZDMACによって除去してやる必要がある。

二つめは、リソグラフィによってできるレジストの断面形状によって糸状の金属片ができる事である。レジストの端面にスロープが出来た場合、その部分に金属が積層される。リフトオフするとき、この部分の金属が糸状になって周囲のパターンに付着することがある。この金属はパターン間を短絡させる原因になる可能性があるため、十分注意する必要がある。

6.2.3. 電極パターンの形成

① Nコンタクトオープン

Nコンタクト層への電気的な接続を行うためにNコンタクトオープンをおこなった。このプロセスの手順を以下に示す。

まず、AZ5214を用いたフォトリソグラフィによってレジストのパターニングをおこなった。ただしこのとき、銀のパターンとNオープンのパターンが近づき過ぎないように注意した。パターニングをおこなったチップは一度ホットプレートでベークすることでエッチング耐性を上げた。その上で、SiO₂、InPおよびInGaAsPをウェットエッチングによって除去し、Nコンタクト層を露出させた。露出を確認したら、レジストをアセトンによって除去した。

このプロセスにおいて注意すべきなのは、Nオープンするためのウェットエッチングの工程が、ドライエッチングの深さによって変化する点である。本プロセスで使用したエピ基板は、Nクラッド層の中間部分にエッチストップ層をもっている。ドライエッチングがこの層の下まで進行した場合、SiO₂のエッチング、InPの塩酸エッチングのみでNコンタクト層を露出することができる。一方、この層の上までしかドライエッチングが進行しなかった場合、SiO₂、InP、InGaAsP、InPの四つの層を順番にウェットエッチングを行う必要がある。ドライエッチングの深さはメサの付近と離れた部分で異なるため、ドライエッチング

の深さがエッチストップ層より上か下かを判断するのは難しい。SiO₂ および InP のウェットエッチングを行いながら、段差系で厚みの変化を観察して判断を行う必要がある。

② 電極パターンのリフトオフ

最後に、P および N の電極パターンをバイレイヤーリフトオフ法によって作製した。手順は 6.2.2.③ と同一であるためそちらを参照のこと。積層した金属は Ti が 20nm×2、Au が 100nm×2 である。

6.3. 作製の結果

以上の作製プロセスによって完成したデバイスの概観を以下に示す。

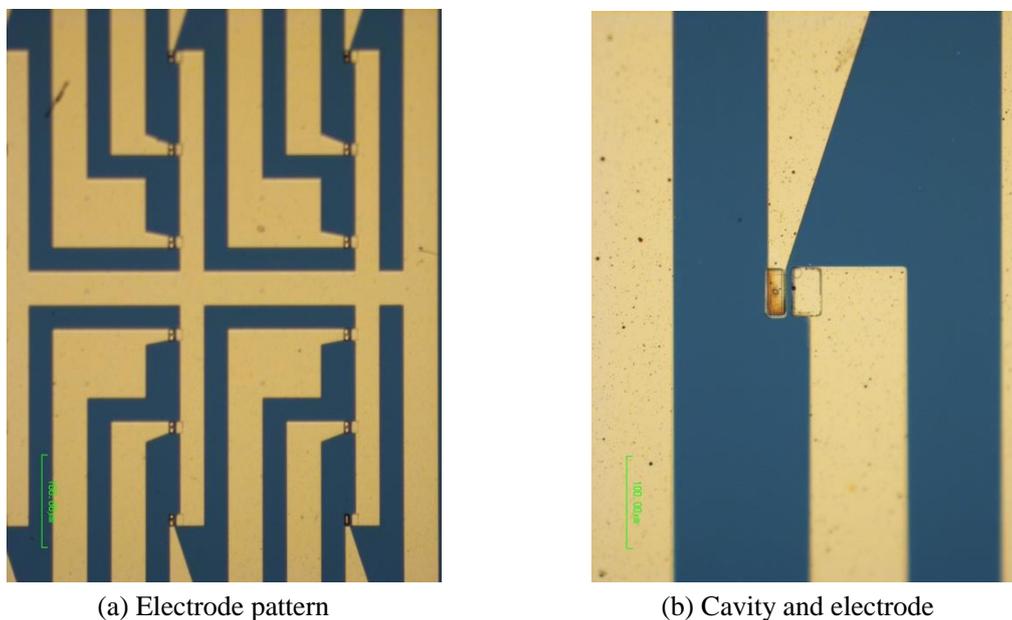


fig. 6.5 Photo of devices for EL measurement.

6.4. デバイス実装

EL デバイスでは、電流注入を行うためにプリント基板とチップの接続を行なう必要がある。以下に、そのための手順を述べてゆく。

6.4.1. 劈開とデバイスのマウント

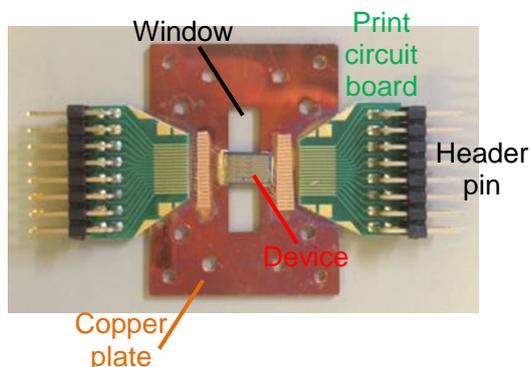


fig. 6.6 Device chip bonded on copper plate

作製したデバイスは、へき開して 10mm×5mm のチップに分けられる。作製プロセスを経たチップは端に傷をもつ場合が多く、この傷によって意図しない面で割れてしまうので注意が必要である。

へき開したチップは、fig. 6.6 に示すように幅 5mm の穴の空いた銅板上に、穴をまたぐように貼り付けた。貼り付ける際には、熱伝導性を良くするために導電性接着剤を利用した。導電性ペーストを塗布するとき、デバイスの発光を観測する裏面に導電性ペーストがつかないように注意した。接着したチップは、120℃で 30 分以上ベークして固定される。

銅板上にはあらかじめカットしたシール基板および PCB が貼り付けられている。シール基板は、チップと PCB ではワイヤボンディングを行なう際の段差が大きいいため、その中間に置かれている。PCB にはピンヘッダがはんだ付けされており、このピンヘッダに圧着端子を接続することで電気的な接続を行なうことができる。

6.4.2. ワイヤボンディング

最後に、PCB とシール基板、シール基板とチップの間を、ワイヤボンディングを用いて電気的に接続した。この時の条件を Table 6.5 に示す。ワイヤボンディングに関する注意点は 3.5.1 を参照のこと。

Table 6.5 Condition of wire-bonding

	PCB → シール基板		シール基板 → chip	
Ultrasonic power	500	385	500	150
Ultrasonic time	500	150	500	120
Force	HIGH	HIGH	HIGH	LOW
Temperature	120℃			

6.5. 作製したデバイスの評価

本研究で作製した EL 用デバイスは，電流注入による IV 特性の評価および，EL 光の観測に成功した．本節では，作製したデバイスから得られた IV 測定の結果，およびその考察について述べる．

6.5.1. IV 測定結果

本研究で作製したデバイスから得られた IV 特性を fig. 6.7 示す．この図を見ると，ダイオード特性のしきい値電圧が 0.5V 付近のものと，しきい値電圧が 2V 付近のもの二種類があることが分かる．本節では，前者をグループ①，後者をグループ②と呼称する．

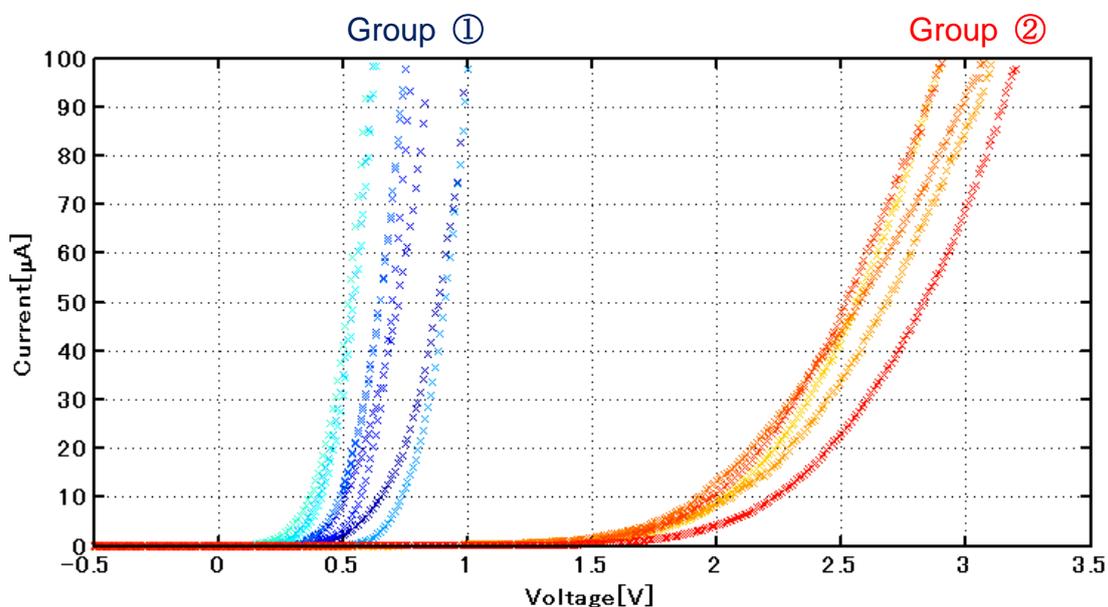


fig. 6.7 IV characteristics of EL devices

6.5.2. ダイオード特性の解析

測定によって得られたダイオード特性について，簡単に考察を行ってゆく．本研究で作製した金属キャビティレーザは，基本的に PIN 接合のダイオード構造をもっている．PIN 接合の内蔵電界 Φ_D は PN 接合の値と基本的に一緒であり，以下の式で表すことができる．

$$\Phi_D = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (6.1)$$

ここで， N_A : P 層のドーピング濃度， N_D : N 層のドーピング濃度， n_i : 半導体材料の真性キ

キャリア密度である。本研究で使用した P クラッド層, N クラッド層のドーピング濃度はともに $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, InP の真性キャリア密度はおよそ $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ であるから, PN 接合の内蔵電位は約 1.27V と算出することができる。

また, 本研究では P コンタクト層にドーピング濃度が $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 以上の InGaAs 層を用い, 銀と接触させることでコンタクトをとっている。ここでは銀と P コンタクト層の間でショットキー接合が形成されていると推測される。ショットキー接合の内蔵電位 Φ_D は, 以下の式から求めることができる。

$$\Phi_D = \chi + (E_c - E_v)/q - \Phi_M \quad (6.2)$$

ここで, χ : p 型半導体の電子親和力, E_c : 伝導帯エネルギー準位, E_v : 価電子帯エネルギー準位, Φ_M : 金属の仕事関数である。これを銀・pInGaAs 間について計算してみると, およそ 0.5~0.98V とまとまる。以上より, 金属キャビティレーザを PIN ダイオードとショットキー接合を直列に接続した回路だと考えると, しきい値電圧はおよそ 1.77~2.25V と推測できる。

以上の計算結果から考えて, 測定によって得られたグループ②のしきい値電圧は上記の値とよく一致していることから, PIN 接合に適切に電流を注入することに成功していると考えられる。一方, グループ①は, しきい値電圧が理論値に比べて小さい。これはデバイスの何処かでリークパスが生じ, そこで電極と半導体がショットキー接合を形成しているためではないかと考えている。これを確かめるには, デバイス内部を FIB 等によって開削して観察するか, P 電極同士で IV 特性を測定して, 原因を推定する必要がある。

6.5.3. 金属キャビティレーザの直列抵抗

ここから, PIN 接合が得られたグループ②について議論を進めてゆく。グループ②のデバイスは, 注入電流を増やしてゆくに連れてリーク電流が増えてゆき, ダイオード特性が劣化することがわかった。私は, この原因は P 電極における接触抵抗の発熱によるものではないかと考えた。そこで, これを確かめるために IV 特性からこの回路の直列抵抗を算出することによって接触抵抗の大きさを推測することにした。

ダイオードの電流電圧特性は, 一般的に以下の式で近似される。

$$I = I_0(\exp(qV/kT) - 1) \quad (6.3)$$

ここで, ダイオードに抵抗が直列に接続された場合を考えてみる。ダイオードに印加される電圧を $V_d(I)$ としたとき, 回路全体に印加される電圧 V は以下の式で表せる。

$$V = V_d(I) + IR_{series} \quad (6.4)$$

ただしここで、 R_{series} : 直列抵抗である。ここで、ダイオードに加わる電圧がしきい値電圧を超えると電流が立ち上がると近似すれば、しきい値電圧以上での直線の傾きを求めれば直列抵抗を求めることができる。ただし、これは非常に簡単なモデルを用いたものであり、正確な直列抵抗の値を求めるには式に基づいてフィッティングを行う必要があることに注意しなければならない。

fig. 6.7 のグループ②の直列抵抗を IV の傾きから算出したところ、おおよそ $8\sim 10\text{k}\Omega$ であることがわかった。ここで、この直列抵抗がすべて接触抵抗であると仮定した時に、キャビティに生じる熱の量を、PL 測定と比較することで検討してみることにした。例えば、PL 測定において波長 532nm で 1mW の励起光を入射した時を考える。 1mW のパワーによって励起されるキャリアのと同じ量のキャリアをキャビティに生成するには、 $429\mu\text{A}$ 以上の電流を流さなければならない。この電流を流した時、接触抵抗が $8\text{k}\Omega$ あったと仮定すると、この抵抗によって生じる熱は 1.472mW であり、PL 励起光のパワーよりも大きい事がわかる。PL 測定によってキャビティに生じた熱は 1mW より小さいはずである。しかし、PI 測定においては 1mW 以上の光を注入すると熱によってキャビティの特性が劣化した。つまり、 1.472mW という熱量はキャビティを劣化させるのに不足のない値であるといえる。

以上から私は、接触抵抗による発熱がキャビティ特性を劣化させたと考えている。熱による劣化の影響を抑えるためには、パルス電流源の利用や低温下での測定が必要である。

6.5.4. EL 光の観測

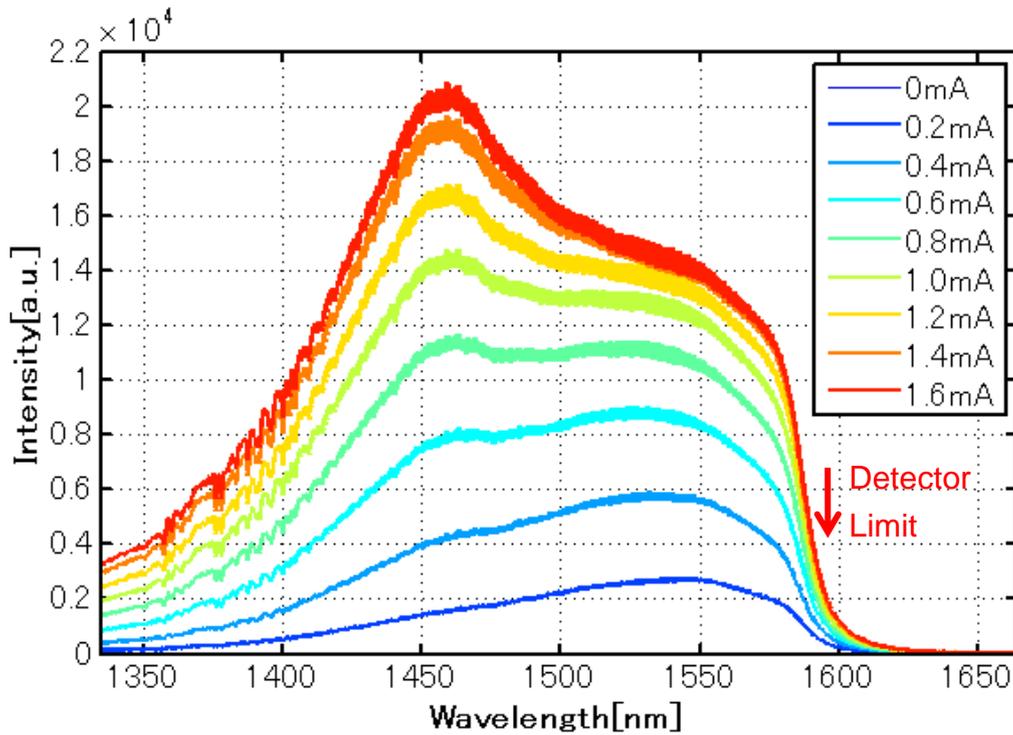


fig. 6.8 EL spectrum from metallic-cavity ($1.69 \times 1.82 \mu\text{m}$)

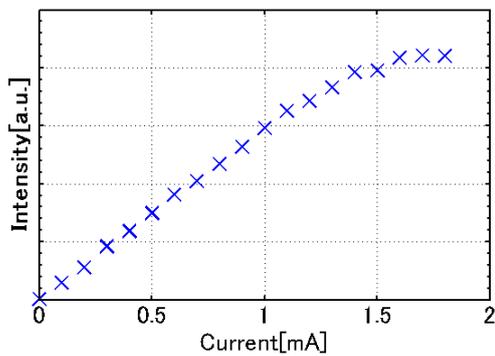


fig. 6.9 Maximum intensity versus injection current

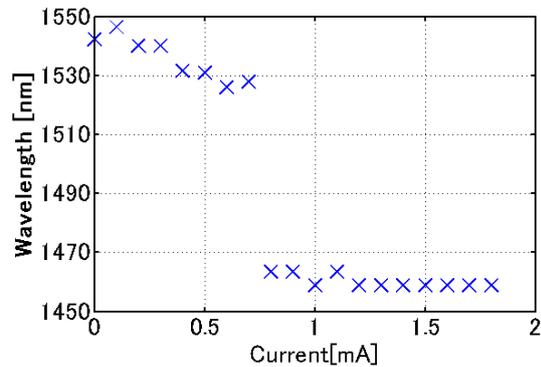


fig. 6.10 Wavelength at max intensity versus injection current

以上の考察から、グループ②は適切に PIN 接合へ電流が注入されていると判断し、大きさ $1.69 \times 1.82 \mu\text{m}$ のデバイスを電流源によって駆動した結果、EL 光の観測に成功した。

EL 光のスペクトルを fig. 6.8 に示す。この時注入したのは $0 \sim 1.6\text{mA}$ の直流電流で、電流量は図中の凡例に表記してある。発光スペクトルの最大強度の注入電流依存性を fig. 6.9 に、最大強度をとる波長の注入電流依存性 fig. 6.10 に示す。fig. 6.9 より、 $0 \sim 1.5\text{mA}$ まで

EL 光強度は線形に増加してゆくが、それ以上では飽和していることが確認できる。また、fig. 6.10 より、最大強度をとる波長が 0.8mA 付近でシフトしていることがわかる。

以上の結果から、適切に PIN 接合に電流注入が行われ、発光が生じていることを確認することが出来た。また、発光スペクトルおよび IL 曲線から、レーザではなく LED として動作していることがわかった。ただし、使用したディテクターの感度限界が 1.6 μm 付近にあるため、それ以上の波長ではスペクトルを観測できていないことに注意いただきたい。

また、fig. 6.10 における波長のシフトから、1460nm 付近においてキャビティ共振モードが存在する可能性が考えられるが、1.5mA 以上で飽和してしまっているため、厳密に確認することは出来なかった。飽和する原因は、接触抵抗によって生じる熱ではないかと私は考えている。

6.5.5. 改善すべき点

以上をふまえて、EL デバイスの作製・および測定において何を改善すべきか、以下の三つの観点から考える。

第一に、キャビティの特性という観点から考えてみる。光学特性については 5.5.3 項で述べたこととほとんど同じことが言える。エッチング特性のさらなる向上、金属の光学特性向上が重要となる。電気特性に関しては、ショットキー接合を解消し、接触抵抗を小さくする必要がある。これを実現するには、Pd/Pt など異なる材料で電極を形成することで接触抵抗を軽減する必要がある⁶¹。また、非発光再結合については 5.5.3 項と同様の注意が必要である。

第二に、プロセスの歩留まりという観点から考えてみる。今回作製したデバイスも歩留まりが非常に悪かった。この原因は、P・N 電極間にリークパスが生じているためではないかと私は考えている。これを確認するには、P 電極同士で IV 特性を測定するほか、FIB 装置等でキャビティ構造内部を観察し、壊れているキャビティと壊れていないキャビティを比較するなどの考察をおこなう必要がある。

第三に、測定方法という観点から考えてみる。今回、接触抵抗によって生じた熱がキャビティ特性を劣化させている可能性が示唆された。これを確認するためには、5.5.3 項で述べたとおり、測定温度によるキャビティ特性の変化を観測し、熱の効果がどの程度の影響を与えているか考察を行う必要がある。また、測定結果にたいして簡単なモデルを作成して比較することで、キャビティの特性を劣化させている原因が何であるか特定する必要がある。

6.6. まとめ

本章では, EL 測定用デバイスの作製をおよび評価をおこなった. まず, デバイスの構造, デバイスの作製, 作製の結果を示した. デバイスの測定の結果, EL 発光を観測した. また, IV 特性から歩留まりの低さと接触抵抗の大きさが示された.

第7章 結論

本研究では、高性能かつ実用的な金属キャビティレーザの実現を目指して研究をおこなってきた。そのために、ダイエレクトリック(TM)モードでのレーザ発振を目的とした素子の設計をおこなった。まず、目的の発振波長である $1.55\ \mu\text{m}$ において TM モードの利得を得られるように、作製に使用するウェハ層構造のコア層に引っ張り歪 MQW 構造を導入した。そのうえでファブリペローレーザのモデルを用いてキャビティ全体の特性の検討を行った。検討の結果、 1000cm^{-1} 以下のしきい値利得を実現できることがわかった。

また、金属キャビティレーザの作製プロセスおよび測定方法は当研究室では行われてこなかったため、これを確立した。まず、キャビティ構造の光学的特性を評価するために、PL 測定用デバイス構造の設計、および作製プロセスの開発を行った。このとき、基板除去技術を作製プロセスに導入した。つぎに、PL 測定をおこなうための測定システムを構築した。同様に、EL 測定用のデバイスの設計、および作製プロセスの開発、EL 測定システムの構築をおこなった。

以上に基づいて、まず PL 測定用のデバイスの作製、および評価を行った。その結果、 $1.06\ \mu\text{m} \times 2.29\ \mu\text{m}$ の構造において、キャビティの共振ピークを観測することに成功したが、レーザ発振は確認できなかった。PL スペクトルを解析した結果、共振ピークはプラズモニックモード(TE)であることが、共振波長から示唆された。そこで、作製した構造と同一の断面構造において導波路モードの計算を行ったところ、ダイエレクトリックモード(TM)よりもプラズモニックモード(TE)の方がよい特性を得られることがわかった。これは、キャビティ構造の幅が $1\ \mu\text{m}$ 以上であることに起因していることが推測された。以上の結果より、TMモードでの発振を実現するためには、幅をより狭くすること、MQW の TM 利得の得られる $1.55\ \mu\text{m}$ に共振波長が一致するように長さの設計をすることが必要であることがわかった。また、レーザ発振を実現できなかった理由として以下の二点が示唆された。第一に、ドライエッチングによって生じた側壁の傾きがキャビティの特性を劣化させている可能性があること。第二に、励起光として用いたレーザによって大きな発熱が生じていることである。

上記の問題点をふまえて、EL 測定用のデバイス作製、および評価を行った。その結果、キャビティ構造の PIN 接合の IV 特性、および EL 光の観測に成功した。EL 光を解析した結果、レーザ発振は実現されていないが、LED として動作していることを確認することが出来た。このとき、連続的に数 1mA 以上の電流を流すと、ダイオード特性が劣化してゆくことが確認された。また、IV 特性を解析したところ、 $8\sim 10\text{k}\Omega$ という非常に大きな直列抵抗があることが確認された。この直列抵抗は、P コンタクトにおける電極の接触抵抗によるものであり、これによって発熱が生じ、PIN 接合のダイオード特性を劣化させているのではないかと考えている。また、デバイス構造においてリークパスが存在し、PIN 接合に電流注入で

きているデバイスの数が少ないことがわかった。

以上より、金属キャビティレーザ実現への道筋が示された。まず、光学的特性の向上を目指して、エッチング形状の向上、構造の最適化を行なう必要がある。電気的特性向上のために、接触抵抗の小さい電極の形成が必要となる。また、熱による影響を考慮した構造の設計が必要である。このような問題を解決することで、キャビティの特性を向上し、電流注入でのレーザ発振が実現されることを期待する。さらに、本研究で確立した作製プロセスを発展させて、金属キャビティの導波路との結合、シリコン基板との集積など、実用的なデバイスとして運用されることを期待することができる。

参考文献

1. Hecht, J. Short history of laser development. *Opt. Eng.* **49**, 091002 (2010).
2. 池上徹彦. 半導体フォトニクス工学. (1995).
3. Miller, D. A. B. Optical Interconnects – Why We Need Them and How We Will Make Them.
4. KITA, S. *et al.* Photonic Crystal Nanolaser Biosensors. *IEICE Trans. Electron.* **E95-C**, 188–198 (2012).
5. 馬場俊彦 *et al.* フォトニック結晶ナノレーザを用いたバイオセンシング. 電子情報通信学会総合大会講演論文集 **2011**, SS-18“–”SS-19 (2011).
6. Takeda, K. *et al.* Few-fJ/bit data transmissions using directly modulated lambda-scale embedded active region photonic-crystal lasers. *Nat. Photonics* **7**, 569–575 (2013).
7. Hill, M. T. *et al.* Lasing in metallic-coated nanocavities. *Nat. Photonics* **1**, 589–594 (2007).
8. Oulton, R., Sorger, V., Zentgraf, T. & Ma, R. Plasmon lasers at deep subwavelength scale. *Nature* (2009). at <<http://www.nature.com/nature/journal/vaop/ncurrent/full/nature08364.html>>
9. Ma, R.-M., Oulton, R. F., Sorger, V. J., Bartal, G. & Zhang, X. Room-temperature sub-diffraction-limited plasmon laser by total internal reflection. *Nat. Mater.* **10**, 110–3 (2011).
10. Noginov, M. A. *et al.* Demonstration of a spaser-based nanolaser. *Nature* **460**, 1110–2 (2009).
11. Khajavikhan, M. *et al.* Thresholdless nanoscale coaxial lasers. *Nature* **482**, 204–7 (2012).
12. 沼居貴陽. 半導体レーザ工学の基礎. (1996).

13. Hill, M. T. *et al.* Lasing in metal-insulator-metal sub-wavelength plasmonic waveguides. *Opt. Express* **17**, 11107 (2009).
14. Nezhad, M. P. *et al.* Room-temperature subwavelength metallo-dielectric lasers. *Nat. Photonics* **4**, 395–399 (2010).
15. Lee, J., Khajavikhan, M. & Simic, A. Electrically pumped sub-wavelength metallo-dielectric pedestal pillar lasers. *Opt. Express* **19**, 21524–21531 (2011).
16. Ding, K. *et al.* Room-temperature continuous wave lasing in deep-subwavelength metallic cavities under electrical injection. *Phys. Rev. B* **85**, 041301 (2012).
17. Roelkens, G. *et al.* III-V/Si photonics by die-to-wafer bonding. *Mater. Today* **10**, 36–43 (2007).
18. Deura, M. *et al.* Effect of Ga content on crystal shape in micro-channel selective-area MOVPE of InGaAs on Si. *J. Cryst. Growth* **310**, 4768–4771 (2008).
19. Yokoyama, M. *et al.* Thin Body III–V–Semiconductor-on-Insulator Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistors on Si Fabricated Using Direct Wafer Bonding. *Appl. Phys. Express* **2**, 124501 (2009).
20. Roelkens, G., Van Thourhout, D., Baets, R., Nötzel, R. & Smit, M. Laser emission and photodetection in an InP/InGaAsP layer integrated on and coupled to a Silicon-on-Insulator waveguide circuit. *Opt. Express* **14**, 8154 (2006).
21. Morthier, G., Spuesens, T., Mechet, P., Roelkens, G. & Van Thourhout, D. InP microdisk lasers integrated on Si for Optical Interconnects.
22. Van Campenhout, J. *et al.* Electrically pumped InP-based microdisk lasers integrated with a nanophotonic silicon-on-insulator waveguide circuit. *Opt. Express* **15**, 6744 (2007).
23. Mitze, T. *et al.* Hybrid integration of III/V lasers on a Silicon-on-Insulator (SOI) optical board. in *2005 IEEE Int. Conf. Gr. IV Photonics* **2005**, 210–212 (IEEE, 2005).

24. Hirano, T. 電磁界シミュレーションの概要と基礎原理 –簡単な1次元問題による説明–.
25. Kocabaş, Ş. Nano-metallic optics for waveguides and photodetectors. (2009). at <http://home.ku.edu.tr/~ekocabas/publications/kocabasThesis_doubleSided.pdf>
26. 永島圭介. 表面プラズモンの基礎と応用. プラズマ・核融合学会誌 **84**, 10–18 (2008).
27. Sze, S. Semiconductor devices: physics and technology. (2008). at <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Semiconductor+Devices:+Physics+and+Technology#0>>
28. Coldren, L. A., Corzine, S. W. & Mashanovitch, M. L. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*. (2012). at <<http://books.google.com/books?hl=ja&lr=&id=D6Ub126rtPoC&pgis=1>>
29. 沖本拓也. 微小金属キャビティ半導体レーザーの設計と試作. (2013).
30. 高橋元悟. 導波路型光アイソレータを一体集積化した半導体リングレーザー. (2010).
31. COMSOL Multiphysics. at <<http://www.comsol.jp/>>
32. Ryu, S., Kim, I., Jeong, W. G., Choe, B. & Park, S. Theoretical investigation of gain and linewidth enhancement factor for 1.55- μm tensile strained quantum-well lasers. *J. Light. Technol.* **15**, 711–716 (1997).
33. Pta, A., Soma, T., Satoh, J. & Matsuo, H. Thermal expansion coefficient of GaAs and InP. *Solid State Commun.* **42**, 889–892 (1982).
34. Cverna, F. ASM Ready Reference: Thermal Properties of Metals.
35. Lucovsky, G. Low-temperature growth of silicon dioxide films: A study of chemical bonding by ellipsometry and infrared spectroscopy. *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.* **5**, 530 (1987).

36. CYCLOTENE™ 4000 Series Advanced Electronics Resins (Photo BCB). at <http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_0055/0901b8038005510a.pdf>
37. フォトニース UR-3100E. at <<http://www.toray.jp/electronic/semicon/fot/>>
38. Yoon, J.-B., Oh, G. Y., Han, C.-H., Yoon, E. & Kim, C.-K. Planarization and trench filling on severe surface topography with thick photoresist for MEMS. in *Micromach. Microfabr.* (Smith, J. H.) **3511**, 297–306 (International Society for Optics and Photonics, 1998).
39. 小林春洋. 絵とき薄膜基礎のきそ.
40. Benjamin, P. & Weaver, C. The adhesion of evaporated metal films on glass. ... *R. ...* (1961). at <<http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/261/1307/516.short>>
41. Ghorbanpour, M. & Falamaki, C. A novel method for the production of highly adherent Au layers on glass substrates used in surface plasmon resonance analysis: substitution of Cr or Ti intermediate layers with Ag layer followed by an optimal annealing treatment. *J. Nanostructure Chem.* **3**, 66 (2013).
42. Kikuchi, A., Baba, S. & Kinbara, A. Measurement of the adhesion of silver films to glass substrates. *Thin Solid Films* **124**, 343–349 (1985).
43. 斧高一 & 江利口浩二. 2.ドライエッチングのモデルとその実験検証(<小特集>ドライエッチングの科学と技術の新局面). *プラズマ・核融合学会誌* **85**, 165–176 (2009).
44. Levy, R. A. *Microelectronic Materials and Processes*. (1989).
45. Kariniemi, M. *et al.* Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition of Silver Thin Films. *Chem. Mater.* **23**, 2901–2907 (2011).
46. Cooper, K. *et al.* LITHOGRAPHIC CHALLENGES AND SOLUTIONS FOR 3D INTERCONNECT Goal : Uniform coating of topography. 74–82
47. 横山浩. 電子線リソグラフィ教本. (2007).

48. CRESTEC CABL-9200TFTN. at <<http://www.crestec8.co.jp/>>
49. Zaitso, M. Polarization Control inside Photonic Integrated Circuits Using InP Half-Ridge Polarization Converters InP. (2013).
50. Schrauwen, J., Van Thourhout, D. & Baets, R. Focused-Ion-Beam Fabricated Vertical Fiber Couplers on Silicon-on-Insulator Waveguides. in *3rd IEEE Int. Conf. Gr. IV Photonics, 2006*. 101–103 (IEEE, 2006).
doi:10.1109/GROUP4.2006.1708179
51. 丹呉浩侑. 半導体プロセス技術.
52. Franz, G. Reactive ion etching GaAs and AlAs: Kinetics and process monitoring. *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.* **14**, 126 (1996).
53. 杉山 正和, アル-アミン アブドゥッラー, 櫻井 謙司, 宋 学良, イット フー チ ョン, 李 寧, 脇 一太郎, 霜垣 幸浩, 中野 義昭. 化合物半導体集積光デバイスとドライエッチング技術. at
<https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvsj/48/9/48_9_511/_article/-char/ja/>
54. Parker, J. S., Norberg, E. J., Guzzon, R. S., Nicholes, S. C. & Coldren, L. a. High verticality InP/InGaAsP etching in Cl₂/H₂/Ar inductively coupled plasma for photonic integrated circuits. *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.* **29**, 011016 (2011).
55. Constantine, C., Barratt, C., Pearton, S. J., Ren, F. & Lothian, J. R. Smooth, low-bias plasma etching of InP in microwave Cl₂/CH₄/H₂ mixtures. *Appl. Phys. Lett.* **61**, 2899 (1992).
56. Lin, L., Cheng, Y.-T. & Najafi, K. Formation of Silicon-Gold Eutectic Bond Using Localized Heating Method. *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, L1412–L1414 (1998).
57. Watanabe, K. *et al.* Thin-Film InGaAs/GaAsP MQWs Solar Cell With Backside Nanoimprinted Pattern for Light Trapping. *IEEE J. Photovoltaics* 1–5 (2014).
doi:10.1109/JPHOTOV.2014.2312486

58. Niklaus, F., Enoksson, P., Kälvesten, E. & Stemme, G. Low-temperature full wafer adhesive bonding. *J. Micromechanics Microengineering* **11**, 100–107 (2001).
59. LabVIEW. at <<http://www.ni.com/labview/ja/>>
60. Ocola, L. E. & Stein, a. Effect of cold development on improvement in electron-beam nanopatterning resolution and line roughness. *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.* **24**, 3061 (2006).
61. Ressel, P., Vogel, K., Fritzsche, D. & Mause, K. Nonalloyed ohmic contacts for p+-type InGaAs base layer in HBTs. *Electron. Lett.* **28**, 2237 (1992).
62. Wilkinson, C. D. W. & Rahman, M. Dry etching and sputtering. *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.* **362**, 125–38 (2004).

本研究に関わる発表等

- [1] 沖本 拓也, 財津 優, 張 柏富, 井上 智之, 種村 拓夫, 中野 義昭, "金属キャビティ TM モード MQW レーザの設計と試作", 第 61 回応用物理学会春季学術講演会 (青山学院大学), 20a-F8-9, 2014 年 3 月
- [2] Baifu Zhang, Takuya Okimoto, Takuo Tanemura and Yoshiaki nakano, "Capsule-Shaped Metallic-Cavity Laser with Reduced Plasmonic Loss", 2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (2014CLEO), JTh2A, San Jose, CA, USA, June 2014.(accepted)
- [3] Baifu Zhang, Takuya Okimoto, Takuo Tanemura and Yoshiaki nakano, "Proposal and Numerical Study on Capsule-Shaped Nanometallic Semiconductor Lasers", Japanese Journal of Applied Physics (accepted)
- [4] 張 柏富, 沖本 拓也, 種村 拓夫, 中野 義昭, "InP/InGaAs カプセル型金属キャビティ構造の作製とフォトルミネッセンス評価", 第 62 回応用物理学会春季学術講演会 (東海大学), 2014 年 3 月, (投稿中)

謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの方々のご協力を賜りました。この場を借りて、深く感謝を申し上げます。

種村拓夫准教授には、学部四年生の頃から三年間にわたって、本研究および本論文のご指導を頂きました。本研究に関する基礎的な知識から、研究における姿勢・考え方、研究発表におけるテクニックなど、数多くの事柄を教えていただきました。研究に行き詰まったときには、鋭い視点から本質的な問題を見抜き、私を正しい方向へと導いてくださいました。また、就職活動など私の個人的な悩みのご相談にも乗って頂きました。中野義昭教授には、研究室会議等において、半導体レーザの専門家として有益なアドバイスを多くいただきました。また、素晴らしい研究環境を提供して下さり三年間自由に研究活動を行うことが出来ました。杉山正和准教授からは、研究室発表などにおいて適切なアドバイスを頂きました。また、研究に対する徹底した姿勢から多くのことを学びました。竹中充准教授には、たびたびのプロセス装置使用を快く了承していただきました。加藤雄一郎准教授には、素晴らしい測定プログラムを提供していただき、そのおかげで本研究に欠かすこと出来ない測定システムを確立することが出来ました。

渡辺健太郎助教からは、作製プロセスから装置の管理に至るまで、様々な面でご指導頂きました。研究室発表においても毎回適切な助言をくださり、本研究をよりよいものとすることが出来ました。肥後昭男助教は、この研究室を離れられた後でもたびたび装置の使用法や作製に関する技術などを教えて下さいました。久保田雅則助教には、武田クリーンルームの装置を使用する際に快くご協力を頂きました。王云鵬助教、ソダーバンルハッサネット助教からも研究を進める上で多くのご協力をいただきました。

財津優氏には、本研究をおこなうにあたって不可欠な、ありとあらゆるものを賜りました。学部四年生で右も左も分からなかった私に、装置の使用法、測定手法、発表の技術などの基本的な技能から、研究に対する心構えまで、丁寧に根気よく教えて下さいました。張柏富氏には、同じ研究テーマに取り組み、研究を前進させるために必要な多くのご協力を賜りました。特に数値計算やデバイスの構造設計に関して多くの助言を頂きました。

同期の四人、綾田雅文氏、井上智之氏、渡邊冬馬氏、トープラサートボン・カシディット氏には、研究室生活三年間にわたって大変お世話になりました。各自の研究テーマに関わらず、常に活発な議論を通じて互いに競い、励まし合いながら、騒がしくも楽しい三年間を過ごすことが出来ました。また、ここに記すことの出来なかった中野・杉山・種村研究室の方々にも深く感謝しております。

最後に、私の研究生生活を支えてくださった家族、友人、そして本研究に協力して下さったすべての方へ、あらためて深く感謝の念を表して、謝辞にかえさせていただきます。