

## 2. 「MOCVD法によるサファイア基板上 GaN系青色面発光レーザーに関する研究」



# 第 1 章

## 序論

### 1.1 はじめに

1900 年代最後の年となった 1999 年、研究機関での薬物混入事件や核燃料処理施設での臨界事故など、信じられないような事件事故が相次いだ。また、インターネットを利用した毒物の違法な取引が行われたり、小中学生による詐欺事件も発生し、インターネットの爆発的な普及には目を見張るものがある。平成 11 年版通信白書によれば、平成 10 年における日本のインターネット人口は約 1,700 万人と推計されており、商用利用開始後わずか 5 年で世帯普及率が 10 %を超えることになった<sup>1)</sup>。また、国の機関においてもホームページの開設が進み、情報の提供、意見募集への利用が本格化し、就職・採用活動には既にインターネットの利用が定着している。その背景には、女性のインターネット利用が増加したこと、若者による趣味娯楽のための利用、シニアは趣味や自己啓発の機会として期待するなど、その多岐にわたる利用法は非常に大きな可能性を秘めている。

高度情報化社会と言われるようになって久しいが、このようなインターネットの爆発的な広がりにより、その言葉はまさに現実のものとなった。その発展の中心には常に光技術が大きな比重を占めて来た。それは光ファイバ網をはじめとする世界的な情報基盤整備から、レーザプリンタ、CD (compact disk), DVD (digital versatile (video) disk, DVD は特定の言葉の略語ではない)といった身近なものにまで至っている。発振波長 750 nm の近赤外線半導体レーザを用いた記録容量が 650 メガバイト(MB; megabyte)の CD に対し、発振波長 635 または 650 nm の赤色半導体レーザを用いた DVD は、そ

の記録容量が約7倍の4.7ギガバイト(GB; gigabyte) (再生専用の片面、単層120 mm ディスク、表1.1 DVD規格参照)へと大幅に増加し、DVD-R (追記型)、DVD-RAM あるいはDVD-RW (書き換え可能型)の開発により、その用途は映像・音楽の分野から大容量データストレージへ、さらには次世代ゲーム機へも広がりを見せている。米国でのDVDプレーヤの世帯普及率は2000年には10%を超える見込みで、全世界でDVDプレーヤを所有する家庭は1999年には対前年比で247%増の850万世帯にのぼっている。また、CD再生用のレーザとDVD再生用の2つのレーザを1チップに作製する技術がSONY、松下電器産業など各社で開発され、さらにCD-R、RWへの書き込み可能な高出力動作も実現されるなど、CDとDVD両方の再生あるいは書き込みができるプレーヤの開発も進んでいる。ゲーム機の分野でも、DVDがデジタルネットワーク家電の核と言われる次世代ゲーム機に相次いで採用され、ネットワーク化の波はさらに広がりを見せる。

1977年に伊賀等によって提案された面発光レーザはこのような次世代デジタルネットワーク化の基幹を成す光ファイバ通信、高速光LAN、光インターコネクトなど、新領域の光エレクトロニクスのキーデバイスとして、最も活発に研究されている半導体レーザの一つとなっている。非常に薄い活性層、非常に小さい共振器により、まさにレーザと呼ぶのにふさわしい丸い光が出てくるのが最も特徴的なところである。さらに2次元高密度集積化が可能なレーザの形式である。

一方、GaNおよびその混晶系は化学的に安定で、直接遷移型のバンドギャップを持ち、その発光波長は近紫外域から可視光をカバーすることから、これまでに実現されていなかった青色など、短波長発光材料として位置づけられている。既に青色LEDは製品化され、その売り上げは好調で新たなアプリケーションの登場によりさらなる市場の拡大が期待される。また、1999年10月1日には405 nmの波長で発振する紫色半導体レーザが日亜化学工業からサンプル出荷され、これを用いたパイオニアのデモンストレーションは次世代DVDにおいて片面が2層化された直径120 mmの専用光ディスクに27.4 GBの高密度記録を実現した。

本研究で実現を目指すGaN系面発光レーザは、この高密度光記録用の短波長発光レーザを2次元に集積化させることのできるレーザであり、さらなる発展が期待される。

## 1.2 結晶成長について

有機金属化合物(metal organic compound)は金属原子と炭素原子の間に直接結合を持つ化合物で、一般に揮発性で熱力学的に不安定であり、加熱により分解が起こり金属を遊離する。この性質を利用し、加熱した基板結晶表面に有機金属化合物と水素化物を同時に供給することで、熱分解反応によりエピタキシャル成長を行うのが有機金属気相成長(MOCVD; metal organic chemical vapor deposition)法の基本的な原理である。1968年に Manasevit により始められた MOCVD 法による GaAs のエピタキシャル成長は<sup>2)</sup>、当初、原料の有機金属の純度が低かったため、作製された結晶の品質は低いものであった。しかし、原料の精製技術の向上や、成長条件、使用する原料の最適化が進み、極めて高純度の結晶が得られるまでに至り、その成長技術は今日までに大きな進歩を遂げている。MOCVD 法によるエピタキシャル成長の大きな特徴として、

- (1) 原料が全て気相状態で供給され、原料供給量の制御が容易
- (2) 混晶組成は供給する原料の組成比で制御可能
- (3) 原料選択の自由度が大きい
- (4) 急峻な界面が比較的容易に作製できる

などが挙げられる。

本研究では、日本酸素製 常圧横型高速三層流 MOCVD 装置を使用した。フェイスアップ型の本装置は、グラファイト製サセプタ上に 2 インチ基板を配備し、サセプタ直下に配置されたグラファイトヒータの抵抗加熱により 1200℃まで昇温が可能である。熱電対が加熱部付近に設置されているが、これは基板温度でもサセプタ温度でもないため、これらの温度の目安とした。ステンレス製のリアクタ内には三層流を形成する石英ガラス製のフローチャネルが設置されている。この三層流の下部に V 族原料とそのキャリアガスが、中間には III 族原料とそのキャリアガス、上部には成長には直接関係しないガスが流れる。これら反応ガスはリアクタ内まで隔離されて輸送される。成長における全てのシーケンス制御はパソコン上のプログラムにより行う。

III 族原料にはトリメチルガリウム(TMGa; trimethylgallium), トリメチルアルミニウム(TMAI; trimethylaluminum), トリメチルインジウム(TMIn; trimethylindium)を、V 族原料にはアンモニアを使用した。また、n 型ドーパントには水素希釈 10 ppm (part per million)のモノシラン(SiH<sub>4</sub>)を、p 型ドーパントにはビスマグネシウム(Cp<sub>2</sub>Mg; bis

(cyclopentadienyl) magnesium)を用いた。キャリアガスには水素および窒素が用いられ、これらは精製機を通して使用している。バルブ制御には外部に設置された CE(cold evaporation)タンクの窒素が直接用いられる。III 族原料とドーパントの性質を表 1.2 に、GaN およびその成長に用いられる基板材料の特性を表 1.3 に示す。

### 1.3 本論文の構成

本論文では GaN 系面発光レーザの実現に向け、それに必要となる GaN/AlGa<sub>N</sub> 半導体多層膜反射鏡、及び、誘電体多層膜反射鏡の作製を行ない、また、GaN/AlGa<sub>N</sub> 半導体多層膜反射鏡を用いた青色発光ダイオード(LED; light-emitting-diode)を作製した。第 2 章では面発光レーザの発振条件について述べ、第 3 章では GaN 系面発光レーザ用反射鏡について述べる。そして、第 4 章で面発光レーザ実現に向けた準備段階として GaN/AlGa<sub>N</sub> 多層膜反射鏡を用いた電流注入型デバイスとなる青色 LED を作製し、その特性について述べ、最後にまとめとした。

表 1.1 DVD 規格

物理フォーマット	
ディスク直径	120mm / 80 mm
ディスク基板厚さ	0.6 mm を 2 枚はり合わせ
ディスク中心の穴径	15 mm
データの記録範囲	直径 48 mm～同 116 mm
トラックピッチ	0.74 $\mu\text{m}$
最短記録ピット長	0.4 $\mu\text{m}$ (2 層ディスクは 0.44 $\mu\text{m}$ )
最長記録ピット長	1.87 $\mu\text{m}$ (2 層ディスクは 2.05 $\mu\text{m}$ )
1 ビット当たりの記録長	0.266 $\mu\text{m}$
光源の波長	635 または 650 nm
対物レンズの開口数(NA)	標準で 0.6
記録符号化方式	8/16 変調(EFM plus)
線速度	標準で 3.49 m/sec
記録容量	再生専用の片面単層 直径 120 mm で 4.7 GB 再生専用の片面 2 層 直径 120 mm で 8.5 GB 再生専用の両面単層 直径 120 mm で 9.4 GB 再生専用の両面 2 層 直径 120 mm で 17 GB

Outline of Specification / DVD-R	
Storage capacity:	3.95 GB (single sided) / 7.9 GB (double sided) ... 120 mm 1.23 GB (single sided) / 2.46 GB (double sided) ... 80 mm
Disc diameter:	120 mm / 80 mm
Disc thickness:	1.2 mm (0.6 mm x 2: bonded structure)
Recording method:	Laser power modulation
Laser wavelength:	635 nm (recording), 635/650 nm (playback)
Numerical Aperture of lens:	0.6
Data bit length:	0.293 $\mu\text{m}$
Track pitch:	0.80 $\mu\text{m}$
Track format:	Wobble & Land pre-pit method, Groove recording method
Modulation system:	8/16
Error correction system:	Read-Solomon Product Code

Outline of Specification / DVD-RAM	
Storage capacity:	2.6 GB (single sided) / 5.2 GB (two sided)
Disc diameter:	120 mm
Disc thickness:	1.2 mm (0.6 mm x 2: bonded structure)
Recording method:	Phase change
Laser wavelength:	650 nm (recording/playback)
Numerical Aperture of lens:	0.6
Data bit length:	0.41-0.43 $\mu\text{m}$
Track pitch:	0.74 $\mu\text{m}$
Track format:	Wobble land groove recording method
Modulation system:	8/16
Error correction system:	Read-Solomon Product Code

表 1.2 III 族原料とドーパントの性質<sup>3)</sup>

略号	分子式	分子量	融点 (°C)	沸点 (°C)	蒸気圧 ( $P(\text{mmHg}), T(\text{K})$ )
TMGa	$(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$	114.82	-15.8	55.7	$\log_{10}P=-1703/T+8.07$
TMAI	$(\text{CH}_3)_3\text{Al}$	72.09	15.3	126	$\log_{10}P=-2188.2/T+8.418$
TMIn	$(\text{CH}_3)_3\text{In}$	159.93	88	134	$\log_{10}P=-3014/T+10.52$
$\text{Cp}_2\text{Mg}$	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{Mg}$	154.49	176	—	$\text{Log}_{10}P=-3413/T+10.13$

表 1.3 GaN および基板材料の物性<sup>4,5)</sup>

	結晶構造	格子定数 (Å)	$E_g$ (eV)	熱膨張係数 $10^{-6} (\text{K}^{-1})$	熱伝導率 ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
GaN	WZ	$c=5.185$	3.39 (300K)	$c_{\parallel} 3.17$ (300-700K) $c_{\parallel} 7.75$ (700-900K) $c_{\perp} 5.59$ (300-900K)	130 (300K)
AlN	ZB	$a=4.52$	3.2-3.45 (300K)		
	WZ	$c=4.982$	6.2 (300K)	$c_{\parallel} 5.27$ (300-700K) $c_{\perp} 4.15$ (300-900K)	285 (300K)
		$a=3.112$	3.28 (5 K)		
InN	ZB	$a=4.38$	5.11 (間接)		
	WZ	$a=3.548$	1.89 (300K)	$c_{\parallel} 2.7-3.7$ (190-560K) $c_{\perp} 3.40-5.70$ (190-560K)	80
		$a=5.760$			
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	ZB	$a=4.98$	2.2 (300K)		
	Cor	$c=12.991$		$c_{\parallel} 8.5$	35
		$a=4.758$		$c_{\perp} 7.5$	
6H-SiC		$c=15.12$		$c_{\parallel} 4.68$	490
		$a=3.08$		$c_{\perp} 4.2$	
Si	Di	$a=5.43095$	1.12	2.4	151
GaAs	ZB	$a=5.4533$	1.42	6.40	54
ZnO	WZ	$c=5.213$	3.3	$c_{\parallel} 4.75$	60
		$a=3.252$		$c_{\perp} 2.9$	

WZ (wurtzite); ウルツ鉱構造、ZB (zincblende); 閃亜鉛鉱構造、Cor (corundum); コランダム構造、Di (diamond); ダイヤモンド構造

## 参考文献

- 1) 平成 11 年版 通信白書
- 2) H. M. Manasevit, Appl. Phys. Lett. **12**, 156 (1968).
- 3) 永井治男, 安達定雄, 福井孝志, “III-V 族半導体混晶”, コロナ社 (1988).
- 4) 赤崎勇, “III-V 族化合物半導体”, 培風館 (1994).
- 5) 赤崎勇, “III 族窒化物半導体”, 培風館 (1999).

## 第 2 章

# 面発光レーザ

### 2.1 はじめに

半導体基板と垂直な方向に光が取り出されるように考えられた、半導体レーザの一種である面発光レーザは 1977 年に Iga 等によって提案され<sup>1)</sup>、光エレクトロニクス分野におけるキーデバイスとして最も活発に研究されている半導体レーザの一つとなっている。その発振波長も 1.3~1.5  $\mu\text{m}$  帯の光通信用から、0.65~0.78  $\mu\text{m}$  の赤色、0.85~1.0  $\mu\text{m}$  の近赤外域と研究開発が進み、最近では短波長域である青色面発光レーザの実現に向けた研究も活発になってきた<sup>2-8)</sup>。

面発光レーザは同一基板上に 2 次元的に多くの素子を集積できることが大きな特徴となっている。これは高集積発光素子としてだけでなく、光を用いた情報通信、記録などの集積化にも応用が期待できる<sup>9)</sup>。面発光レーザの電流注入による発振は 1979 年に Soda 等によってはじめて実現された<sup>10)</sup>。活性層には GaInAsP が用いられ、n 型 InP 基板上に作製されたこのレーザは、n 側電極に内径 100  $\mu\text{m}$  の Au/Sn リング電極が、p 側電極に直径 50  $\mu\text{m}$  の Au/Zn 円電極が作製された。p 側電極は反射鏡の役割も果たし、n 側反射鏡として Au が Au/Sn リング電極の内側に形成された。共振器長は約 90  $\mu\text{m}$  で、77 K でのパルス発振であった。このときの閾値電流は 800 mA を超えており、閾値電流密度も 11 kA/cm<sup>2</sup> であった。この新しい半導体レーザは当初 Area Emitting Laser と名付けられたが、光を垂直方向に出射するレーザとして Surface Emitting (SE) Laser, あるいは Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) と呼ばれるようになり、現在広くこの名称が用いられるようになった。

1990年代に入ってから多くの研究機関でいろいろな形状の面発光レーザが開発されるようになり、面発光レーザは低閾値動作において大きな発展を遂げた。1 mA以下の低閾値動作が実現されるなど<sup>11-13)</sup>、面発光レーザの閾値電流はおよそ4年に1桁の割合で減少しており、1998年時点ですでに市販の半導体レーザに比べて3桁以上小さく、現在では $\mu\text{A}$ の領域に入ってきた<sup>14-16)</sup>。

面発光レーザは光並列処理と共に低消費電力デバイスとして、その特性は水平共振器型の半導体レーザの特性を大きく上回っており、様々な応用が期待されるレーザの形式である。

## 2.2 面発光レーザの構造と特徴

面発光レーザは基板と垂直方向に光を出射するレーザの形式であり、基板と垂直にレーザ共振器を構成する垂直共振器型をはじめ、回折格子や $45^\circ$ 反射鏡を用いて光を基板と垂直方向に取り出す構造など、いろいろな形式のものがある。これまでに提案された面発光レーザはレーザ共振器の構造から、

- i) 垂直共振器型
- ii) 水平共振器型（回折格子型、 $45^\circ$ 反射鏡型）
- iii) 曲がり共振器型（曲がり導波路型、 $45^\circ$ 内部反射鏡型）

の3種類に分けられる。特に、本研究で扱う垂直共振器型面発光レーザには次のような優れた特徴がある。

- a) 活性層体積が小さくできることから、極低閾値動作が可能
- b) 共振器長が波長に近いことから、動的単一モード性に優れている
- c) 高密度2次元アレー化が可能
- d) プロセスがモノリシックな一貫製法によりできる
- e) 初期試験が一括ででき、チップ価格が大幅に低減できる
- f) ボンディングやパッケージがしやすい
- g) 光ファイバへの結合がやさしい

垂直共振器型の面発光レーザは活性領域の径を小さくすることにより、極めて低い閾値電流のレーザ動作が期待できる。

## 2.3 面発光レーザの発振条件<sup>17,18)</sup>

面発光レーザが通常の端面発光型のストライプレーザと最も大きく違う点は、共振器長が通常 300  $\mu\text{m}$  程度あるストライプレーザに対して面発光レーザは波長と同程度であり、横方向も同様に波長の大きさまで小さくできるという点である。面発光レーザとストライプレーザのモデルを図 2.1 に示す。

発振条件はレーザの活性媒質の利得が共振器の損失を保証できるという条件で次式のように表される。

$$\xi g_{th} = \alpha_a + \alpha_d + \alpha_m \quad (2.1)$$

ここで、各パラメータを以下で定義する。

$\alpha_a$ : 光吸収損 (自由キャリア、その他の光吸収を含む)

$\alpha_d$ : 回折損 (反射鏡における回折損を等価的に表したもの)

$\alpha_m$ : 反射損 (反射鏡における等価損)

$A_0$ : 微分利得係数 (キャリアの増分に対する光利得の増分比  $= dg/dN$ )

$B_{eff}$ : 実効再結合係数 (再結合の強さを 2 乗で近似したときの等価的係数)

$d$ : 活性層厚 (多重量子井戸の場合は全領域の総和)

$D$ : 活性層径 (キャリアの拡散があるとき、等価的な直径で表す)

$L$ : 共振器長 (反射鏡でのしみ出しを含む)

$N_t$ : 透明キャリア密度 (光利得が現れ始めるキャリア密度)

$\tau_s$ : 電子、正孔の再結合寿命時間

$\xi$ : 光閉じ込め係数 ( $= \xi_l \xi_r$ )

$\xi_l$ : 光閉じ込め係数 (縦方向における光が活性層に存在する割合)

$= d/L$  (活性層厚が光定在波に比べて大きいとき)

$= 2d/L$  (活性層厚が光定在波に比べて非常に小さいとき)

$\xi_r$ : 光閉じ込め係数 (横方向における光が活性層に存在する割合)

$\eta_i$ : 注入効率 (キャリアが活性層に注入される効率)

$\eta_{spont}$ : 自然放出の効率 (再結合によって光放出する効率)

まず、面発光レーザの閾値電流密度  $J_{th}$  を求める。

利得と注入キャリアとの関係、

$$g = A_0(N - N_t) = (dg/dN)(N - N_t) \quad (2.2)$$

より、閾値キャリア密度は、

$$N_{th} = N_t + \frac{g_{th}}{(dg/dN)} \quad (2.3)$$

となる。さらに、電流密度とキャリア密度の関係、

$$J = \frac{ed}{\eta_i \tau_s} N \quad (2.4)$$

と、誘導放出の確率（キャリア寿命の逆数）をキャリア密度の1次項で近似した次式、

$$\frac{1}{\tau_s} = \frac{B_{eff} N}{\eta_{spon}} \quad (2.5)$$

より、

$$J_{th} = \frac{ed}{\eta_i \tau_s} N_{th} \equiv \frac{edB_{eff}}{\eta_i \eta_{spon}} N_{th}^2 \quad (2.6)$$

となる。ここで  $e$  は電子の電荷である。直径  $D$  の活性領域を持つ面発光レーザの閾値電流は、閾値電流密度  $J_{th}$  の式(2.6)から次式で表される。

$$I_{th} \equiv \frac{edB_{eff}}{\eta_i \eta_{spon}} \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 N_{th}^2 = \frac{eB_{eff} V_a}{\eta_i \eta_{spon}} N_{th}^2 \quad (2.7)$$

ここで、 $V_a$  は活性層体積で、

$$V_a = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 d \quad (2.8)$$

である。また、 $N_{th}$  は発振条件を満たす時の活性領域の電子密度であり、式(2.1)と(2.3)より、

$$N_{th} = N_t + \frac{\alpha_a + \alpha_d + \alpha_m}{(dg/dN)\xi} = N_t + \frac{\alpha_a + \alpha_d + \alpha_m}{(dg/dN)\xi_l \xi_t} \quad (2.9)$$

で与えられる。式(2.9)の分母にある縦方向の閉じ込め係数  $\xi_t$  において、非常に薄い量子井戸が縦モード定在波の腹にあるときはバルク活性層の場合の2倍となる。

次に、面発光レーザの微分量子効率について考える。レーザの出力効率は反射鏡と取り出し効率と内部損失とで決まる。共振器中の光の寿命  $\tau_p$  は、

$$\tau_p = \frac{n_{eq}/c}{\alpha_a + \alpha_d + \alpha_m} \quad (2.10)$$

で表される。 $n_{eq}$  は等価屈折率、 $c$  は光速である。ここで、共振器の反射損を、

$$\alpha_m = \frac{1}{L} \ln \left( \frac{1}{R_m} \right) \quad (2.11)$$

とした。 $R_m$ はn側とp側の反射鏡の反射率の自乗平均で、出射側の反射率を $R_f$ 、裏面の反射率を $R_r$ とすれば、

$$R_m = \sqrt{R_f \times R_r} \quad (2.12)$$

である。出力効率 $\eta_d$ は、

$$\eta_d = \frac{\alpha_m}{\alpha_a + \alpha_d + \alpha_m} \quad (2.13)$$

で与えられる。面発光レーザは、反射率が高いため効率が小さくなりそうだが、共振器長が短くできるため反射損失がストライプレーザと同程度以上となる。

出射側反射鏡の吸収や散乱による損失が無視できれば、微分量子効率 $\eta_i$ は次式で与えられる。

$$\eta_d = \eta_i \frac{\frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_f} \right)}{\alpha + \frac{1}{L} \ln \left( \frac{1}{R_m} \right)} \quad (2.14)$$

ここで、 $\alpha$ は反射損を除く光損( $=\alpha_a + \alpha_d$ )である。

最後に電力変換効率について考える。外部微分効率と自然放出の効率 $\eta_{spon}$ を用いると、外に取り出される光出力 $P_0$ は、

$$\begin{aligned} P_0 &= \eta_d \eta_{spon} C E_g I & I \leq I_{th} \\ &= \eta_d E_g (I - I_{th}) + \eta_d \eta_{spon} C E_g I_{th} & I \geq I_{th} \end{aligned} \quad (2.15)$$

となる。ここで、 $C$ はレーザモードに結合する自然放出光の割合である。

一方、電力変換効率 $\eta_p$ は

$$\eta_p = \frac{P_0}{VI} \quad (2.16)$$

で表される。ここで、 $V$ は素子電圧である。閾値以上では式(2.15)と(2.16)より、

$$\eta_p = \frac{\eta_d E_g (I - I_{th})}{VI} = \eta_d \left( \frac{E_g}{V} \right) \left( 1 - \frac{I_{th}}{I} \right) \quad (2.17)$$

で表される。シリーズ抵抗などにより $E_g \leq V$ であるから、 $\eta_p$ は $\eta_d$ より小さくなる。しかし、 $I_{th}$ が非常に小さくできる面発光レーザでは $\eta_p$ をかなり大きくできる可能性がある。

る。

式(2.7), (2.9), (2.10)より、閾値電流は、

$$I_{th} = \frac{eB_{eff}V_a}{\eta_i\eta_{spon}} \left( N_t + \frac{1}{(c/n_{eq})(dg/dN)} \frac{1}{\xi_l \xi_t \tau_p} \right)^2 \quad (2.18)$$

となる。閾値電流を低減するには式(2.7), (2.18)からも分かるように、活性領域の体積  $V_a$  を小さくすればよい。いま、式(2.7)において、体積を小さくしても発振に必要な電子密度  $N_{th}$  が変わらないとする。ストライプレーザの活性領域として、厚さ  $0.1 \mu\text{m}$ , 幅  $2 \mu\text{m}$ , 長さ  $300 \mu\text{m}$  を、面発光レーザとして直径  $3 \mu\text{m}$ , 厚さ  $0.01 \mu\text{m}$  の円盤を考えると、ストライプレーザの活性領域の体積は  $V_a=60 \mu\text{m}^3$ , 面発光レーザの活性領域の体積は  $V_a=0.07 \mu\text{m}^3$  と 3 桁も小さくなる。つまり、ストライプレーザで閾値電流が  $\text{mA}$  オーダーであるとすれば、面発光レーザでは  $\mu\text{A}$  オーダーとなる。しかし、式(2.11)に示したように、レーザ共振器を小さくしていくと共振器の損失  $\alpha_m$  が増大して、発振に必要な電子密度  $N_{th}$  が増大するため、同時に反射率を上げなければならない。

また、活性層での損失を  $\alpha_{ac}$ , クラッド層での損失を  $\alpha_{ex}$  とすれば、

$$g_{th} = \xi\alpha_{ac} + \alpha_{ex}(1-\xi) + \alpha_m + \xi\alpha_d \quad (2.19)$$

と表される<sup>19)</sup>。  $\alpha_m$  を式(2.11)のようにおくと、

$$g_{th} = \alpha_{ac} + \alpha_{ex} \left( \frac{1}{\xi} - 1 \right) + \frac{1}{\xi L} \ln \left( \frac{1}{R_m} \right) + \alpha_d \quad (2.20)$$

$\xi=1$ ,  $\xi_t=d/L$  とすれば、

$$g_{th} = \alpha_{ac} + \alpha_{ex} \left( \frac{L}{d} - 1 \right) + \frac{1}{d} \ln \left( \frac{1}{R_m} \right) + \alpha_d \quad (2.21)$$

よって、閾値電流密度  $J_{th}$  は式(2.3), (2.6), (2.21)より、

$$J_{th} = \frac{eB_{eff}}{\eta_i\eta_{spon}} \left[ N_t + \frac{1}{(dg/dN)} \left\{ \alpha_{ac} + \alpha_{ex} \left( \frac{L}{d} - 1 \right) + \frac{1}{d} \ln \left( \frac{1}{R_m} \right) + \alpha_d \right\} \right]^2 \quad (2.22)$$

過剰損失を  $\alpha_{in}$  とすれば、

$$\alpha_{in} = \frac{dg}{dN} N_t = A_0 N_t \quad (2.23)$$

なので、式(2.22)は、

$$J_{th} = \frac{eB_{eff}}{\eta_i\eta_{spon}A_0^2} \left[ \alpha_{in} + \alpha_{ac} + \alpha_{ex} \left( \frac{L}{d} - 1 \right) + \frac{1}{d} \ln \left( \frac{1}{R_m} \right) + \alpha_d \right]^2 \quad (2.24)$$

となる。これより、閾値電流密度を低減させるには反射率を上げることが有効であることが分かる。

このように、垂直共振器型面発光レーザにおいて、反射鏡の反射率は非常に重要な要素となる。

## 2.4 面発光レーザ用反射鏡<sup>20)</sup>

前節でみたように、面発光レーザでは反射鏡の反射率を上げることが閾値電流の低減において有効であることが分かる。一般に反射鏡は高反射率を有することの他に、出射側では光を通すことが、裏面では電流と熱を通すことが重要である。しかし、絶縁性基板を用いる GaN 系面発光レーザでは裏面側反射鏡は必ずしも導電性でなければならないということはない。

反射鏡には金属反射鏡、誘電体と金属による反射鏡、誘電体多層膜反射鏡、半導体多層膜反射鏡が用いられる。これらの反射鏡の特徴を表 2.1 に示す。本研究では GaN 系面発光レーザ用反射鏡として、出射側に誘電体多層膜反射鏡を、基板側に半導体多層膜反射鏡を採用した。ここで、金属の反射鏡を採用しなかった理由は、短波長領域で高反射率を示す金属が少ないためで、誘電体と組み合わせた場合も高反射率を得るのは困難だからである。

表 2.1 各種反射鏡の特徴

種類	光吸収	反射率	電流
金属	大きい	最大で 98 %程度	流れる
誘電体+金属	大きい	波長により 99 %程度が可能	リング電極構造により流れる
誘電体多層膜	極めて少ない	数周期で 99 %以上が可能	流れない
半導体多層膜	少ない	数十周期で 99 %以上が可能	伝導またはトンネルによる場合流れる

誘電体多層膜反射鏡、半導体多層膜反射鏡は共に、屈折率の異なる媒質を 1/4 波長の光学厚さで交互に形成させる反射鏡で、分布型ブラッグ反射鏡(DBR; distributed Bragg reflector)と呼ばれる。このとき、2つの媒質の屈折率差が大きいほど、また、交互多層膜の周期数が多いほど高反射率が得られる。図 2.2 に DBR の反射の原理を示す。

屈折率の高い媒質中から低い媒質に光が入射した場合、境界面においてその反射波の位相は変化しない。しかし、屈折率の低い媒質中から高い媒質に光が入射した場合、反射波の位相は境界面で $\pi$ だけ変化する。ここで、それぞれの膜厚を波長の $1/4$ の光学厚さで、交互に、周期的に配列させると、各境界面からの反射波はその位相がすべて揃い、高い反射率が得られる。

多層膜反射鏡の反射率を計算する手段について説明する。

まず、光が媒質0から媒質1に向かって、その境界面の法線と $\phi_0$ で入射した場合を考える。ここで、入射光を含み境界面に垂直な面を入射面、 $\phi_0$ を入射角という。また、光の電場が入射面に平行な偏光成分をp偏光、垂直な成分をs偏光成分という。図2.3に示すように、入射角、反射角、屈折角をそれぞれ $\phi_0, \phi_0', \phi_1$ 、媒質0, 1の屈折率をそれぞれ $n_0, n_1$ とすると、

$$\phi_0 = \phi_0' \quad (2.25)$$

$$n_0 \sin \phi_0 = n_1 \sin \phi_1 \quad (2.26)$$

である。ここで、式(2.26)はスネル(Snell)の法則と呼ばれる。

また、s偏光に対する振幅反射率、透過率は次のようになる。

$$\frac{E_{0s}^-}{E_{0s}^+} = \frac{n_0 \cos \phi_0 - n_1 \cos \phi_1}{n_0 \cos \phi_0 + n_1 \cos \phi_1} = r_s \quad (2.27)$$

$$\frac{E_{1s}^-}{E_{0s}^+} = \frac{2n_0 \cos \phi_0}{n_0 \cos \phi_0 + n_1 \cos \phi_1} = t_s \quad (2.28)$$

p偏光に対しても同様に次のようになる。

$$\frac{E_{0p}^-}{E_{0p}^+} = \frac{n_0 \cos \phi_1 - n_1 \cos \phi_0}{n_0 \cos \phi_1 + n_1 \cos \phi_0} = r_p \quad (2.29)$$

$$\frac{E_{1p}^-}{E_{0p}^+} = \frac{2n_0 \cos \phi_0}{n_0 \cos \phi_1 + n_1 \cos \phi_0} = t_p \quad (2.30)$$

$E_{0s}^+$ は媒質0中を $z$ の正方向へ伝搬する光の電場のs偏光成分、 $E_{1s}^+$ は媒質1中を $z$ の正方向へ伝搬する光の電場のs偏光成分、 $E_{0s}^-$ 媒質0中を $z$ の負方向へ伝搬する光の電場のs偏光成分である。p偏光についても同様である。 $r, t$ は反射及び透過のフレネル(Fresnel)係数と呼ばれる。

エネルギー反射率は光の強度の比であるから、

$$R = |r|^2 \quad (2.31)$$

$$T = \frac{n_1 \cos \phi_1}{n_0 \cos \phi_0} |t|^2 \quad (2.32)$$

となる。垂直入射の場合は  $\phi_0 = \phi_0' = \phi_1 = 0$  となるため、s, p 偏光の区別はなくなり、フレネル係数は、

$$r_0 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad (2.33)$$

$$t_0 = \frac{2n_0}{n_0 + n_1} \quad (2.34)$$

で与えられる。また、エネルギー反射率、透過率は、

$$R_0 = \left( \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2 \quad (2.35)$$

$$t_0 = \frac{4n_0 n_1}{(n_0 + n_1)^2} \quad (2.36)$$

となる。これまでは媒質中で吸収がない場合を考えてきたが、吸収がある場合、つまり屈折率が複素数である場合もこれらは成り立つ。つまり、屈折率  $n$  を複素屈折率  $n - ik$  に置き換えればよい。ここで、複素屈折率の虚部  $k$  を消衰係数(extinction coefficient)という。

つぎに、単層膜の反射、透過を考える。基板上の平行平面膜に媒質 0 から光が入射する場合を考える。ここでそれぞれの屈折率を  $n_0, n_1, n_2$  とし、膜厚を  $d$  とする。図 2.4 に示すように、媒質 0 から入射し A 点で反射した波と、膜を往復して B 点から透過して出ていく波の位相差  $2\delta_1$  は、スネルの法則などから、

$$2\delta_1 = \frac{4\pi}{\lambda} n_1 d \cos \phi_1 \quad (2.37)$$

となる。反射と透過を繰り返した波の総和をとった振幅反射率、振幅透過率は次のようになる。

$$R = r_1 + t_1 r_2 t_1' e^{-i2\delta_1} + t_1 r_2 (r_1' r_2) t_1' e^{-i4\delta_1} + t_1 r_2 (r_1' r_2)^2 t_1' e^{-i6\delta_1} + \dots \quad (2.38)$$

$$T = t_1 t_2 e^{-i\delta_1} + t_1 (r_2 r_1') t_2 e^{-i3\delta_1} + t_1 (r_2 r_1')^2 t_2 e^{-i5\delta_1} + \dots \quad (2.39)$$

$r_1, r_2, t_1, t_2$  はそれぞれ界面 1, 2 での反射および透過のフレネル係数、 $t_1', r_1'$  は界面 1 で媒質 1 から 0 に光が入射する場合のフレネル係数である。

$t_1' = t_1, r_1' = -r_1$  であるから、式(2.38), (2.39)は、

$$R = \frac{r_1 + r_2 e^{-i2\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-i2\delta_1}} \quad (2.40)$$

$$T = \frac{t_1 t_2 e^{-i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-i2\delta_1}} \quad (2.41)$$

となる。これを有効フレネル係数という。

有効フレネル係数を用いると、エネルギー反射率、エネルギー透過率は、

$$R = R \cdot R^* \quad (2.42)$$

$$T = \frac{n_2}{n_1} T \cdot T^* \quad (2.43)$$

で与えられる。

最後に有効フレネル係数を用いて任意の多層膜の反射率を求める。

図 2.5 に示すような  $N$  層の多層膜を考えたとき、第 1 層からの振幅反射率は、

$$R_1 = \frac{r_2 + r_1 e^{-i2\delta_1}}{1 + r_2 r_1 e^{-i2\delta_1}} \quad (2.44)$$

で表される。ここで、 $r_1, r_2$  は各層での反射のフレネル係数である。

第 1 層をこのような反射率を持つ単一境界として考えれば、第 2 層からの反射率は、

$$R_2 = \frac{r_3 + R_1 e^{-i2\delta_2}}{1 + r_3 R_1 e^{-i2\delta_2}} \quad (2.45)$$

となる。ここで、

$$R_0 = r_1 \quad (2.46)$$

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \phi_j \quad (2.47)$$

とすれば、振幅反射率は、

$$R_j = \frac{r_{j+1} + R_{j-1} e^{-i2\delta_j}}{1 + r_{j+1} R_{j-1} e^{-i2\delta_j}} \quad (2.48)$$

となり、 $j=1$  から  $N$  まで繰り返すことにより  $N$  層の多層膜の反射率を求めることができる。

また、この他に多層膜の反射率を求める方法として特性マトリクスを用いて求める方法がある。これは光学インピーダンス  $Z$ 、アドミッタンス  $Y=1/Z$  の概念を導入することにより、光学計算に電気回路の分布定数回路の手法を適用させたものである。薄

膜を繰り返し形成することは4端子回路を継続して接続することに相当し、多層膜の反射率の計算はマトリクスの積を求める計算となる。

$j=0$  から  $N+1$  の境界が  $x$ - $y$  平面にあり、 $z$  方向に進む平面波について考える。媒質  $j$  中の電界のうち、媒質  $j-1$  と媒質  $j$  との境界で  $z$  の正方向に進む波を  $E_j^{+L}$ ,  $z$  の負の方向に進む波を  $E_j^{-L}$ , また媒質  $j$  と媒質  $j+1$  との境界において  $z$  の正方向に進む波を  $E_j^{+R}$ ,  $z$  の負の方向に進む波を  $E_j^{-R}$  とおく。

これより、媒質  $j-1$  と媒質  $j$  の電界の関係は行列を用いて次のように表される。

$$\begin{bmatrix} E_{j-1}^{+R} \\ E_{j-1}^{-R} \end{bmatrix} = B_{j-1}^{-1} B_j M_j \begin{bmatrix} E_j^{+L} \\ E_j^{-L} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

ここで、

$$B_j = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_j & -n_j \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

$$M_j = \begin{bmatrix} e^{i\frac{2\pi}{\lambda}n_j d_j} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}n_j d_j} \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

である。また、 $n_j$ ,  $d_j$  はそれぞれ媒質  $j$  の屈折率と膜厚である。

これより、 $N$  層の多層膜全体では、

$$\begin{bmatrix} E_0^{+R} \\ E_0^{-R} \end{bmatrix} = S \cdot \begin{bmatrix} E_{N+1}^{+L} \\ E_{N+1}^{-L} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

となる。ここで、

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = B_0^{-1} U_1 U_2 \cdots U_{N-1} U_N B_{N+1} \quad (2.53)$$

であり、 $U_j$  は特性マトリクスと呼ばれ次式で表される。

$$U_j = B_j M_j B_j^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}n_j d_j\right) & i\frac{1}{n_j}\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}n_j d_j\right) \\ in_j \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}n_j d_j\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}n_j d_j\right) \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

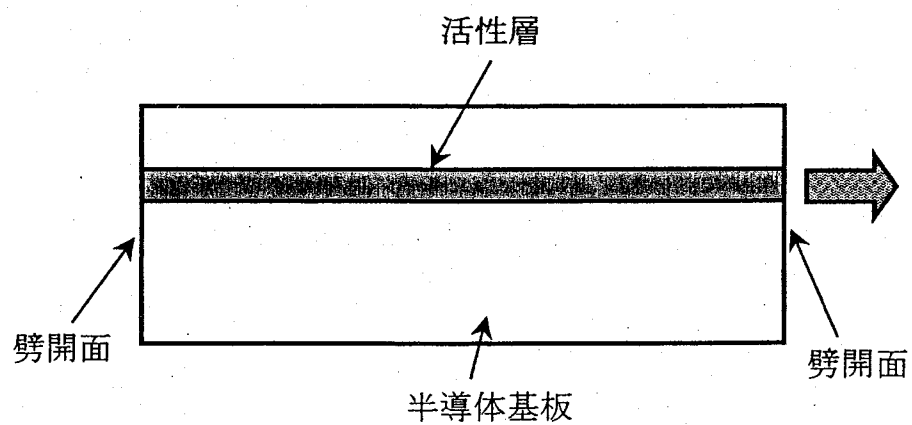
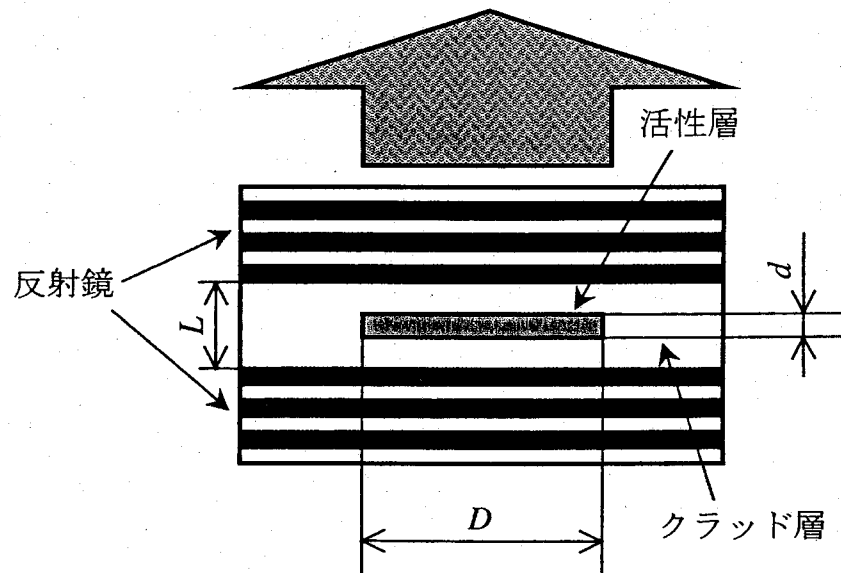
以上より、 $N$  層の多層膜のエネルギー反射率およびエネルギー透過率は特性マトリクスを用いると次式で与えられる。

$$R = \frac{|E_0^{-R}|^2}{|E_0^{+R}|^2} = \frac{|S_{21}|^2}{|S_{11}|^2} \quad (2.55)$$

$$T = \frac{n_{L+1}}{n_0} \cdot \frac{|E_{N+1}^{+L}|^2}{|E_0^{+R}|^2} = \frac{n_{L+1}}{n_0} \cdot \frac{1}{|S_{11}|^2} \quad (2.56)$$

ここでは垂直入射の場合を考えた。

本研究において、多層膜における反射率の理論計算には、ここに示した2種類の導出法のうち、有効フレネル係数を用いた方法で算出を行った。



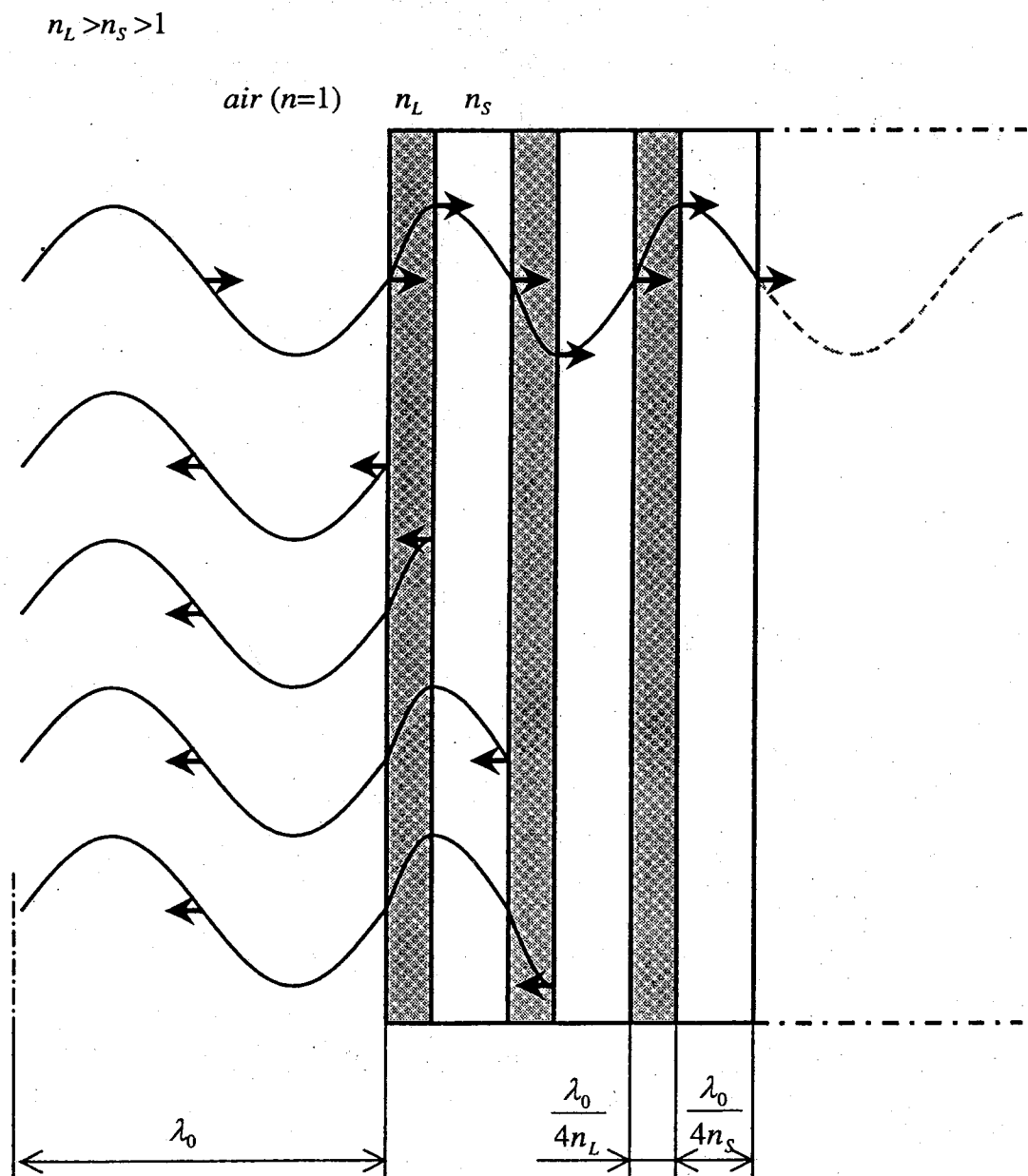


図 2.2 分布型ブラッグ反射鏡における反射の概念図

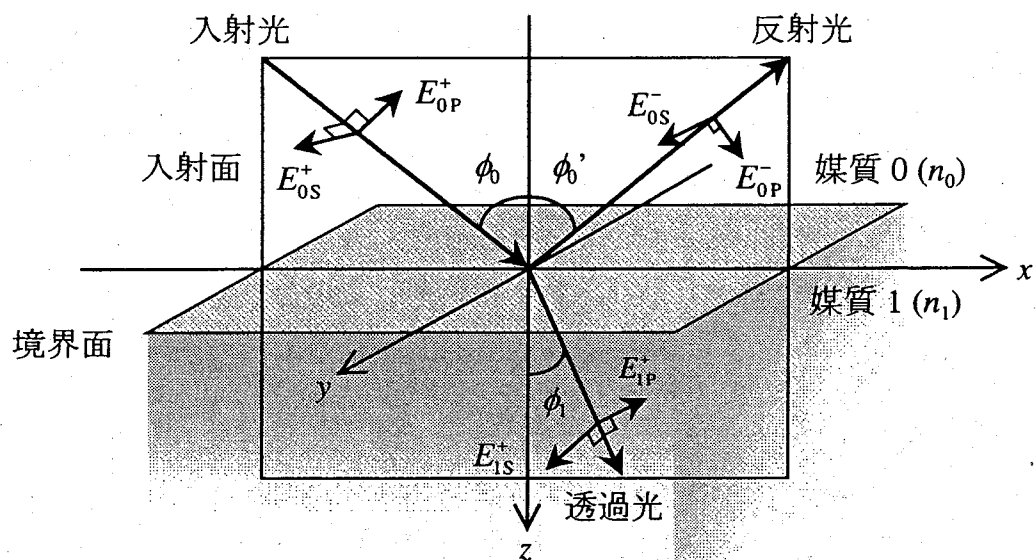


図 2.3 界面での光の反射と透過

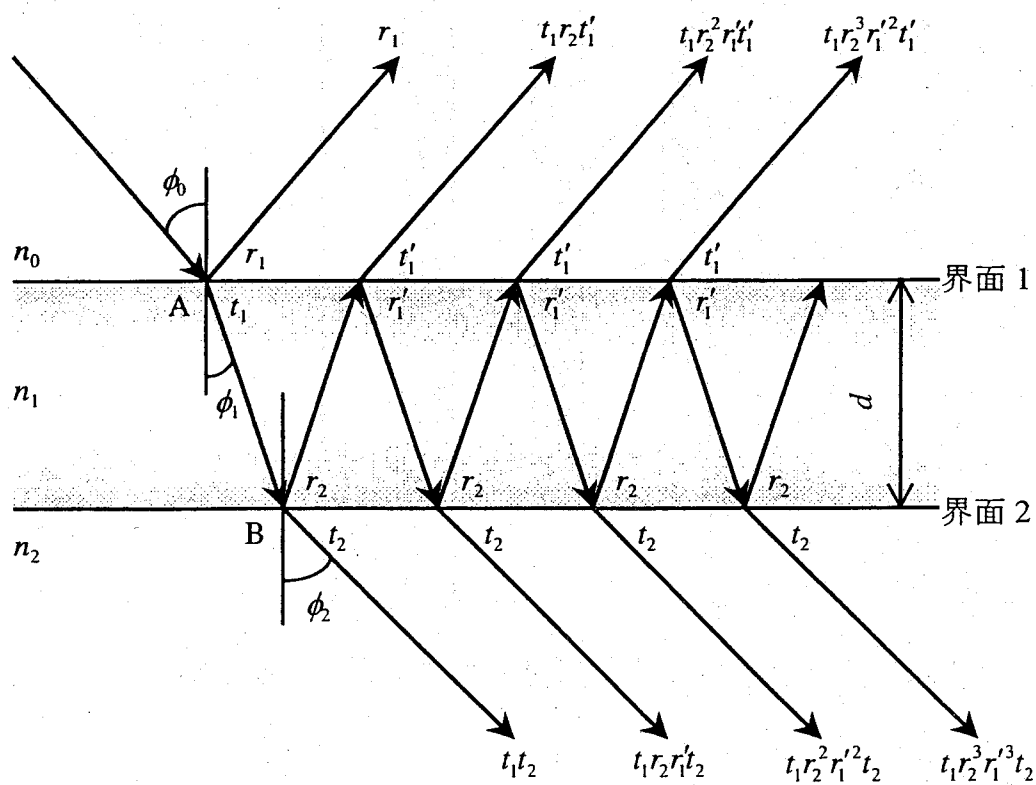


図 2.4 単層膜の反射と透過

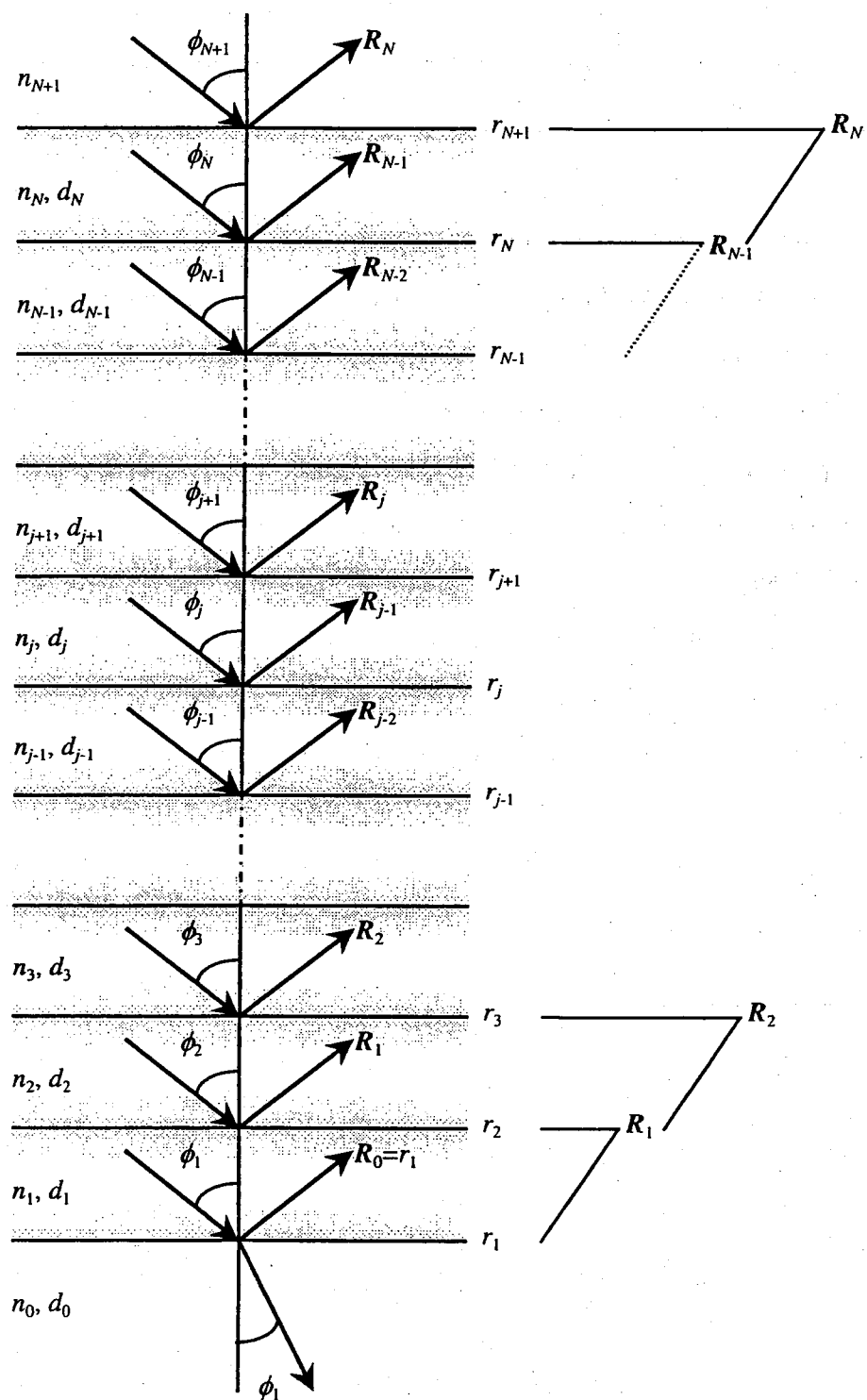


図 2.5 フレネル係数を用いた多層膜の反射率導出法

## 参考文献

- 1) K. Iga, F. Koyama, S. Kinoshita, IEEE J. Quantum Electronics, **QE-24**, 1845 (1988).
- 2) M. Asif Khan, J. N. Kuznia, J. M. Van Hove, and D. T. Olson, Appl. Phys. Lett. **59**, 1449 (1991).
- 3) I. J. Fritz, and T. J. Drummond, Electron. Lett. **31**, 68 (1995).
- 4) P. D. Floyd, J. L. Merz, H. Luo, J. K. Furdyna, T. Yokogawa, and Y. Yamada, Appl. Phys. Lett. **66**, 2929 (1995).
- 5) Joan M. Redwing, David A. S. Loeber, Neal G. Anderson, Michael A. Tischler, and Jeffrey S. Flynn, Appl. Phys. Lett. **69**, 1 (1996).
- 6) T. Shirasawa, N. Mochida, A. Inoue, T. Honda, T. Sakaguchi, F. Koyama, and K. Iga, J. Cryst. Growth. **189/190**, 124 (1998).
- 7) H. Ishikawa, N. Nakada, G. Y. Zhao, T. Egawa, T. Jimbo, and M. Umeno, Proc. 2nd International Symposium of Blue Laser and Light Emitting Diode. 727 (1998).
- 8) T. Someya, R. Werner, A. Forchel, M. Catalano, R. Cingolani, and Y. Arakawa, Science. **285**, 1905 (1999).
- 9) K. Iga, M. Oikawa, S. Misawa, J. Banno, and Y. Kokubun, Appl. Optics. **21**, 3456 (1982).
- 10) H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu, Jpn. J. Appl. Phys. **18**, 2329 (1979).
- 11) R. S. Geels, and L. A. Coldren, Appl. Phys. Lett. **57**, 1605 (1991).
- 12) T. Wipiejewski, K. Panzlaf, E. Zeeb, and K. J. Ebeling, 18th European Conf. On Opt. Comm., ECOC '92, PDII-4 (1992).
- 13) T. Numai, T. Kawakami, Y. Yoshikawa, M. Sugimoto, Y. Sugimoto, H. Yokoyama, K. Kasahara, and K. Asakawa, Jpn. J. Appl. Phys. **32**, L1533 (1993).
- 14) D. G. Deppe, D. L. Huffaker, J. Shin, and Q. Deng, IEEE Photon. Tech. Lett. **7**, 965 (1995).
- 15) Y. Hayashi, T. Mukaihara, N. Hatori, N. Ohnoki, A. Matsutani, F. Koyama, and K. Iga, Electron. Lett. **31**, 560 (1995).
- 16) G. M. Yang, M. MacDougall, and P. D. Dupkus, Electron. Lett. **31**, 886 (1995).
- 17) 伊賀健一, 小山二三夫, 面発光レーザ, オーム社 (1990).

- 18) 伊賀健一, 小山二三夫, 面発光レーザの基礎と応用, 共立出版 (1999).
- 19) H. Soda, Y. Motegi, and K. Iga, IEEE J. Quantum Electronics, **QE-19**, 1035 (1983).
- 20) 吉田貞史, 矢嶋弘義, 薄膜・光デバイス, 東京大学出版会 (1994).