

修士論文

分布帰還型半導体レーザにおける
閾値下スペクトルからのパラメータ抽出

1997年2月7日提出

指導教官
中野 義昭 助教授

東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻

学籍番号 56422

名倉 徹

目次

1	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	研究の背景	2
1.3	本論文の構成	4
2	スペクトル計算のモデル	5
2.1	結合波方程式	5
2.2	Transfer Matrix	9
2.3	抽出可能なパラメータ	11
3	最小二乗法によるフィッティング	13
3.1	最小二乗法	13
3.2	フィッティングルーチン	13
4	初期値の自動化	21
4.1	初期値	21
4.2	ピークの読み取り	24
5	抽出結果の例	27
5.1	いろいろなレーザでの測定例	27
5.2	両端面からの測定	32
5.3	軸方向電界分布	36
6	抽出パラメータの誤差評価	40
6.1	カイ二乗一定の境界による誤差評価	40
6.2	閾値以上どこまで信用できるか	43

7 結合係数の変化	46
7.1 閾値以下	46
7.2 閾値以上	64
8 結論及び今後の展望	67
A Instruction manual for parameter extraction program	69
A.1 Introduction	69
A.2 Theorem	69
A.3 Preparation	69
A.4 Execution program	70
A.5 How to execute	70
A.6 Simple use	71
A.7 Example	72
A.8 Format and meanings of input/output files	73
A.9 Specified use	75
A.10 Option	81
A.11 Etc.	82
A.12 Request	82
謝辞	83
本研究に関する学会発表	84
参考文献	86

第 1 章

序論

1.1 はじめに

近年の光ファイバの普及にはめざましいものがあり、その光源としては半導体レーザーが主に使われている。なかでも DFB(Distributed FeedBack) レーザ、特に利得結合 DFB レーザは単一モード性に優れており、今後ますます普及していくであろう。

ここで、DFB レーザの原理について簡単に説明しておく。

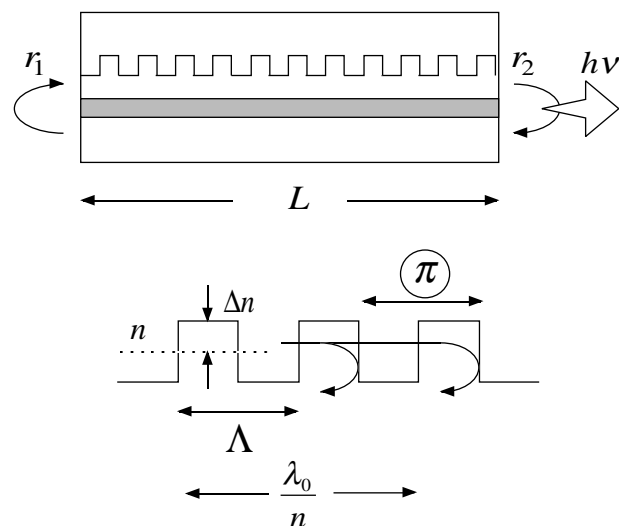


図 1.1: DFB レーザの構造

DFB レーザは、レーザ共振器内部にグレーティングと呼ばれる周期 Λ の凹凸を持つ。この凹凸により屈折率差 Δn が生じるため、この部分で光の一部が反射し、これは回折格子の役割を果たす。距離 Λ 進んだ時に位相が π 回転する波長をブラッグ波長といい、各グレーティングでの反射波の位相が 2π だけずれており、お互いに強め合っていることが分かる。DFB レーザは、このブラッグ波長周辺の波長のみを選択的に発振させるため、単一モード性が優れているのである。

しかし、この屈折率結合 DFB レーザは、ブラッグ波長では発振せずに、本質的に 2 モード発振する。そこで、より単一モード性を高めるために考え出されたものとして、 $\lambda/4$ 位相シフト DFB レーザ、利得結合 DFB レーザというものがある[3]。

位相シフト DFB レーザでは、レーザ中央に位相を $\pi/4$ だけ回転させるための位相シフト領域があり、ここで位相を調節することにより、ブラッグ波長での安定な単一モード発振を得ることができる。

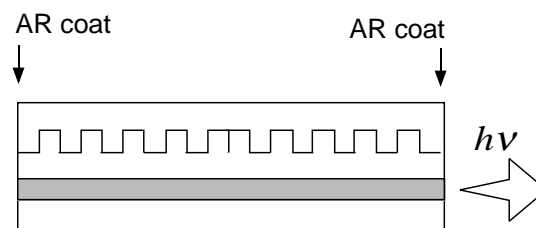


図 1.2: $\lambda/4$ 位相シフト DFB レーザ

利得結合 DFB レーザでは、屈折率ではなく利得を周期的に変えることによって反射の際の位相回転を調整することにより、単一モード発振を実現している。

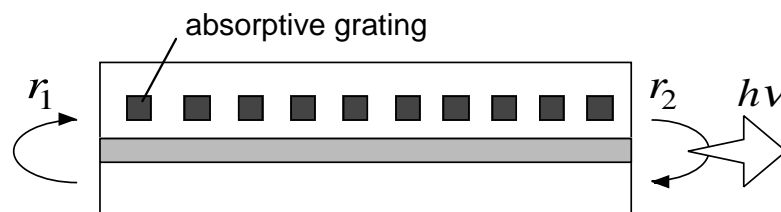


図 1.3: 利得結合 DFB レーザ

1.2 研究の背景

DFB レーザのデバイスパラメータの測定は、レーザの特性評価やレーザの最適化を行なう際に非常に重要になってくる。

DFB レーザでは、グレーティングによる反射が最も重要な要素であり、その反射の様子を表すパラメータが、結合係数と呼ばれるパラメータである。結合係数には 2 種類ある。一つは屈折率結合係数 (κ_i) であり、これはグレーティングの屈折率変化による反射

を表す量である。もう一つは利得結合係数 (κ_g) であり、これはグレーティングの利得変化による反射を表す量である。

結合係数の測定として現在広く使われている方法としては、次のものがある。

両端面に AR コーティングをかけ、その閾値下スペクトルのストップバンド幅を測定し、

$$\kappa_i = \frac{n_{eff}(\Delta\omega)_{gap}}{2c} \quad (1.1)$$

により結合係数を計算する。

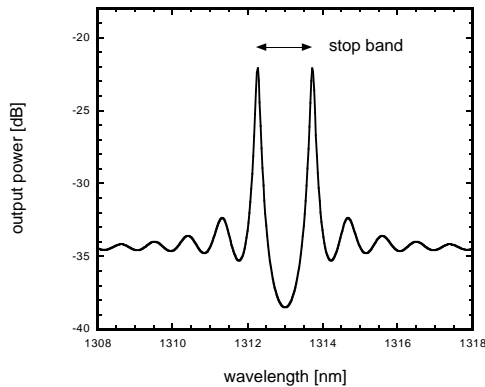


図 1.4: ストップバンド幅

しかしこの方法では、

- 両端面に AR コートが必要である。
- AR コートしても残留反射率があり、正確な見積りができない (図 1.5)。
- 屈折率結合係数以外のパラメータが測定できない。

などの欠点がある。

また、レーザ端面に反射率がある場合、端面のグレーティングの位相によってもレーザの特性が変わってしまうが、その位相は現在のところ制御することはできず、その測定方法も非常に手間が掛かってしまう[9]。

本研究では、閾値以下スペクトルに最小二乗法を用いてフィッティングを掛けることにより、簡単に、利得結合係数や端面位相を含む様々なパラメータの、新しい測定方法を提案することを目的としている。本方法を用いることの利点としては

- 屈折率結合係数だけでなく、利得結合係数、端面位相など、様々なパラメータが測定可能

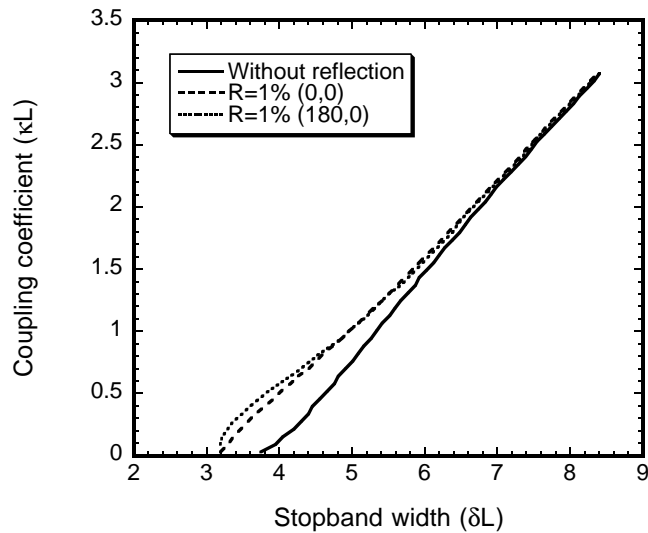


図 1.5: 残留反射率が結合係数評価に与える誤差。ただし、両端面完全無反射、両端面反射率 1%, 端面位相 (0,0)、両端面反射率 1%, 端面位相 (180,0)

- 端面反射率があってもよい
- パッケージング済みのレーザを非破壊で測定可能
- 測定が簡単である。

などが挙げられる。

1.3 本論文の構成

本研究の目的は、閾値以下スペクトルからのパラメータ抽出による、デバイスパラメータの新しい測定方法の提案である。まず第 2 章で、スペクトル計算のモデルを説明し、次に第 3 章でフィッティングのための理論を、さらに、第 4 章では、フィッティングのための初期値の与え方について説明する。第 5 章では、実際の測定スペクトルと、それからのパラメータの抽出例を示し、第 6 章では、抽出パラメータの誤差評価の理論と、計算例を示す。次に第 7 章で、本測定方法を用いることにより初めて観測された、結合係数の電流依存性を示す。最後に第 7 章をまとめとする。なお、Appendix として、パラメータ抽出プログラムの説明書を付けた。

第 2 章

スペクトル計算のモデル

2.1 結合波方程式

Maxwell 方程式より

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\text{rot}\mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\text{div}\mathbf{D} = 0 \quad (2.3)$$

したがって、

$$\text{rot} \cdot \text{rot}\mathbf{E} = -\text{rot}\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$= -\mu \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

$\text{rot} \cdot \text{rot} = \text{grad} \cdot \text{div} - \nabla^2$ より、

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

$$= \mu \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

$$= \mu \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial^2 (\mathbf{P} + \mathbf{P}_{per})}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

ただし、 \mathbf{P} は平均 (無摂動) の分極、 \mathbf{P}_{per} は摂動分分極を表す。いま、透磁率は 1 とし、また、スラブ導波路を考え、 z 方向にのみ屈折率 (誘電率) の周期的変化 (摂動) があるとす。一般に、半導体レーザでは、TE モードしか発生しないように設計されているため、 E_y のみを考えれば良い。

$$\nabla^2 E_y - \mu_0 \epsilon(\mathbf{r}) \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \{P_{per}(\mathbf{r}, t)\}_y}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

いま、「摂動のある」導波路中の電界を

$$E_y(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} \sum_m A_m(z) \mathcal{E}_y^m(x) e^{j(\omega t - \beta_m z)} + c.c \quad (2.10)$$

とおく。ただし

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \beta_m^2\right) \mathcal{E}_y^m(\mathbf{r}) + \omega^2 \mu_0 \epsilon(\mathbf{r}) \mathcal{E}_y^m = 0 \quad (2.11)$$

である。いま、(2.10) 式より、

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \sum_m A_m(z) \frac{\partial^2 \mathcal{E}_y^m}{\partial x^2} e^{j(\omega t - \beta_m z)} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial y^2} = 0 \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{1}{2} \sum_m \left\{ \frac{\partial^2 A_m(z)}{\partial z^2} \mathcal{E}_y^m(x) e^{j(\omega t - \beta_m z)} \right. \\ \left. + 2 \frac{\partial A_m(z)}{\partial z} \mathcal{E}_y^m(x) \cdot -j \beta_m e^{j(\omega t - \beta_m z)} + A_m(z) \mathcal{E}_y^m(x) \cdot -\beta_m^2 e^{j(\omega t - \beta_m z)} \right\} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{2} \sum_m A_m(z) \mathcal{E}_y^m(x) \cdot -\beta_m^2 e^{j(\omega t - \beta_m z)} \quad (2.15)$$

なので、これらの式を(2.9) 式に代入し、(2.11) 式を用いて整理すると

$$\sum_m -j \beta_m \frac{\partial A_m(z)}{\partial z} \mathcal{E}_y^m(x) + c.c = \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{P_{per}(\mathbf{r}, t)\}_y \quad (2.16)$$

したがって、 $A_m(z)$ を $+z$ 方向に進む波 A_s^+ と $-z$ 方向に進む波 A_s^- に分けて考え、

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{E}_y^s(x) \left\{ -j \beta_s \frac{\partial A_s^+}{\partial z} \mathcal{E}_y^s(x) e^{j(\omega t - \beta_s z)} + j \beta_s \frac{\partial A_s^-}{\partial z} \mathcal{E}_y^s(x) e^{j(\omega t + \beta_s z)} \right\} dx \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{P_{per}(\mathbf{r}, t)\}_y \mathcal{E}_y^s(x) dx \end{aligned} \quad (2.17)$$

ここで、各モードは直交するので、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{E}_y^{(l)} \mathcal{E}_y^{(m)} dx = \frac{2\omega\mu_0}{\beta_m} \delta_{l,m} \quad (2.18)$$

であり、これを使って整理すると、

$$\frac{\partial A_s^-}{\partial z} e^{j(\omega t + \beta_s z)} - \frac{\partial A_s^+}{\partial z} e^{j(\omega t - \beta_s z)} - c.c = -\frac{j}{2\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \{P_{per}(\mathbf{r}, t)\}_y \mathcal{E}_y^s(x) dx \quad (2.19)$$

誘電率の変動は、すなわち屈折率の変動なので、

$$\mathbf{P}_{per}(\mathbf{r}, t) = \Delta \epsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \Delta n(\mathbf{r})^2 \epsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \quad (2.20)$$

(2.10) 式を(2.20) 式に代入して、

$$\{P_{per}(\mathbf{r}, t)\} = \frac{\Delta n^2(\mathbf{r}) \epsilon_0}{2} \sum \left\{ A_m(z) \mathcal{E}_y^m(x) e^{j(\omega t - \beta_s z)} + c.c \right\} \quad (2.21)$$

この式を (2.19) 式に代入し、

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_s^-}{\partial z} e^{j(\omega t + \beta_s z)} - \frac{\partial A_s^+}{\partial z} e^{j(\omega t - \beta_s z)} - c.c \\ = -\frac{j\epsilon_0}{4\omega} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \sum_m \left\{ A_m(z) \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x, z) \mathcal{E}_y^m(x) \mathcal{E}_y^s(x) dx \cdot e^{j(\omega t - \beta_m z)} + c.c \right\} \end{aligned} \quad (2.22)$$

屈折率は周期的に変化しているので、フーリエ級数展開して

$$\Delta n^2(x, z) = \Delta n^2(x) \sum_{\infty} a_q e^{j \frac{2q\pi}{\Lambda} z} \quad (2.23)$$

この式を (2.22) 式に代入して (2.18) 式を用い、さらに、

$$\frac{2l\pi}{\Lambda} - \beta_s \approx \beta_s \quad (2.24)$$

を満たすような波長のみを考え、 \exp の係数により、 $+z$ 方向の波 $A_s^+ \exp[j(\omega t - \beta_s z)]$ と、 $-z$ 方向の波 $A_s^- \exp[j(\omega t + \beta_s z)]$ に分けて考えることにより、

$$\frac{\partial A_s^-}{\partial z} = \frac{j\omega\epsilon_0 a_l}{4} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x) \{E_y^s\}^2 dx \cdot A_s^+ e^{-j2(\beta_g - \beta_s)z} \quad (2.25)$$

$$= j\kappa^- A_s^+ e^{j2\Delta\beta z} \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial A_s^+}{\partial z} = -\frac{j\omega\epsilon_0 a_{-l}}{4} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x) \{E_y^s\}^2 dx \cdot A_s^- e^{j2(\beta_s - \beta_g)z} \quad (2.27)$$

$$= -j\kappa^+ A_s^- e^{j2\Delta\beta z} \quad (2.28)$$

ただし、

$$\frac{l\pi}{\Lambda} = \beta_g \quad (2.29)$$

$$\beta_s - \beta_g = \Delta\beta \quad (2.30)$$

$$\kappa^- = \frac{j\omega\epsilon_0 a_l}{4} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x) \{E_y^s\}^2 dx \quad (2.31)$$

$$\kappa^+ = \frac{j\omega\epsilon_0 a_{-l}}{4} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x) \{E_y^s\}^2 dx \quad (2.32)$$

とおいた。ここで、

$$\mathcal{E}_m^+ = A_s^+ e^{-j\beta_s z} = R_m^+ e^{-j\beta_g z} \quad (2.33)$$

$$\mathcal{E}_m^- = A_s^- e^{j\beta_s z} = R_m^- e^{j\beta_g z} \quad (2.34)$$

と、 $A \rightarrow R$ というふうに変数変換すると、(2.26), (2.28) 式は、次のようになる。

$$\frac{\partial R^+}{\partial z} + j\Delta\beta R^+ = -j\kappa^+ R^- \quad (2.35)$$

$$-\frac{\partial R^-}{\partial z} + j\Delta\beta R^- = -j\kappa^- R^+ \quad (2.36)$$

これを「結合波方程式」といい、DFB レーザにおける最も基本的な式である。また、 κ はグレーティングによる反射量を表し、「結合係数」という、DFB レーザで最も重要なパラメータである。

2.1.1 一般的な結合波方程式について

以上の変形は、導波路に利得も損失もない場合であったが、利得媒質中では、

$$\beta_m = \frac{2\pi}{\lambda}n + j\frac{1}{2}g \quad (2.37)$$

とおくことにより、(2.35), (2.36) 式がそのまま利用できる。また、一般的に結合波方程式といえば、

$$-\frac{\partial R}{\partial z} + (\alpha - j\delta)R = j\kappa S \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial S}{\partial z} + (\alpha - j\delta)S = j\kappa R \quad (2.39)$$

と書くが[1]、 $R \rightarrow R^+$, $S \rightarrow R^-$, $\alpha \rightarrow g/2$, $\Delta\beta \rightarrow \frac{2\pi}{\lambda}n + j\frac{1}{2}g - \frac{2\pi}{\lambda_g}n$ とすることにより、(2.35), (2.36) 式に帰着できる。 $\alpha \rightarrow g/2$ とおくのは、 α が電界の増幅率であるのに対し、 g が電界の二乗に比例するパワーの増幅率で定義されるからである。

ここでは、都合により $\kappa \rightarrow -\kappa$ として、

$$\frac{\partial R^+}{\partial z} + j\Delta\beta R^+ = j\kappa^+ R^- \quad (2.40)$$

$$-\frac{\partial R^-}{\partial z} + j\Delta\beta R^- = j\kappa^- R^+ \quad (2.41)$$

として結合波方程式を扱うことにする。

2.1.2 端面位相について

DFB レーザでは、屈折率が周期的に変化しているわけだが、端面の位相により、(2.23) のフーリエ級数展開の係数 a_q の値が変わり、したがって κ の値が変わってくる。図 2.1 のように端面位相を定義すると、

$$n(z) = n + (\Delta n) \cos(2\pi z/\Lambda + \theta_{rear}) \quad (2.42)$$

$$g(z) = g + (\Delta g) \cos(2\pi z/\Lambda + \theta_{rear}) \quad (2.43)$$

と表現できる。普通、 $\theta_{rear} = 0$ のときの κ の値を「結合係数」として定義するため、端面位相による a_q のずれは、結合波方程式において、

$$\kappa^+ \rightarrow \kappa^+ e^{-j\theta_{rear}}, \quad \kappa^- \rightarrow \kappa^- e^{j\theta_{rear}} \quad (2.44)$$

とすることによって補正する。

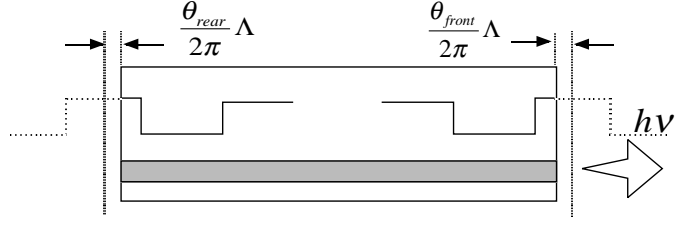


図 2.1: 端面位相の定義

2.2 Transfer Matrix

(2.40), (2.41) 式より、

$$\begin{pmatrix} R^+(z+l) \\ R^-(z+l) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11}(l) & F_{12}(l) \\ F_{21}(l) & F_{22}(l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R^+(z) \\ R^-(z) \end{pmatrix} \quad (2.45)$$

として、

$$F_{11}(l) = \cosh(Dl) - j \frac{\Delta\beta}{D} \sinh(Dl) \quad (2.46)$$

$$F_{12}(l) = j \frac{\kappa^+}{D} \sinh(Dl) \quad (2.47)$$

$$F_{21}(l) = -j \frac{\kappa^-}{D} \sinh(Dl) \quad (2.48)$$

$$F_{22}(l) = \cosh(Dl) + j \frac{\Delta\beta}{D} \sinh(Dl) \quad (2.49)$$

と変形できる。ただし、

$$D^2 = -(\Delta\beta)^2 + \kappa^2 \quad (2.50)$$

である。

(2.45) 式により、座標 z における $\pm z$ 方向へ進む波 $R^+(z), R^-(z)$ と、座標 $z+l$ における $\pm z$ 方向へ進む波 $R^+(z+l), R^-(z+l)$ との関係が分かる。これを transfer matrix という。

ここで、(2.33),(2.34) 式で変数変換したことの影響を考える。実際の電界強度は R ではなく A である。したがって、電界強度を考える時は、

$$A^+(z) = R^+(z)e^{-j\beta_g z} \quad (2.51)$$

$$A^-(z) = R^-(z)e^{j\beta_g z} \quad (2.52)$$

として、 $R \rightarrow A$ と変換し直す必要がある。このことを考慮すると、

$$\begin{pmatrix} A^+(0) \\ A^-(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^0 & 0 \\ 0 & e^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R^+(0) \\ R^-(0) \end{pmatrix} \quad (2.53)$$

$$\begin{pmatrix} R^+(l) \\ R^-(l) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11}(l) & F_{12}(l) \\ F_{21}(l) & F_{22}(l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R^+(0) \\ R^-(0) \end{pmatrix} \quad (2.54)$$

$$\begin{pmatrix} A^+(l) \\ A^-(l) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-j\beta_g l} & 0 \\ 0 & e^{j\beta_g l} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R^+(0) \\ R^-(0) \end{pmatrix} \quad (2.55)$$

より、

$$\begin{pmatrix} A^+(l) \\ A^-(l) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11}(l)e^{-j\beta_g l} & F_{12}(l)e^{-j\beta_g l} \\ F_{21}(l)e^{j\beta_g l} & F_{22}(l)e^{j\beta_g l} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A^+(0) \\ A^-(0) \end{pmatrix} \quad (2.56)$$

$$= \begin{pmatrix} a_{11z}(l) & a_{12z}(l) \\ a_{21z}(l) & a_{22z}(l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A^+(0) \\ A^-(0) \end{pmatrix} \quad (2.57)$$

である。同様にして、

$$\begin{pmatrix} A^+(L) \\ A^-(L) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11}(L-l)e^{-j\beta_g(L-l)} & F_{12}(L-l)e^{-j\beta_g(L+l)} \\ F_{21}(L-l)e^{j\beta_g(L+l)} & F_{22}(L-l)e^{j\beta_g(L-l)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A^+(l) \\ A^-(l) \end{pmatrix} \quad (2.58)$$

$$= \begin{pmatrix} a_{11}(L-l) & a_{12}(L-l) \\ a_{21}(L-l) & a_{22}(L-l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A^+(l) \\ A^-(l) \end{pmatrix} \quad (2.59)$$

ここで、ある座標 z から見た等価的な反射率 $\rho_l(z), \rho_r(z)$ 、等価的な透過率 $transr(z)$ は、端面の電界反射係数を r_1, r_2 とすると、

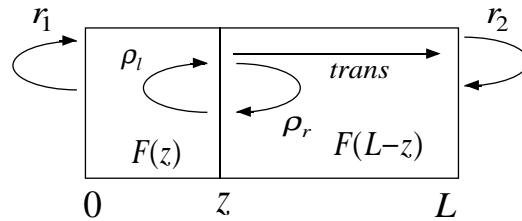


図 2.2: $\rho_l(z), \rho_r(z), transr(z)$

$$\rho_l(z) = \frac{A^+(z)}{A^-(z)} = \frac{r_1 a_{11z}(z) + a_{12z}(z)}{r_1 a_{21z}(z) + a_{22z}(z)} \quad (2.60)$$

$$\rho_r(z) = \frac{A^-(z)}{A^+(z)} = -\frac{r_2 a_{11}(L-z) - a_{21}(L-z)}{r_2 a_{12}(L-z) - a_{22}(L-z)} \quad (2.61)$$

$$transr(z) = \frac{A^+(L)}{A^+(z)} = \frac{a_{11}(L-z)a_{22}(L-z) - a_{12}(L-z)a_{21}(L-z)}{a_{22}(L-z) - a_{12}r_2} \quad (2.62)$$

ある座標 z で $+z$ 方向の光が発生したとして、その光がレーザ端面に作る電界 $E(L)$ は

$$E(L) = \sum_{n=0}^{\infty} \{transr \cdot (\rho_l \rho_r)^n\} \quad (2.63)$$

$$= transr \frac{\rho_l \rho_r}{1 - \rho_l \rho_r} \quad (2.64)$$

となる。 $+z$ 方向の光と $-z$ 方向の光が同じ確率で発生するとし、また、共振器全体で均一に光が発生するとすると、端面からの出力 P は、

$$P = \frac{J_0}{2} \int_0^L \frac{|trans|^2 (1 + |\rho_l|^2)}{|1 - \rho_l \rho_r|^2} (1 - |r_2|^2) dz \quad (2.65)$$

これを、波長を変えながら計算することにより、閾値以下のスペクトルが計算できる。

ここで、「閾値以下」という条件が付いてしまうのは、(2.63) 式で、無限等比級数の和を計算しているため、項比が $|\rho_l \rho_r| < 1$ の時しか成り立たないためである。厳密には、「閾値」というのは、 $\rho_l \rho_r = 1 + j0$ のときであり、そうなる前に、発振波長以外の波長で $|\rho_l \rho_r| > 1$ となってしまうため、閾値よりも、もっと下でしか成り立たない。

2.3 抽出可能なパラメータ

以上のようなモデルを用いてスペクトルを計算するため、必要なパラメータは以下の通りである。

- フィッティングにより、抽出可能なもの
 - 屈折率結合係数 : κ_i
 - 利得結合係数 : κ_g
 - 利得プロファイル* : g_1, g_2, λ_p
 - 実効屈折率* : $n_{Bragg}, \frac{dn}{d\lambda}$
 - 端面位相 : $\theta_{rear}, \theta_{front}$
- 確定値を入力する必要のあるもの
 - 共振器長 : L
 - グレーティングピッチ : Λ

- 端面コーティングを施してある場合は、端面反射率： R_{rear}, R_{front}

ただし、

* 利得プロファイル

$$g = \Gamma \{g_{a1} - g_{a2}(E - E_p)^2\} - \Gamma \alpha_{active} - (1 - \Gamma) \alpha_{clad} \quad (2.66)$$

$$= \underline{\underline{\Gamma g_{a1} - \alpha}} - \underline{\underline{\Gamma g_{a2}}}(E - E_p)^2 \quad (2.67)$$

$$= \underline{\underline{g_1}} - \underline{\underline{g_2}}(E - \frac{hc}{q\lambda_p})^2 \quad (2.68)$$

$$(2.69)$$

* 実効屈折率

$$n_{eff} = n_{Bragg} + \frac{dn}{d\lambda}(\lambda - \lambda_{Bragg}) \quad (2.70)$$

とする。

第3章

最小二乗法によるフィッティング

3.1 最小二乗法

ある実験データ $D_{(0)}$ が与えられた時、調整可能なパラメータ \mathbf{a} を含む「モデル」をデータに当てはめることにより、そのモデルのパラメータを決定することを考える。その時にもっとも良く使われるのが最小二乗法である。つまり、

$$a_1 \dots a_M \text{ について } \sum_{i=1}^N \{y_m(\lambda) - y_c(\lambda_i; a_1 \dots a_M)\}^2 \text{ を最小化} \quad (3.1)$$

となるようなパラメータ $\mathbf{a}_{fit(0)}$ を決定するのである。

しかし、データ点 (x_i, y_i) がそれぞれ標準偏差 σ_i を持つとすると、パラメータの最も確かな値は次の量を最小にすることで得られる。

$$\chi^2 \equiv \sum_i^N \left\{ \frac{y_m(\lambda_i) - y_c(\lambda_i; \mathbf{a})}{\sigma_i} \right\}^2 \quad (3.2)$$

この量を「カイ二乗」と呼ぶ。

ここでは、全ての点において σ_i は一定であると仮定し、

$$\sum_i^N \{y_m(\lambda_i) - y_c(\lambda_i; \mathbf{a})\}^2 \quad (3.3)$$

を最小にするような \mathbf{a} をパラメータの値とする。

3.2 フィッティングルーチン

非線形最小二乗法によるパラメータ決定のためのアルゴリズムとしては、Gauss-Newton法をはじめとして、Levenberg-Marquardt法、Davidon-Fletcher-Powell法など、様々なアルゴリズムがあり、問題の性質によって、最適なアルゴリズムが存在する。ここでは、“NL2SOL”というライブラリ[14]を使うことにする。これは、問題の性質により、最適なアルゴリズムを選択しながら、最小二乗法でフィッティングを掛けてパラメータを見つける、という優れたライブラリである。必要なものは、スペクトル計算のルーチン、スペク

トルのパラメータでの偏微分を求めるルーチン、それらを制御するルーチンである。スペクトル計算のルーチンは、2章の式を計算すれば良い。大変なのは、その偏微分である。以下、その偏微分の計算式を挙げる。

3.2.1 定義

パラメータについては、2.3節に書いたが、正確には、以下のような17個のパラメータがあり、それぞれの偏微分を計算する。

- 利得 $g = \Gamma \{g_1 - g_2(E - E_p)^2\} - \alpha_i$ において、 $x(1) = g_1, x(2) = g_2, x(3) = E_p$
- 屈折率 $n = n_0 + n_1\lambda + n_2\lambda^2 + n_3\lambda^3$ において、 $x(4) = n_0, x(5) = n_1, x(6) = n_2, x(7) = n_3$
- 結合係数 $\kappa = \kappa_i + j\kappa_g$ において、 $x(8) = \kappa_i, x(9) = \kappa_g$
- 電界反射係数 $r_1 = |r_1|e^{j\phi_1}, r_2 = |r_2|e^{j\phi_2}$ において、 $x(10) = |r_1|, x(11) = |r_2|, x(12) = \phi_1, x(13) = \phi_2$
- グレーティングピッチ $x(14) = \Lambda$
- 自然放出光係数 $x(15) = J_0$
- 共振器長、端面位相 $L = n\Lambda - \Lambda \frac{\theta_{rear}}{2\pi} + \Lambda \frac{\theta_{front}}{2\pi}$ において、 $x(16) = \theta_{rear}, x(17) = \theta_{front}$

利得、屈折率、前端面の端面位相については、定義が2.3節と異なる。この第3章のみ、都合上、この定義に従う。その他の章では、2.3節に従う。また、電界反射係数の位相回転と、端面位相は、スペクトル上では全く区別できない。したがって、この章では電界反射係数の位相回転も含めてあるが、その他の章では、反射の位相回転は0とし、もし、反射の位相回転があるとしても、それは、端面位相の中に押し込まれている。さらに、屈折率に関しては、 $n_2 = n_3 = 0$ として、全ての計算を行なっている。

本章と他の章との対応については、次のようになっている。

$$\Gamma \{g_1 - g_2(E - E_p)^2\} - \alpha_i \rightarrow g_1 - g_2(E - E_p)^2 \quad (3.4)$$

$$n_0 + n_1\lambda + n_2\lambda^2 + n_3\lambda^3 \rightarrow n_{Bragg} + \frac{dn}{d\lambda}(\lambda - \lambda_{Bragg}) \quad (3.5)$$

$$\theta_{front} \rightarrow -\theta_{front} \quad (3.6)$$

3.2.2 微分形式

- $\Delta\beta$

$$\Delta\beta = \beta - \beta_g \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{2\pi}{\lambda} \{x(4) + x(5)\lambda + x(6)\lambda^2\} \\ &\quad + j\frac{1}{2} \left[\Gamma \left\{ x(1) - x(2) \left(\frac{hc}{q\lambda} - x(3) \right)^2 \right\} - \alpha_i \right] - \frac{m\pi}{x(14)} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial\Delta\beta}{\partial x(1)} = j\frac{1}{2}\Gamma \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial\Delta\beta}{\partial x(2)} = j\frac{1}{2}\Gamma \left\{ \frac{hc}{q\lambda} - x(3) \right\}^2 \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial\Delta\beta}{\partial x(3)} = j\frac{1}{2}\Gamma x(2) \left\{ \frac{hc}{q\lambda} - x(3) \right\} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial\Delta\beta}{\partial x(4)} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial\Delta\beta}{\partial x(5)} = 2\pi \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial\Delta\beta}{\partial x(6)} = 2\pi\lambda \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial\Delta\beta}{\partial x(7)} = 2\pi\lambda^2 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial\Delta\beta}{\partial x(8)} = \frac{m\pi}{x^2(14)} = \frac{\beta_g}{x(14)} \quad (3.16)$$

- κ^+

$$\kappa^+ = (\kappa_i + j\kappa_g)e^{-j\theta} \quad (3.17)$$

$$= \{x(8) + jx(9)\}e^{jx(16)} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial\kappa^+}{\partial x(8)} = e^{-jx(16)} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial\kappa^+}{\partial x(9)} = je^{-jx(16)} \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial\kappa^+}{\partial x(16)} = \{x(9) - jx(8)\}e^{-jx(16)} \quad (3.21)$$

- κ^-

$$\kappa^- = (\kappa_i + j\kappa_g)e^{j\theta} \quad (3.22)$$

$$= \{x(8) + jx(9)\}e^{jx(16)} \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial \kappa^-}{\partial x(8)} = e^{jx(16)} \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial \kappa^-}{\partial x(9)} = j e^{jx(16)} \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial \kappa^-}{\partial x(16)} = \{-x(9) + jx(8)\} e^{jx(16)} \quad (3.26)$$

• D

$$D = \sqrt{-(\Delta\beta)^2 + \kappa^+ \kappa^-} \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial D}{\partial x} = \frac{-2\Delta\beta \frac{\partial \Delta\beta}{\partial x} + \kappa^+ \frac{\partial \kappa^-}{\partial x} + \kappa^- \frac{\partial \kappa^+}{\partial x}}{2D} \quad (3.28)$$

• r_1, r_2

$$r_1 = |r_1| e^{j\phi_1} = x(10) e^{jx(12)} \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial r_1}{\partial x(10)} = e^{jx(12)} \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial r_1}{\partial x(12)} = jx(10) e^{jx(12)} \quad (3.31)$$

$$r_2 = |r_2| e^{j\phi_2} = x(11) e^{jx(13)} \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial r_2}{\partial x(11)} = e^{jx(13)} \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial r_2}{\partial x(13)} = jx(11) e^{jx(13)} \quad (3.34)$$

• L

$$L = L_0 - \Lambda \frac{\theta_{rear}}{2\pi} + \Lambda \frac{\theta_{front}}{2\pi} \quad (3.35)$$

$$= n \cdot x(14) - x(14) \frac{x(16)}{2\pi} + x(14) \frac{x(17)}{2\pi} \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x(14)} = -\frac{x(16)}{2\pi} + \frac{x(17)}{2\pi} + n \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x(16)} = -\frac{x(14)}{2\pi} \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x(17)} = \frac{x(14)}{2\pi} \quad (3.39)$$

• a_{11}

$$a_{11} = \left\{ \cosh(D(L-l)) - j \frac{\Delta\beta}{D} \sinh(D(L-l)) \right\} e^{-j\beta_g(L-l)} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial a_{11}}{\partial x} &= \left\{ \sinh(D(L-l)) \left\{ \frac{\partial D}{\partial x}(L-l) + D \frac{\partial L}{\partial x} \right\} - j \frac{1}{D} \left[\frac{\frac{\partial \Delta \beta}{\partial x} D - \Delta \beta \frac{\partial D}{\partial x}}{D} \right. \right. \\
&\quad \times \sinh(D(L-l)) + \Delta \beta \cosh(D(L-l)) \left. \left. \left\{ \frac{\partial D}{\partial x}(L-l) + D \frac{\partial L}{\partial x} \right\} \right] \right\} e^{-j\beta_g(L-l)} \\
&\quad - j a_{11} \left(\frac{\partial \beta_g}{\partial x}(L-l) + \beta_g \frac{\partial L}{\partial x} \right) \tag{3.41}
\end{aligned}$$

• a_{12}

$$a_{12} = j \frac{\kappa^+}{D} \sinh(D(L-l)) e^{-j\beta_g(L+l)} \tag{3.42}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial a_{12}}{\partial x} &= j \left\{ \kappa^+ \frac{1}{D} \left[\cosh(D(L-l)) \left\{ \frac{\partial D}{\partial x}(L-l) + D \frac{\partial L}{\partial x} \right\} - \frac{1}{D} \sinh(D(L-l)) \frac{\partial D}{\partial x} \right] \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{D} \frac{\partial \kappa^+}{\partial x} \sinh(D(L-l)) \right\} e^{-j\beta_g(L+l)} - j a_{12} \left(\frac{\partial \beta_g}{\partial x}(L+l) + \beta_g \frac{\partial L}{\partial x} \right) \tag{3.43}
\end{aligned}$$

• a_{21}

$$a_{21} = -j \frac{\kappa^-}{D} \sinh(D(L-l)) e^{j\beta_g(L+l)} \tag{3.44}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial a_{21}}{\partial x} &= -j \left\{ \kappa^- \frac{1}{D} \left[\cosh(D(L-l)) \left\{ \frac{\partial D}{\partial x}(L-l) + D \frac{\partial L}{\partial x} \right\} - \frac{1}{D} \sinh(D(L-l)) \frac{\partial D}{\partial x} \right] \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{D} \frac{\partial \kappa^-}{\partial x} \sinh(D(L-l)) \right\} e^{j\beta_g(L+l)} + j a_{21} \left(\frac{\partial \beta_g}{\partial x}(L+l) + \beta_g \frac{\partial L}{\partial x} \right) \tag{3.45}
\end{aligned}$$

• a_{22}

$$a_{22} = \left\{ \cosh(D(L-l)) + j \frac{\Delta \beta}{D} \sinh(D(L-l)) \right\} e^{j\beta_g(L-l)} \tag{3.46}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial a_{22}}{\partial x} &= \left\{ \sinh(D(L-l)) \left\{ \frac{\partial D}{\partial x}(L-l) + D \frac{\partial L}{\partial x} \right\} + j \frac{1}{D} \left[\frac{\frac{\partial \Delta \beta}{\partial x} D - \Delta \beta \frac{\partial D}{\partial x}}{D} \right. \right. \\
&\quad \times \sinh(D(L-l)) + \Delta \beta \cosh(D(L-l)) \left. \left. \left\{ \frac{\partial D}{\partial x}(L-l) + D \frac{\partial L}{\partial x} \right\} \right] \right\} e^{j\beta_g(L-l)} \\
&\quad + j a_{22} \left(\frac{\partial \beta_g}{\partial x}(L-l) + \beta_g \frac{\partial L}{\partial x} \right) \tag{3.47}
\end{aligned}$$

• a_{11z}

$$a_{11z} = \left\{ \cosh(Dl) - j \frac{\Delta \beta}{D} \sinh(Dl) \right\} e^{-j\beta_g l} \tag{3.48}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial a_{11z}}{\partial x} &= \left[\sinh(Dl) \frac{\partial D}{\partial x} l - j \frac{1}{D} \left\{ \frac{\frac{\partial \Delta \beta}{\partial x} D - \Delta \beta \frac{\partial D}{\partial x}}{D} \sinh(Dl) + \Delta \beta \cosh(Dl) \frac{\partial D}{\partial x} l \right\} \right] e^{-j\beta_g l} \\
&\quad - j a_{11z} \frac{\partial \beta_g}{\partial x} l \tag{3.49}
\end{aligned}$$

- a_{12z}

$$a_{12z} = j \frac{\kappa^+}{D} \sinh(Dl) e^{-j\beta_g l} \quad (3.50)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_{12z}}{\partial x} &= j \left\{ \kappa^+ \left[\frac{1}{D} \cosh(Dl) \frac{\partial D}{\partial x} l - \frac{1}{D^2} \sinh(Dl) \frac{\partial D}{\partial x} \right] \frac{1}{D} \frac{\partial \kappa^+}{\partial x} \sinh(Dl) \right\} e^{-j\beta_g l} \\ &\quad - j a_{12z} \frac{\partial \beta_g}{\partial x} l \end{aligned} \quad (3.51)$$

- a_{21z}

$$a_{21z} = -j \frac{\kappa^-}{D} \sinh(Dl) e^{j\beta_g l} \quad (3.52)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_{21z}}{\partial x} &= -j \left\{ \kappa^- \left[\frac{1}{D} \cosh(Dl) \frac{\partial D}{\partial x} l - \frac{1}{D^2} \sinh(Dl) \frac{\partial D}{\partial x} \right] \frac{1}{D} \frac{\partial \kappa^-}{\partial x} \sinh(Dl) \right\} e^{j\beta_g l} \\ &\quad + j a_{21z} \frac{\partial \beta_g}{\partial x} l \end{aligned} \quad (3.53)$$

- a_{22z}

$$a_{22z} = \left\{ \cosh(Dl) + j \frac{\Delta\beta}{D} \sinh(Dl) \right\} e^{j\beta_g l} \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_{22z}}{\partial x} &= \left\{ \sinh(Dl) \frac{\partial D}{\partial x} l + j \frac{1}{D} \left[\frac{\frac{\partial \Delta\beta}{\partial x} D - \Delta\beta \frac{\partial D}{\partial x}}{D} \sinh(Dl) + \Delta\beta \cosh(Dl) \frac{\partial D}{\partial x} l \right] \right\} e^{j\beta_g l} \\ &\quad + j a_{22z} \frac{\partial \beta_g}{\partial x} l \end{aligned} \quad (3.55)$$

- rg_1, rg_2, rg_3, rg_4

$$rg_1 = r_1 a_{11} - a_{21} \quad (3.56)$$

$$\frac{\partial rg_1}{\partial x} = \frac{\partial r_1}{\partial x} a_{11} + r_1 \frac{\partial a_{11}}{\partial x} - \frac{\partial a_{21}}{\partial x} \quad (3.57)$$

$$rg_2 = a_{22} - r_2 a_{12} \quad (3.58)$$

$$\frac{\partial rg_2}{\partial x} = \frac{\partial a_{22}}{\partial x} - \frac{\partial r_2}{\partial x} a_{12} - r_2 \frac{\partial a_{12}}{\partial x} \quad (3.59)$$

$$rg_3 = r_1 a_{11z} + a_{12z} \quad (3.60)$$

$$\frac{\partial rg_3}{\partial x} = \frac{\partial r_1}{\partial x} a_{11z} + r_1 \frac{\partial a_{11z}}{\partial x} + \frac{\partial a_{12z}}{\partial x} \quad (3.61)$$

$$rg_4 = r_1 a_{21} + a_{22z} \quad (3.62)$$

$$\frac{\partial rg_4}{\partial x} = \frac{\partial r_1}{\partial x} a_{21z} + r_1 \frac{\partial a_{21z}}{\partial x} + \frac{\partial a_{22z}}{\partial x} \quad (3.63)$$

- fl, fr, rg

$$fr = \frac{r_2 a_{11} - a_{21}}{a_{22} - r_2 a_{12}} = \frac{rg_1}{rg_2} \quad (3.64)$$

$$\frac{\partial fr}{\partial x} = \frac{\frac{\partial rg_1}{\partial x} - fr \frac{rg_2}{x}}{rg_2} \quad (3.65)$$

$$fl = \frac{r_1 a_{11z} + a_{12z}}{r_1 a_{21z} + a_{22z}} = \frac{rg_3}{rg_4} \quad (3.66)$$

$$\frac{\partial fl}{\partial x} = \frac{\frac{\partial rg_3}{\partial x} - fl \frac{\partial rg_4}{\partial x}}{rg_4} \quad (3.67)$$

$$rg = fl \cdot fr \quad (3.68)$$

$$\frac{\partial rg}{\partial x} = \frac{\partial fl}{\partial x} fr + fl \frac{\partial fr}{\partial x} \quad (3.69)$$

- *transr*

$$transr = \frac{a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}}{a_{22} - r_2 a_{12}} \quad (3.70)$$

$$\frac{\partial transr}{\partial x} = \frac{\partial \left(\frac{\partial a_{11}}{\partial x} a_{22} + a_{11} \frac{\partial a_{22}}{\partial x} - \frac{\partial a_{21}}{\partial x} a_{12} - a_{21} \frac{\partial a_{12}}{\partial x} \right) - transr \cdot \frac{\partial rg_2}{\partial x}}{\partial rg_2} \quad (3.71)$$

- *integr*

いま、

$$\{(f(x) + jg(x))'\}^* = (f'(x) + jg'(x))^* = f'(x) - jg'(x) \quad (3.72)$$

$$\{(f(x) + jg(x))^*\}' = (f(x) - jg(x))' = f'(x) - jg'(x) \quad (3.73)$$

より、微分して複素共役をとると、複素共役をとって微分するのとは等しいので

$$integr = \sum \frac{|transr|^2(1 + |fl|^2)}{|1 - rg|^2} dz \quad (3.74)$$

$$= \sum \frac{(transr)(transr)^*(1 + fl \cdot fl^*)}{(1 - rg)(1 - rg)^*} dz \quad (3.75)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{分子}}{\partial x} &= |transr|^2 \left(\frac{\partial fl}{\partial x} fl^* + fl \frac{\partial fl^*}{\partial x} \right) \\ &\quad + \left(\frac{\partial transr}{\partial x} transr^* + transr \frac{\partial transr^*}{\partial x} \right) (1 + |fl|^2) \end{aligned} \quad (3.76)$$

$$\frac{\partial \text{分母}}{\partial x} = -\frac{\partial rg}{\partial x} (1 - rg)^* - (1 - rg) \frac{\partial rg^*}{\partial x} \quad (3.77)$$

$$\frac{\partial integr}{\partial x} = \sum \frac{\frac{\partial \text{分子}}{\partial x} |1 - rg|^2 - |transr|^2 (1 + |fl|^2) \frac{\partial \text{分母}}{\partial x}}{|1 - rg|^4} dz \quad (3.78)$$

- P_{spn} (linear scale)

$$P_{spn} = \frac{J_0}{2} \int_0^L \frac{|transr|^2(1 + |fl|^2)}{|1 - rg|^2} (1 + |r_2|^2) dz \quad (3.79)$$

$$= \frac{x(15)}{2} (1 - x^2(11)) \text{integr} \quad (3.80)$$

$$\frac{\partial P_{spon}}{\partial x} = \frac{x(15)}{2} (1 - x^2(11)) \frac{\partial \text{integr}}{\partial x} \quad \text{ただし、} x(11), x(15) \text{ 以外} \quad (3.81)$$

$$\frac{\partial P_{spon}}{\partial x(11)} = \frac{x(15)}{2} \left\{ -2x(11) \cdot \text{integr} + (1 - x^2(11)) \frac{\partial \text{integr}}{\partial x(11)} \right\} \quad (3.82)$$

$$\frac{\partial P_{spon}}{\partial x(15)} = \frac{1 - x^2(11)}{2} \left\{ \text{integr} + x(15) \frac{\partial \text{integr}}{\partial x(15)} \right\} \quad (3.83)$$

• P_{spon} (log scale)

$$10 \log_{10} P_{spon} = \frac{10}{\log_{10}} \left\{ \log x(15) + \log (1 - x^2(11)) \right. \\ \left. + \log \text{integr} - \log 2 \right\} \quad (3.84)$$

$$\frac{\partial 10 \log_{10} P_{spon}}{\partial x} = \frac{10}{\log 10} \frac{\frac{\partial \text{integr}}{\partial x}}{\text{integr}} \quad \text{ただし、} x(11), x(15) \text{ 以外} \quad (3.85)$$

$$\frac{\partial 10 \log_{10} P_{spon}}{\partial x(11)} = \frac{10}{\log 10} \left\{ \frac{-2x(11)}{1 - x^2(11)} + \frac{\frac{\partial \text{integr}}{\partial x(11)}}{\text{integr}} \right\} \quad (3.86)$$

$$\frac{\partial 10 \log_{10} P_{spon}}{\partial x(15)} = \frac{10}{\log 10} \left\{ \frac{1}{x(15)} + \frac{\frac{\partial \text{integr}}{\partial x(15)}}{\text{integr}} \right\} \quad (3.87)$$

第 4 章

初期値の自動化

4.1 初期値

最小二乗法でフィッティングを掛ける場合、最初に与える初期値によって、うまく収束したり、全く異なる方向に発散してしまったりする。したがって、いかにうまく初期値を与えるかも、非常に重要な要素である。ここでは、スペクトルから、初期値を自動的に計算するためのルーチンについて説明する。

今、共振器長 L 、グレーティングピッチ Λ は分かっているものとする。また、両端面の反射率については、へき開か、コーティングをしているかは、分かっており、さらに、コーティングをしている場合は、その反射率 R_{front}, R_{rear} は分かっているものとする。

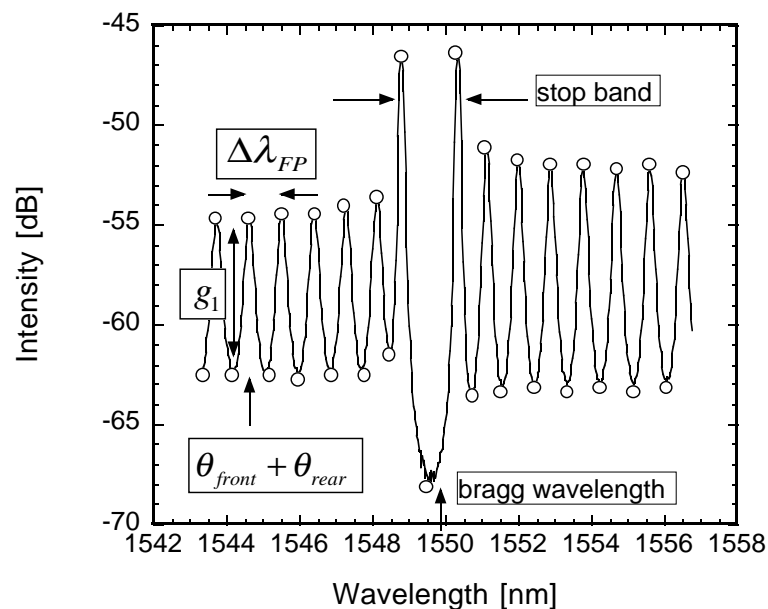


図 4.1: 初期値の自動化

1. スペクトルから極大点と極小点を読みとり、FP ピーク間隔 $\Delta\lambda_{FP}$ を計算する。

2. 極大点間の間隔が最も大きいところをストップバンドとし、その中間点をブラッグ波長 λ_{Bragg} とする。
3. 共振器長 L 、グレーティングピッチ Λ は分かっているので、実効屈折率 $n_{eff} = n_{Bragg} + \frac{dn}{d\lambda}(\lambda - \lambda_{Bragg})$ を計算する。

$$n_{Bragg} = \frac{\lambda_{Bragg}}{2\Lambda} \quad (4.1)$$

$$\frac{dn}{d\lambda} = \frac{n_{Bragg}}{\lambda_{Bragg}} - \frac{\lambda_{Bragg}}{2L\Delta\lambda_{FP}} \quad (4.2)$$

4. へき開端面の場合は、端面反射率 R_{front}, R_{rear} を計算する。

$$R_{front} = R_{rear} = \left(\frac{n_{Bragg} - 1}{n_{Bragg} + 1} \right)^2 \quad (4.3)$$

5. グレーティングの影響の小さい、最も短波側の FP ピーク波長 λ_{short} から、両端面の端面位相の和を計算する。

$$\theta_{rear} + \theta_{front} = \frac{\text{mod}(\beta 2L, 2\pi)\lambda_{short}}{2n_{eff}\Lambda} \quad (4.4)$$

初期値では、 $\theta_{front} = 0$ とする。

6. 両端面の反射率が 0 の場合について、あらかじめ数値計算でストップバンド幅と屈折率結合係数 κ_i との関係性を求めておき (図 4.2)、読みとったストップバンド幅から、この関係により κ_i の値を計算する。

$$\kappa_i = 0.68025\delta - 2.6206/L \quad (4.5)$$

7. グレーティングの影響の小さい、最も短波側の FP ピークの山谷比から、利得プロファイル $g = g_1 - g_2(E - E_p)^2$ の g_1 を計算する[11]。

$$g_1 = \frac{1}{L} \ln \frac{\sqrt{10^{P+/10}} - \sqrt{10^{P-/10}}}{\sqrt{10^{P+/10}} + \sqrt{10^{P-/10}}} + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{\sqrt{R_{front}R_{rear}}} \quad (4.6)$$

8. ブラッグ波長を利得ピークの波長 λ_p とする。
9. $g_2 = 0$ とする。
10. $\kappa_g = 0$ とする。

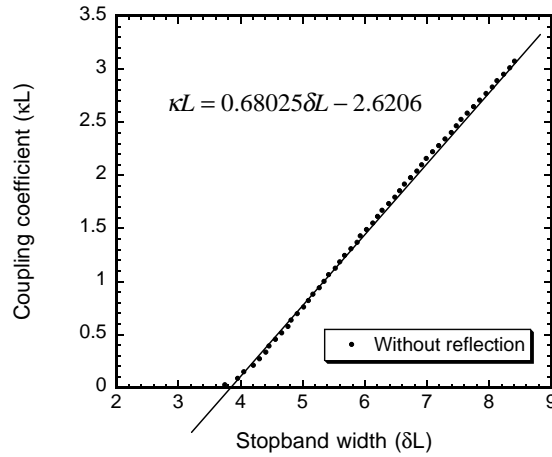


図 4.2: ストップバンド δL と結合係数 κL の関係

ここで、(4.4) 式を導出する。

λ_0 で FP ピークになるように、共振器長 L を調整する。つまり、

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} n 2L = 2\pi m + \Phi \quad (4.7)$$

であるとき、

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} n 2(L_0 + l) = 2\pi m + \Phi \quad (4.8)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} n 2(L_0) = 2\pi m \quad (4.9)$$

となるような l は

$$l = \frac{\lambda_0 \Phi}{4n\pi} \quad (4.10)$$

であるから、共振器長を l だけ縮めればよい。つまり、一方の端面位相 θ_{front} を 0 と固定し、もう一方の端面位相 θ_{rear} を

$$\frac{\theta_{rear}}{2\pi} \Lambda = \frac{\lambda_0 \Phi}{4n\pi} \quad (4.11)$$

$$\theta_{rear} = \frac{\lambda_0 \Phi}{2n\Lambda} \quad (4.12)$$

とすればよい。

次に (4.6) 式を導出する。FP ピークの山谷比から、利得を求める。

ある点 z で、 F_1 の電界が発生したとして、それがピーク P^+ 、谷 P^- になる時、

$$P^+ = F_1 + F_1 \sqrt{R_{front} R_{rear}} e^{\frac{1}{2} g 2L}$$

$$+F_1\sqrt{R_{front}R_{rear}}e^{\frac{1}{2}g^2L}\sqrt{R_{front}R_{rear}}e^{\frac{1}{2}g^2L}+\dots \quad (4.13)$$

$$= F_1\frac{1}{1-\sqrt{R_{front}R_{rear}}e^{gL}} \quad (4.14)$$

$$P^- = F_1 - F_1\sqrt{R_{front}R_{rear}}e^{\frac{1}{2}g^2L} + F_1\sqrt{R_{front}R_{rear}}e^{\frac{1}{2}g^2L}\sqrt{R_{front}R_{rear}}e^{\frac{1}{2}g^2L} - \dots \quad (4.15)$$

$$= F_1\frac{1}{1+\sqrt{R_{front}R_{rear}}e^{gL}} \quad (4.16)$$

となるので、

$$\frac{P^+}{P^-} = \frac{1 + \sqrt{R_{front}R_{rear}}e^{gL}}{1 - \sqrt{R_{front}R_{rear}}e^{gL}} \quad (4.17)$$

より、 $P_{\log} = 10 \log_{10} P_{linear}$ であることを考慮して、

$$g_1 = \frac{1}{L} \ln \frac{\sqrt{10^{P^+/10}} - \sqrt{10^{P^-/10}}}{\sqrt{10^{P^+/10}} + \sqrt{10^{P^-/10}}} + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{\sqrt{R_{front}R_{rear}}} \quad (4.18)$$

4.2 ピークの読み取り

初期値の自動化において、測定スペクトルからのピークの読み取りというのが、以外と難しい。隣の点との傾きを見ているだけだと、測定スペクトルにノイズが含まれると、そのノイズを、いくつかの極大・極小だと判断してしまう。ここでは、極大極小の判定を以下のようにした。

1. 隣の点との傾きが正か負かを判断する
2. ある点の前後2つずつの(5つの連続した)点で全て傾きの符号が同じであれば、その点の傾きを正または負に決定する
3. 全ての点での符号が一致しない場合は、とりあえず、正でも負でもない、グレーであるとする(極大、極小では必ずグレーとなる)
4. 正 → グレー → 負 の場合は、グレーゾーンに極大があるとし、グレーゾーンの中での最大値を見つけて、それを極大とする
5. 負 → グレー → 正 の場合は、グレーゾーンに極小があるとし、グレーゾーンの中での最小値を見つけて、それを極小とする

6. 正 → グレー → 正 の場合は、グレーゾーンは全て正であるとし、極大極小は存在しないとする
7. 負 → グレー → 負 の場合は、グレーゾーンは全て負であるとし、極大極小は存在しないとする

以上のようにして、極大・極小を判定することにより、測定スペクトルに多少のノイズがあっても、うまく初期値を計算することが可能になった。

以上のようにして算出された初期値の例を示す。

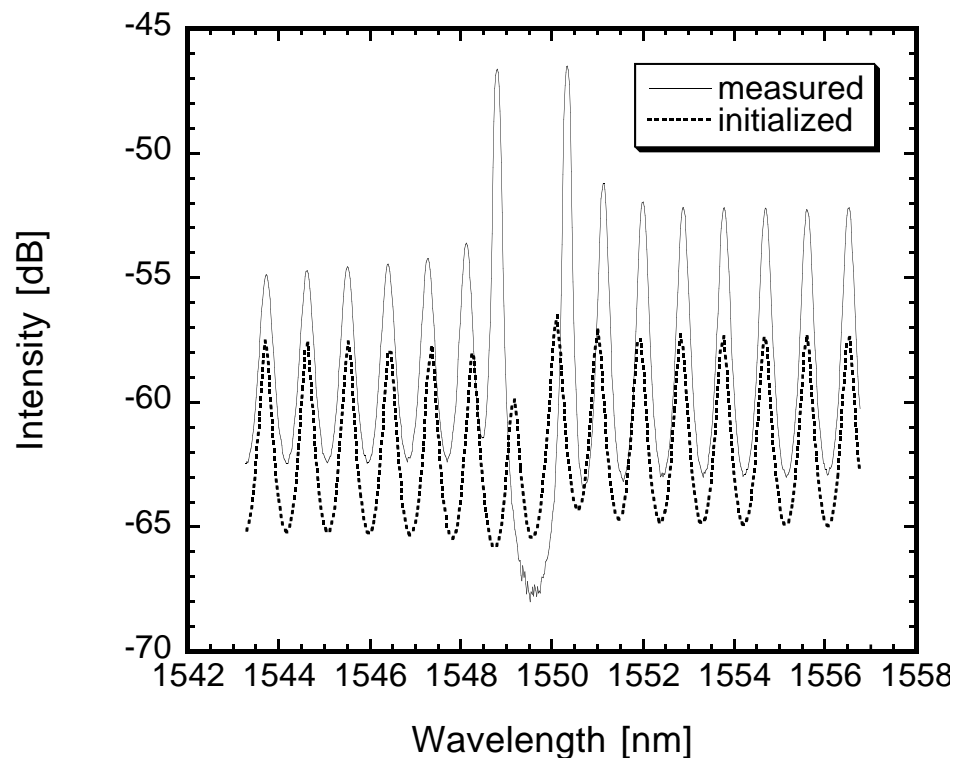


図 4.3: 初期値

これで、最小二乗法のための初期値の算出が全自動でできるようになったので、スペクトル測定データから、計算機上のコマンド一つで、レーザのパラメータの値を抽出することが可能になった。

表 4.1: 初期値の値

Parameter [unit]	value
net gain g_1 [cm^{-1}]	10.2
net gain curvature g_2 [$\mu\text{m}^{-1}\text{eV}^2$]	0
gain peak wavelength λ_p [nm]	1550
refractive index n_{Bragg}	3.23
$dn/d\lambda$ [μm^{-1}]	-0.343
index coupling coefficient κ_i [cm^{-1}]	17.2
rear facet phase [degree]	146
front facet phase [degree]	0
facet reflectivity $R_{\text{front}}, R_{\text{rear}}$ [%]	27.8

$$g = g_1 - g_2 \left(E - \frac{hc}{q\lambda_p} \right)^2, \quad n_{\text{eff}} = n_{\text{Bragg}} + \frac{dn}{d\lambda} (\lambda - \lambda_{\text{Bragg}})$$

第 5 章

抽出結果の例

5.1 いろいろなレーザでの測定例

第 4 章までで、パラメータ抽出のための基本的な理論は終了である。この章では、これまでの理論に基づき、実際の DFB レーザのスペクトルからパラメータ抽出を行なった例を挙げる。この章に挙げた例は、

- IC-DFB, $L=350[\mu\text{m}]$, $\Lambda=0.240[\mu\text{m}]$, as-cleaved
- GC-DFB, $L=270[\mu\text{m}]$, $\Lambda=0.2372[\mu\text{m}]$, as-cleaved
- IC-DFB, $L=305[\mu\text{m}]$, $\Lambda=0.202[\mu\text{m}]$, AR-HR coated
- $\lambda/4$ 位相シフト IC-DFB, $L=470[\mu\text{m}]$, $\Lambda=0.244[\mu\text{m}]$, AR-AR coated

である。抽出結果は、この後 4 ページにわたって載せてある。いずれの場合も、うまくフィッティングが掛かっており、パラメータを抽出できていることが分かる。ただし、 $\lambda/4$ 位相シフトに関しては、端面反射率が小さいため、端面位相の特長がスペクトルにでてこない、さらに、FP ピークがない、などの理由により、信頼性はかなり低いものと考えられる。

しかし、as-cleaved の DFB レーザや、AR-HR コートの DFB レーザでは、問題なくパラメータを決定できることが分かる。

5.1.1 IC-DFB, $L=350[\mu\text{m}]$, $\Lambda=0.240[\mu\text{m}]$, as-cleaved

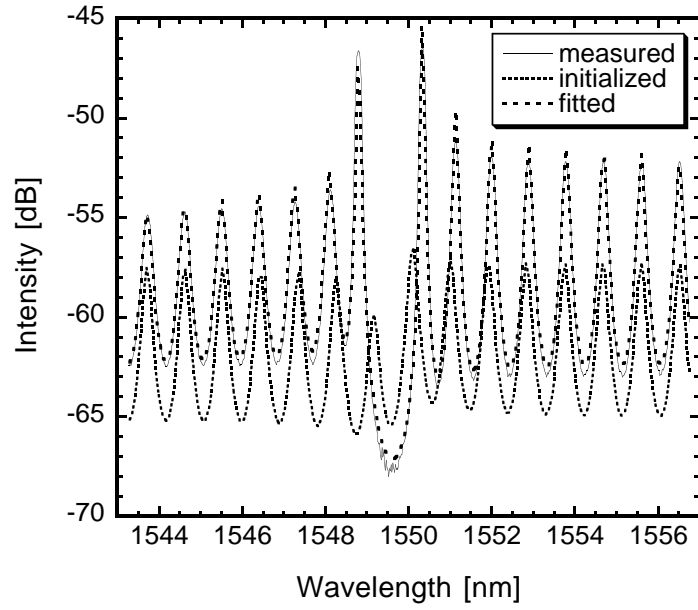


図 5.1: IC-DFB のスペクトル

表 5.1: IC-DFB の抽出パラメータ

Parameter [unit]	init.	fitted
net peak gain g_1 [cm^{-1}]	10.2	18.4
net gain curvature g_2 [$\mu\text{m}^{-1}\text{eV}^2$]	0	8
gain peak wavelength λ_p [nm]	1550	1560
refractive index n_{Bragg}	3.23	3.23
$dn/d\lambda$ [μm^{-1}]	-0.343	-0.351
index coupling coefficient κ_i [cm^{-1}]	17.2	41.6
rear facet phase [degree]	147	-124
front facet phase [degree]	0	-141
facet reflectivity $R_{\text{front}}, R_{\text{rear}}$ [%]	27.8	27.8

$$g = g_1 - g_2 \left(E - \frac{hc}{q\lambda_p} \right)^2, \quad n_{\text{eff}} = n_{\text{Bragg}} + \frac{dn}{d\lambda} (\lambda - \lambda_{\text{Bragg}})$$

5.1.2 GC-DFB, $L=270[\mu\text{m}]$, $\Lambda=0.2372[\mu\text{m}]$, as-cleaved

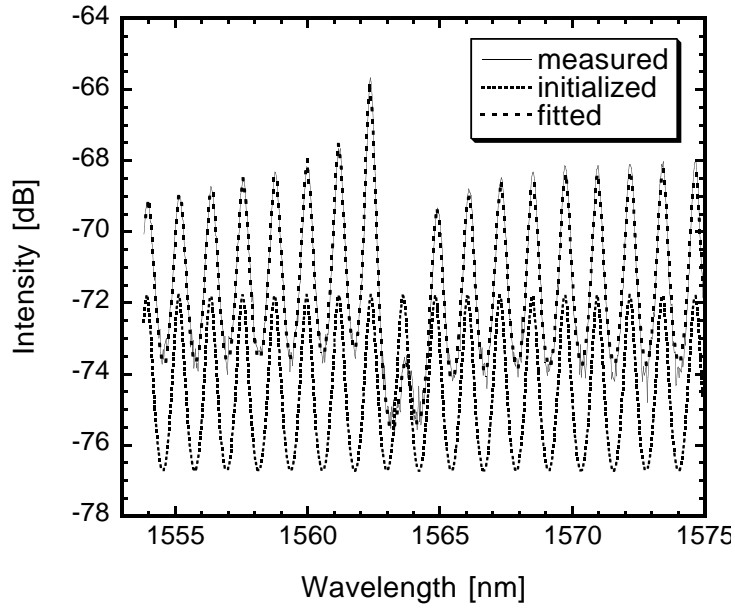


図 5.2: GC-DFB のスペクトル

表 5.2: GC-DFB の抽出パラメータ

Parameter [unit]	init.	fitted
net gain g_1 [cm^{-1}]	1.2	3.2
net gain curvature g_2 [$\mu\text{m}^{-1}\text{eV}^2$]	0	8
gain peak wavelength λ_p [nm]	1562	1572
refractive index n_{Bragg}	3.29	3.30
$dn/d\lambda$ [μm^{-1}]	-0.265	-0.274
index coupling coefficient κ_i [cm^{-1}]	0	34.3
gain coupling coefficient κ_g [cm^{-1}]	0	-8.1
rear facet phase [degree]	-11	53
front facet phase [degree]	0	-121
facet reflectivity $R_{\text{front}}, R_{\text{rear}}$ [%]	28.5	28.5

$$g = g_1 - g_2 \left(E - \frac{hc}{q\lambda_p} \right)^2, \quad n_{\text{eff}} = n_{\text{Bragg}} + \frac{dn}{d\lambda} (\lambda - \lambda_{\text{Bragg}})$$

5.1.3 IC-DFB, $L=305[\mu\text{m}]$, $\Lambda=0.202[\mu\text{m}]$, AR-HR coated

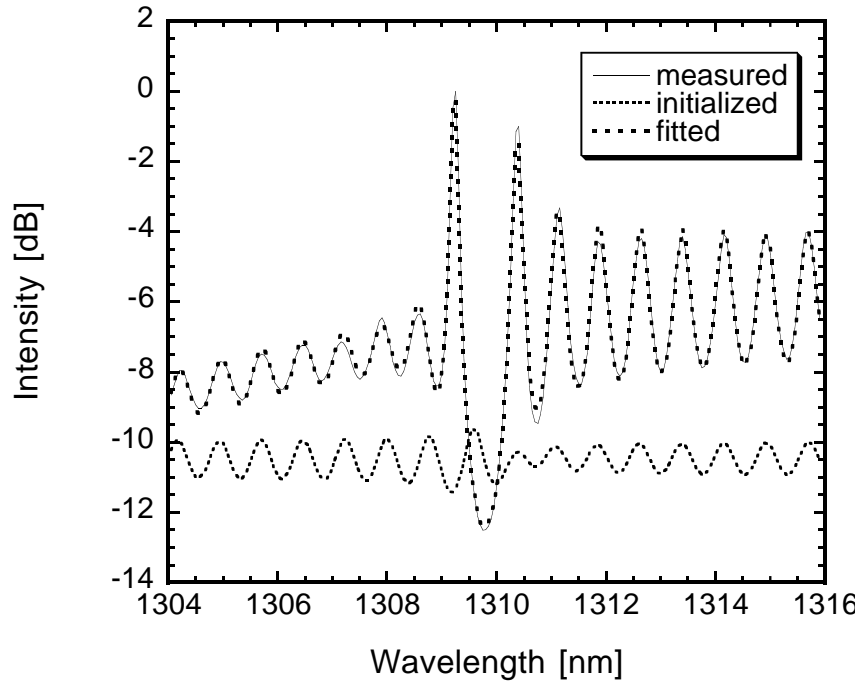


図 5.3: AR-HR coated DFB のスペクトル

表 5.3: AR-HR coated IC-DFB (1%, 80%) の抽出パラメータ

Parameter [unit]	init.	fitted
net gain g_1 [cm^{-1}]	-14.0	22.4
net gain curvature g_2 [$\mu\text{m}^{-1}\text{eV}^2$]	0	25
gain peak wavelength λ_p [nm]	1310	1316
refractive index n_{Bragg}	3.24	3.24
$dn/d\lambda$ [μm^{-1}]	-0.320	-0.345
index coupling coefficient κ_i [cm^{-1}]	11.9	36.2
rear facet phase [degree]	139	172
front facet phase [degree]	0	-149

$$g = g_1 - g_2 \left(E - \frac{hc}{q\lambda_p} \right)^2, \quad n_{\text{eff}} = n_{\text{Bragg}} + \frac{dn}{d\lambda} (\lambda - \lambda_{\text{Bragg}})$$

5.1.4 $\lambda/4$ 位相シフト IC-DFB, $L=470[\mu\text{m}]$, $\Lambda=0.244[\mu\text{m}]$, AR-HR coated

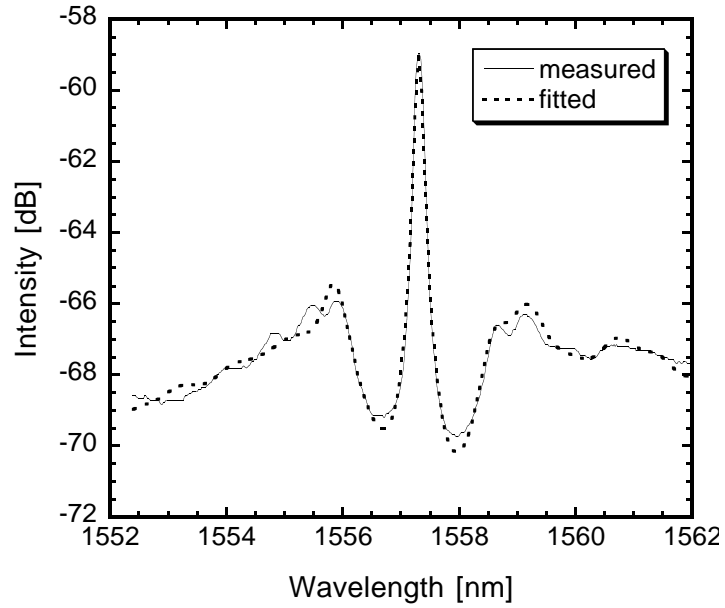


図 5.4: $\lambda/4$ 位相シフト DFB のスペクトル

表 5.4: $\lambda/4$ 位相シフト DFB の抽出パラメータ

Parameter [unit]	value
net gain g_1 [cm^{-1}]	12.4
net gain curvature g_2 [$\mu\text{m}^{-1}\text{eV}^2$]	26
gain peak wavelength λ_p [nm]	1558
refractive index n_{Bragg}	3.19
index coupling coefficient κ_i [cm^{-1}]	47.9
rear facet phase [degree]	347
front facet phase [degree]	48
reflectivity of rear facet [%]	1.6
reflectivity of front facet [%]	1.1
shift quantity	0.268

$$g = g_1 - g_2 \left(E - \frac{hc}{q\lambda_p} \right)^2$$

5.2 両端面からの測定

前節では、実際のレーザのスペクトルからのパラメータ抽出の例を挙げた。ここでは、本手法の信頼性の確認のために、レーザの両端面からのスペクトルに対するパラメータ抽出を行なった結果について述べる。両方の端面からのスペクトルは、主に端面位相の違いに起因して、スペクトル形状も異なっている。この異なったスペクトルに対してそれぞれ独立にフィッティングを掛け、それから同じパラメータ値が抽出されれば、本手法の信頼性は、より向上するであろう。

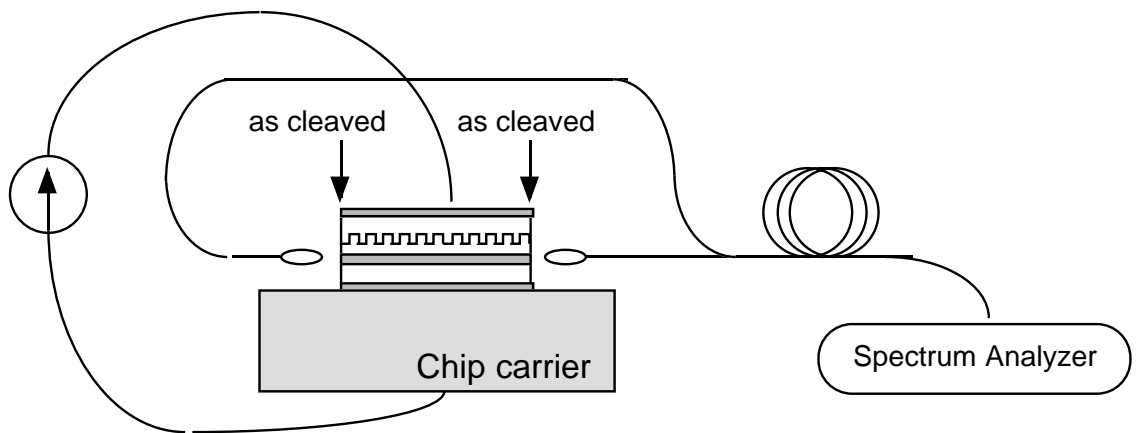


図 5.5: 測定系

実際のレーザの両端面からのスペクトル測定のための測定系を図 5.5 に示す。直流電流を流し、レーザを CW 発振させ、その光をファイバで受けとり、光スペクトルアナライザで測定する。このとき、光スペクトルアナライザは、シングルモノクロモードでなく、ダブルモノクロモードで測定した。また、この測定系では、レーザに全く手を触れることなく、レーザの両方の端面から、スペクトルを測定できる。

以下に、両端面からのスペクトルと、その抽出結果を示す。屈折率結合のレーザは $L=440[\mu\text{m}]$, $\Lambda=0.237[\mu\text{m}]$ 、利得結合のレーザは $L=550[\mu\text{m}]$, $\Lambda=0.237[\mu\text{m}]$ である。

この後 3 ページにわたって示したこれらの結果を見ると、前端面と後端面でのスペクトル形状は異なることが分かる。さらに、それらに対してそれぞれ独立にパラメータ抽出を行なったにもかかわらず、同じパラメータの値を抽出していることが分かる。特に、スペクトル形状の違いの原因となっている端面位相が、同じ値を抽出しており、本手法の信頼性が確かめられた。

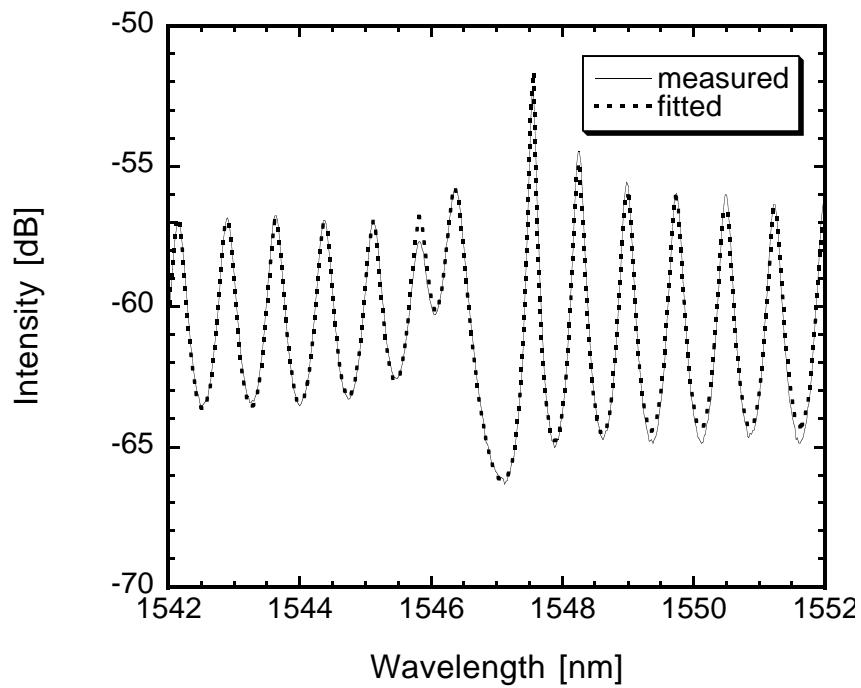


図 5.6: IC-DFB (No.8, $I=3$ [mA]) 前端面からのスペクトル

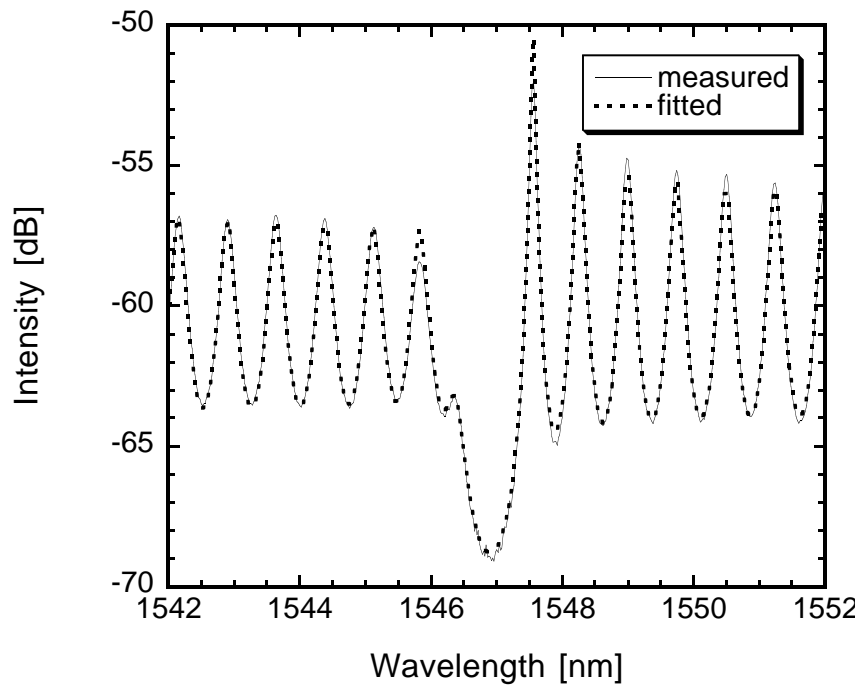


図 5.7: IC-DFB (No.8, $I=3$ [mA]) 後端面からのスペクトル

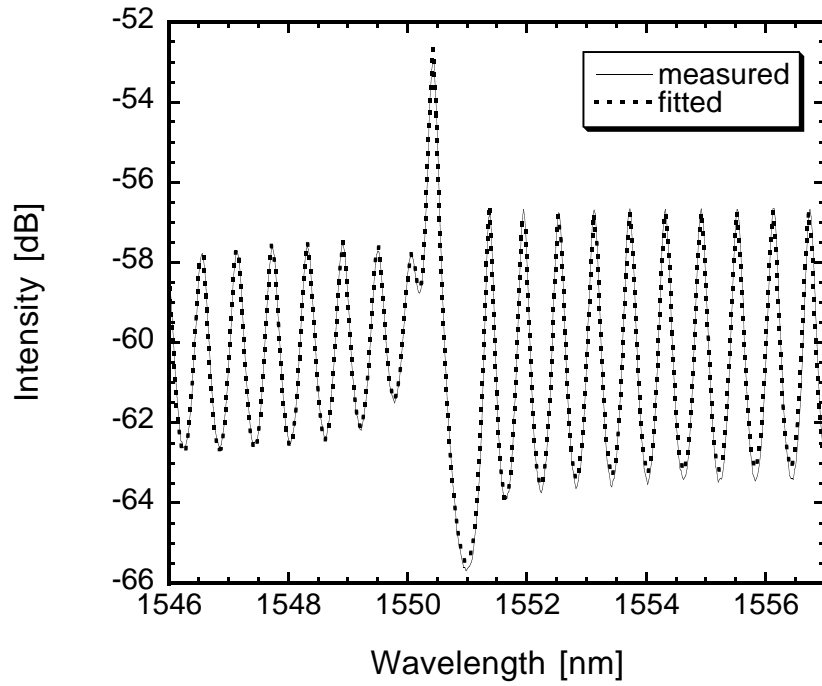


図 5.8: GC-DFB (No.4, $I=24$ [mA]) 前端面からのスペクトル

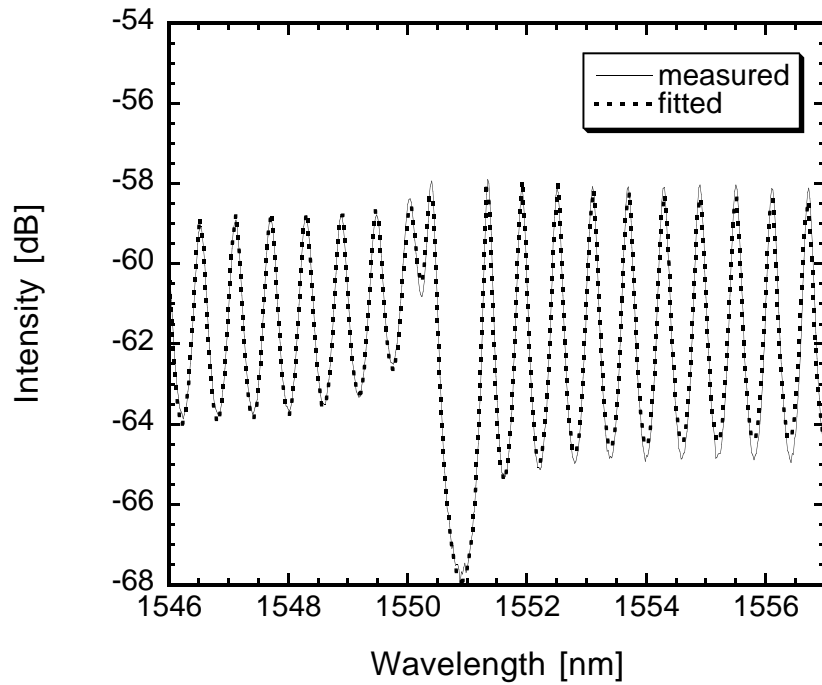


図 5.9: GC-DFB (No.4, $I=24$ [mA]) 後端面からのスペクトル

表 5.5: IC-DFB (No.8, I=3[mA]) の抽出パラメータ

Parameter [unit]	front	rear
net gain g_1 [cm^{-1}]	8.6	8.4
net gain curvature g_2 [$\mu\text{m}^{-1}\text{eV}^2$]	8	6
gain peak wavelength λ_p [nm]	1545	1548
refractive index n_{Bragg}	3.26	3.26
$dn/d\lambda$ [μm^{-1}]	-0.223	-0.223
index coupling coefficient κ_i [cm^{-1}]	36.4	37.6
rear facet phase [degree]	-119	-114
front facet phase [degree]	145	142
facet reflectivity R_{front}, R_{rear} [%]	28.2	28.2

$$g = g_1 - g_2 \left(E - \frac{hc}{q\lambda_p} \right)^2, \quad n_{eff} = n_{Bragg} + \frac{dn}{d\lambda} (\lambda - \lambda_{Bragg})$$

表 5.6: GC-DFB (No.4, I=24[mA]) の抽出パラメータ

Parameter [unit]	front	rear
net gain g_1 [cm^{-1}]	3.3	3.0
net gain curvature g_2 [$\mu\text{m}^{-1}\text{eV}^2$]	6	13
gain peak wavelength λ_p [nm]	1557	1553
refractive index n_{Bragg}	3.27	3.27
$dn/d\lambda$ [μm^{-1}]	-0.250	-0.249
index coupling coefficient κ_i [cm^{-1}]	27.9	28.1
gain coupling coefficient κ_g [cm^{-1}]	-4.6	-4.2
rear facet phase [degree]	-177	-176
front facet phase [degree]	149	144
facet reflectivity R_{front}, R_{rear} [%]	28.3	28.3

$$g = g_1 - g_2 \left(E - \frac{hc}{q\lambda_p} \right)^2, \quad n_{eff} = n_{Bragg} + \frac{dn}{d\lambda} (\lambda - \lambda_{Bragg})$$

5.3 軸方向電界分布

一般に、DFB レーザでは、グレーティングによる共振器内部の反射の影響により、電界の強度分布が、共振器の中央部分で強く、端の部分で弱いという傾向がある。光が集中する → キャリアが誘導放出でなくなる → 屈折率が高くなる → まanus光が集中する → … という関係がある。これを軸方向空間ホールバーニングという。この、軸方向空間ホールバーニングが起こると、共振器の中央部と端の部分で、特性が変わってしまい、スペクトル線幅の増大、などの悪影響を及ぼす。本研究に関しては、レーザの特性は共振器全体で均一であると仮定してモデルをたてているため、ホールバーニングが起きると、正確なパラメータを抽出できないという問題がある。

いま、共振器全体で全てのパラメータは一定であると仮定して、共振器内部での光分布の様子を計算した結果を示す。(正確には、光分布の様子から屈折率を計算し、それに基づいて光分布を計算、それから屈折率を計算…として、セルフコンジステントに計算する必要があるのだが、そこまではしていない。)

それぞれ、5.1節で抽出したパラメータを使って計算している。total は、全てのモードの電界強度の和を表す。main は、主モードの電界分布を、right going, left going はそれぞれ、主モードの右、左向きの波の電界分布を示している。ちなみに、右端面から光が出射しているとしている。また、強度は正規化されているが、total のみ、別の値で正規化されている。

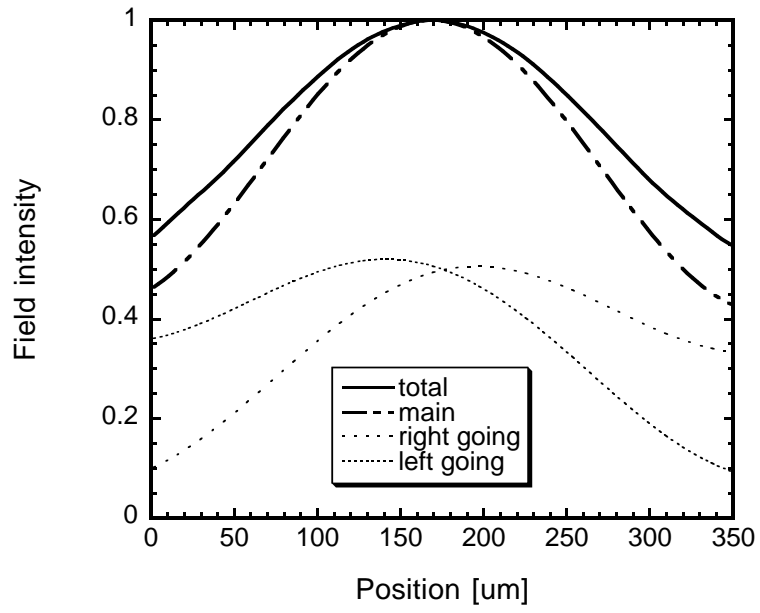


図 5.10: IC-DFB の電界分布

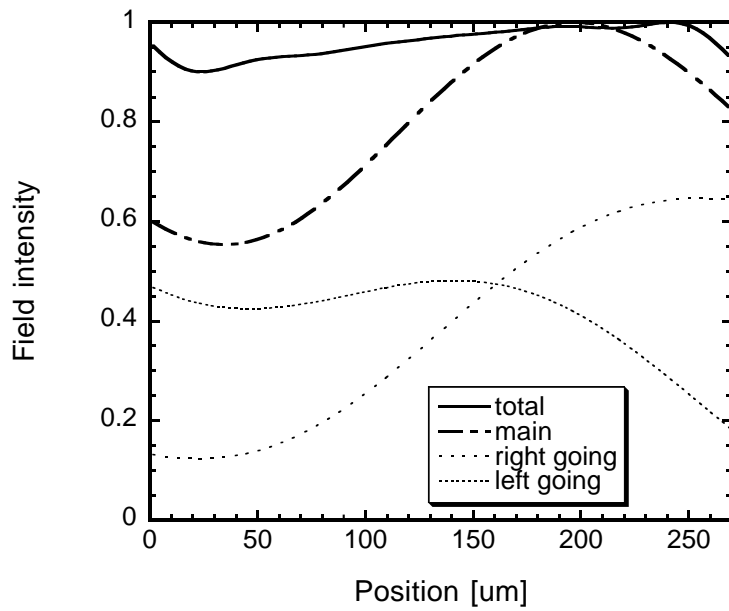


図 5.11: GC-DFB の電界分布

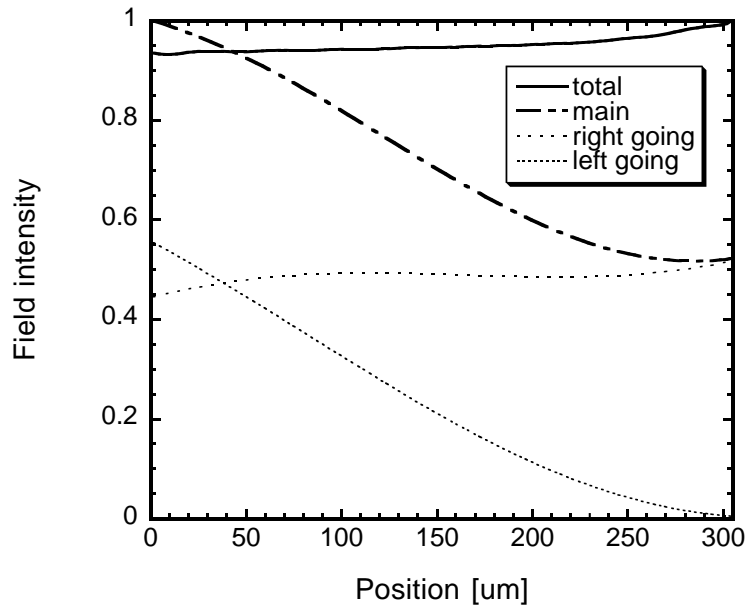


図 5.12: AR-HR coated IC-DFB の電界分布

これらを見ると、主モードの電界分布は、共振器内部の反射の影響により、大きく強度差が出てしまう。しかし、閾値以下では、DFB モードは、共振器内部の反射の影響の小さい FP モードに対して、強度としてはそれほど差がなく、FP モードは、共振器全体でほぼ均等な分布を持つため、全てのモードの和としてみると、共振器内部でそれほど大きな強度差はついていない。また、閾値以下なので、強度の絶対値自体も小さく、軸方向空間ホールバーニングは起きておらず、パラメータ値は共振器全体で均一であるとみなしてもよい。

また、図 5.13, 5.14 は、5.2 節で抽出したパラメータを使って計算したものである。計算したモードは、ストップバンドの短波側と長波側のモード、全てのモードの和、の強度分布である。矢印は、それぞれのモードの波の進行方向を表す。図 5.13 の IC-DFB の例では、短波側のモードの強度が前端面と後端面で大きく異なり、長波側のモードの強度は前端面と後端面とでは、それほど変わらない。また、図 5.14 の GC-DFB の例では、前端面では短波側のモードと長波側のモードとの差が大きく、後端面では、それほど変わらないことが分かる。これらは、スペクトルのモードの強度 (図 5.6, 5.7, 5.8, 5.9) との関係を見ても納得のいく結果である。このように、端面位相の違いによる電界分布の違いが、スペクトル形状の違いとして観測されるのである。

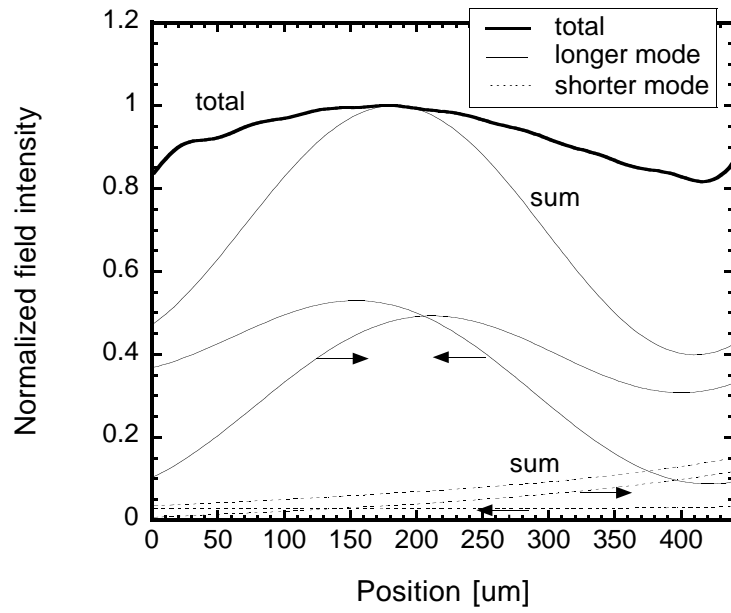


図 5.13: IC-DFB, $I=3[\text{mA}]$ ストップバンドの短波側と長波側のモードの強度分布、および、全体の強度分布

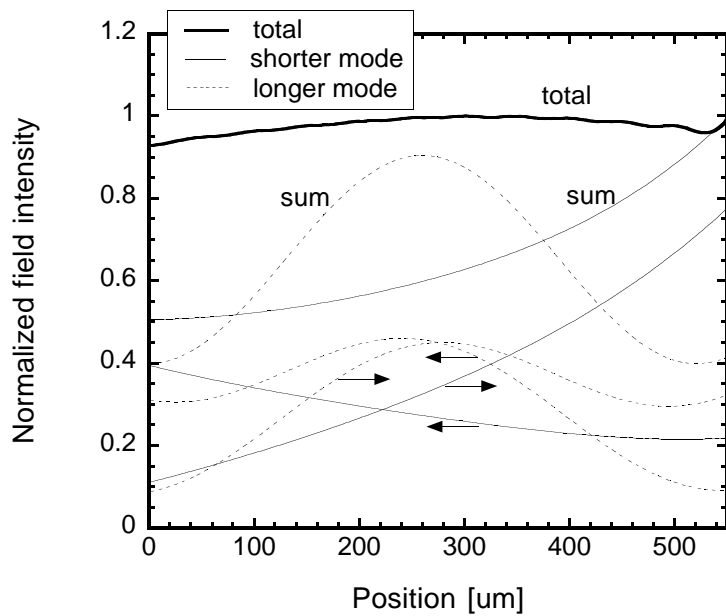


図 5.14: GC-DFB, $I=24[\text{mA}]$ ストップバンドの短波側と長波側のモードの強度分布、および、全体の強度分布

第 6 章

抽出パラメータの誤差評価

これまでで、閾値以下スペクトルに最小二乗法でフィッティングを掛けることにより、デバイスパラメータを測定できるということ、さらに、その信頼性も高いということがわかった。次にわれわれが知りたいのはその抽出値がどれくらい正しい値を表しているかである。

残念ながら、デバイスパラメータを評価する方法が他になく、真の値を知ることはできない。したがってこの方法によって抽出された値の誤差は直接には分からない。ここでは、統計学に基づき、測定スペクトルへの当てはまりの良さの度合を調べることによっておおよその誤差を概算する。

6.1 カイ二乗一定の境界による誤差評価

いま、抽出すべきパラメータ (κ_i, g_1 など) を $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_M)$ と表す。また、波長 λ_i での測定スペクトルを $y_m(\lambda_i)$ 、パラメータ \mathbf{a} を用いて計算したスペクトルを $y_c(\lambda_i; \mathbf{a})$ とする。いま、測定データ $D_{(0)}$ に対して

$$\sum_i^N \{y_m(\lambda_i) - y_c(\lambda_i; \mathbf{a})\}^2 \quad (6.1)$$

が最小になるように、最小二乗法でフィッティングを掛けることにより、パラメータ値 $\mathbf{a}_{fit(0)}$ 得ることができる。

いまから求めるのは、 $\mathbf{a}_{fit(0)}$ がどれくらい信頼性のある値を示しているか、ということである。

まず、 σ_{min}, χ を次のように定義する。

$$\sigma_{min}^2 \equiv \frac{1}{N} \sum_i^N \{y_m(\lambda_i) - y_c(\lambda_i; \mathbf{a}_{fit(0)})\}^2 \quad (6.2)$$

$$\chi^2 \equiv \sum_i^N \left\{ \frac{y_m(\lambda_i) - y_c(\lambda_i; \mathbf{a})}{\sigma_{min}} \right\}^2 \quad (6.3)$$

測定されたデータ $D_{(0)}$ に対して、 χ^2 は $\mathbf{a}_{fit(0)}$ で最小値

$$\chi_{min}^2 \equiv \sum_i^N \left\{ \frac{y_m(\lambda_i) - y_c(\lambda_i; \mathbf{a}_{fit(0)})}{\sigma_{min}} \right\}^2 \quad (6.4)$$

をとる。もし、測定にノイズが含まれると、測定データ D が変化し、それに伴って抽出パラメータ \mathbf{a}_{fit} も変化する。つまり、 \mathbf{a}_{fit} は $\mathbf{a}_{fit(0)}$ の周りに分布する。また、データ $D_{(0)}$ に対して、パラメータが $\mathbf{a}_{fit(0)} + \Delta \mathbf{a}$ に変化すると、 χ^2 の値も $\chi_{min}^2 + \Delta \chi^2$ に変化する。 $\Delta \chi^2$ がある一定値以内の領域は、ある M 次元の信頼区間を $\mathbf{a}_{fit(0)}$ のまわりに定める。 $\Delta \chi^2$ を大きくすればこの領域は広がり、小さくすればこの領域は狭まる (図 6.1)。 $\Delta \chi^2$ をうまくとれば、この領域が \mathbf{a}_{fit} の分布のうち 68% なり、90% なりの範囲を含むようにすることができる。ここでは 99.73% (正規分布の 3σ) となる領域をパラメータ $\mathbf{a}_{fit(0)}$ の誤差領域とする。1 つのパラメータでの 99.73% の信頼性領域に対応する $\Delta \chi^2$ は 9.0 である。例えば図 6.1において、 a_1, a_2 の誤差範囲は $p \leq a_1 \leq p^*, q \leq a_2 \leq q^*$ となる。

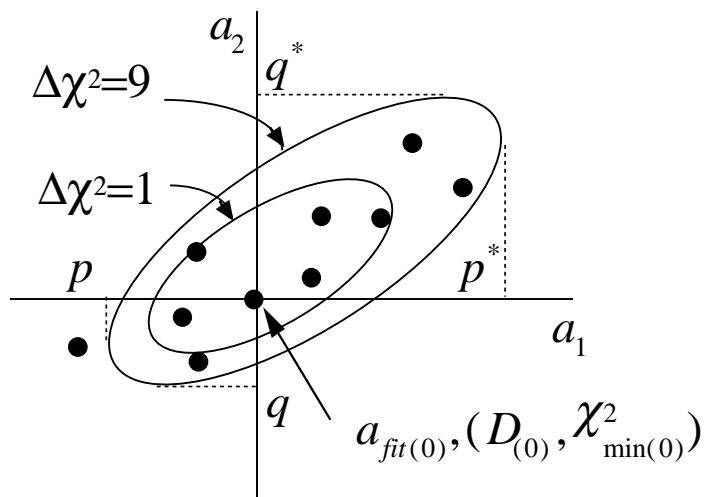


図 6.1: 誤差範囲

この方法は、数学的には

- 真のモデルを使用
- 誤差が正規分布する

のときにのみ成り立つものであるが、ここでは、誤差評価の一つの目安としてこの方法を

用いることにする。また、本来は、各測定点において誤差分布 σ_i が分かっている、

$$\chi^2 \equiv \sum_i^N \left\{ \frac{y_m(\lambda_i) - y_c(\lambda_i; \mathbf{a})}{\sigma_i} \right\}^2 \quad (6.5)$$

として χ^2 を定義するのであるが、ここでは、フィッティングを掛ける時は $\sigma_i = 1$ としておき、フィッティング終了後に

$$\sigma^2 \equiv \frac{1}{N} \sum_i^N \{y_m(\lambda_i) - y_c(\lambda_i; \mathbf{a}_{fit(0)})\}^2 \quad (6.6)$$

を計算することにより、全ての測定点で一定値であるとして σ を得ている。

したがって次のようにすれば抽出パラメータの誤差を評価することができる。例えば、屈折率結合係数 (κ_i) の誤差を評価する場合、

1. 測定スペクトルにフィッティングを掛けてパラメータを抽出し (κ_{i0} とする)、その時の χ_{min}^2 を計算する。
2. κ_i を κ_{i0} から少し動かして ($\kappa_{i0} + \Delta\kappa_i$) 固定し、その他のパラメータに関してフィッティングを掛け、そのときの χ^2 および、

$$\Delta\chi^2 \equiv \chi^2 - \chi_{min}^2 \quad (6.7)$$

を計算する。

3. $\Delta\chi^2 = 9.0$ となるような $\Delta\kappa_i$ を探す。
4. この手続きで、 κ_i が増加していく方向と、減少していく方向の2通りで計算する。

しかし、残念ながら、利得に関しては、誤差を求めることができない。利得は $g = g_1 - g_2(E - \frac{hc}{q\lambda_p})^2$ として、3つのパラメータを用いて表されているので、自由度が大き過ぎて、いくらでも自由な値を取れるためである。例えば、図 6.2において、測定波長の範囲が measured range のとき、true gain profile に対して、extracted gain profile のような利得プロファイルを仮定しても、残差 χ^2 の値は、それほど大きくなるしないのである。

また、屈折率に関しては、誤差が小さ過ぎて、求めることができない。本方法では、共振器長を最初に測定して、その共振器長のもとで様々なパラメータを決定しているが、屈折率の誤差は、共振器長の読み取り誤差よりもかなり小さいため、屈折率の誤差を議論しても無意味なのである。

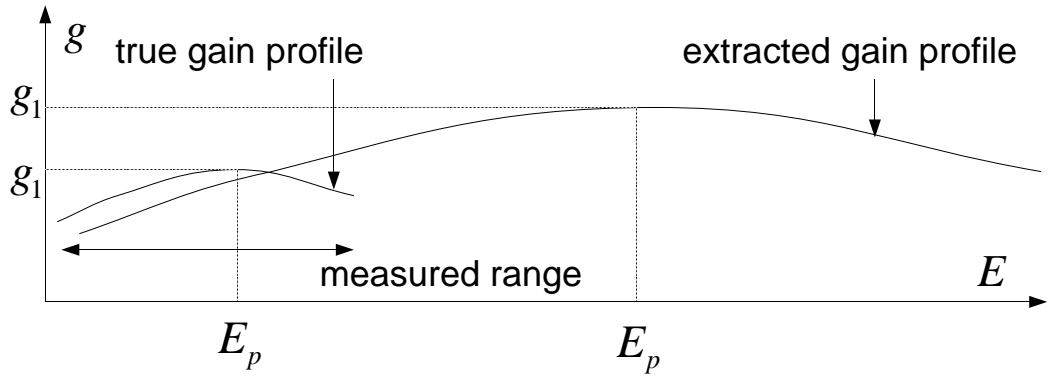


図 6.2: 利得プロファイル

以上のようにして求めた誤差は、図 5.1 の例では

$$40.4 \leq \kappa_i \leq 48.5 \quad (\kappa_{i0} = 41.6) \quad (6.8)$$

$$-124 \leq \theta_{rear} \leq -124 \quad (\theta_{rear0} = -124) \quad (6.9)$$

$$-163 \leq \theta_{front} \leq -93 \quad (\theta_{front0} = -141) \quad (6.10)$$

図 5.2 の例では

$$32.2 \leq \kappa_i \leq 36.3 \quad (\kappa_{i0} = 34.3) \quad (6.11)$$

$$-10.1 \leq \kappa_g \leq -6.1 \quad (\kappa_{g0} = -8.1) \quad (6.12)$$

$$45 \leq \theta_{rear} \leq 61 \quad (\theta_{rear0} = 53) \quad (6.13)$$

$$-132 \leq \theta_{front} \leq -110 \quad (\theta_{front0} = -121) \quad (6.14)$$

図 5.3 の例では

$$35.0 \leq \kappa_i \leq 37.6 \quad (\kappa_{i0} = 36.2) \quad (6.15)$$

$$166 \leq \theta_{rear} \leq 179 \quad (\theta_{rear0} = 172) \quad (6.16)$$

$$-155 \leq \theta_{front} \leq -145 \quad (\theta_{front0} = -150) \quad (6.17)$$

であった。

6.2 閾値以上どこまで信用できるか

本研究は、「閾値下スペクトルからのパラメータ抽出」であるが、この、「閾値以下」という制限について説明する。

そもそも、「パラメータ」というのは、ある「モデル」を仮定し、そのモデルの中の変数である。したがって、重要なのは、モデルである。本手法は、結合波方程式 (2.35), (2.36) というモデルにおける、結合係数 κ を求める手法として考案されたものである。その結合係数の影響が最も大きく表れる「スペクトル」を用いることにより、結合係数を求めよう、というものである。したがって、「スペクトルのモデル」が必要である。スペクトルのモデルに関しては、第2章で説明した。その中の変数である、利得、端面位相なども、本手法により、抽出することができる。

ここで、「閾値以下」という条件が付いてしまうのは、(2.63) 式で、スペクトル計算のモデルとして、無限等比級数の和を用いているため、項比が $|\rho_l \rho_r| < 1$ の時しか、モデルに当てはまらないからである。

厳密には、「閾値」というのは、図 6.3のように、I-L 特性から定義される。

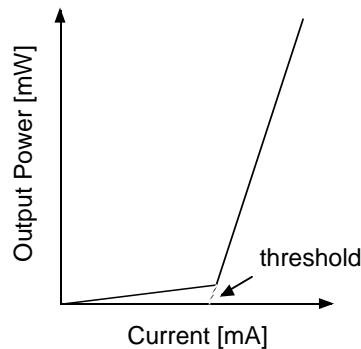


図 6.3: 閾値の定義

数式の上では、一般的には、共振器中央で、ある波長において $\rho_l \rho_r = 1 + j0$ となることを閾値と定義する。ところが、モデルとして妥当なのは、全ての場所、全ての波長において、 $|\rho_l \rho_r| < 1$ を満たすときである。例えば、ストップバンドの中央の波長においては、閾値より低い状態でも、 $\rho_l \rho_r = -1.1 + j0$ など、絶対値が1以上の値になってしまう。絶対値は1より大きくても、位相が合わないため、この波長では発振しない。しかし、こうなるともう、モデルには当てはまらないため、これ以上の電流値では、本手法は用いることはできない。さらに、一般的な定義では、共振器中央でのラウンドトリップゲイン ($\rho_l \rho_r$) を考慮するが、本手法では、中央に限らず、どこかの部分でラウンドトリップゲインの絶対値が1を越えた時点で、モデルから外れてしまうことになる。したがって、本手法の適用範囲は、I-L から決まる閾値よりも、もっと下の範囲でしか成り立たない。

とはいうものの、経験的に、そこまで厳密に線引きする必要はないようである。では、どこまで適用可能かという点、共振器内の全ての場所、全ての波長において、ラウンドトリップゲインの絶対値の最大値が 1.2 程度まで、が一応の目安とすればよさそうである。次の章で詳しく触れるが、同一のレーザで、バイアスを増加させながらスペクトルを測定し、それぞれに独立にフィッティングを掛けた場合の端面位相に注目すると、ラウンドトリップゲインの絶対値が 1.2 以下の場合、端面位相が一定値を示すが、1.2 を越えると、端面位相の値がずれてくることから、以上のことを判定した。

また、ラウンドトリップゲインの絶対値が 1 以下であるからといって、必ずしもフィッティングがうまくいったとは限らず、抽出結果の妥当性は、最終的には人間が判断しなければならない。

第7章

結合係数の変化

7.1 閾値以下

本手法により、DFBレーザの、結合係数の電流依存性を初めて測定することが可能になった。以下に、利得結合DFB、屈折率結合DFBのそれぞれにおいて、結合係数 (κ_i, κ_g)、端面位相 ($\theta_{front}, \theta_{rear}$) の電流依存性の、両端面からの測定結果を示す。IC-DFB No.8 は $L=440[\mu\text{m}]$ 、IC-DFB No.6 は $L=450[\mu\text{m}]$ 、また、GC-DFB No.4 は $L=550[\mu\text{m}]$ 、GC-DFB No.1 は $L=425[\mu\text{m}]$ であり、いずれも $\Lambda=0.237[\mu\text{m}]$ 、端面は、へき開端面である。

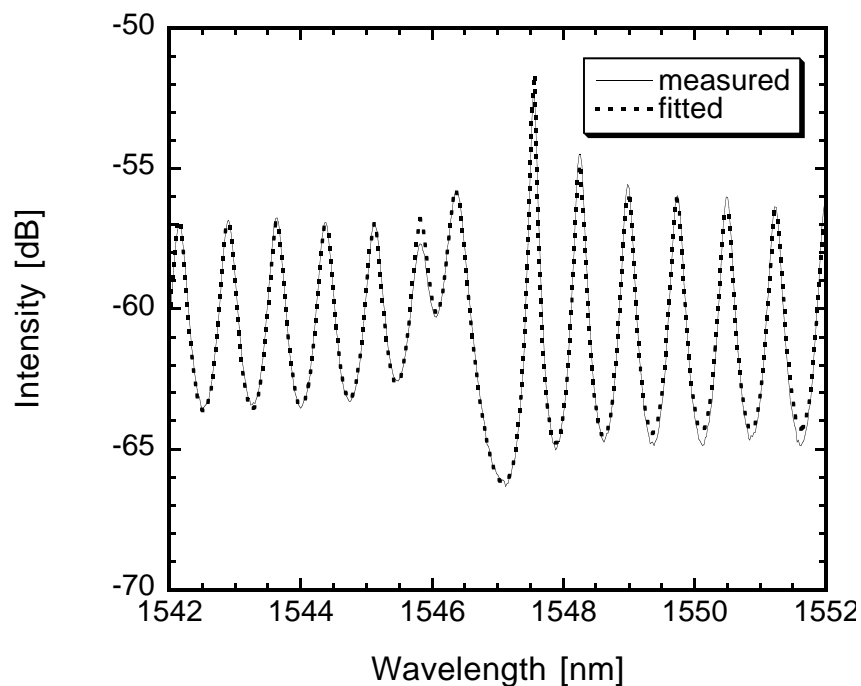


図 7.1: IC-DFB No.8, $I=3[\text{mA}]$ の前端面からのスペクトル

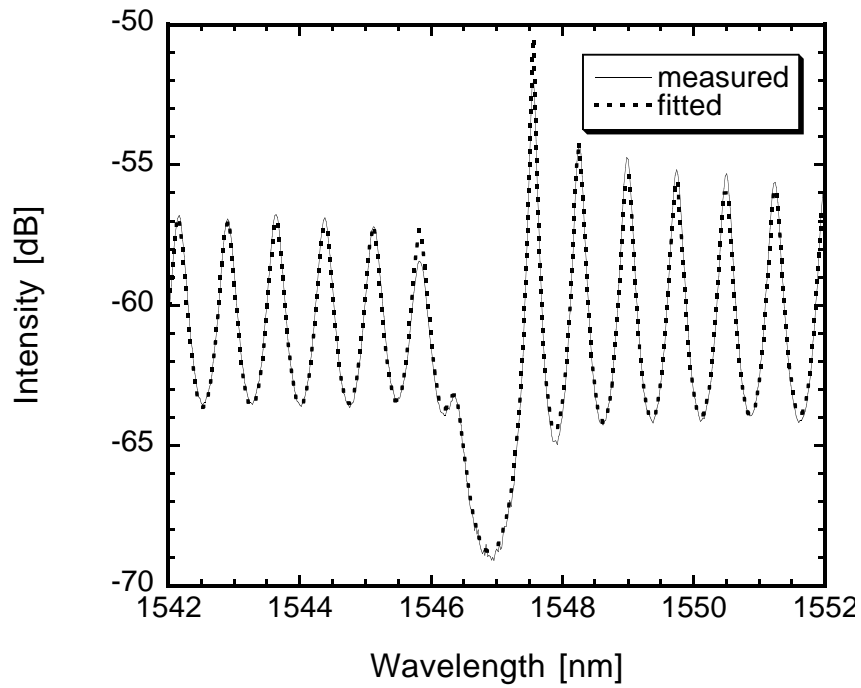


図 7.2: IC-DFB No.8, $I=3[\text{mA}]$ の後端面からのスペクトル

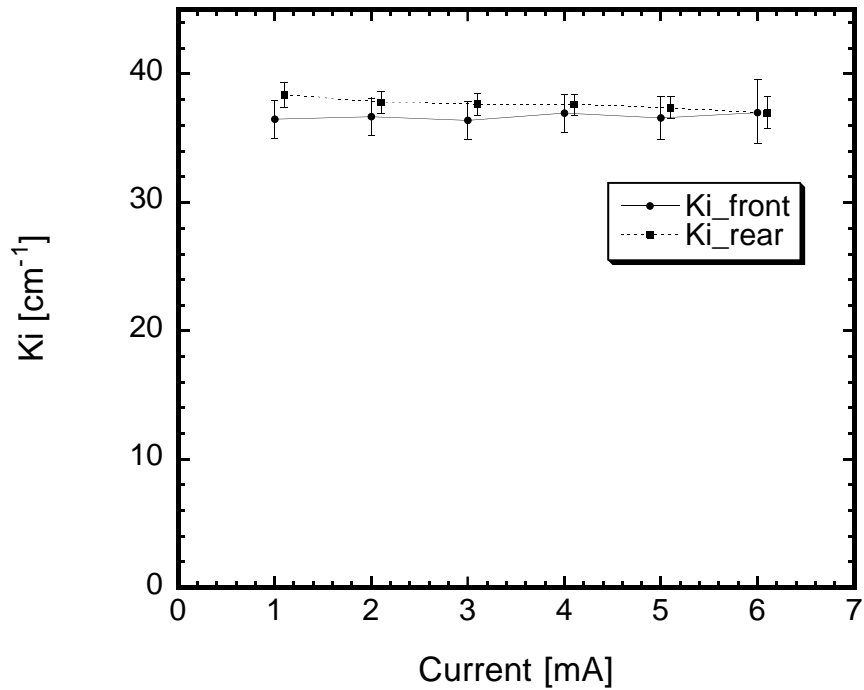


図 7.3: IC-DFB No.8, 屈折率結合係数 κ_i の電流依存性

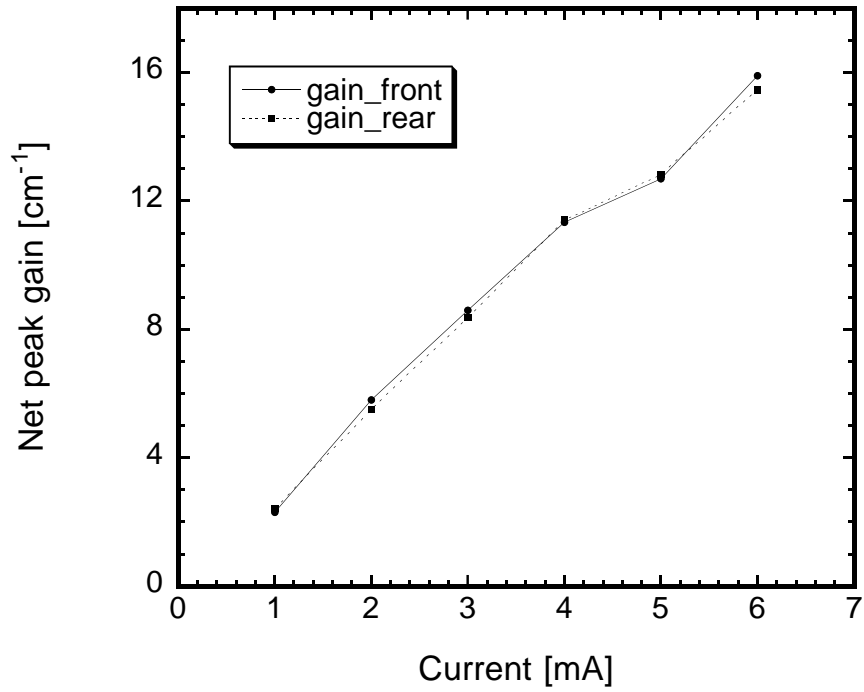


図 7.4: IC-DFB No.8, ネットピークゲイン g_1 の電流依存性

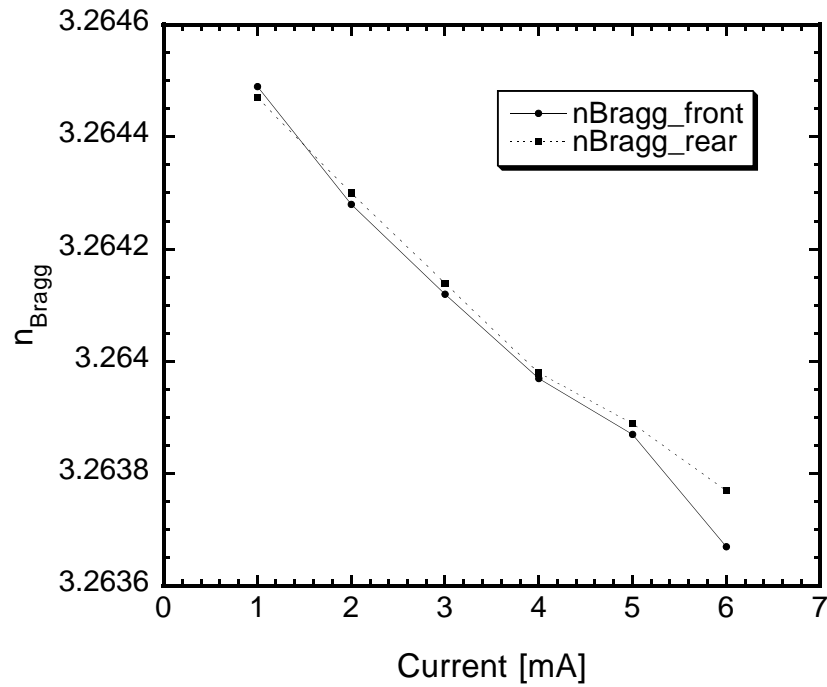


図 7.5: IC-DFB No.8, ブラッグ波長での実効屈折率 n_{Bragg} の電流依存性

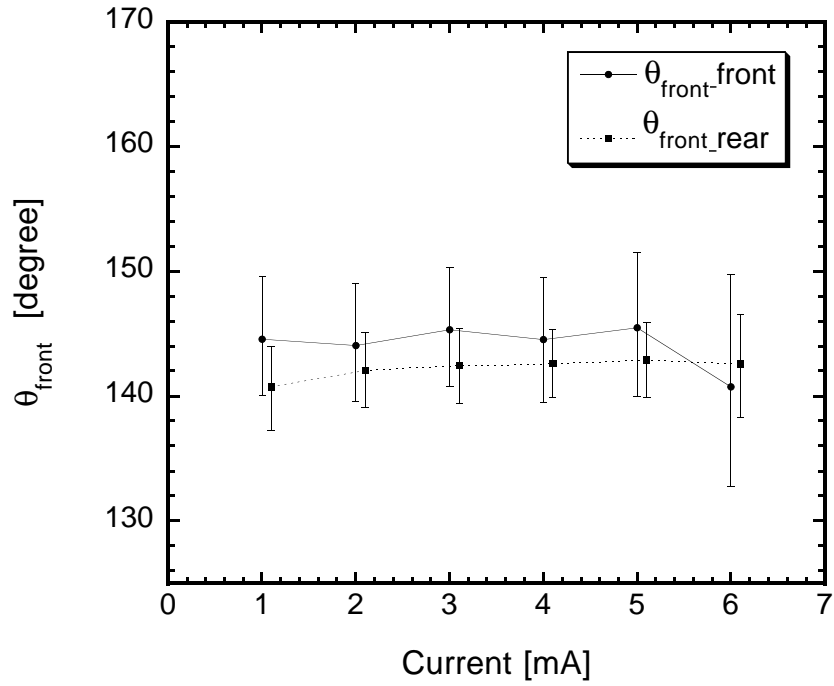


図 7.6: IC-DFB No.8, 前端面の端面位相 θ_{front} の電流依存性

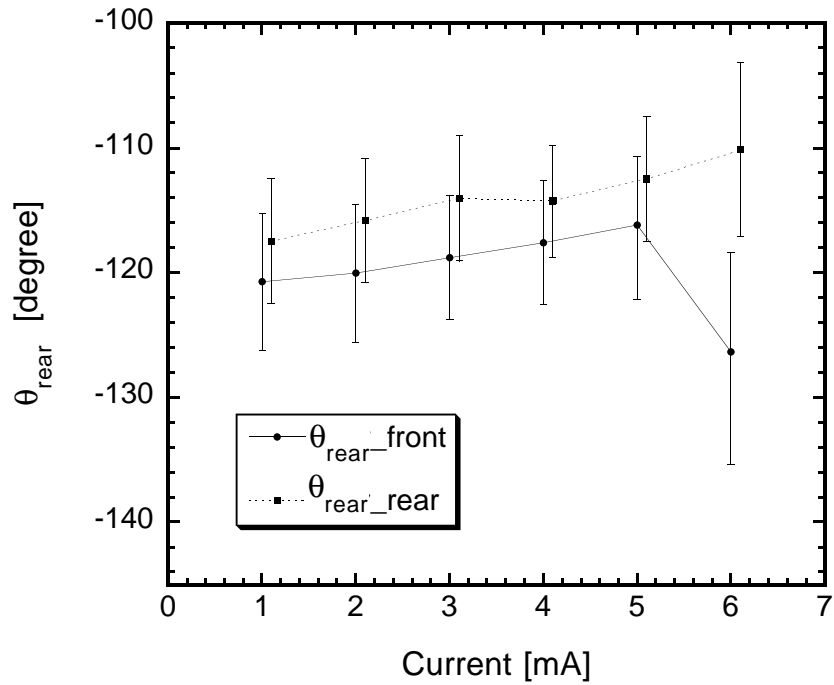


図 7.7: IC-DFB No.8, 後端面の端面位相 θ_{rear} の電流依存性

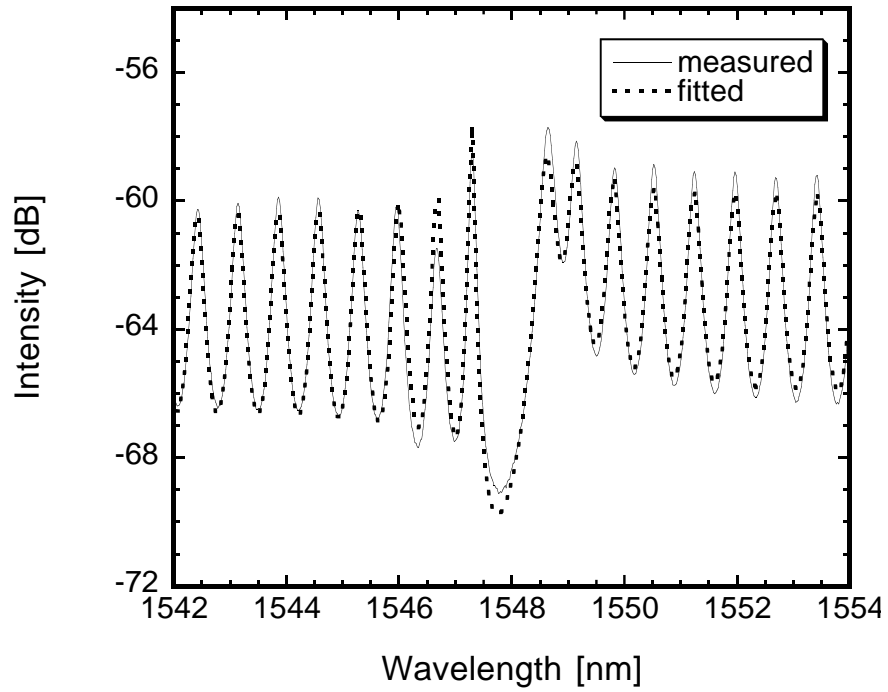


図 7.8: IC-DFB No.6, $I=3$ [mA] の前端面からのスペクトル

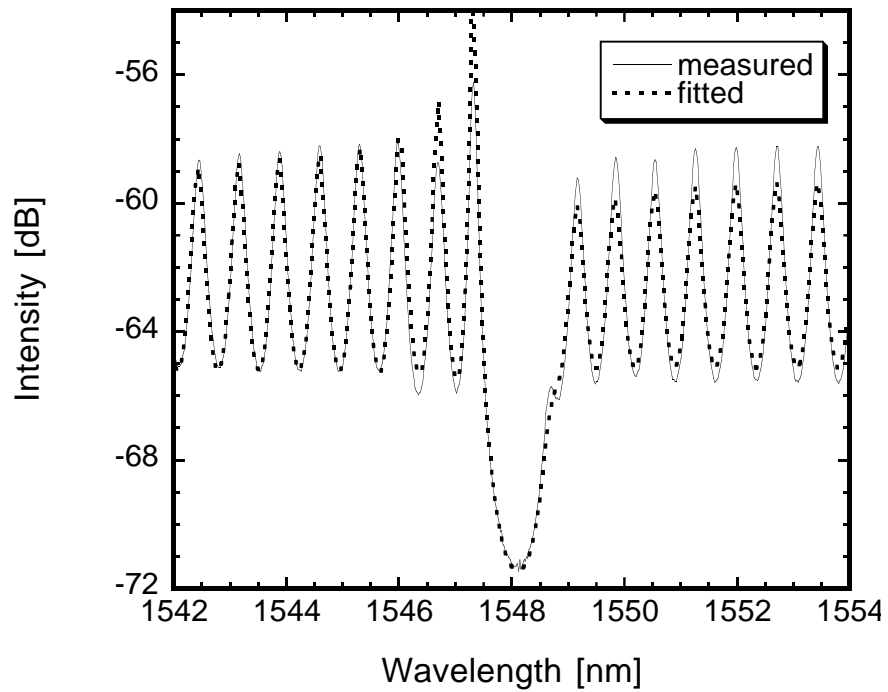


図 7.9: IC-DFB No.6, $I=3$ [mA] の後端面からのスペクトル

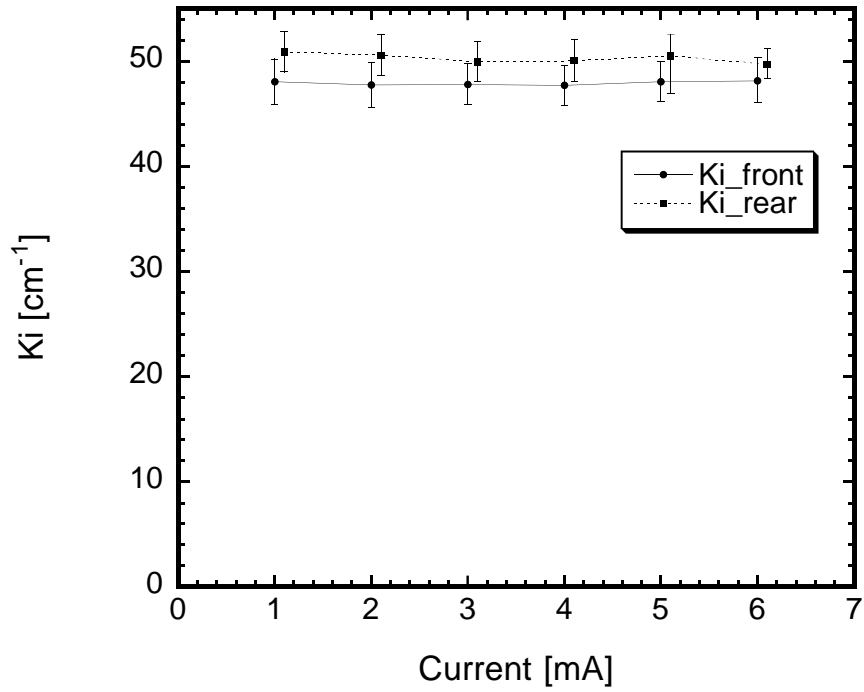


図 7.10: IC-DFB No.6, 屈折率結合係数 K_i の電流依存性

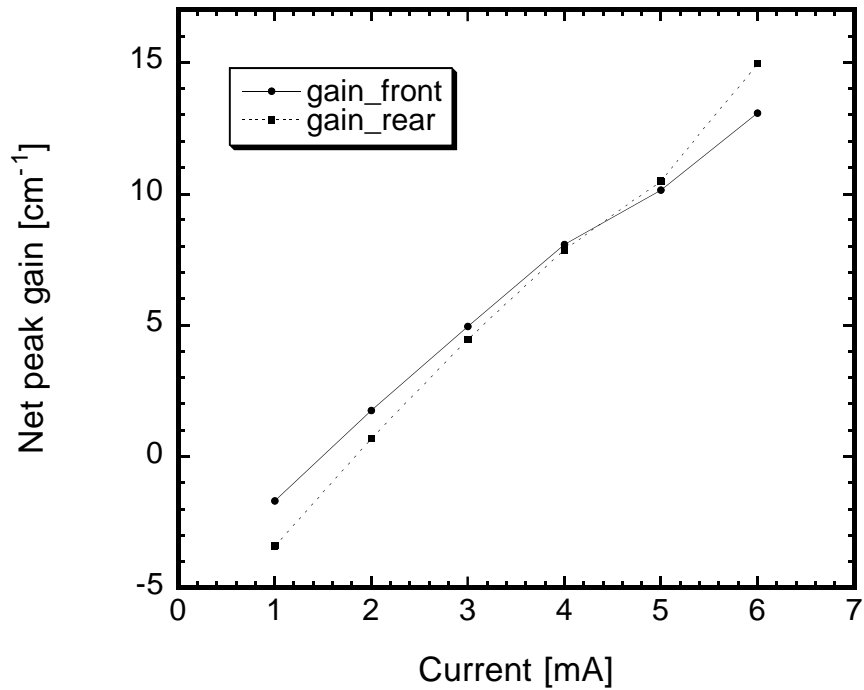


図 7.11: IC-DFB No.6, ネットピークゲイン g_1 の電流依存性

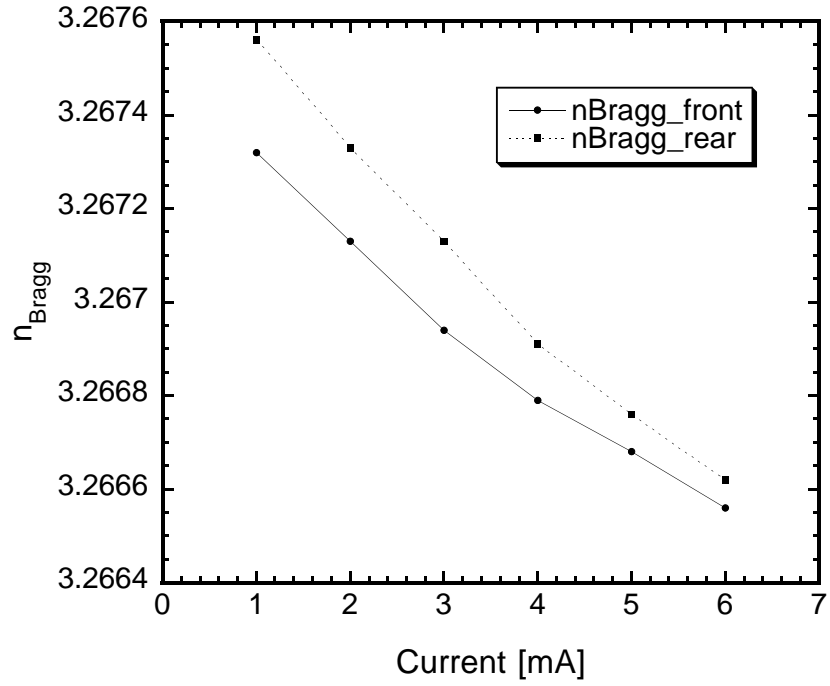


図 7.12: IC-DFB No.6, ブラッグ波長での実効屈折率 n_{Bragg} の電流依存性

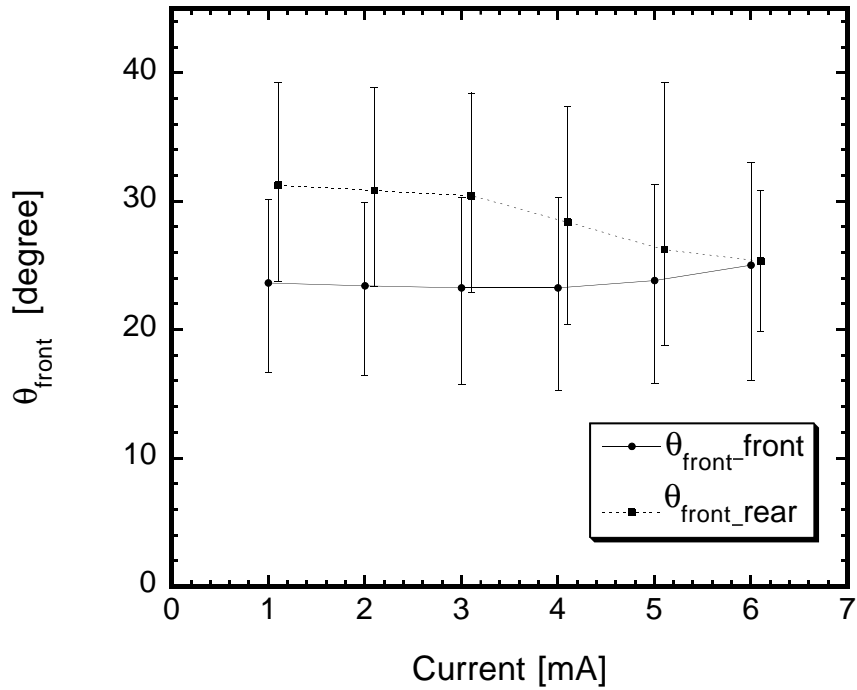


図 7.13: IC-DFB No.6, 前端面の端面位相 θ_{front} の電流依存性

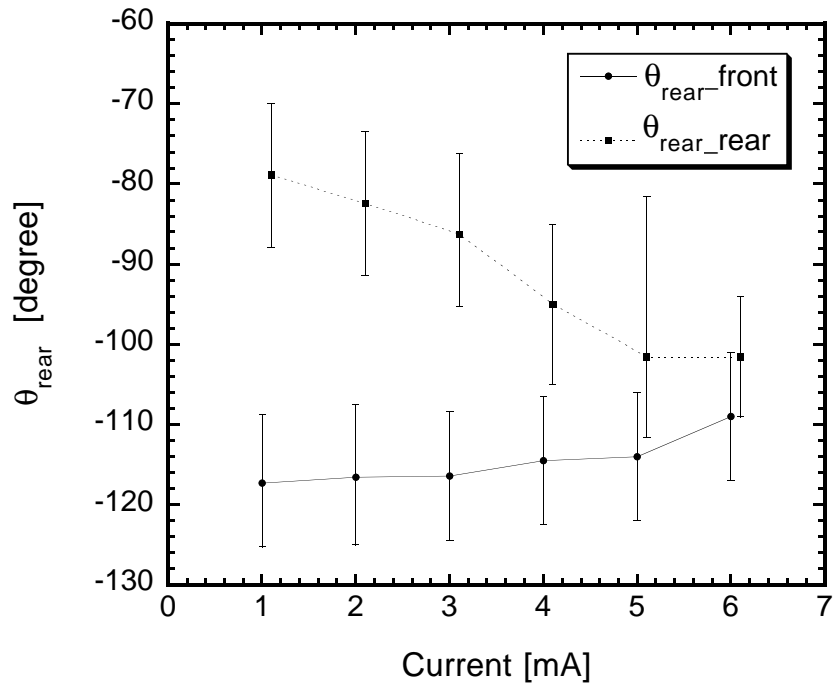


図 7.14: IC-DFB No.6, 後端面の端面位相 θ_{rear} の電流依存性

以上のグラフより次のことが分かる。

- いずれのスペクトルにおいても、フィッティングはきちんと掛かっている。
- No.8 IC-DFB のサンプルでは
 - 前端面と後端面からのスペクトルの形は違う。(図 7.1, 7.2)
 - 前端面と後端面からの抽出パラメータは一致する。(図 7.3 ~ 7.7)
 - 端面位相 $\theta_{front}, \theta_{rear}$ は変化しない。(図 7.6, 7.7)
 - 屈折率結合係数 κ_i は変化しない。(図 7.3)
- No.6 IC-DFB のサンプルでは
 - 前端面と後端面からのスペクトルの形は違う。(図 7.8, 7.9)
 - 前端面と後端面からの抽出パラメータは、端面位相が、多少異なっている。(図 7.10 ~ 7.14)
 - 屈折率結合係数 κ_i は変化しない。(図 7.10)
- No.4 GC-DFB のサンプルでは
 - 前端面と後端面からのスペクトルの形は違う。(図 7.15, 7.16)
 - 前端面と後端面からの抽出パラメータは一致する。(図 7.17 ~ 7.22)
 - 端面位相 $\theta_{front}, \theta_{rear}$ は変化しない。(図 7.21, 7.22)
 - 屈折率結合係数 κ_i は小さくなる。(図 7.17)
 - 利得結合係数 κ_g の絶対値は小さくなる。(図 7.18)
- No.1 GC-DFB のサンプルでは
 - 前端面と後端面からのスペクトルの形は、ほぼ同じ。(図 7.23, 7.24)
 - 前端面と後端面からの抽出パラメータは一致する。(図 7.25 ~ 7.30)
 - 端面位相 $\theta_{front}, \theta_{rear}$ は変化しない。(図 7.29, 7.30)
 - 屈折率結合係数 κ_i は小さくなる。(図 7.25)
 - 利得結合係数 κ_g の絶対値は小さくなる。(図 7.26)
- 全てのサンプルに共通して

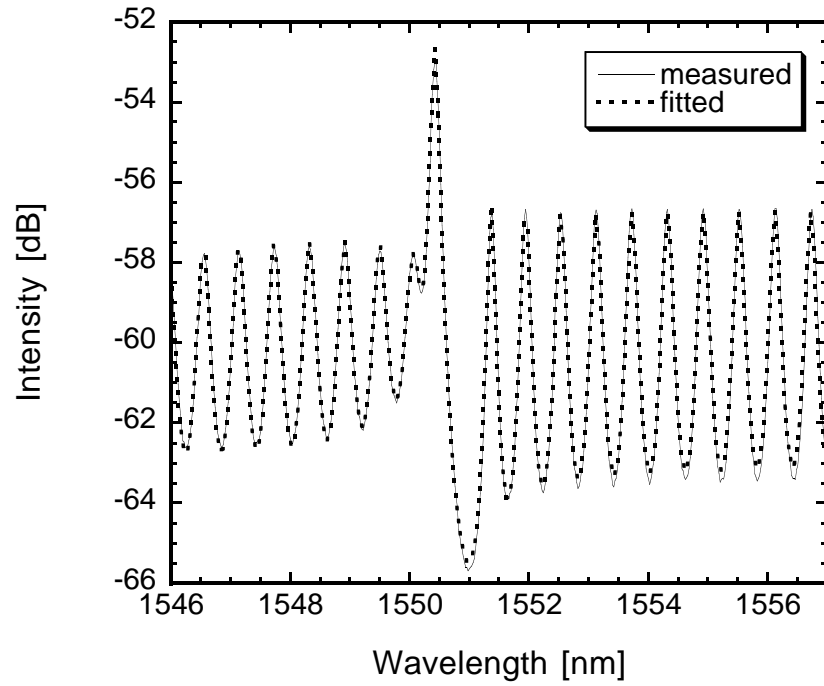


図 7.15: GC-DFB No.4, $I=24$ [mA] の前端面からのスペクトル

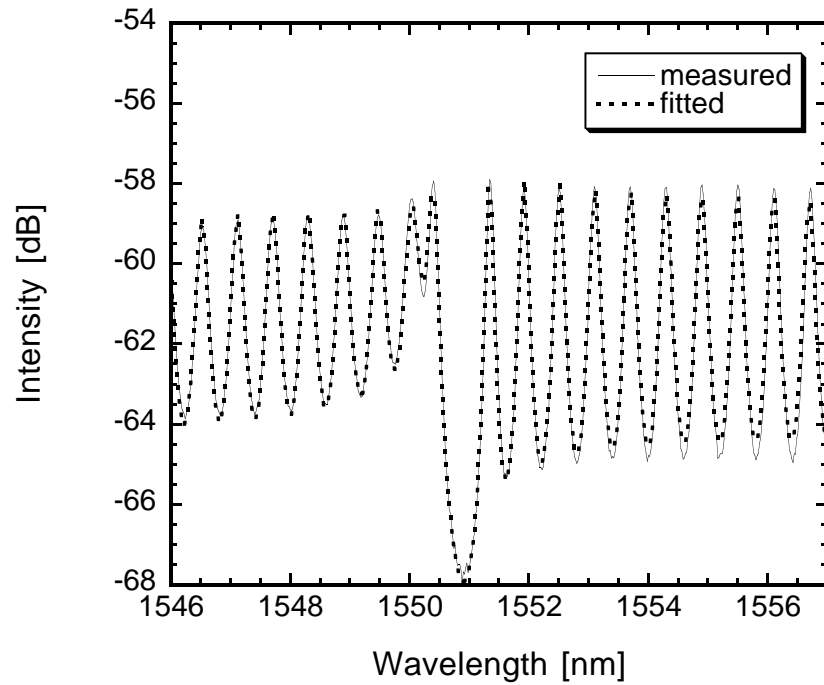


図 7.16: GC-DFB No.4, $I=24$ [mA] の後端面からのスペクトル

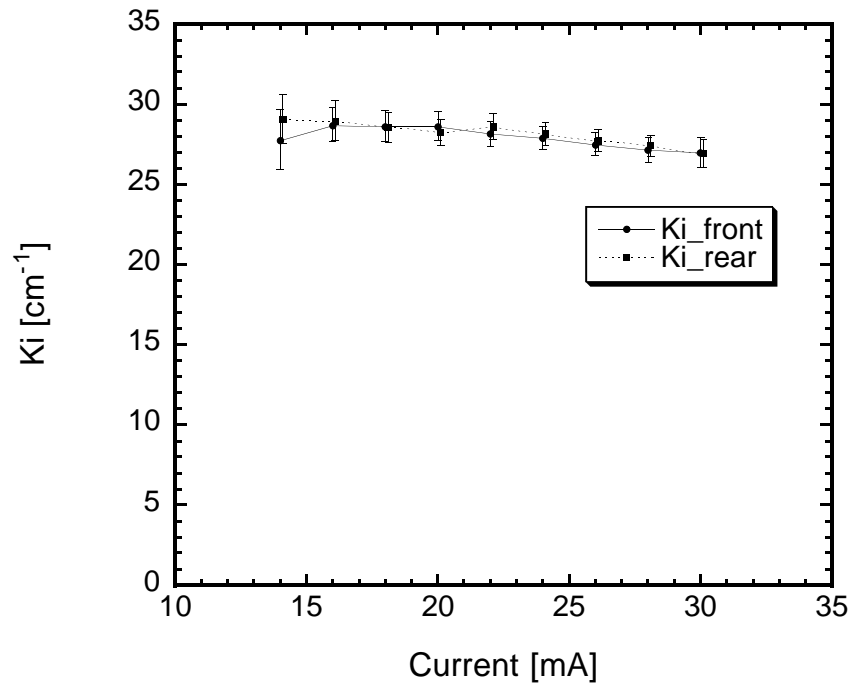


図 7.17: GC-DFB No.4, 屈折率結合係数 κ_i の電流依存性

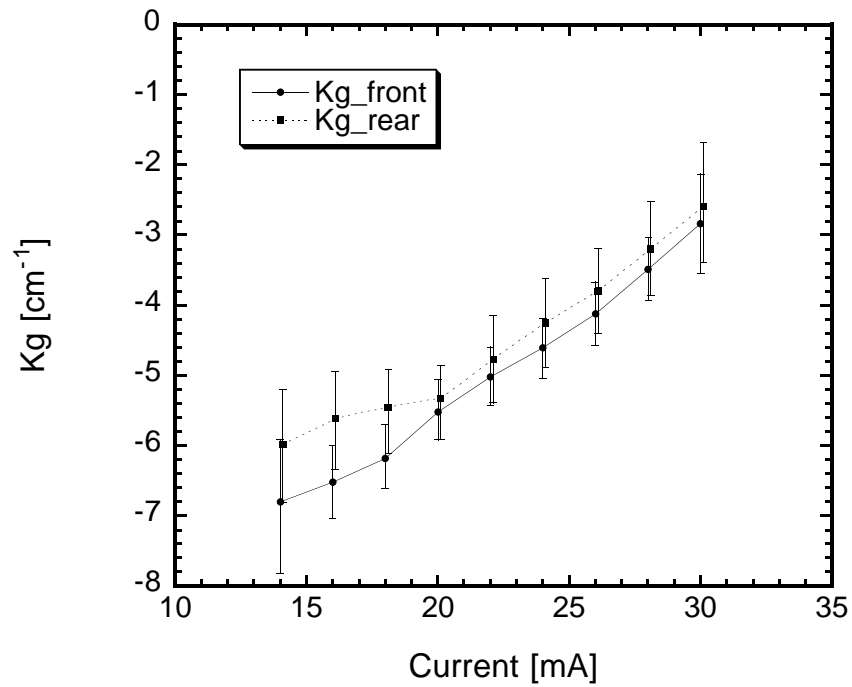


図 7.18: GC-DFB No.4, 利得結合係数 κ_g の電流依存性

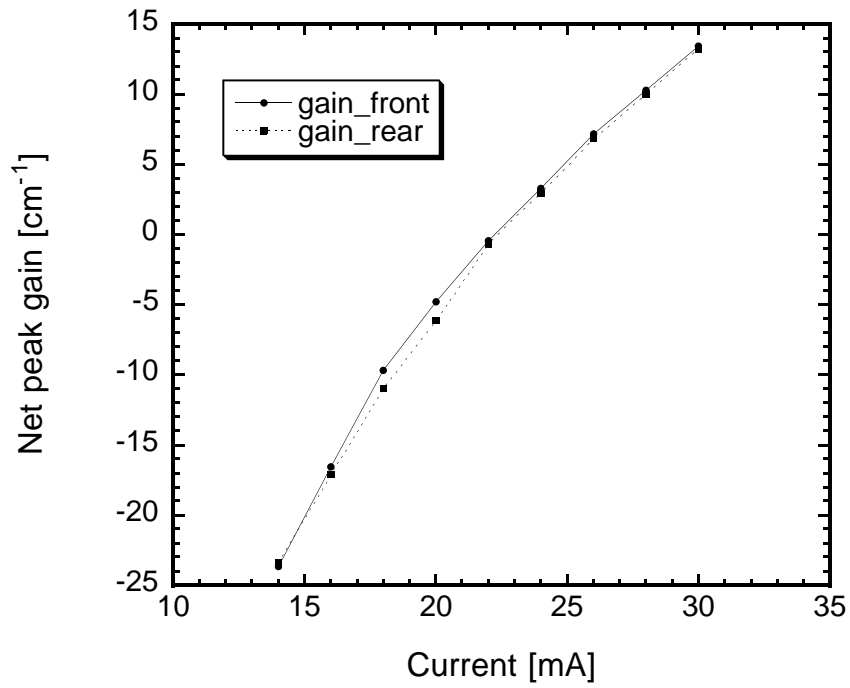


図 7.19: GC-DFB No.4, ネットピークゲイン g_1 の電流依存性

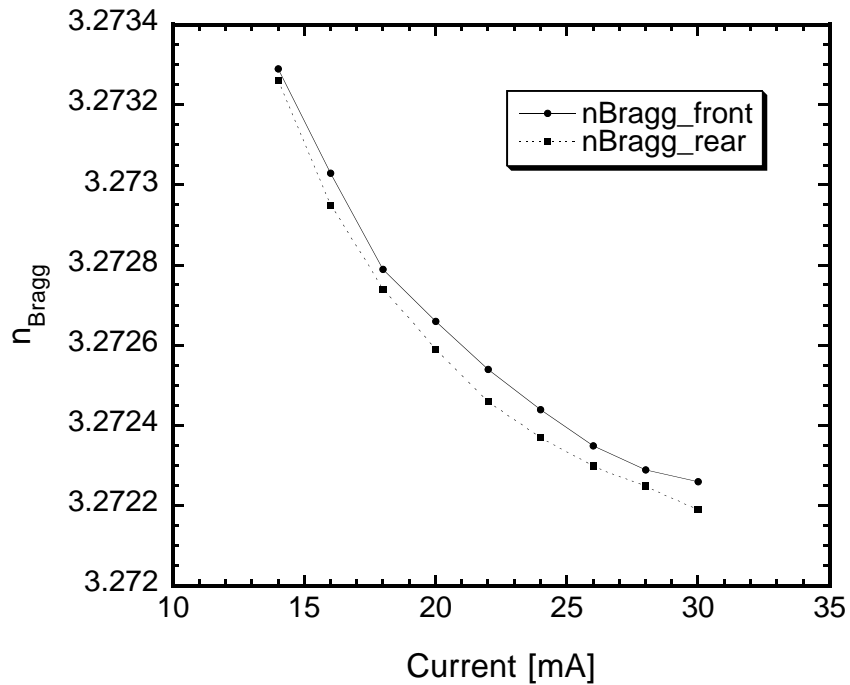


図 7.20: GC-DFB No.4, ブラッグ波長での実効屈折率 n_{Bragg} の電流依存性

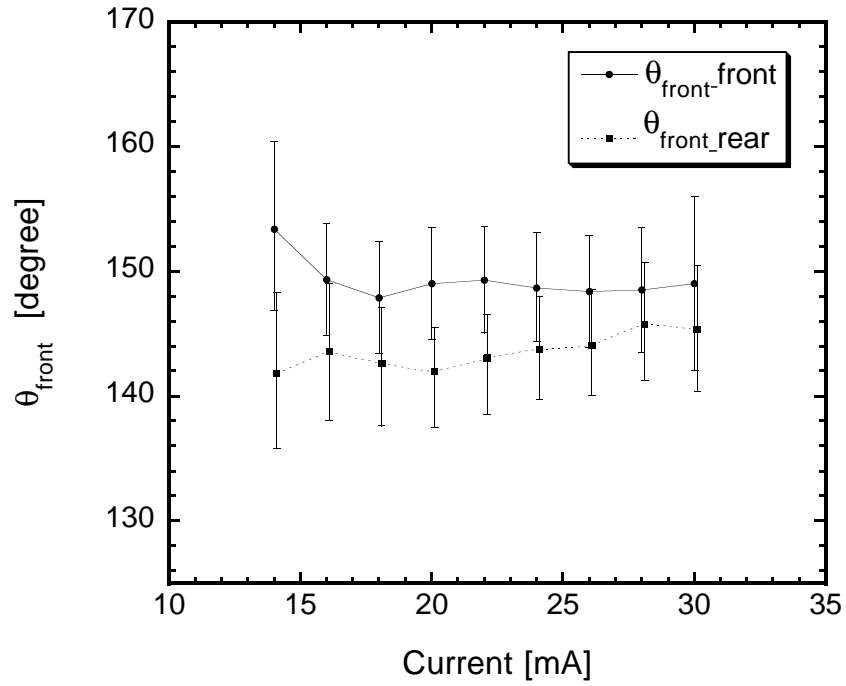


図 7.21: GC-DFB No.4, 前端面の端面位相 θ_{front} の電流依存性

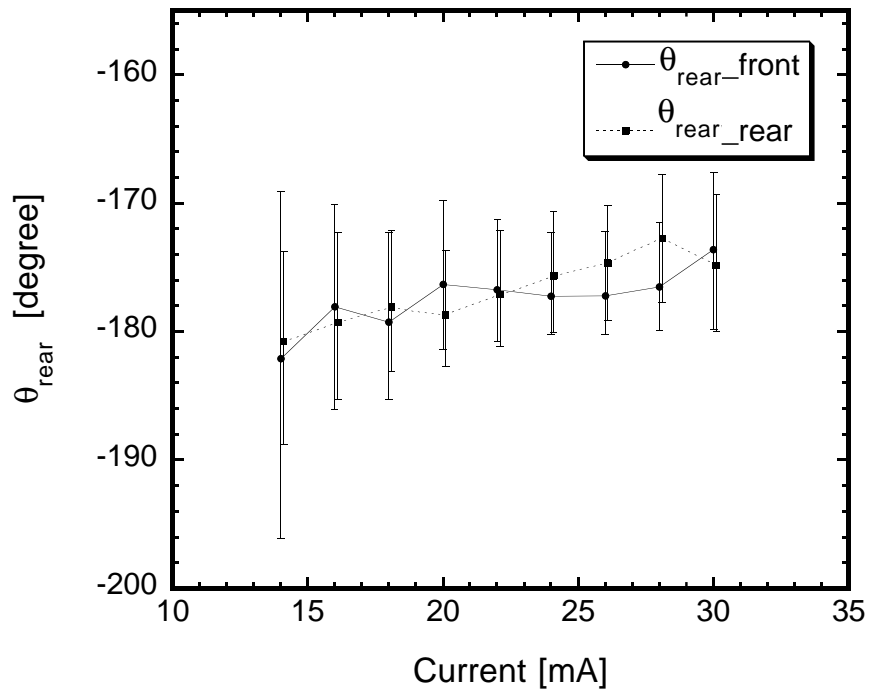


図 7.22: GC-DFB No.4, 後端面の端面位相 θ_{rear} の電流依存性

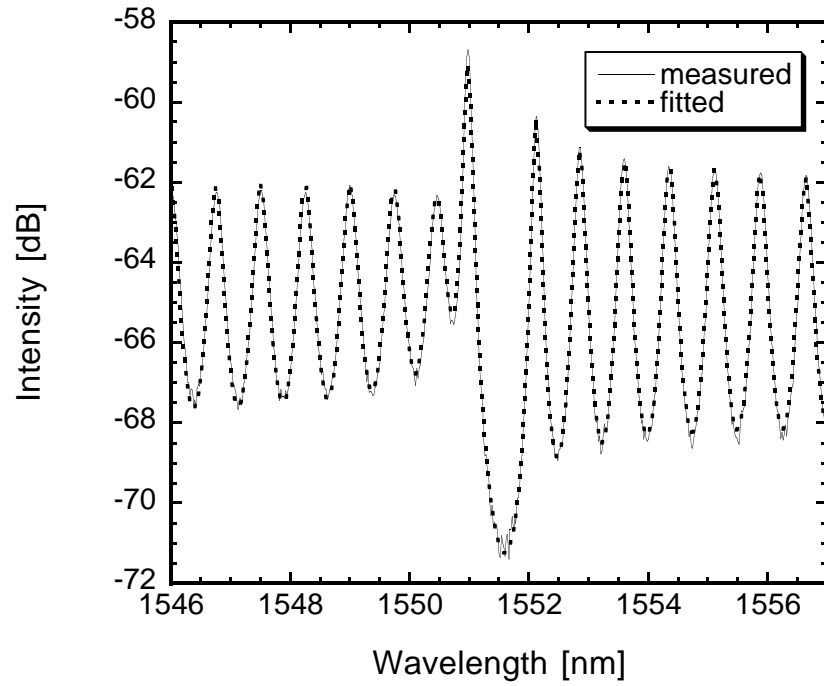


図 7.23: GC-DFB No.1, $I=24$ [mA] の前端面からのスペクトル

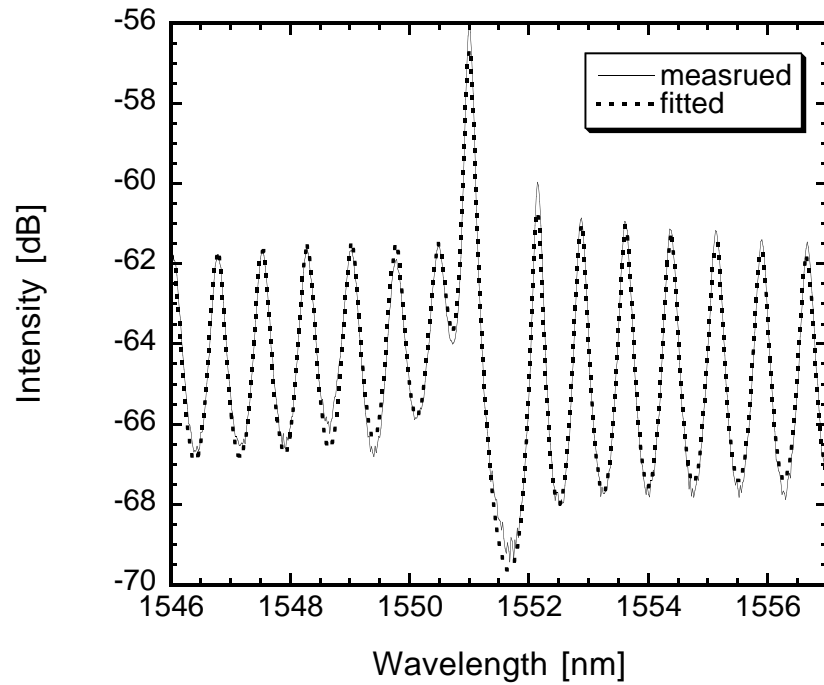


図 7.24: GC-DFB No.1, $I=24$ [mA] の後端面からのスペクトル

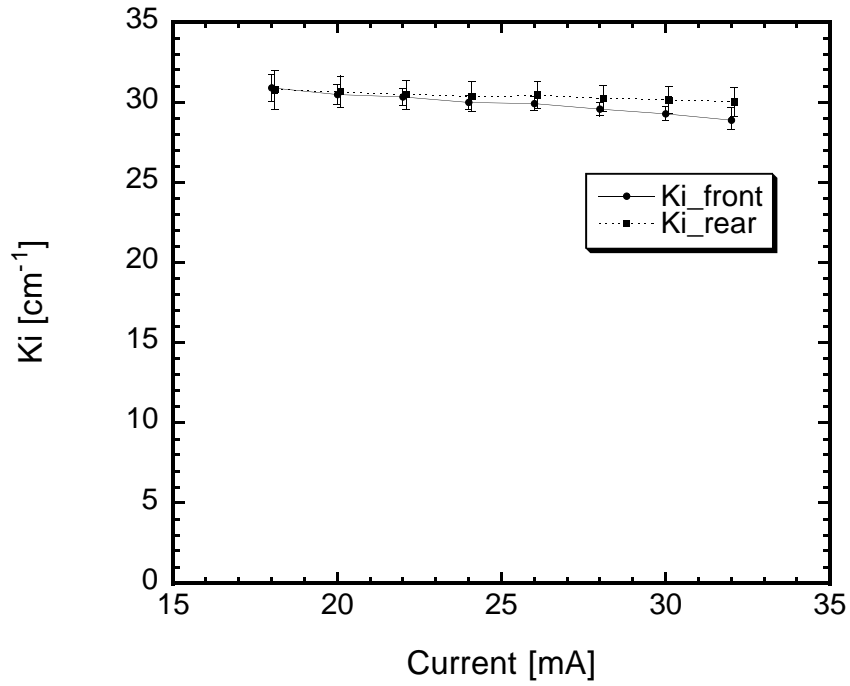


図 7.25: GC-DFB No.1, 屈折率結合係数 κ_i の電流依存性

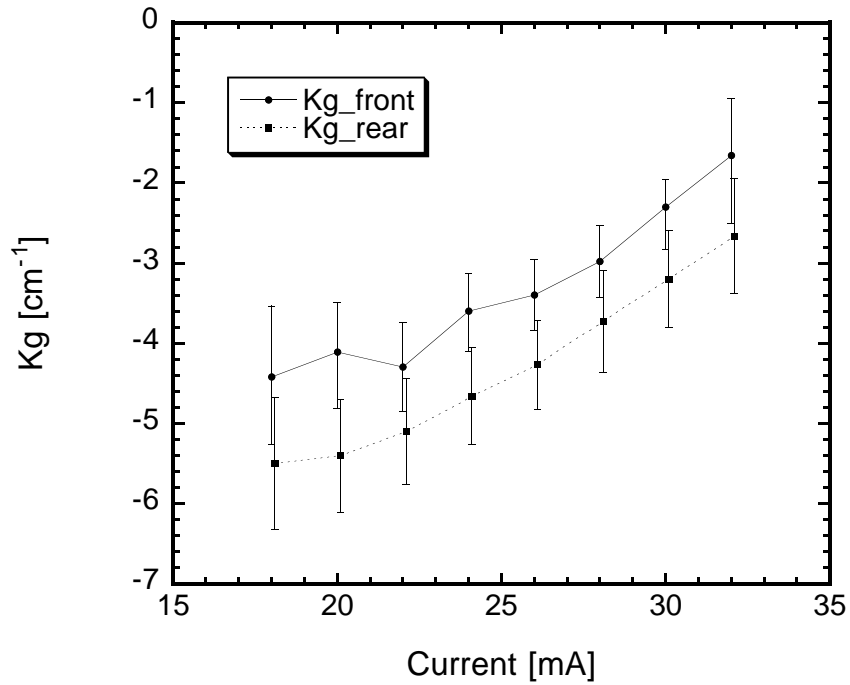


図 7.26: GC-DFB No.1, 利得結合係数 κ_g の電流依存性

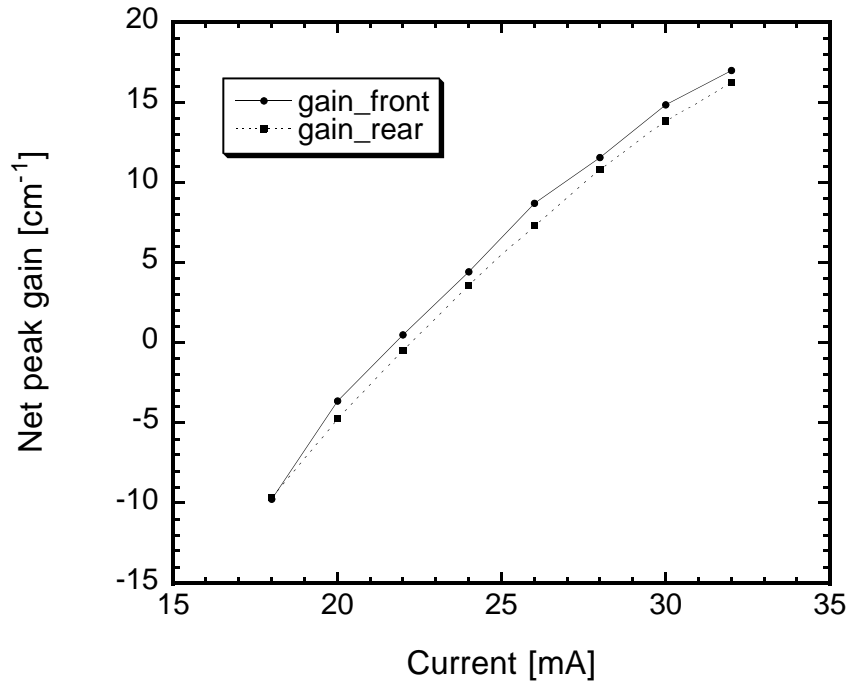


図 7.27: GC-DFB No.1, ネットピークゲイン g_1 の電流依存性

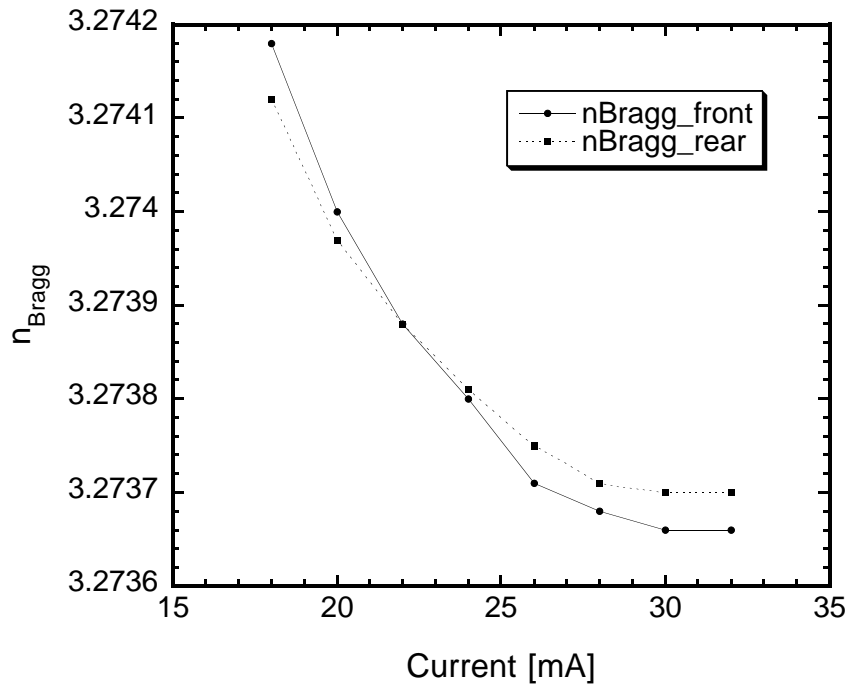


図 7.28: GC-DFB No.1, ブラッグ波長での実効屈折率 n_{Bragg} の電流依存性

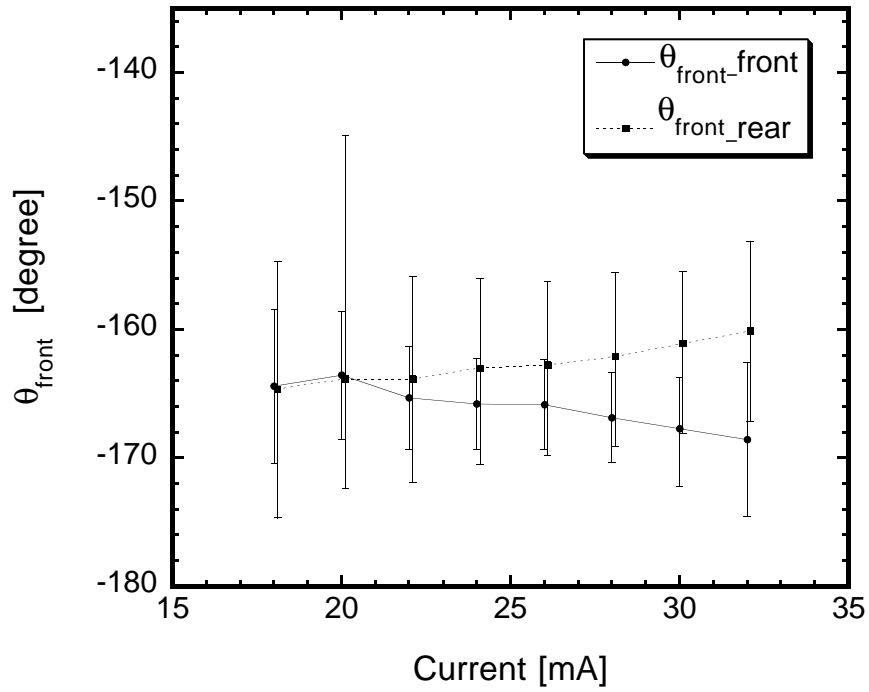


図 7.29: GC-DFB No.1, 前端面の端面位相 θ_{front} の電流依存性

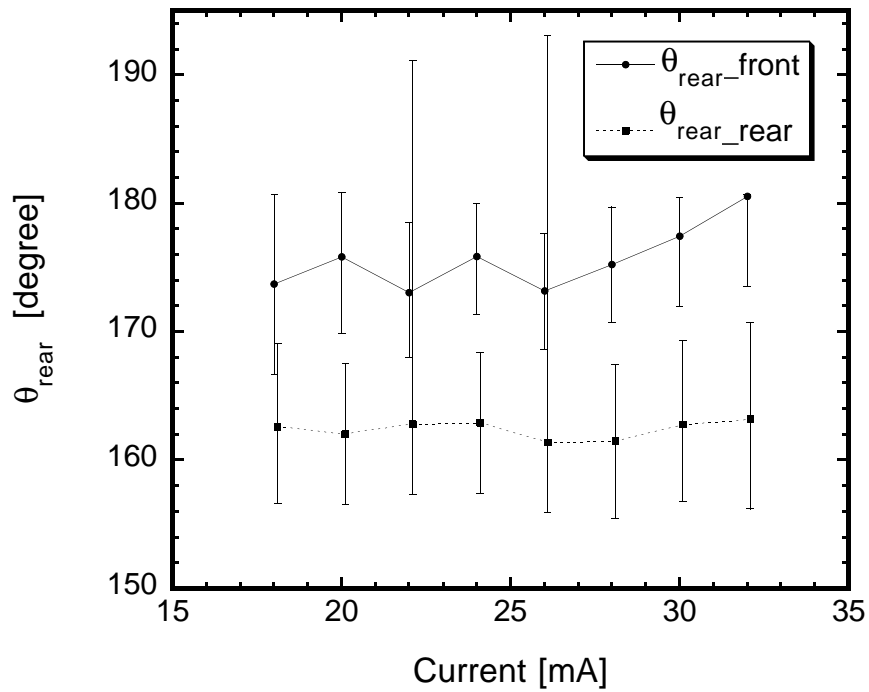


図 7.30: GC-DFB No.1, 後端面の端面位相 θ_{rear} の電流依存性

- ネットピークゲイン g_1 は、大きくなる。(図 7.4, 7.11, 7.19, 7.27)
- ブラッグ波長での実効屈折率 n_{Bragg} は小さくなる。(図 7.5, 7.12, 7.20, 7.28)

これらの解釈は、

- 注入電流とともに利得が増加するのは、あたりまえ。
- 注入電流とともに実効屈折率 n_{Bragg} が小さくなるのは、プラズマ効果が原因である。また、電流注入にしたがって熱が発生するため、屈折率は大きくなるようにするため、 n_{Bragg} の減少率は、小さくなっていく。IC-DFB では、閾値が低く、熱が発生しないため、 n_{Bragg} の減少率は一定であるが (7.5, 7.12)、GC-DFB では、閾値が高く、熱の影響が見える (7.20, 7.28)。
- 前端面と後端面のスペクトルの形が異なるのは、端面位相の違いが原因である。No.1 のサンプルで、前端面と後端面の端面位相がほぼ同じであり (図 7.29, 7.30)、したがって、スペクトルの形が同じである (図 7.23, 7.24) ことから、このことが分かる。このことは、5.3節でも述べた。
- No.6 のサンプルで、前後の端面位相の抽出値が異なる (図 7.14) 原因は、ブラッグ波長の短波側で、原因不明のモードが存在し (図 7.8, 7.9)、そのため、モデルに合わないスペクトルになってしまい、それが、端面位相の値にシワ寄せされたため、と考えられる。
- GC-DFB において、利得結合係数 κ_g が変化する (図 7.18, 7.26) 原因としては、吸収層が吸収飽和を起こしてしまい、そのため、利得の周期変化が小さくなったためである。
- GC-DFB において、屈折率結合係数 κ_i が変化する (図 7.17, 7.25) 原因としては、
 1. 吸収層で光が吸収され、キャリアがたまる。
 2. キャリアがたまると、バンドフィリング効果により、屈折率が小さくなる。
 3. 吸収層は、もともと屈折率の高い部分であり、ここの屈折率が小さくなり、屈折率の周期的変化が小さくなる。
 4. したがって、屈折率結合係数 κ_i は小さくなる。

- GC-DFB で、結合係数が注入電流とともに変化するのは、吸収層での光吸収が原因である。したがって、GC-DFB では、結合係数は変化し (図 7.17, 7.18)、IC-DFB では、結合係数は変わらない (図 7.3, 7.10)。
- また、以下の図 7.31 に、IC-DFB (No.8) のスペクトルに対して、利得結合係数 κ_g も一緒にフィッティングを掛けた時の、 κ_g の値を示す。 $|\kappa_g| < 1[\text{cm}^{-1}]$ で、十分小さいことから、本測定方法の信頼性が確認できた。

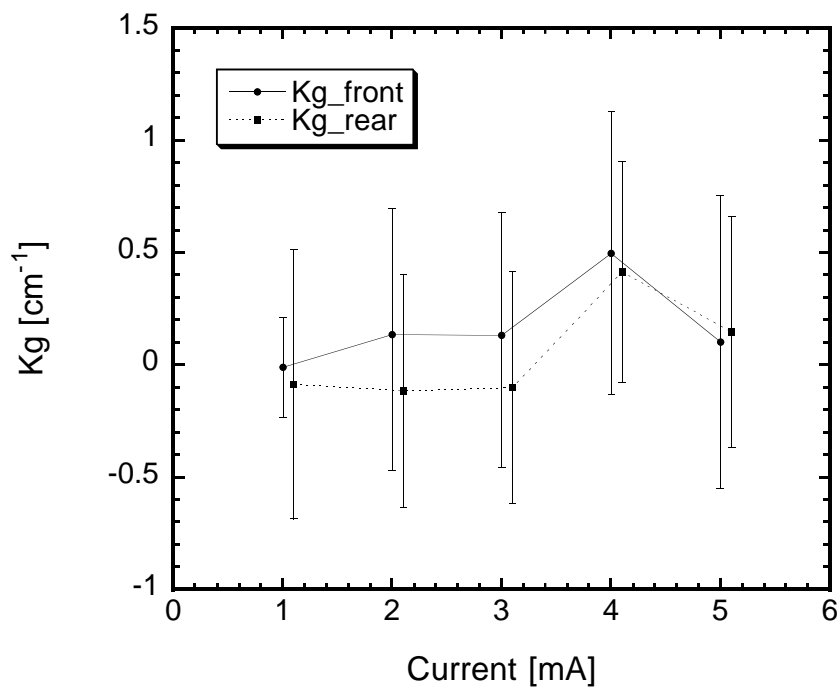


図 7.31: IC-DFB No.8, 利得結合係数 κ_g の電流依存性

7.2 閾値以上

前節で、閾値以下スペクトルからのパラメータ抽出により、結合係数の電流依存性と、その理由が明らかになった。しかし、実際にレーザを使う時は、閾値以上にバイアスするため、システム設計の観点からすると、閾値以上でのデバイスパラメータを知りたい。端面位相は、当然、閾値以上でも変化はしないが、図 7.18, 7.26 などを見ると、実際の閾値以上のバイアス点では、結合係数の値はかなり変化していそうである。

しかし残念ながら、閾値以上での結合係数を正確に見積もる方法は、考え出すことはできなかった。以下に、とりあえず考えてみた方法を述べる。

7.2.1 SMSR を用いる方法

文献[12]によると、閾値利得差 $\Delta\alpha$ と SMSR との関係が計算されている。いま、閾値以下でのデバイスパラメータが抽出されているので、閾値利得差を計算することができる。SMSR は測定できるので、SMSR の測定値から閾値利得差を求め、その閾値利得差になるように、利得結合係数 κ_g を変化させるのである。つまり、

$$SMSR \rightarrow \Delta\alpha \rightarrow \kappa_g \quad (7.1)$$

として、 κ_g を求めるのである。

しかし、この方法は使えなかった。理由は以下の通り。

- SMSR と閾値利得差の計算は、レート方程式を用いており、DFB レーザには特有の現象は考慮されていない。また、SMSR と $\Delta\alpha$ との関係は、きちりと1対1対応しているわけではない。
- 実際に DFB レーザで SMSR を測定したところ、前端面と後端面で、SMSR が異なっていた (図 7.32)。

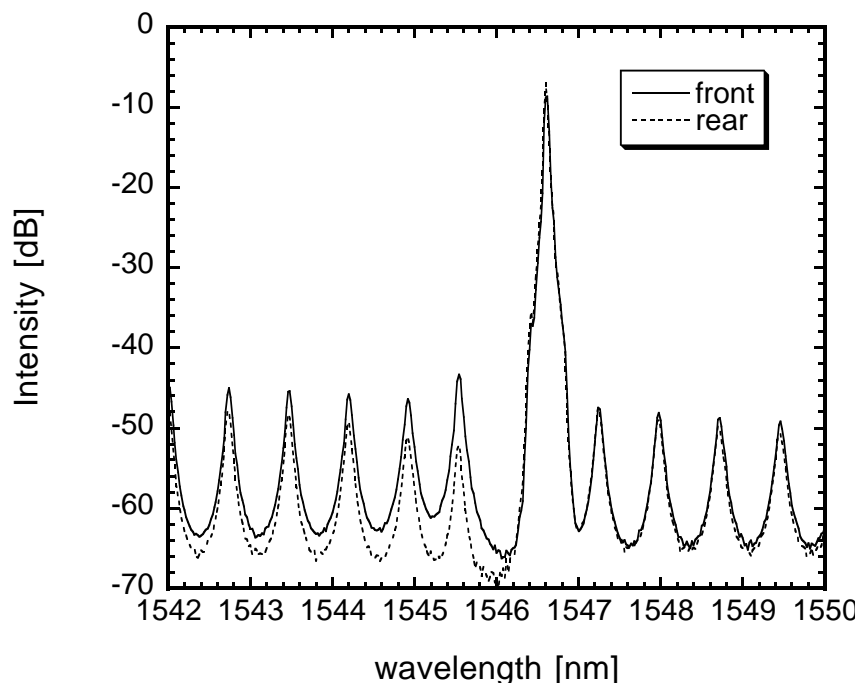


図 7.32: GC-DFB $I = 2I_{th}$, 両端面からのスペクトルにおける SMSR

7.2.2 FP ピークの山谷比用いる方法

単純には、結合係数は以下の式で表される

$$\kappa = \kappa_i + j\kappa_g \quad (7.2)$$

$$= \frac{\pi\Delta n}{\lambda} + j\frac{\Delta\alpha}{2} \quad (7.3)$$

一般的に、注入電流を上げていくと、閾値以下では、注入キャリアは全てのモードに分配されて、FP ピークの山谷比は大きくなるが、閾値を越えると、注入キャリアは、発振モードで全て消費されるため、他のFP モードの山谷比は一定のままである。つまり、キャリア密度がロックされるのである。IC-DFB では、このようになるが、GC-DFB では、発振後もFP ピークの山谷比が増加し続けることがある。式(4.6)によれば、山谷比の増加は、利得の増加である。が、利得は増加しないはずである。これは、吸収層における吸収の減少が、等価的に利得の増加として観測されているのである。したがって、(4.6)式により、閾値以後の山谷比の増加分から吸収層の吸収の減少分を計算し、(7.3)式から、結合係数の減少分を計算することができる。

しかし、この方法でも、次のような欠点がある。

- 一般には、閾値でキャリアがロックされる、と言われているが、ちょうど閾値というわけでもなく、閾値よりも少し高いバイアス点で、ロックされているようである。その点の判別が難しい。また、ちょうどロックされた点で、スペクトルからフィッティングでパラメータを抽出する必要があるが、閾値を越えてしまっているため、その点でのパラメータの値が分からない。
- 山谷比から利得を求める場合、ノイズや、サンプリングポイントの関係で、測定誤差が大きいため、 κ_g の正確な見積りは難しい。
- DFB モードから離れているFP モードであっても、グレーティングの影響は多少は受けており、モードの山谷比が正確に利得を反映しているわけではない。

以上、SMSR を用いる方法、FP ピークの山谷比を用いる方法、という、2通りの閾値以上での結合係数の見積り方法を示した。感触としては、2番目の方法は、工夫次第では、かなり有力な方法であると思われる。しかし、利得結合では、発振以後は、吸収層を避けて定在波が立つため、発振以後は、吸収層の吸収飽和はそれ以上進まず、結合係数は発振以後は変わらない、という予測もできる。

今後の発展を期待したい。

第 8 章

結論及び今後の展望

本研究により、以下のことがわかった。

- 閾値以下スペクトルに最小二乗法を用いてフィッティングを掛けることにより、結合係数 κ_i, κ_g を含めた、様々なパラメータを求めることができる。
- この方法は、へき開端面、AR-HR コート、いずれの DFB レーザに対しても、適用可能である。
- 初期値も自動で算出されるため、スペクトルから、計算機上で「コマンドポン！」で、デバイスパラメータが分かるようになった。
- カイ二乗一定の境界を用いることにより、抽出パラメータの誤差評価が可能になった。
- 本手法を用いることにより、吸収性回折格子型利得結合 DFB レーザにおいて、吸収飽和により κ_g が、バンドフィリング効果により κ_i が、注入電流とともに変化するということが分かった。
- 本手法による、パラメータの抽出値の信頼性は、かなり高いということが以下のことから分かった。
 - 端面位相の違いにより、前端面と後端面から観測されるスペクトル形状は異なるが、それぞれに独立にフィッティングを行うと、同じ値が抽出された。
 - 利得結合で、結合係数が注入電流とともに変化するのは、吸収層での光吸収が原因である。したがって、利得結合では、結合係数は変化し、屈折率結合では、結合係数は変わらないはずである。この現象も本手法により、観測された。
 - 屈折率結合のスペクトルに対して、利得結合係数 κ_g も一緒にフィッティングを掛けても、 $\kappa_g \approx 0$ であった。

- 利得、実効屈折率、利得結合での結合係数など、電流注入によって変化すべきパラメータは変化し、端面位相、屈折率結合での結合係数など、一定であるべきパラメータは、一定値が抽出された。

今後、閾値以上での結合係数の評価方法の開発を期待する。

付録 A

Instruction manual for parameter extraction program

A.1 Introduction

Determination of device parameters in distributed feedback (DFB) lasers is very important for optimization of laser characteristics and system design. Although the coupling coefficient is the most important parameter, its determination has only been possible in AR-coated index-coupled DFB lasers. Moreover, this is not an easy task or not very accurate if there are facet reflectivities remaining. And although phacet phase of the grating also gives influence on laser performance, it is uncontrollable and very difficult to measure. In this parameter extraction program, parameters are derived by numerical fitting of subthreshold spectrum. Using this way, not only index coupling coefficient κ_i , but also gain coupling coefficient κ_g , gain profile $g = g_1 - g_2(E - E_p)^2$, both facet phase $\theta_{front}, \theta_{rear}$, refractive index n_{eff} and its wavelength dispersion $dn/d\lambda$ can be determined. Moreover, AR coating doesn't needed.

A.2 Theorem

See another explanation paper.

A.3 Preparation

You get the following executable file

For Window version

<code>anlyser.exe</code>	<code>autofs.exe</code>	<code>autos.exe</code>	<code>fitting.exe</code>	<code>initpar.exe</code>
<code>autofi.exe</code>	<code>autoi.exe</code>	<code>extract.exe</code>	<code>fspec.exe</code>	<code>spectrum.exe</code>

For Macintosh version

<code>anlyser.exe</code>	<code>autofs.exe</code>	<code>autos.exe</code>	<code>fitting.exe</code>	<code>mactrans.exe</code>
<code>autofi.exe</code>	<code>autoi.exe</code>	<code>execution</code>	<code>fspec.exe</code>	<code>spectrum.exe</code>

and following example file


```

anlyser.bat      example0.spe    example2.spe    example4.spe    example6.spe
ex8.err          example1.dat    example3.dat    example5.dat    example7.dat
ex8.par          example1.err    example3.err    example5.err    example7.err
ex8.spe          example1.par    example3.par    example5.par    example7.par
example.bat      example1.spe    example3.spe    example5.spe    example7.spe
example0.dat     example2.dat    example4.dat    example6.dat    example8.dat
example0.err     example2.err    example4.err    example6.err    example8.par
example0.par     example2.par    example4.par    example6.par    example8.spe

```

'example0.dat' is measured spectrum of IC-DFB laser, 'example1 ~ 9.dat' is measured spectrum of the same GC-DFB laser. 'example1 ~ 4' is from right facet, and 'example5 ~ 8' is from left facet with changing injection current from 16 [mA] to 22 [mA] by 2 [mA] step.

'*.dat' is measured spectrum data, '*.par' is *correct* extracted parameters, and '*.spe' is *correct* fitted spectrum.

A.4 Execution program

command	input file	output file	function
spectrum.exe	spec.dat, mydfb.dat	spec.new	calculate spectrum
fspec.exe	spec.dat, dfb.new	fspec.new	calculate spectrum
initpar	spec.dat	fspec.new,dfb.new, (peak.new)	calculate initialized parameter for fitting
extract	spec.dat	fspec.new,dfb.new, (peak.new)	parameter extraction by fitting
fitting.exe	spec.dat, dfb.new ^o	dfb.new	parameter extraction by fitting (appropriate initialized parameters should be given)
anlyser.exe	errspec.dat, errparam.dat	err.new	error estimation

caution : Files with ^o are removed after execution.

There are some other executable program and input/output files, but you don't need to know their detail.

A.5 How to execute

For Windows version, this program can run only on "DOS Window on Windows95", cannot run on MS-DOS. And all the command are executed by the command line.

For Macintosh version, you should edit the file "command", and write command in this file, like "extract ICDFB 350 0.240". Then double clic on the icon "execution". You can use only following 6

command `fspec.exe`, `spectrum.exe`, `anlyser.exe`, `copy`, `extract`, `initpar`. And `fspec.exe`, `spectrum.exe`, `anlyser.exe`, `fitting.exe` can be also executed by double clic on the icon itself.

For Windows version, you can make batch files and you don't have to be in front of the computer. But for Macintosh version, execution program request "push RETURN to continue" so often that you have to be in front of the computer even though you can make batch files.

A.6 Simple use

In most cases, this simple way is enough to extract parameters.

1. Copy the measured spectrum file to `spec.dat`.
2. When the laser is as-cleaved, input the command

```
extract code cavitylength( $\mu$ m) gratingpitch( $\mu$ m)
```

when you want to specify the facet power reflectivity, like AR-HR coated lasers, input the command

```
extract code cavitylength( $\mu$ m) gratingpitch( $\mu$ m) -r Rrear(%) Rfront(%)
```

default facet power reflectivity is calculated by $R = (\frac{n-1}{n+1})^2$.

3. Wait untill calculation is over. (in a few minutes)
4. Extracted parameters are written in the file `dfb.new`, and fitted spectrum are written in the file `fspec.new`.
5. Display `spec.dat` and `fspec.new` in the same graph to confirm the fitting was succeeded.
6. Open the file `dfb.new` to see the value of extracted parameters.

If you want to estimate error of extracted parameters, follow next step.

7. Copy `dfb.new` to `errparam.dat`.
8. Copy `spec.dat` to `errspec.dat`.
9. Execute

```
anlyser.exe
```

10. — coffee break — (in a few hour)
11. Open the file `err.new` to see the value of extracted parameters.

Meanings of input/output files are written in section A.8.

A.7 Example

A.7.1 Example No.0

Known information • as cleaved IC-DFB. • first order grating and $\Lambda = 240[\text{nm}]$. • $L = 350[\mu\text{m}]$

1. Copy `example0.dat` to `spec.dat`.
2. Execute

```
extract ICDFB 350 0.240
```

3. Wait until calculation is over. (in a few minutes)
4. Display `spec.dat` and `fspec.new` in the same graph to confirm the fitting was succeeded.
5. Open the file `dfb.new` to see the value of extracted parameters. `example0.par` and `example0.spe` is the *correct* parameters and spectrum.
6. Copy `dfb.new` to `errparam.dat`.
7. Copy `example0.dat` (`spec.dat`) to `errspec.dat`.
8. Execute

```
analyser.exe
```

9. — coffee break — (in a few *hour*)
10. Open the file `err.new` to see the value of extracted parameters. `example0.err` is the *correct* error region.

A.7.2 Example No.4

Known information • as cleaved GC-DFB. • first order grating and $\Lambda = 0.23693[\text{nm}]$. • $L = 550[\mu\text{m}]$

1. Copy `example4.dat` into `spec.dat`.
2. Execute

```
extract GCDFB 550 0.23693
```

3. Wait until calculation is over. (in a few minutes)
4. Display `spec.dat` and `fspec.new` in the same graph to confirm the fitting was succeeded.
5. Open the file `dfb.new` to see the value of extracted parameters. `example4.par` and `example4.spe` is the *correct* parameters and spectrum.
6. Copy `dfb.new` to `errparam.dat`.

7. Copy `example4.dat` (`spec.dat`) to `errspec.dat`.

8. Execute

`anlyser.exe`

9. — coffee break — (in a few *hour*)

10. Open the file `err.new` to see the value of extracted parameters. `example4.err` is the *correct* error region.

A.8 Format and meanings of input/output files

A.8.1 `mydfb.dat`, `dfb.new`

Meaning of parameters are as follows.

line 1 Code. ICDFB or GCDFB

line 2 Order of the grating. This program can cope with only when this parameter is 1.

line 3 L : Cavity length.

line 4 Λ : Grating pitch.

line 5 κ_i : Index coupling coefficient.

line 6 κ_g : Gain coupling coefficient.

line 7 g_1 : Net peak gain*.

line 8 g_2 : Net gain curvature*.

line 9 λ_p : Wavelength in which gain is maximum*.

line 10 J_0 : Parameter to move spectrum up and down without changing the shape of the spectrum.

line 11 n_{Bragg} : Refractive index at Bragg wavelength*.

line 12 $dn/d\lambda$: Wavelength dispersion of refractive index*.

line 13 R_{rear} : Power reflectivity on rear facet.

line 14 R_{front} : Power reflectivity on front facet.

line 15 θ_{rear} : Phase of the grating on rear facet^o.

line 16 θ_{front} : Phase of the grating on front facet^o.

line 17 This parameter stands for whether spectrum is measured in log scale ([dB]) or linear scale ([mW]). Spectrum should be measured with log scale, that is, this parameter should be 1.

line 18 This parameter stands for whether these program calculate spectrum around bragg wavelength or around measured wavelength in `spec.dat`. When 1, at the wavelength in `spec.dat`, and when 0, around bragg wavelength.

line 19 Goodness-of-fit. This line exists only on Windows version. “sigma2” means σ^2 defined as follows,

$$\sigma^2 \equiv \frac{1}{N} \sum_i^N \{y_m(\lambda_i) - y_c(\lambda_i; \mathbf{a}_{fit(0)})\}^2 \quad (\text{A.1})$$

and “max round trip gain” means the maximum value of the round trip gain at any position and any wavelength. “sigma2” is desired to be close to 0, and “max round trip gain” should be less than 1.

* The model of gain profile $g(\lambda)$ is

$$g = \Gamma\{g_{a1} - g_{a2}(E - E_p)^2\} - \Gamma\alpha_{active} - (1 - \Gamma)\alpha_{clad} \quad (\text{A.2})$$

$$= \frac{\Gamma g_{a1} - \alpha}{\Gamma} - \frac{\Gamma g_{a2}}{\Gamma} (E - E_p)^2 \quad (\text{A.3})$$

$$= \frac{g_1}{\Gamma} - \frac{g_2}{\Gamma} (E - E_p)^2 \quad (\text{A.4})$$

$$(\text{A.5})$$

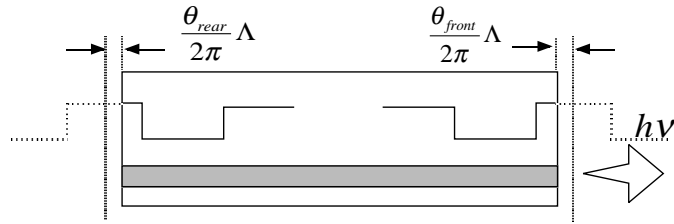
where

$$E_p = \frac{hc}{q\lambda_p} \quad (\text{A.6})$$

★ The model of refractive index $n(\lambda)$ is

$$n_{eff} = n_{Bragg} + \frac{dn}{d\lambda}(\lambda - \lambda_{Bragg}) \quad (\text{A.7})$$

▷ The definition of facet phase is,



☒ A.1: definition of the facet phase

then, we can represent

$$n(z) = n + (\Delta n) \cos(2\pi z/\Lambda + \theta_{rear}) \quad (\text{A.8})$$

$$g(z) = g + (\Delta g) \cos(2\pi z/\Lambda + \theta_{rear}) \quad (\text{A.9})$$

so, κ_i is always positive, and κ_g is positive when “in-phase”, and κ_g is negative when “anti-phase”.

And cavity length become

$$L = m\Lambda - \frac{\theta_{rear}}{2\pi}\Lambda - \frac{\theta_{front}}{2\pi}\Lambda \quad (\text{A.10})$$

0 or 1 beside each parameter means flag for fitting. When 0, the value is fixed. When 1, the parameter is fitted.

A.8.2 spec.dat, spec.new, fspec.new

Column of wavelength and column of output power. Each column should be divided with space. Unit of wavelength should be [nm], and that of output power should be [dB]. *Don't insert comment line.* Second column is calculated spectrum from front facet, and third column is that of rear facet in **spec.new** and **fspec.new**.

Measured point in **spec.dat** should be less than 2000 points, and 200 points are calculated. Divide from starting wavelength to ending wavelength described in **spec.dat** into 200 equal intervals. So calculated output power in **spec.new** and **fspec.new** is 200 points.

When there are less than 200 points in **spec.dat**, spectrum are calculated at the written wavelength.

A.8.3 err.new

First line is the value of σ^2 and number of sampling points. On line 2 to line 6, first column is parameter, third column is fitted value, and second and fourth column is lower and higher error region.

A.8.4 peak.new

When the command **extract** or **initpar** is executed, this program recognize peaks and valleys of measured spectrum in **spec.dat**. These recognized peaks and valleys are written in **peak.new**.

A.9 Specified use

A.9.1 Example No.3

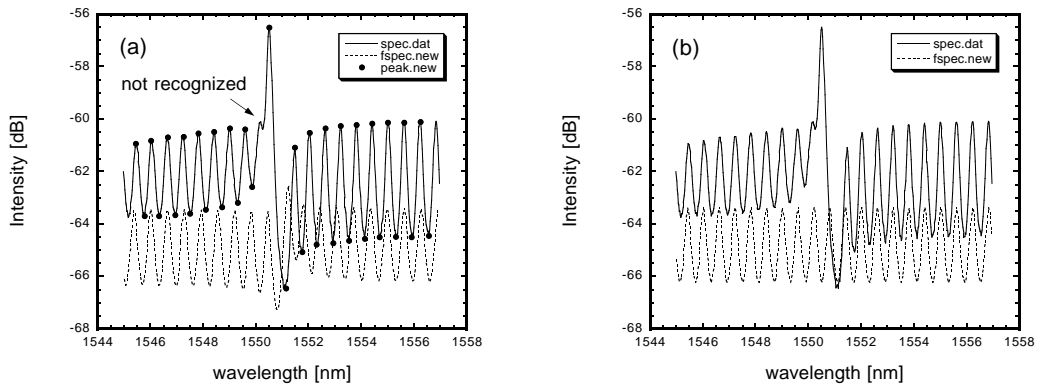
Known information • as cleaved GC-DFB. • first order grating and $\Lambda = 0.23693[\text{nm}]$. •
 $L = 550[\mu\text{m}]$

1. Copy **example3.dat** into **spec.dat**.
2. Execute

```
extract GCDFB 550 0.23693
```

3. Wait until calculation is over. (in a few minutes)
4. Display **spec.dat** and **fspec.new** in the same graph to confirm the fitting was *not* succeeded.
It is because initialized parameters were not appropriate.
5. Execute

```
initpar GCDFB 550 0.23693
```



☒ A.2: (a) Misread FP peak, (b) use `-f 1` flag

6. Display `spec.dat` and `fspec.new` and `peak.new` in the same graph. And you can see that one small peaks are not recognized and calculated FP peaks are shifted from measured one (Fig.A.2(a)). It is because this program recognize that small peak as just a noise.

7. In this case, you input the command (`-f` means misread FP peaks)

```
initpar GCDFB 550 0.23693 -f 1
```

8. Display `spec.dat` and `fspec.new` in the same graph to confirm initialized parameters are appropriate (Fig.A.2(b)). (`peak.new` was removed.)

9. Execute

```
extract GCDFB 550 0.23693 -f 1
```

10. Wait untill calculation is over. (in a few minutes)

11. Display `spec.dat` and `fspec.new` in the same graph to confirm the fitting was succeeded.

12. Open the file `dfb.new` to see the value of extracted parameters. `example3.par` and `example3.spe` is the *correct* parameters and spectrum.

13. Copy `dfb.new` to `errparam.dat`.

14. Copy `example3.dat` (`spec.dat`) to `errspec.dat`.

15. Execute

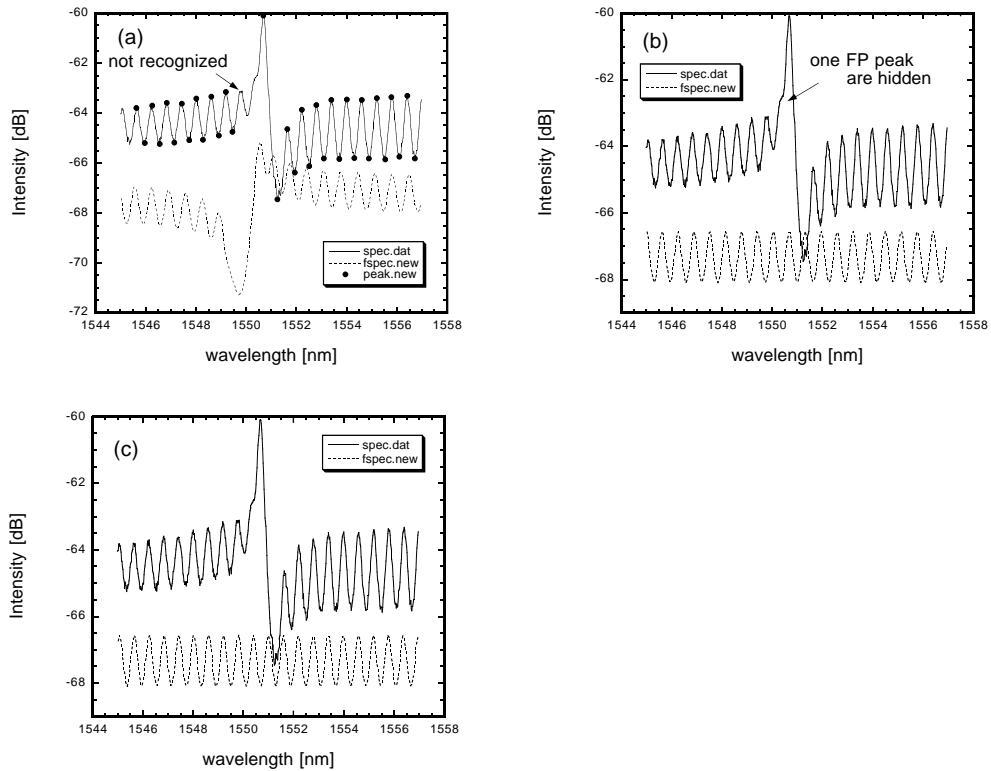
```
anlyser.exe
```

16. — coffee break — (in a few *hour*)

17. Open the file `err.new` to see the value of extracted parameters. `example3.err` is the *correct* error region.

A.9.2 Example No.1

Known information • as cleaved GC-DFB. • first order grating and $\Lambda = 0.23693[\text{nm}]$. •
 $L = 550[\mu\text{m}]$



☒ A.3: (a) Misread FP peak, (b) use `-f 1` flag, (c) use `-f 2` flag

1. Copy `example1.dat` into `spec.dat`.

2. Execute

```
extract GCDFB 550 0.23693
```

3. Wait until calculation is over. (in a few minutes)

4. Display `spec.dat` and `fspec.new` in the same graph to confirm the fitting was *not* succeeded.
 It is because initialized parameters were not appropriate.

5. Execute

```
initpar GCDFB 550 0.23693
```


6. Display `spec.dat` and `fspec.new` and `peak.new` in the same graph. And you can see that one small peaks are not recognized and calculated FP peaks are shifted (Fig.A.3(a)).

7. You input the command

```
initpar GCDFB 550 0.23693 -f 1
```

8. Display `spec.dat` and `fspec.new` in the same graph to confirm initialized parameters are *not* appropriate (Fig.A.3(b)). It is because this program can't recognize the FP peak hidden in the main mode peak.

9. In this case, you input the command

```
initpar GCDFB 550 0.23693 -f 2
```

10. Display `spec.dat` and `fspec.new` in the same graph to confirm initialized parameters are appropriate (Fig.A.3(c)). (`peak.new` was removed.)

11. Execute

```
extract GCDFB 550 0.23693 -f 2
```

12. Wait until calculation is over. (in a few minutes)

13. Display `spec.dat` and `fspec.new` in the same graph to confirm the fitting was succeeded.

14. Open the file `dfb.new` to see the value of extracted parameters. `example1.par` and `example1.spe` is the *correct* parameters and spectrum.

15. Copy `dfb.new` to `errparam.dat`.

16. Copy `example1.dat` (`spec.dat`) to `errspec.dat`.

17. Execute

```
anlyser.exe
```

18. — coffee break — (in a few *hour*)

19. Open the file `err.new` to see the value of extracted parameters. `example1.err` is the *correct* error region.

A.9.3 Example No.8

Known information • as cleaved GC-DFB. • first order grating and $\Lambda = 0.23693[\text{nm}]$. • $L = 550[\mu\text{m}]$

1. Copy `example8.dat` into `spec.dat`.

2. Execute

3. Wait until calculation is over. (in a few minutes)
4. Display `spec.dat` and `fspec.new` in the same graph to confirm the fitting *seems to be* succeeded.
5. Open the file `dfb.new` to see the value of extracted parameters. You find that net gain curvature is negative, and gain peak wavelength is too far from bragg wavelength. It is because that gain is expressed in three parameters, $g = g_1 + g_2(E - E_p)^2$. When range of measured wavelength (12[nm] in example8) and net gain curvature is small, gain parameters cannot be extracted correctly. But the value of gain at measured wavelength are roughly correct (Fig.A.4).

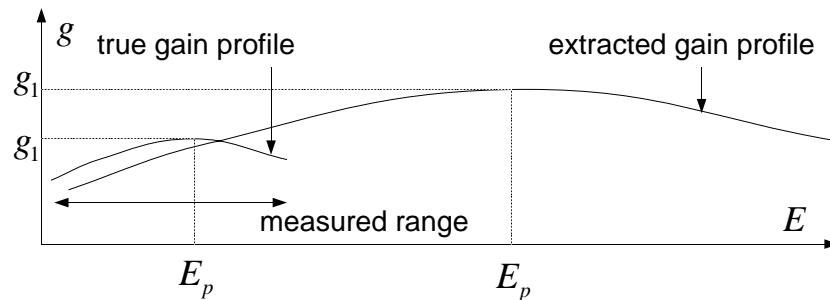


図 A.4: gain profile

6. If gain peak wavelength is fixed to appropriate value, net gain g_1 and net gain curvature g_2 is extracted correctly. As described in section A.3, parameters of example8 is thought to be almost the same as those of example7, so you can use the *correct* parameters of example7 as initialized parameters for example8. And concerned about gain peak wavelength λ_p , you have decided λ_p of example7 as that of example8. Then copy to `example7.par` to `dfb.new` and edit this file. Change fitting flag of gain peak wavelength 1 to 0.

7. Execute

`fitting.exe`

8. Wait until calculation is over. (in a few minutes)
9. Parameters are extracted into the file `dfb.new`. So execute `fspec.exe` to calculate spectrum with using extracted parameters. Then fitted spectrum is written into the file `fspec.new`
10. Display `spec.dat` and `fspec.new` in the same graph to confirm the fitting was succeeded.
11. Open the file `dfb.new` to see the value of extracted parameters. `ex8.par` and `ex8.spe` is the *correct* parameters and spectrum.
12. Copy `dfb.new` to `errparam.dat`.
13. Copy `example8.dat (spec.dat)` to `errspec.dat`.

14. Execute

`anlyser.exe`

15. — coffee break — (in a few *hour*)

16. Open the file `err.new` to see the value of extracted parameters. `ex8.err` is the *correct* error region.

A.9.4 When some parameters are known

If you know the value of some parameters, such as front and rear facet phase for example, you can use such fixed parameters and apply fitting for other parameters. For example, you want to apply fitting to `example2` with using fitted parameters of `example1` as initialized parameters, and want not to change front and rear facet phase.

1. Copy `example2.dat` to `spec.dat`

2. Copy `example1.par` to `dfb.new`

3. Open the file `dfb.new` and change the fitting flag of front and rear facet phase 1 to 0

4. Execute `fspec.exe` to calculate spectrum with using parameters in `dfb.new`.

5. Display `spec.dat` and `fspec.new` in the same graph to confirm that both of them resemble each other and `dfb.new` is valid as initialized parameters for fitting to `example2.dat`.

6. Execute

`fitting.exe`

7. Wait untill calculation is over. (in a few minutes)

8. Parameters are extracted into the file `dfb.new`. So execute `fspec.exe` to calculate spectrum with using extracted parameters. Then fitted spectrum is written into the file `fspec.new`

9. Display `spec.dat` and `fspec.new` in the same graph to confirm the fitting was succeeded.

10. Open the file `dfb.new` to see the value of extracted parameters. Compared with `example2.par`, you find that extracted parameters are almost the same.

Program `extract` consists of three parts, calculate initialized parameters (`auto*.exe`), calculate spectrum with using given parameters (`fspec.exe`), and apply fitting (`fitting.exe`). The program `extract` only control these three function appropriately.

A.9.5 Example of batch file

When you measure many spectrum and want to apply fitting to all these spectrum, it is convenient to make batch file.

1. Copy one measured spectrum to `spec.dat`, and with using `initpar.exe`, you should know whether this spectrum need some flag like `-f 1` or not.
2. This work should be applied to all measured spectrum.
3. Edit batch file for fitting. In the example0 ~ 8, batch file become `example.bat`
4. Execute

```
example.bat
```

5. Wait until all calculations are over.
6. See fitting was succeeded or not for all cases. In this case, fitting for example8 is failed, so try again as described in subsection A.9.3
7. Edit batch file for error estimation. In this case, batch file become `anlyser.bat`.
8. Execute

```
anlyser.bat
```

9. Wait until all calculation are over.

A.10 Option

- `-r` Specify the facet power reflectivity, like AR-HR coated lasers. Default : facet power reflectivity is calculated by $R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$.
- `-i` Recognize bragg wavelength as intensity peak wavelength when calculate initialized parameters. Default : bragg wavelength is recognized as the center of stop-band.
- `-f` Recognize hidden or small FP peak. With using this option, bragg wavelength is recognized as intensity peak wavelength when calculate initialized parameters.
- `-fs` Recognize hidden or small FP peak. With using this option, bragg wavelength is recognized as the center of stop-band.

The option `-i`, `-f`, and `-fs` should not be used at the same time. But `-r` can be used with other option.

A.11 Etc.

- When you measure the sub-threshold spectrum for fitting, optical spectrum analyzer should be used in DOUBLE MONOCHROME MODE.
- When the span of measured spectrum is too large, this program can't extract correct value, especially coupling coefficient and facet phase. In this case, you had better cut the data of `spec.dat` before fitting. (empirically, spectrum with 15~20 FP peaks is valid)
- When valid initialized parameters aren't derived and fitting routine doesn't work well, you should change the parameter *yourself* to bring the calculated spectrum close to the measured one by editing `dfb.new` and calculate spectrum by `fspec.exe` before executing fitting routine.
- The most probable case of failure in fitting routine is concerned about gain. In some cases, net gain curvature g_2 is determined as negative number or gain peak wavelength λ_p is determined as far from bragg wavelength. In this case, you should edit the failed extracted parameter file `dfb.new` and change g_2 as 0, λ_p as around bragg wavelength, and g_1 as appropriate value, and fitting flag of λ_p as 0. After this changing, execute `fitting.exe` again. Which was described in subsec. A.9.3.
- But even if gain is not extracted correctly, value of other parameters are correctly extracted (See `example8.par` and `ex8.par`). Don't so mind when these gain parameters are not appropriate.
- If measured laser has some unique points, like dark line in active layer, or nonuniformity along the cavity, or so, this fitting program can't give a good fit.
- About goodness-of-fit. "sigma2" is desired to be as small as possible. And "max round trip gain" should be smaller than 1 because this value is used as general proportion in sum of infinite geometric series.
- When you judge result of the fitting, you should always see measured spectrum and fitted one at the same time.
- Even if fitting seems to be succeeded, *person* should judge whether the result is correct or not finally.

A.12 Request

This fitting program and instruction manual was written by Tooru Nakura, Nakano Lab., Dept. of Elec. Eng., Univ. of Tokyo, Japan. Please send e-mail to my supervisor if you get this program. Not me, because I graduate university and change my research subject.

nakano@ee.t.u-tokyo.ac.jp

謝辞

本研究を進めるにあたり、協力してくれた多田・中野研のみなさんに感謝します。特に、この研究の立ち上げ時に、丁寧に基礎から教えてくれ、その後も的確なアドバイスをしてくれた佐藤さん、常に厳しいつっこみをしてくれた須藤 剣さん、測定用のレーザを快く提供してくれた舟橋君、川西君、なにかとお世話になった須藤信也さん、その他、研究室の皆さん。ありがとうございました。

そしてなによりも、素晴らしい研究環境を整えてくれ、いつも熱心に、そして暖かく指導してくれた、中野先生、多田先生に深く感謝します。どうもありがとうございました。

本研究に関する学会発表

- 名倉 徹, 佐藤健二, ヘルルト・モルティエル, ルル・バーツ, 中野義昭, 多田邦雄, “DFB レーザの閾値下スペクトルからのパラメータ抽出 (II),” 春季第 43 回応用物理学関係連合講演会, 27a-C-1, p.1041, 1996
- 名倉 徹, 佐藤健二, ヘルルト・モルティエル, ルル・バーツ, 中野義昭, 多田邦雄, “DFB レーザの閾値下スペクトルからのパラメータ抽出 (III),” 秋季第 57 回応用物理学学会学術講演会, 9a-KH-4, p.971, 1996
- 名倉 徹, 佐藤健二, ヘルルト・モルティエル, ルル・バーツ, 中野義昭, 多田邦雄, “DFB レーザの結合係数自動抽出プログラム,” 1996 年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-315, p.315, 1996
- 名倉 徹, 舟橋政樹, ヘルルト・モルティエル, ルル・バーツ, 中野義昭, 多田邦雄, “DFB レーザの閾値下スペクトルからのパラメータ抽出 (IV),” 春季第 44 回応用物理学関係連合講演会, PA-11, to be published.
- Tooru Nakura, Kenji Sato, Masaki Funabashi, Geert Morthier, Roel Baets, Yoshiaki Nakano, Kunio Tada, “First observation of changing coupling coefficients in a gain-coupled DFB laser with an absorptive grating by an automatic parameter extraction from sub-threshold spectra,” 1997 CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS, to be published.
- 舟橋政樹, 谷津亮介, 名倉 徹, 中野義昭, 多田邦雄, “1.55 μm 帯吸収性回折格子型利得結合 DFB 歪み MQW レーザの試作,” 春季第 44 回応用物理学関係連合講演会, PA-13, to be published.
- 舟橋政樹, 谷津亮介, 名倉 徹, 中野義昭, 多田邦雄, “1.55 μm 帯吸収性回折格子型利得結合 DFB レーザの反射戻り光耐性 (II),” 春季第 44 回応用物理学関係連合講演会, PA-14, to be published.

- 阿部博明, 三ツ谷真司, 青野園子, 伊藤卓雄, 杉山正和, 野中俊介, 須藤信也, 川西秀和, 須藤 剣, 名倉 徹, 霜垣幸浩, 中野義昭, 多田邦雄, “表面回折格子型 InGaAsP/InP 歪 MQW-DFB レーザの試作,” 春季第 44 回応用物理学関係連合講演会, to be published.
- JQE?

参考文献

- [1] H. Kogelnik and C.V. Shank, "Coupled-Wave Theory of Distributed Feedback Lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 43, No. 5, pp. 2327-2335, May 1972.
- [2] AMNON YARIV and MICHIHARU NAKAMURA, "Periodic Structures for Integrated Optics," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-13, No. 4, pp. 233-253, Apr. 1977.
- [3] Yoshiaki Nakano, Yi Luo, and Kunio Tada, "Facet reflection independent, single longitudinal mode oscillation in a GaAlAs/GaAs distributed feedback laser equipped with a gain-coupling mechanism," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 55, No. 16, pp. 1606-1608, Oct. 1989.
- [4] HARUHISA SODA and HAJIME IMAI, "Analysis of the Spectrum Behavior Below the Threshold in DFB Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, No. 5, pp. 637-641, May 1986.
- [5] TOSHIHIKO MAKINO and JAN GLINSKI, "Transfer Matrix Analysis of the Amplified Spontaneous Emission of DFB Semiconductor Laser Amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 24, No. 8, pp. 1507-1518, Aug. 1988.
- [6] PATRICK VANKWIKELBERGE, GEERT MORTHIER, and ROEL BEATS, "CLADISS - A Longitudinal Multimode Model for the Analysis of the Static, Dynamic, and Stochastic Behavior of Diode Lasers with Distributed Feedback," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, No. 10, pp. 1728-1741, Oct. 1990.
- [7] STEPHEN R. CHINN, "Effects of Mirror Reflectivity in a Distributed-Feedback Laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-9, No. 6, pp. 574-580, June 1973.

- [8] Leonard J. P. Ketelsen, Isako Hoshino, and David A. Ackerman, "Experimental and Theoretical Evaluation of the CW Suppression of TE Side Modes in Conventional 1.55 μm InP-InGaAsP Distributed Feedback Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, No. 4, pp. 965-975, Apr. 1991.
- [9] David M. Adams, Daniel T. Cassidy, and Douglas M. Bruce, "Scanning Photoluminescence Technique to Determine the Phase of the Grating at the Facets of Gain-Coupled DFB's," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, No. 7, pp. 1237-1242, July 1996.
- [10] BRIAN R. BENNETT, RICHARD A. SOREF, and JESUS A. DEL ALAMO, "Carrier-Induced Change in Refractive Index of InP, GaAs, and InGaAsP," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, No. 1, pp. 113-122, Jan. 1990.
- [11] Basil W. Hakki and Thomas L. Paoli, "Gain spectra in GaAs double-heterostructure injection lasers," *J. of Appl. Phys.*, vol. 46, No. 3, pp. 1299-1306, March 1975.
- [12] 荒井 滋次, "DSM(動的単一モード) レーザの理論と実験," 応用物理学会量子エレクトロニクス研究会主催「半導体レーザ」資料, pp. 71-78, 1985
- [13] 中川 徹, 小柳 義夫, "最小二乗法による実験データ解析," 東京大学出版会, 1982.
- [14] JOHN E. DENNIS, JR, DAVID M. GAY, and ROY E. WELSCH, "An Adaptive Nonlinear Least-Squares Algorithm," *ACM Transaction on Mathematical Software*, vol. 7, No. 3, pp. 348-368, Sep. 1981.
- [15] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery, "NUMERICAL RECIPIES in C," 技術評論社, 1993