

ファブリペロ干渉計を用いて同時安定化した GaAs 半導体レーザの周波数及び出力の応答特性

鈴木 正 夫* 山口 静 夫*

Response Characteristics of the Frequency and Output Power of a GaAs Semiconductor Laser Simultaneously Stabilized by Use of a Fabry-Pérot Interferometer

Masao SUZUKI, Shizuo YAMAGUCHI

The simultaneous stabilization of the frequency and output power of a GaAs semiconductor laser has been done by using two kinds of feedback loops, i. e., one is connected to the injection current source for the frequency stabilization and the other to the temperature controller for the power level control. An approximate formula to estimate the effective damping factor similar to that obtained by a second order system is given. The frequency shift to the power level control of $\pm 0.5 \text{ mW}$ was $\pm 1.2 \text{ MHz}$. The power level change to the frequency tuning of 1 GHz was $0.4 \mu\text{W}$. The settling time of 10 s at an effective damping factor of 0.19 was obtained by adjusting the time constant and the loop gain of the feedback loop for the power level control.

(要 旨)

周波数を安定化する帰還回路を注入電流源に、出力レベルを安定化する帰還回路を温度制御装置に接続し、GaAs 半導体レーザの出力と周波数の同時安定化を行なった。出力や周波数のステップ応答を調べ、システムを二次系で近似し、減衰率を見積った。±0.5 mW の範囲で出力を変化させた時の周波数シフトは ±1.2 MHz、1 GHz の周波数掃引に対する出力レベルの変化は 0.4 μW 以下である。出力制御回路の利得と、積分器の時定数を調整し、減衰率 0.19、整定時間 10 s の動作条件を定めることができた。

1. 序 論

GaAs 半導体レーザは、形状、効率、コスト寿

命等の点で他のレーザに見られぬすぐれた特徴があり、各種光計測装置や光通信装置の光源として用いられている。しかし、発振波長や出力が注入電流や動作温度に依存して変化するので、高い安定度を必要とする場合は、波長標準にファブリペロ干渉計^{1,2)}や原子分子のスペクトル^{3,4,5)}を用いてこれに安定化することが行なわれる。

注入電流と動作温度の変動 ΔI と ΔT に対する周波数変化 ΔF と出力の変化 ΔP は

$$\Delta F = \left(\frac{\partial F}{\partial I} \right) \Delta I + \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right) \Delta T \quad (1-a)$$

$$\Delta P = \left(\frac{\partial P}{\partial I} \right) \Delta I + \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right) \Delta T \quad (1-b)$$

と表わされるように互いに相関するので、一方を安定化するとかえって他方の安定度が悪化したりする。そこで、周波数変動により生じる誤差信号を注入電流に、出力変動により生じる誤差信号を

* 電子工学科 教授、助手
昭和 60 年 10 月 8 日受理

温度制御装置に帰還して、周波数と出力を同時に安定化する方法が考案され、 K_r のガルバノ信号を波長標準に用いて、 10^{-10} の周波数安定度と、 10^{-4} の出力安定度が得られるようになった⁶⁾。

この同時安定化システムに用いられている波長標準器に、ファブリペロ干渉計を用いると、任意の周波数と出力レベルで動作する汎用性あるレーザ発振器として使用できる。そこでこのシステムの出力や周波数の応答特性を調べ、経験的に定めた動作点について検討を加えた。

2. 周波数及び出力レベル同時安定化システムとその応答

制御システムの概要⁶⁾を図1に示す。ビームスプリッタを用いて分割したレーザ光をファブリペロ干渉計 (F. P. I.) に入射させ、この透過光を検出器 D_1 で検出する。干渉計のミラー間隔は、ピエゾ素子 (PZT) に加える直流電圧 V_{FR} により調節する。またこの直流電圧に交流信号を重ね波長標準とするインタフェログラムを変調する。検出信号を位相検波すると、周波数弁別信号を得ることができるのでこれを周波数安定化回路の誤差信号 e_F とする。次にこれを増幅度 A_{F1} の比例増

幅器、増幅度 A_{F2} 時定数 τ_F の積分器で増幅し、電圧-電流変換率 k_{VI} の割合で注入電流源に帰還する。レーザ周波数 F と共振周波数 F_0 の差が、 ΔF の時に生じる注入電流の変化分 ΔI は

$$\Delta I = k_{VI} \cdot A_{F2} \cdot k_F \cdot \Delta F \quad (2)$$

となる。 k_F は弁別信号の中心における勾配 (V/GHz) である。また増幅度 A_{F1} は A_{F2} に較べて十分小さいとする。

レーザに組み込まれた検出器 D_2 でレーザ出力を検出し、この出力 V_P と基準電圧 V_{PR} との差 e_P をレーザ出力の誤差信号とする。これを増幅度 A_{P1} の比例増幅器、時定数 τ_P 増幅度 A_{P2} の積分器で増幅する。この信号を減衰器で減衰させ電圧-温度変換率 k_{VT} の温度制御装置に帰還する。 ΔP の出力変化があった時生じる温度変化は、 $A_{P1} \ll A_{P2}$ とすると、

$$\Delta T = 10 \cdot k_P \cdot A_{P2} \cdot C \cdot k_{VT} \cdot \Delta P \quad (3)$$

である。因子 10 は、差動増幅器の増幅度、 C は減衰度、 k_P は検出器の効率 (V/mW) である。

(1) 式の $(\partial F / \partial I)$ 、 $(\partial F / \partial T)$ 、 $(\partial P / \partial T)$ が負で、 $(\partial P / \partial I)$ は正であるので、レーザ周波数が仮に高い方へずれると、注入電流が増大する。この結果出力は増加するので、出力レベルを一定に保

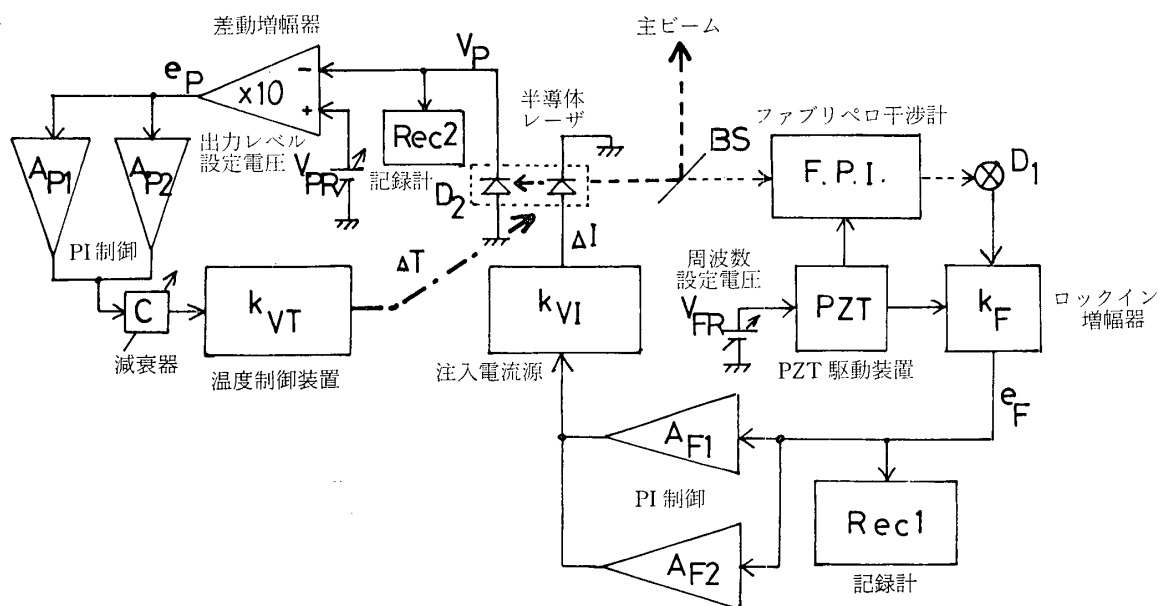


図1 周波数出力同時安定化システム

つよう動作温度が上昇する。これは周波数を下げる方向へ移動させる信号となるので、最終的には、 $e_F=0$, $e_P=0$ となる状態が得られ、レーザは、ファブリペロ共振器の共振周波数 F_0 , 出力基準電圧の設定値に対応する出力レベル $P_0=V_{PR}/k_P$ で動作する。

a) 出力レベル設定時の応答特性

V_{PR} を変化させ出力レベルを P から P_0 に設定すると、(3) 式で示すような割合で温度制御装置の温度が変わり $(\partial F/\partial T)\Delta T$ の割合で周波数が変わる。この周波数の変化分は、(1-a) 式の $(\partial F/\partial I)\Delta I$ の項により注入電流が変化し $\Delta F=0$ の状態にもどる。温度制御装置が関与する出力制御系に比べて注入電流で制御する周波数制御系の応答は速い。 $A_{F1} \ll A_{F2}$ の場合実際上の時定数 τ_F^{eff} は

$$\tau_F^{\text{eff}} = \tau_F \left(\frac{A_{F1}}{A_{F2}} \right) \quad (4)$$

となり、無視できる。

このように周波数制御系のループが働き注入電流を変化させ、周波数一定の条件を保つように動作する⁷⁾ と、出力レベルの温度変化に対する割合 $G_L = -(dP/dT)$ は、(1-a), (1-b) 式より

$$G_L = \frac{(\partial P/\partial I)(\partial F/\partial T)}{(\partial F/\partial I)} - \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right) \quad (5)$$

となることがわかる。従って、出力制御系のループは図2のように簡略化され、伝達関数 $G(s)$ は温度制御装置の時定数 τ_T , 減衰率を ζ_T として、

$$G(s) = \frac{K_P(1+\alpha+\alpha\tau_P s)}{(1+\tau_P s)(1+2\zeta_T\tau_T s+\tau_T^2 s^2)} \quad (6-a)$$

$$K_P = 10 \cdot A_{P2} \cdot C \cdot k_{VT} \cdot k_P \cdot G_L \quad (6-b)$$

$$\alpha = A_{P1}/A_{P2} \quad (6-c)$$

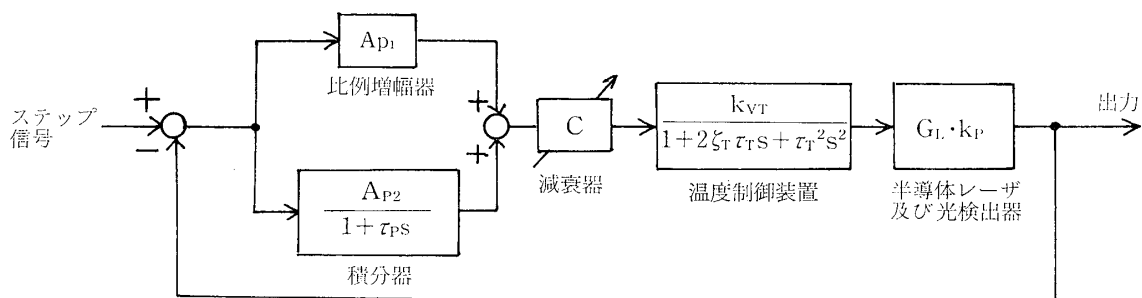


図2 出力制御系のブロック線図

と表わすことができる。閉ループとした時のステップ信号に対する応答は、特性方程式

$$s^3 + \frac{1}{\tau_T}(2\zeta_T + \gamma)s^2 + \frac{1}{\tau_T^2}(1 + K_P\alpha + 2\zeta_T\alpha)s + \frac{1}{\tau_T^3}(1 + K_P\alpha + K_P)\gamma = 0 \quad (7-a)$$

$$\gamma = \tau_T/\tau_P \quad (7-b)$$

の3根を η , $-\delta \pm j\omega$ として、

$$A(t) = 1 + K_1(\eta)e^{\eta t} + K_2(\delta, \omega)e^{-\delta t}\cos(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

と表わすことができる。

温度制御装置の減衰率 $\zeta_T \doteq 1$ とし、 $1 \gg \gamma > \alpha$, $K_P \gg 1$ とすると、(8) 式の η , δ , ω は

$$\eta \doteq -\frac{1}{\tau_T} \left\{ \sqrt[3]{K_P\gamma} \left(1 - \frac{2\alpha}{9\gamma} \right) + \frac{2}{3}\zeta_T \right\} \quad (9-a)$$

$$\delta \doteq \frac{1}{\tau_T} \left\{ \frac{2}{3}\zeta_T - \frac{1}{2} \sqrt[3]{K_P\gamma} \left(1 - \frac{2\alpha}{9\gamma} \right) \right\} \quad (9-b)$$

$$\omega \doteq \frac{1}{\tau_T} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{K_P\gamma} \left(1 - \frac{2\alpha}{9\gamma} \right) \quad (9-c)$$

と近似できる。

(8) 式の第2項は、第3項より速く減衰するので、出力レベルの応答は、次のような減衰振動で近似できる。

$$P(t) \doteq P_0 - \Delta P e^{-(\zeta_P^{\text{eff}}/\tau_T)t} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) \quad (10-a)$$

$$\zeta_P^{\text{eff}} \doteq \frac{2}{3}\zeta_T - \frac{1}{2} \sqrt[3]{K_P\gamma} \quad (10-b)$$

周期 T は

$$T \doteq \frac{4\pi \cdot \tau_T}{\sqrt{3} \cdot \sqrt[3]{K_P\gamma}} \quad (10-c)$$

ΔP の出力変化に対する定常状態での周波数シ

フト δF は, (1-a), (1-b) 式と (2) 式を用いて

$$\delta F = \frac{(\partial F / \partial T)}{(\partial P / \partial T)} \frac{\Delta P}{1 + K_F} \quad (11-a)$$

$$K_F = k_F \cdot A_{F2} \cdot k_{V1} \left\{ \frac{(\partial F / \partial T)(\partial P / \partial I)}{(\partial P / \partial T)} - \left(\frac{\partial F}{\partial I} \right) \right\} \quad (11-b)$$

と求めることができる.

b) 周波数設定時の応答特性

出力制御回路の帰還ループを動作させた状態で, V_{FR} を変化させファブリペロ干渉計のミラー間隔を変え共振点を ΔF 移動させる. するとレーザの発振周波数は, (4) 式で示す時定数でこれを追従するのだが, 出力制御回路の応答は遅いので, 出力レベルには

$$\Delta P_1 = \frac{(\partial P / \partial I)}{(\partial F / \partial I)} \Delta F \quad (12)$$

の変化が生じる. この応答は, 周波数をファブリペロ干渉計の設定周波数 F_0 にロックした状態で出力レベルを, $P + \Delta P_1$ より P に変化させた事に対応する. 従って, (10-a) 式の P_0 を $P + \delta P$ に, ΔP を $-\Delta P_1$ に置き換えることにより応答特性の近似式を得ることができる. すなわち $t > \tau_F^{\text{eff}}$ では

$$P(t) = P + \delta P + \frac{(\partial P / \partial I)}{(\partial F / \partial I)} \Delta F e^{-(\zeta_F^{\text{eff}} / \tau_F) t} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi\right) \quad (13-a)$$

$$\delta P = \frac{(\partial P / \partial I)}{(\partial F / \partial I)} \frac{\Delta F}{1 + K_F} \quad (13-b)$$

(13) 式の δP は定常状態における出力レベルの変化であって, (1-a), (1-b), (3) 式より求めることができる.

3. 実験結果及び考察

表 1 に示す特性を持つ GaAs 半導体レーザを 8°C で動作させ, 周波数誤差信号及び出力レベルのステップ応答を調べた.

1 mW の出力変化を与えた時の周波数のオフセットが 2 MHz 以内となるよう K_F を 10^6 と決めた. 表 2 に示すように周波数制御系のパラメータを設定し, 温度一定の条件で, 周波数制御回路の

表 1 GaAs 半導体レーザの特性パラメータ

型 名	HL 780/E (日立製作所)		
発振波長	800 nm		
最大出力	1.8 mW		
しきい値電流	70 mA		
$(\partial F / \partial I)$	-3.2 GHz/mA	$(\partial P / \partial I)$	$35 \mu\text{W/mA}$
$(\partial F / \partial T)$	$-23 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$	$(\partial P / \partial T)$	$-10.5 \mu\text{W}/^\circ\text{C}$

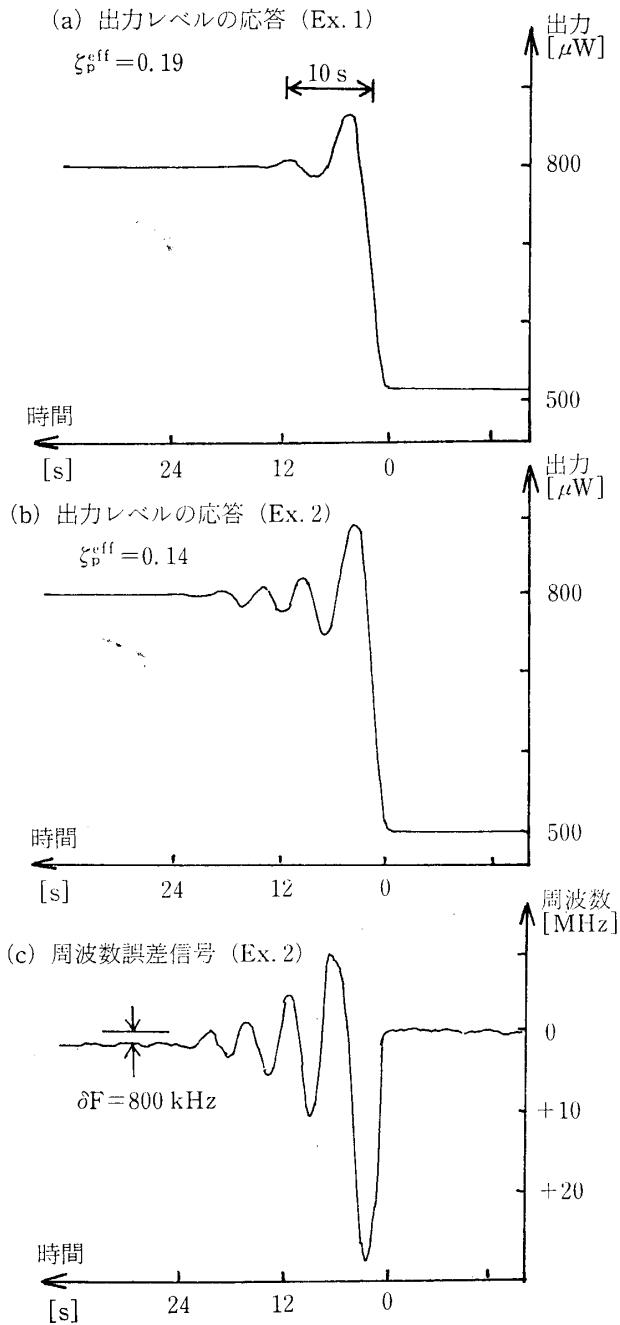
表 2 制御系のパラメータ

周波数安定化回路		出力安定化回路	
k_F	1 V/GHz	k_P	1 V/mW
A_{F1}	10	A_{P1}	2
A_{F2}	320	A_{P2}	100
τ_F	30 s	k_{VT}	10°C/V
k_{V1}	40 mA/V	ζ_T	1
K_F	10^6	τ_T	1 s
Ex. 1		Ex. 2	
C		$(1 \pm 0.2)/100$	
τ_P		30 s	
K_P		26 ± 5.2	

応答を調べると $\tau_F^{\text{eff}} < 2 \text{ s}$ であった.

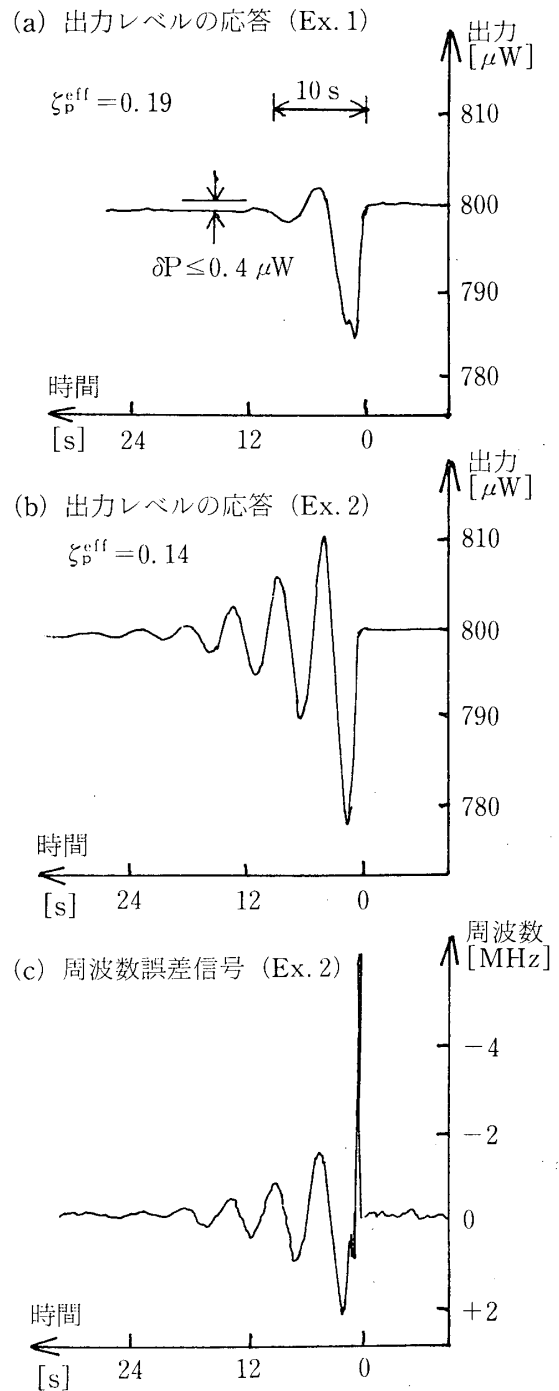
出力レベルのオフセットを小さくするには, K_P を大きくすれば良い. しかし, これを大きくすると, (10-b) 式の減衰率が小さくなり整定時間が長くなる. これをさけるため, 積分器の時定数 τ_P を調節し $r = \tau_T / \tau_P$ の値が小さくなるようにして, 応答特性の改善を図った. 表 2 に示すように温度制御装置へ帰還する信号を $(1 \pm 0.2)/100$, $(1 \pm 0.2)/50$ と減衰させ K_P を 26 と 52 とした. それぞれについて, 時定数を 30 s と 45 s して測定したステップ応答を図 3 と図 4 に示す. 図 3 は, 出力レベルを $300 \mu\text{W}$ から $800 \mu\text{W}$ にした時の結果である. 図 4 は, 1.6 GHz の周波数変化を与えた時の応答である.

それぞれの実験条件について, 見掛けの減衰率を (10-b) 式により見積ると 0.19 と 0.14 となる. また減衰振動の周期は, 7.6 s と 6.9 s となり, 実験結果との対応も満足の行くものである. 前者の条件では, 出力レベルのオフセットが, 後

図 3 $\Delta P = +300 \mu\text{W}$ のステップ応答

者の 2 倍になるが整定時間が 10 s と短かいので適切な条件と考えられる。周波数変動は、図 3 c, 4 c に示すように出力の応答と同じような減衰振動を示す。ステップ信号を与えた直後の鋭い応答は周波数制御回路の応答時間が短い事を示している。

比例増幅器と積分器の増幅度の比を変えて特性を改善するには、近似式が成り立たなくなるので

図 4 $\Delta F = +1.6 \text{ GHz}$ のステップ応答

数値解析法を行なう必要がある。これを行ない最適条件を求めると、さらに良好な結果が得られるものと期待できる。

半導体レーザの発振周波数と出力は、注入電流と動作温度を変えて調節できるが、互いに相関するので、目的とする値に両者を設定することは難

かしい。しかし、同時安定化法を用いると、周波数と出力を制御回路の雑音レベルに相当する数 MHz 数 μW の精度で設定でき、かつファブリペロ干渉計が参照波長標準器として使われているため 10^{-8} 程度の周波数安定度も同時に得られるので、種々の光計測装置の精度は光源として使用できる。

文 献

- 1) T. Okoshi and K. Kikuchi, *Electron. Lett.*, **16**, 179-181 (1980).
- 2) J. L. Picqué and S. Roisen, *Appl. Phys. Lett.*, **27**, 340-342 (1975).
- 3) T. Yabuzaki, A. Ibarai, H. Hori, M. Kitano and T. Ogawa, *Japan. J. Appl. Phys.*, **20**, L 451-L 454 (1981).
- 4) S. Yamaguchin and M. Suzuki, *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 597-598 (1982).
- 5) H. Tsuchida, M. Ohtsu and T. Tako, *Japan. J. Appl. Phys.*, **19**, L 541-L 543 (1980).
- 6) S. Yamaguchi and M. Suzuki, *IEEE J. Quant. Elec.*, **QE-19**, 1514-1519 (1983).
- 7) K. Okumura and Misao Ohi, *Japan. J. Appl. Phys.*, **23**, 1589-1593 (1984).