

半導体レーザの雑音解析

中平 勝也

大幡 浩平

水野 秀樹

NTT ワイヤレスシステム研究所

〒238-03 神奈川県横須賀市武1-2356

あらまし RF信号やマイクロ波信号の光インタコネクトでは半導体レーザの強度雑音はシステム全体の信号品質に最も支配的となる。従ってシステム設計において、レーザの選択及びレーザを駆動させる周波数や入力電流等の駆動パラメータを最適に設定するには、RIN (相対強度雑音) の解析は非常に重要となる。そこで本稿では、個々のレーザのRINを付加測定なしに一意に得る解析法の検討を行なった。本解析法ではレーザ活性層のレート方程式を用い、方程式中のパラメータをレーザの基本的な特性を表す8つの値によってRINを記述している。さらに解析法を1.3 μ mFPレーザとDFBレーザに適用し解析値が測定値と非常によく一致することを確認した。

和文キーワード 光インタコネクト、半導体レーザ、相対強度雑音

Noise Analysis of Semiconductor Lasers

Katsuya NAKAHIRA

Kohei OHATA

Hideki MIZUNO

NTT Wireless Systems Laboratories

1-2356 Take Yokosuka-shi Kanagawa 238-03 Japan

Abstract A noise performance of semiconductor lasers significantly affect optical interconnection system and, therefore, to get noise characteristics of the lasers are very important for the system designers. In order to obtain RIN, measurements of noise characteristics have to be carried out for each laser and consequently, when the laser is changed a new set of measurements must be taken.

This paper focused on the theoretical expression of RIN and all parameters in the equations are derived using fundamental values of laser characteristics. The noise performance experiments are carried out for the FP and the DFB lasers, and confirmed that the experimental results show good agreement with the analytical results.

英文 key words optical interconnection, semiconductor laser, relative intensity noise

1. まえがき

近年、RF信号やマイクロ波信号の高周波アナログ信号を光ファイバによって伝送する光インタコネクが注目されている。光インタコネクは、同軸ケーブルや導波管が設置されていた部分に応用される。例えば、衛星を使った受信専用のTV網、CATV伝送網、アンテナと無線基地局間の伝送路、飛行機や船に装備される無線回路、数千の放射素子から構成されるフェーズドアレイアンテナ、レーダに用いられる遅延線などがある^{[1]・[6]}。

光インタコネクは同軸ケーブルや導波管を用いる従来伝送方式と比較すると信号線の長距離化、信号容量の増大、ケーブル設置面積とケーブル重量の減少、雷や環境電磁波等の干渉波の除去の利点を持つ。しかし各デバイス（半導体レーザ、フォトダイオード、フォトダイオード後段のアンプ）で発生する雑音が従来伝送方式で発生する雑音に対して大きい。従って、雑音による信号品質劣化に厳しいアナログ伝送路では各デバイスの雑音特性を詳細に検討する必要がある。

光インタコネクの雑音発生源は主に（1）半導体レーザの強度雑音、（2）フォトダイオードのショット雑音、（3）アンプの熱雑音に大別することが出来る。これら雑音の大きさは光インタコネク間の距離（光ファイバの長さ）、各デバイスの特性や駆動条件、周辺回路のインピーダンス等によって変化する。次節で詳しく述べるが、RF/マイクロ波信号の光インタコネク間の距離及びデバイス性能を考慮すると、上記の3つの雑音成分の中で半導体レーザの強度雑音は最も支配的となる。従って半導体レーザの雑音解析法は重要な検討課題となる。

半導体レーザの強度雑音の大きさは一般的にRIN（相対強度雑音）を用いて評価される。よってシステム設計においてレーザの選択及びレーザを駆動させる周波数や入力電流等の駆動パラメータを最適に設定するためにはRINは非常に重要な値となる。しかし、RINは駆動条件が一定でしかも同一種類のレーザにおいても一定値とはならず、個々のレーザの物理的な形状や特性の違いにより異なる。従って、従来RINはレーザ毎に測定され、レーザが変われば新たに測定をやり直す必要があった。その上、RINはレーザへの反射戻り光やレーザ本体の温度、振動、劣化等の外部環境によって変動するため、これを抑える配慮が必要となり測定は非常に負荷が大きいものとなる。そこでレーザ毎の測定をさげ、個々のレーザが持つ特定の値（以下特性値）と駆動パラメータからRINを一意に得ることの出来る解析法が望まれている。

RINに関しては、主に光通信に用いられる $1.3\mu\text{m}$ や $1.5\mu\text{m}$ 帯InGaAsP/InP FP (Fabri Perrot) とDFB（分布

帰還型）レーザについて多くの理論解析が行われている^{[7]・[9]}。しかしこれらの解析はRINの定性的な特性を扱うことに主眼が置かれているため、RINを定量的に求めることは困難である。そこで本稿では、個々のレーザの特性を表す8つの値と任意の周波数、入力電流から一意にRINを得る解析法の検討を行なった。さらに解析法を $1.3\mu\text{m}$ FPレーザとDFBレーザに適用し、解析値が測定値と非常によく一致することを確認したので報告する。

2. 光インタコネクで発生する雑音

前節でも述べたように、光インタコネクで発生する雑音は（1）半導体レーザ強度雑音 N_{LD} 、（2）フォトダイオードショット雑音 N_{PD} 、（3）アンプ熱雑音 N_{AMP} に大別されるが、光インタコネクの等価回路を図1で表すと、それぞれの雑音密度（単位周波数当たりの雑音密度）の入力換算値は次式で表される^{[10]・[11]}。

$$N_{LD} = RIN(I_{in} - I_{th})^2 R_i \quad (1)$$

$$N_{PD} = 2e(I_{in} - I_{th})L_{cur}R_i \quad (2)$$

$$N_{AMP} = kT_o F L_{pow} \quad (3)$$

ただし L_{cur} は電流ロス（フォトダイオードの出力電流に対するレーザの入力電流比）であり L_{pow} は電力ロス（ロードの出力電力に対するレーザの入力電力比）で、各々次式で表される。

$$L_{cur} = I_{in} / I_{pd} = L_{fib} / x y \quad (4)$$

$$L_{pow} = \left(\frac{I_{in}}{I_{out}}\right)^2 \frac{R_i}{R_l} = \left(L_{cur} \frac{R_o + R_l}{R_o}\right)^2 \frac{R_i}{R_l} \quad (5)$$

（1）～（5）式で用いられた記号と本検討で使用した代表値を表1にまとめた。

図2は表1の代表値を（1）～（5）式に代入し、光ファイバの長さと各雑音密度の大きさの関係を求めたものである。光ファイバを伝送路とするシステムにおいては、光ファイバの長さは光コヒーレント通信に代表されるような数百Km以上のものから光LANのような数百m以下に至るまで様々なものが考えられるが、本稿で対象とするRF信号やマイクロ波信号の光インタコネクではその距離は数Km以下程度として検討した。また、高周波アナログ通信用として最も一般的に用いられるDFBレーザのRINは現状で入手可能なものとしては -150dB/Hz 程度が最低値であり、FPレーザではさらに大きな値となる。

図2より3つの雑音要素の中では半導体レーザの強度雑音が支配的となる。従って、信号品質に着目したシステムでは雑音の低い半導体レーザの選定あるいは雑音を低く抑える駆動条件の検討が最も重要な課題となる。

半導体レーザの強度雑音は、(1)式から明らかなように、入力電流、しきい値電流、回路インピーダンスが一定の場合には、RINによって決まる。しかし(a) RIN本来の値は個々のレーザの物理的な形状や構造より決まる特性値により変化する。また実際にレーザを使用する場合は、一定の入力電流に重畳させたRF/マイクロ波信号でレーザを変調するが、(b) RINは一般に周波数によって大きく変化する。高周波(RF/マイクロ波周波数は数GHz~数十GHz)で増加する傾向がある。さらにレーザの入力電流を変化させると(1)、(2)式の I_{in} 部分も変化するが、(c) RINも入力電流によって大きく変化する。以上よりRIN本来の値はレーザの特性値によって決定し、さらに駆動パラメータ(周波数、入力電流)によって変化する。

次章以降ではレーザの特性値と駆動パラメータよりRINを一意に求める解析法の検討を行い、次に実際のFPレーザとDFBレーザに適用する。また測定値と比較を行い解析法の適用可否を評価する。

3. 解析法

本章では半導体レーザのレート方程式を用い、各レーザの物理的な形状や構造より決まる8つの特性値、即ち

(1) 活性層の厚さ、(2) 幅、(3) 長さ、(4) 光子の吸収係数、(5、6) へき開両面の反射率、(7) 量子微分効率、(8) しきい値電流からRINを導出する解析法について検討を行う。

RINは半古典的には活性層内部の電子と光子数のレート方程式を用いると次式で示される^{[12]・[13]}。

$$RIN = \alpha \frac{f^2 + \gamma^2}{(\beta^2 - f^2)^2 + f^2 \gamma^2} \quad (6)$$

ここで f は雑音の周波数、 α 、 β 、 γ は個々のレーザに対して決まる雑音パラメータであり更に次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{n_{sp}}{\pi^2 P V \tau_p} \quad (7a)$$

$$\beta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{P \frac{\Gamma}{\tau_p} \frac{\partial G}{\partial N}} \quad (7b)$$

$$\gamma = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau_N} + P \frac{\partial G}{\partial N} \right) \quad (7c)$$

ここで n_{sp} は反転分布パラメータ、 P は光子密度、 V は活性層の体積、 τ_p は光子寿命、 Γ は光閉じ込め係数、 G

表1 光インタコネクタ代表値

No.	記号	内容	代表値	単位
1	RIN	相対強度雑音(RIN)	-140~-150	dB/Hz
2	I_{in}	レーザ入力電流	0.05	A
3	I_{th}	レーザしきい値電流	0.02	A
4	L_{fib}	光ファイバ伝送ロス	0.4	dB/km
5	x	レーザ電気/光変換効率	0.2	W/A
6	y	フォトダイオード光/電気変換効率	0.8	A/W
7	κ	ボルツマン定数	1.38E-23	W/Hz
8	T_0	常温	298	K
9	F	アンプ雑音指数	5	dB
10	R_i, R_o, R_l	回路インピーダンス	50	Ω

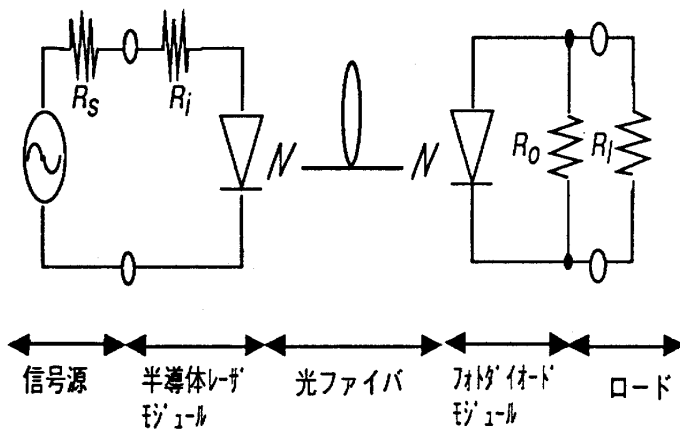


図1 光インタコネクタ等価回路

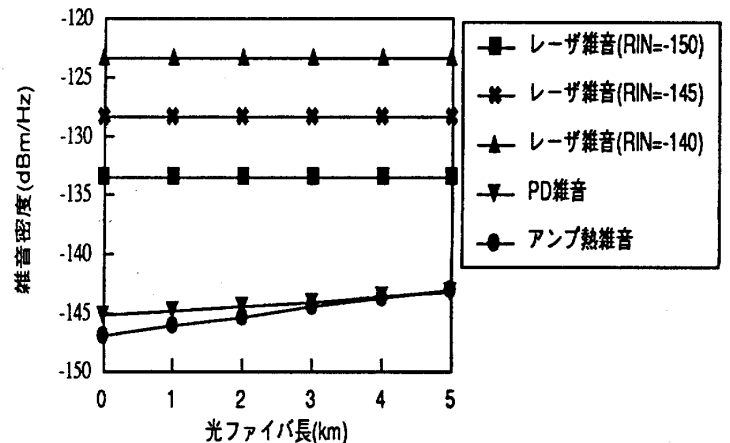


図2 光ファイバ長と各雑音密度の関係

は光子の利得係数、 N は電子密度、 τ_N は電子寿命である。

(6) 式から明らかなように任意の周波数における RIN は α 、 β 、 γ によって完全に記述することが出来る。また α 、 β 、 γ は (7) 式より右辺のパラメータ (P , V , Γ , τ_p , $\delta G / \delta N$, τ_N , n_{sp}) から求めることが出来る。

以下において (7) 式右辺のパラメータをすべて半導体レーザの特性値で記述する式とその導出の過程を詳しく述べる。

(1) $[V]$, $[\Gamma]$, $[\tau_p]$

V は活性層の体積であり長さ l 、厚さ m 、幅 n の積として求めることができる。

$$V = lmn \quad (8)$$

Γ と τ_p は一般的な関係がすでに報告されており次式で表すことが出来る。^[14]

$$\Gamma = 1 - \exp\{-2\pi^2(r_a^2 - r_c^2)m^2/\lambda^2\} \quad (9)$$

$$\tau_p = \frac{r_a}{J} \left(A + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right)^{-1} \quad (10)$$

から求めることができる。ここで r_a は活性層の屈折率、 r_c はクラッド層の屈折率、 λ はレーザの発振波長、 J は真空中での光の速度、 A は自由電子による光子の吸収係数、 R_1 と R_2 はへき開両面の反射率である。また r_a 、 r_c の導出については文献 [15] - [17] に記載される以下の実験近似式を用いる。

$$r_a = -4.94 \times 10^{18} E + 2.27 \sqrt{10^{18} E - 0.043} + 3.53 \quad (11)$$

$$r_c = \sqrt{7.26 + 2.33 / (1 - 10^{37} E^2)} \quad (12)$$

ここで E はバンドギャップエネルギーで $E = hJ / \lambda$ で与えられる。

(2) $[\delta G / \delta N]$

半導体レーザに対して密度行列の理論を用いると、活性層内の光子の利得は光子エネルギー (波長) の関数として表される。しかし半導体レーザは利得が最大となる波長においてのみ発振する性質を持つ。従って利得係数 G は常に最大利得 G_{\max} とみなすことが出来る。一方、上記理論によると最大利得は電子密度に対し $G_{\max} = a(N - N_0)$ のように比例することが導かれる。ここで a は比例定数、 N_0 は $G_{\max} = 0$ のときの電子密度である。よって、

$$\delta G / \delta N = \delta G_{\max} / \delta N = a \quad (13)$$

が得られる。また a と N_0 の値は文献 [18] に記載される以下の実験近似式を用いる。

$$a = 9.60 \times 10^{-12} \exp(-1.84 \times 10^{18} E) / r_a \quad (14)$$

$$N_0 = 5.00 \times 10^{23} \exp(6.50 \times 10^{18} E) \quad (15)$$

(3) $[P]$

レーザから出力される光電力 W は注入電流 I_{in} に対し $W = \eta(I_{in} - I_{th})$ で示されるように比例する。ここで η は微分量子効率、 I_{th} はしきい値電流である。またレーザ内部において密度 P の光子が反射率 R_2 のへき開面から出力されるとその密度は $PR_1 / (R_1 + R_2)$ と表され、さらにこれを光電力に換算すると $W = PR_1 / (R_1 + R_2) EV / \tau_p$ となる。従って W に関する上記の2つの式より

$$P = \eta(I_{in} - I_{th})(R_1 + R_2) / R_1 \cdot \tau_p / EV \quad (16)$$

が導かれる。

(4) $[\tau_N]$

上記 (2) の $G_{\max} = a(N - N_0)$ の関係に対し、しきい値電子密度 N_{th} としきい値利得 G_{th} を代入すると $G_{th} = a(N_{th} - N_0)$ が得られる。一方、実際のレーザ発振現象においては、発振に参与する真の利得は、光子の一部が活性層からクラッド層に洩れ込むため ΓG_{th} となる。またしきい値電子密度においては、時間 τ_p の間にレーザから放出される光子の割合が1であることを考慮すると $\Gamma G_{th} \tau_p = 1$ が得られる。従ってこれらの関係式を N_{th} について解くと $N_{th} = 1 / a \tau_p \Gamma + N_0$ となる。また電子寿命は $\tau_N = eV N_{th} / I_{th}$ と表されることより次式が導かれる。

$$\tau_N = eV / I_{th} (1 / \Gamma \tau_p a + N_0) \quad (17)$$

(5) $[n_{sp}]$

反転分布パラメータ n_{sp} は自然放出に対する誘導放出の比で $N / (N - N_0)$ と表される。また実際にレーザを使用する場合、入力電流はしきい値電流より常に大きく設定する。このような場合、 N_{th} を越える電子は光子と電子の再結合によりほとんど消滅する。従って $n_{sp} = N_{th} / (N_{th} - N_0)$ となる。さらに上記 (4) の $N_{th} = 1 / a \tau_p \Gamma + N_0$ の関係を代入すると次式が導かれる。

$$n_{sp} = 1 + N_0 a \tau_p \Gamma \quad (18)$$

以上すべての式を記載した。

最後に (6) 式より RIN は周波数 f の関数となっていること、(7) と (16) 式より α 、 β 、 γ はいずれも入力電流 I_{in} の関数となっていることを考慮すると、(6)、(7) 式で表される RIN は (8) ~ (18) 式を使って個々のレーザの特性値 l 、 m 、 n 、 A 、 R_1 、 R_2 、 η 、 I_{th} 及び駆動パラメータ f 、 I_{in} から求めることが出来る。

4. 結果と評価

本章ではRIN解析法を $1.3\ \mu\text{m}$ 帯InGaAsP/InP FPレーザとDFBレーザに適用する。

FPレーザとDFBレーザの最も大きな違いは、DFBレーザが持つ共振器の周期構造である。この周期構造はDFBの発振スペクトルを単一モードに限定する。従ってDFBレーザは1モードのRINのみ計算すればよい。一方、FPレーザは中心モードの周りにパワーの小さなモードが複数発生する多モード発振でありRINは正確には各モードの総和となる。しかし本解析ではFPレーザはすべてのモードの光電力の総和を中心モードにて代表させてDFBレーザと同様に1モードのRINで近似できると仮定し、2種のレーザに対し同一の式を適用し

た。

それぞれのレーザの特性値を表2に示す。表2の値は個々のレーザにおいて正確に測定されたものではなく、典型値としてメーカー側から入手したものであるが、これらを直接解析式に代入した。

まず、雑音パラメータ α 、 β 、 γ の解析結果を図3に示す。(7)、(16)式より α 、 β 、 γ はいずれもレーザへの入力電流 I_{in} としきい値電流 I_{th} に対し $\alpha \propto (I_{\text{in}} - I_{\text{th}})^{-1}$ 、 $\beta \propto (I_{\text{in}} - I_{\text{th}})^{0.5}$ 、 $\gamma \propto (I_{\text{in}} - I_{\text{th}})$ の関係を持つ。これより任意の入力電流における雑音パラメータを求めることが出来る。さらにこの結果を(6)式に代入することにより任意の周波数におけるRINを求めることが出来る。

最後に図4は入力電流をパラメータとした周波数に対するRINの変化を求めたものである。同図においてFP

表2 半導体レーザの特性値 (典型値)

No.	記号	内容	FPレーザ	DFBレーザ	単位
1	l	活性層の長さ	300	300	μm
2	m	厚さ	0.15	0.10	μm
3	n	幅	2.0	1.5	μm
4	A	光子吸収係数	15	15	/cm
5	$R1$	へき開面屈折率1	60	90	%
6	$R2$	へき開面屈折率2	30	3	%
7	η	微分量子効率	0.17	0.32	W/A
8	I_{th}	しきい値電流	18	20	mA

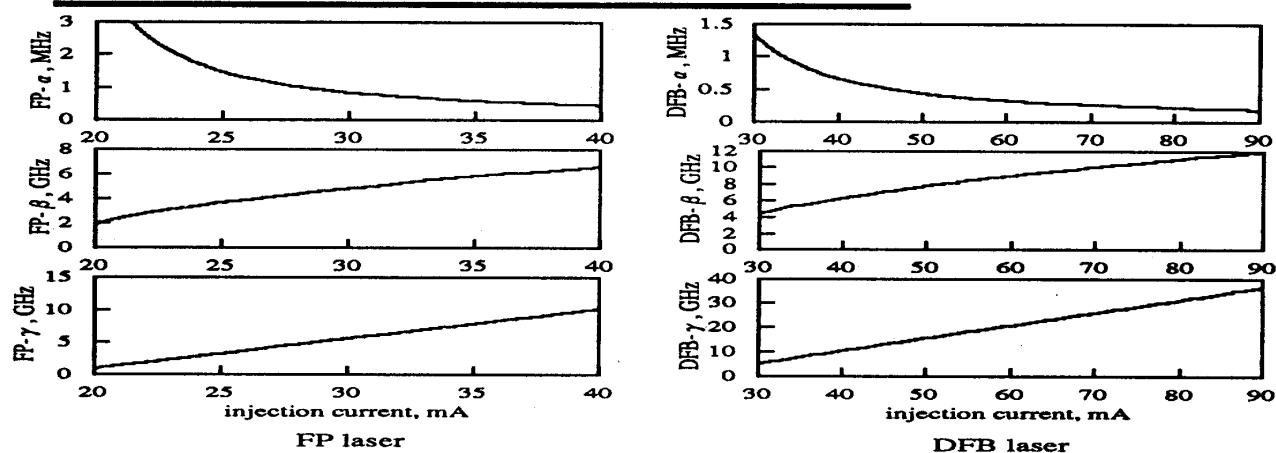


図3 入力電流と雑音パラメータの関係

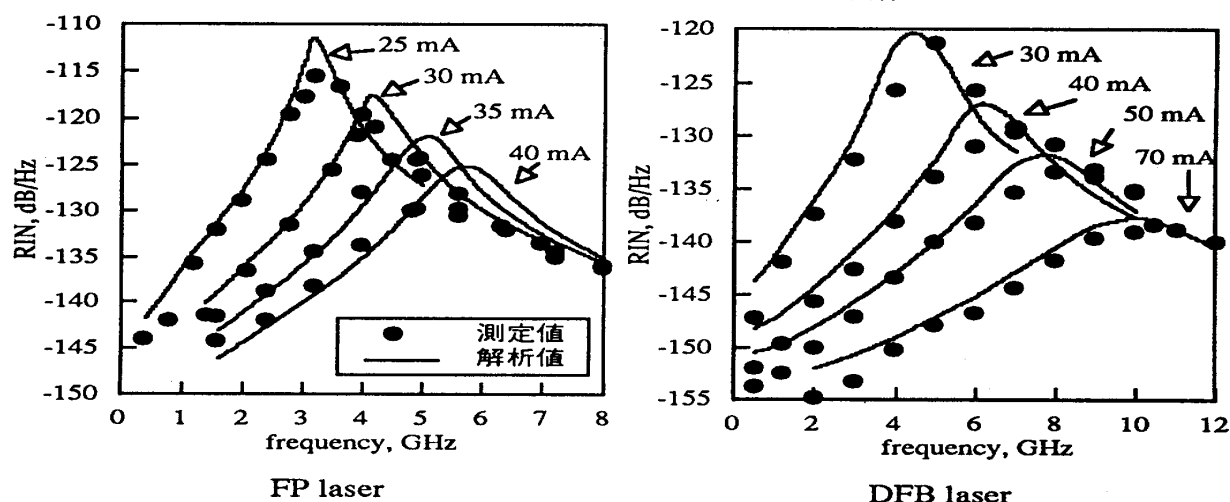


図4 入力電流をパラメータとした周波数とRINの関係

レーザ、DFBレーザとも解析値と実験値が非常によく一致することが明らかである。またRINが最大となる周波数はレーザの共振周波数と一致するが、共振周波数以上の周波数においては解析値と実験値に数dBの差が見られる。しかしこの差はレーザが変調可能である周波数が共振周波数以下であることを考慮すると、実際のレーザ使用においては問題はない。

5. おわりに

半導体レーザの物理的な形状や構造から決定する8つの定数とレーザの主な駆動パラメータ(注入電流と周波数)からRINを定量的に求める解析法について検討を行った。解析は $1.3\mu\text{m}$ 帯InGaAsP/InP FPレーザとDFBレーザに適用した。その結果RINが測定値と非常によく一致することを確認した。また解析法は活性層の共振器構造が異なるFPレーザとDFBレーザに対し同時に適用可能であることも明らかとなった。今後は実際にレーザを試作し、上記定数とRINの関係についてさらに詳細に検討を行う。また発振波長が異なる $1.3\mu\text{m}$ レーザ以外の $0.78\mu\text{m}$ 、 $1.5\mu\text{m}$ レーザや共振器構造の異なるMQWレーザについても同様の検討を行う予定である。

謝辞

本研究を進めるに当たり、日頃ご指導いただくNTTワイヤレスシステム研究所衛星通信研究部鮫島部長に感謝いたします。

文 献

- [1] J. E. Bowers, A. C. Chipalowski, S. Boodaghians, J. W. Carlin, "Long Distance Fiber-Optic Transmission of C-Band Microwave Signals to and from a Satellite Antenna", IEEE J. Lightwave Technol., 5, pp. 1733-1741, 1987.
- [2] W. I. Way, M. Krain, R. S. Wolff, "1.3 μm 35-km Fiber-Optic Microwave Multicarrier Transmission System for Satellite Earth Stations", Electron. Lett., 23, pp. 400-402, 1987.
- [3] C. M. Gee, G. D. Thurmond, I. L. Newberg, H. W. Yen, D. Lafaw, B. Spink: "11-GHz Fiber Optic Links For Airborne Satellite Communications Applications", Microwave and Optical Technology Letters, 1, pp. 67-70, 1988.
- [4] 米田悦吾: "光ファイバ伝送におけるマイクロ波サブキャリア技術の動向", 信学技報, MW89-146, pp. 15-22, 1989.
- [5] 渋谷真, 金井敏仁, 江村克巳: "光ファイバ伝送を用いたマイクロセル移動通信の無線信号集配方式", 信学技報, SAT90-32, pp. 19-26, 1990.
- [6] 中平勝也, 大幡浩平, 水野秀樹: "衛星通信地球局光インタコネクトの一検討", 信学技報, SAT92-54, pp. 33-38, 1992.
- [7] K. Sato: "Intensity Noise of Semiconductor Laser Diodes in Fiber Optic Analog Video Transmission", IEEE J. Quantum Electron., 19, 9, pp. 1380-1391, 1983.
- [8] W. I. Way: "Subcarrier Multiplexed Lightwave System Design Considerations For Subscriber Loop Applications", IEEE J. Lightwave Technol., 7, 11, pp. 1806-1818, 1989.
- [9] Y. YAMAMOTO and S. SAITO, "AM and FM Quantum Noise in Semiconductor Lasers -- Part II: Comparison of Theoretical and Experimental Results for AlGaAs Lasers", IEEE J. Quantum Electron., 19, 1, pp. 47-58, 1983.
- [10] ORTEL Corporation: "RF/Microwave Fiber Optic Link Design Guide", 1990.
- [11] 中平勝也, 大幡浩平, 水野秀樹: "衛星通信地球局用光インタコネクト", NTT R&D, 42, 11, pp. 1421-1430, 1993.
- [12] K. Kikuchi, T. Okoshi: "Measurement of FM noise, AM noise, and Field Spectra of 1.3mm InGaAsP DFB Lasers and Determination of the Linewidth Enhancement Factor", IEEE J. Quantum Electron., 21, 11, pp. 1814-1818, 1985.
- [13] 大越孝敬, 菊池和郎: "コヒーレント光通信", オーム, pp. 65-101, 1989.
- [14] 米津宏雄: "光通信素子工学", 工学図書株式会社, pp. 177-187, 1984.
- [15] R. E. Nahory, M. A. Pollack: "Threshold dependence on active-layer thickness in InGaAsP/InP D.H. lasers", Electron. Lett., 14, 23, pp. 727-729, 1978.
- [16] R. E. Nahory, M. A. Pollack, W. D. Johnston, Jr., R. L. Barns: "Band gap versus composition and demonstration of Vegard's law for In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} lattice matched to InP", Appl. Phys. Lett., 33, 7, pp. 659-661, 1978.
- [17] G. D. Pettit, W. J. Turner: "Refractive Index of InP", J. Appl. Phys., 36, pp. 2081, 1964.
- [18] M. ASADA and Y. SUEMATSU, "Density-Matrix Theory of Semiconductor Lasers with Relaxation Broadening Model-Gain and Gain-Suppression in Semiconductor Lasers", IEEE J. Quantum Electron., 21, 5, pp. 434-442, 1985.