

白色光源用 SLD SD3S207T/208T/209T

SD3S207T/208T/209T Superluminescent Diodes

UDC 621.375 : 681.7.069.24 : 621.382

山田 敦史

Atsushi Yamada

研究所 光デバイス技術プロジェクトチーム

山口 優子

Yuko Yamaguchi

研究所 光デバイス技術プロジェクトチーム

篠根 克典

Katsunori Shinone

研究所 光デバイス技術プロジェクトチーム

1 はじめに

高出力でスペクトル幅が狭くファイバへの結合効率が高いレーザダイオード(LD)に対して、発光ダイオードは発光スペクトルが広く低出力である。これに対しスーパーluminescentダイオード(SLD)は両者の中間的な特徴を持つ素子で、LDの端面反射率を十分下げ、自然放出光を誘導放出により増幅することで実現される。このため、高出力で広い波長範囲を持つ低コヒーレントな光を指向性良く放射できる特徴を持つ¹⁾²⁾。これらの特徴により白色光源、光ファイバジャイロ³⁾、高分解能OTDR⁴⁾などの光計測の分野に応用されている。近年では光生体観測⁵⁾、エンジン燃焼モニタ⁶⁾などの分野への応用も検討され始めている。

一方、波長多重(WDM)通信は実用段階に入り、光ファイバ増幅器、光アイソレータ、光カプラなどの光部品に対する性能評価への要求も高まりつつある。これに対応して計測器事業本部においてポータブル光スペクトラムアナライザMS9710BおよびWDMテストMS9715Aが開発された⁷⁾。これらの装置ではSLDと基準用のガスセルを搭載することにより自動的な絶対波長校正を可能としている。また、光スペクトラムアナライザではSLDを白色光源として使うことで、光部品の波長特性の測定におけるダイナミックレンジが、ハロゲンランプを使った場合と比べて大幅に拡大できる。従来SLDの波長半値幅は50nm程度であったが⁸⁾、これらの目的のために特に広帯域の波長半値幅と低い波長リップルを持つように設計した長波長帯SLDを開発した。ここではその構造と特性を紹介するとともに応用例についても報告する。

2 基本構成

2.1 設計方針

まずSLDに求められている素子性能をまとめる。

- 1.55 μm 帯光部品の波長帯域を検出できる広波長帯域
- 波長基準用ガスセルの吸収線を検出可能な低リップル
- 両端面の出力をそれぞれ利用できる前後方出力

これらの性能を満足させるために従来のSLDに対して、以下に述べる点を改善した。

2.2 活性層構造

以前から製作してきた長波長SLD SD3S205は高出力をねらいBULKの活性層構造を採用した。図1に示す通りBULK活性層における状態密度関数は放物線型である。注入キャリアの分布は状態密度とフェルミ分布との積になるので、光出力が大きくなる反面、波長半値幅の拡大はそれほど望めない。こ

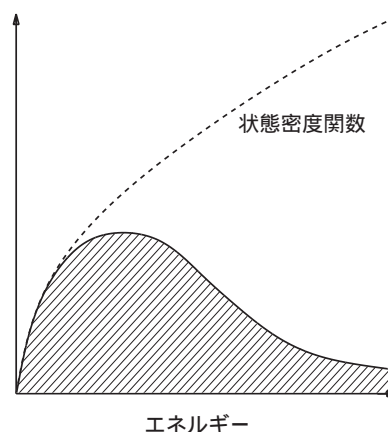


図1 BULKの状態密度関数と電子のエネルギー分布
Density of states and energy distribution of electron
in bulk semiconductor

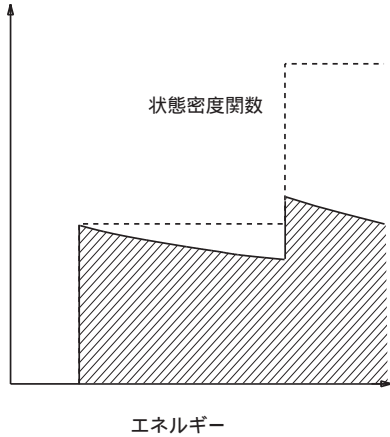


図2 量子井戸の状態密度関数と電子のエネルギー分布
Density of states and energy distribution of electron in a quantum well

のため、スペクトル帯域が狭く白色光源としての用途には適していない。量子井戸構造では状態密度関数が階段状で(図2)高電流密度の時の注入キャリアのエネルギー分布がBULKの時に比べて広がるために、波長帯域の広帯域化が期待できる⁹⁾。

LDでは量子井戸の井戸層に圧縮歪をいれることで特性改善をねらうことが多い。しかし、単に圧縮歪をいれるだけでは内部応力の関係上、井戸層厚を厚くとれないので長波長SLDでは光出力が下がる傾向にある。一方、引張り歪をいれると光出力が向上する上にSLDの偏波依存性が低減できるというメリットも生じる。しかし、これではアイソレータが出力側に入っているために、ここで3 dB落ちて結局出力が上がらない。このため今回のSLDでは井戸層は無歪みにして、偏波特性と光出力の両方の特性が満足できるような設計値とした。

実際の素子は、有機金属気相成長(MOVPE)法と液相成長(LPE)法を用いて作製した¹¹⁾¹²⁾。図3に作製した素子のエネルギーバンドダイアグラムの設計値を示す。井戸層は5層で無歪のInGaAs、障壁層に1.3 μm組成のInGaAsPを用いた。また、光とキャリアを有効に井戸層内に閉じ込めるために3層のステップ型GRIN-SCH構造を用いた。井戸幅と障壁層の厚さはそれぞれ95, 90 Åである。波長帯はWDMなどの光通信用として用いられる1.55 μm帯である。レーザでは発振すると注入キャリア密度が固定され、それ以上増えなくなる。しかしSLDではしきい値がなく電流値に応じてキャリア密度が上昇していくため、ピーク波長が短波長側にシフトしていく。この現象を考慮して井戸層厚の設定波長は使用波長より長い約1.59 μmとした。

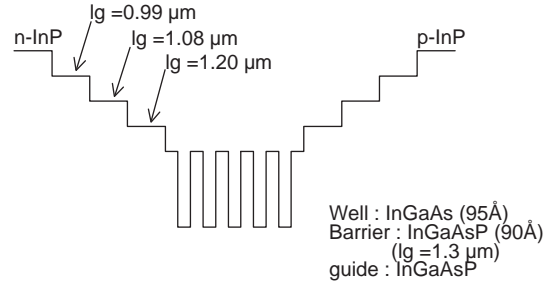


図3 活性層バンド構造
Band profile of active region

2.3 素子構造

SLDはレーザ発振を抑圧するために素子端面での反射率を極力落とす必要がある。長波長SLD SD3S205では両端面に無反射コートしたうえで、後面の反射率の低減のために吸収領域を設け、さらにウエットエッチングを行い溝を設けて活性層への反射率を構造的に下げている⁸⁾。この場合スペクトルのリップルは1dB以上になることもあるが、大抵の用途にはこれで十分であった。しかし、今回はアセチレンの吸収線を安定して検出する必要があるためさらに低減する必要がある。しかも、溝方式のSLDでは片側の出力が犠牲になるので後方出力を利用することは困難になる。このために、光源出力と基準出力に両端面の出力それぞれを利用する光スペクトラムアナライザなどの用途には適用できなかった。今回我々は溝方式に換えて、半導体光増幅器で実績のある端面窓構造に加えなおかつ無反射コーティングを両端面に導入し、反射率を極限まで下げることでこれらが可能になった¹³⁾。

図4にSLDの素子構造を示す。埋め込み構造には、n型基板で実績のあるRVN構造を採用した¹⁴⁾。端面にはSiO_xによる無反射コートを実施した。反射率はLD端面に片端ずつコーティングしたときの出力前後比変化の測定により、約0.2%と見積

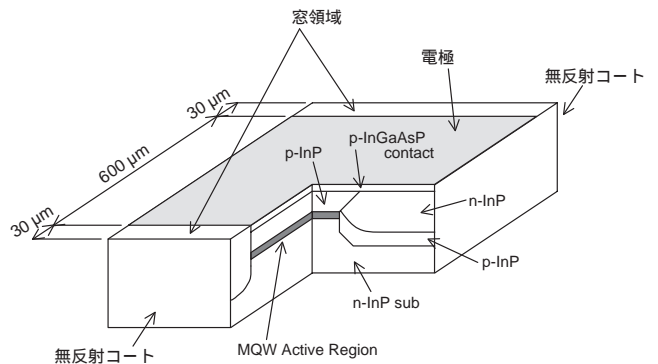


図4 素子構造図
Schematic configuration of SLD

もられた。さらに、端面近傍で活性領域を途切れさせる窓領域を設けた。窓領域内では、光は閉じ込められずにガウスビームとして拡散しながら伝搬していくため、素子端面で反射した光は活性領域まで戻ってきた時には最初のスポットサイズより大きくなる。このため、反射してきた光は元の活性領域に対して再結合しにくくなる。したがって、窓構造は活性領域に対して等価的に端面反射率を下げる効果がある。反射ビームは窓領域長が長いほどビームスポットが大きくなるので、長さに応じて反射率低減効果が得られる。ここでは出力ビームパターンの乱れを避けるために窓領域長は約30 μm に設定した。無反射コートの場合と同様、片側に窓構造をつけた素子で見積もった結果、反射率が窓構造だけで約1/10以下にすることが可能になった。この結果、窓構造と無反射コートの合計の反射率として0.02%以下を得ている。

2.4 素子作製工程

素子作製工程を図5に示す。

まず、n-InP(100)基板の上に、n-InP バッファ層、MQW 活性層、

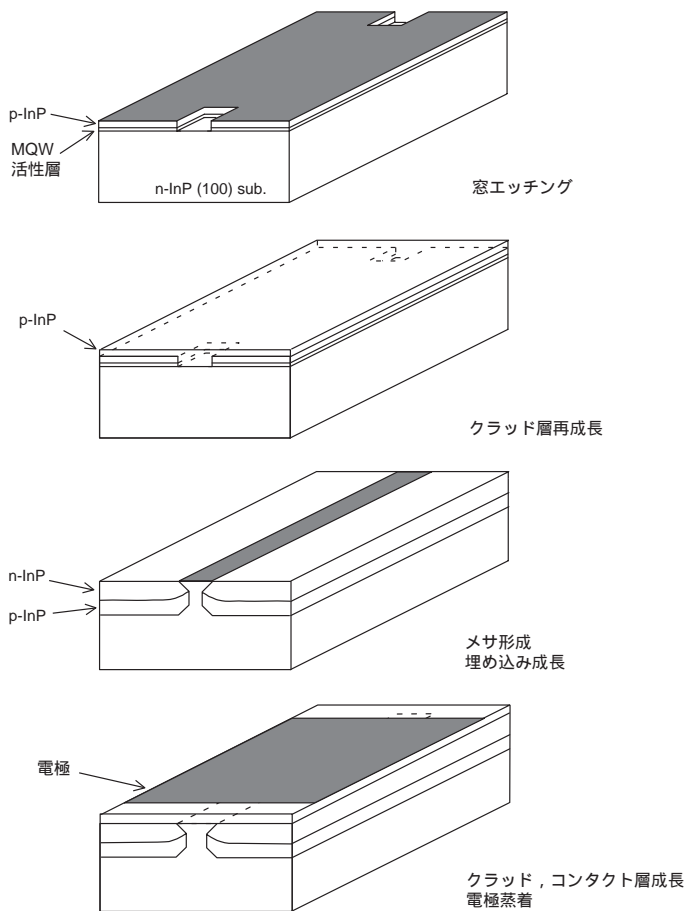


図5 素子作成工程図
Device fabrication of SLD

p-InP クラッド層を成長する。プラズマCVDでSiNx膜を堆積し窓構造用のパターンをつけた後、p-InP クラッド層を再成長する。この後さらにプラズマCVDで<011>方向のストライプのパターンを作製後、プロムメタノール、塩酸系エッチャントを用いてRVN構造のメサを形成する。次にLPE法により2回の結晶成長を行い、p/n-InP電流ブロック層埋め込みおよびクラッド/コンタクト層を形成する。続いて研磨、電極形成工程後へき開し、ヒートシンク上にAuSnはんだを用いてマウントする。

3 特性

3.1 光出力特性

SLDではLDのようなしきい値を持たないため光出力は注入電流に応じてなめらかに上昇していく。25℃、直流100mAで最大0.32mW、平均でも約0.25mWの出力が得られている。

3.2 スペクトル特性

SD3S208T/209Tは光スペクトラムアナライザMS9710Bのオプションの基準光源/白色光源として使用されるため広い波長帯域が要求される。SD3S208Tは基準光源または白色光源のどちらかみの機能を得るため片側出力を規定している。これに対しSD3S209Tでは、その両方の機能を得るために両端面出力それぞれの出力特性を確認した上、その出力前後比も規定している。動作電流100mAの時の代表的なスペクトル特性を図6に示す。100mAにおいて-3dBで約90nm、-10dBでは約160nmの波長範囲が得られている。

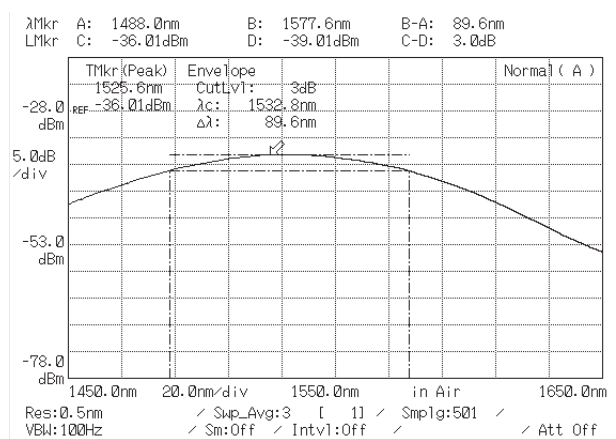


図6 スペクトル特性
Emission spectrum

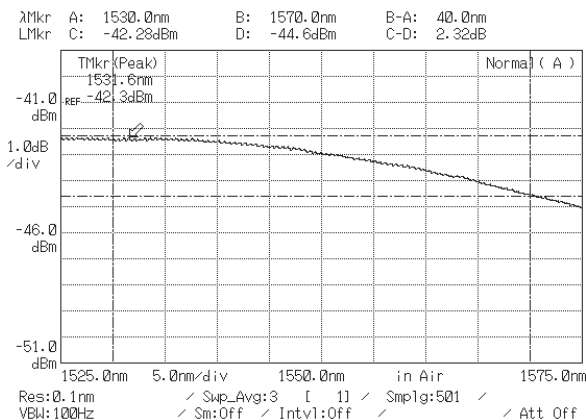


図7 SD3S208T/209Tのスペクトル特性
Emission spectrum of SD3S208T/209T

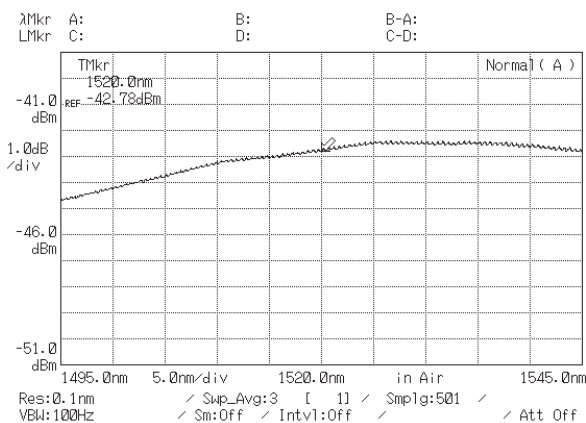


図8 SD3S207Tのスペクトル特性
Emission spectrum of SD3S207T

図7はこの素子の規格値である $1.55 \mu\text{m} \pm 20\text{nm}$ の波長帯域で測定したスペクトル特性を示す。フラットネスはこの波長範囲内の光出力の最大値と最小値の差と定義している。この素子の場合2.3dB程度であった。スペクトルリップルは分解能0.1nmで測定した時、約0.2dBと良好である。

WDM テスタ MS9715A は波長基準として $1.52 \mu\text{m}$ に吸収線を持つアセチレンのガスセルを内蔵している。SD3S207Tはこの基準光源用の光源として使用される。この場合、SLDは吸収線が観測できればよいので、波長帯域に対する要求は光スペクトラムアナライザ用より低い。しかし、他のSLDより出力レベルを要求されるという違いがある。100mAの時のスペクトル特性を図8に示す。また、表1にそれぞれの素子に対する主な要求仕様を示す。

4 応用例

SLD光源と光スペクトラムアナライザMS9710Bを用いた測定例を以下に示す。図9は可変波長のバンドパスフィルタの透過特性を測定した例である。(a)はシングルパス構成で、(b)はマルチパス構成によりダイナミックレンジを拡大したフィルタの例である。あらかじめ測定しておいたSLD光源のスペクトル特性分を補正して透過スペクトルとしてある。なお、この時の電流値は100mAである。従来光部品の波長特性を測定するにはハロゲンランプを用いた白色光源を使っていたが、このSLDを白色光源として用いることで20dB以上ダイナミックレンジを拡大できる。このため図9(b)のようなフィルタでも十分な測定が可能になった。

光スペクトラムアナライザMS9710Bと波長可変光源MG9637A/9638Aを使えば同様な測定をより高ダイナミックレンジで行うことが可能である。しかしこの場合、波長範囲が限られており、より広い範囲にわたって測定したいときにはSLDを使った構成が有効である。図10は光ファイバ用のWDMモジュールを測定した例である。これは光増幅器に使われる光部品で励起用の $1.48 \mu\text{m}$ のLD光源と信号

表1 電気的、光学的特性
Electrical and optical characteristics

項目	記号	測定条件	SD3S207T	SA3S208T	SD3S209T	単位
最大光出力	P_{out}	$I_f = 100\text{mA}$		-8.0 MIN.	-7.0 MIN.	dBm
スペクトラムレベル*1	S_f	$I_f = 100\text{mA}$	-34.0 MIN.			dBm
リップル	R_{pt}	$I_f = 100\text{mA}$	0.3 MAX.	0.3 MAX.	0.2 MAX.	dB
消光比	R	$I_f = 100\text{mA}$			6.0 TYP.	dB
順電圧	V_f	$I_f = 100\text{mA}$	1.2 TYP.	1.2 TYP.	1.2 TYP.	V
フラットネス*2	F_1	$I_f = 100\text{mA}$, $\lambda = 1.53 - 1.57 \mu\text{m}$		3.0 MAX.	3.0 MAX.	dB
前後光出力差	$ D_i $	$I_f = 100\text{mA}$			1.0 MAX.	dB
TEモード出力	P_{te}	$I_f = 100\text{mA}$			-7.5 MIN.	dBm

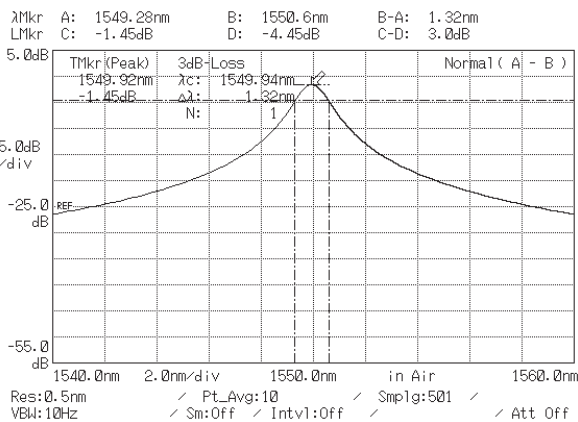
*1 $S_1 = S_f + (P_0 - P_f)$ S_f : 波長1520nmでのスペクトルレベル(分解0.2nm, SMファイバ出力)
 P_0 : 素子光出力
 P_f : SMファイバ光出力

*2 波長範囲1.53 ~ 1.57 μm までの最大値と最小値の差

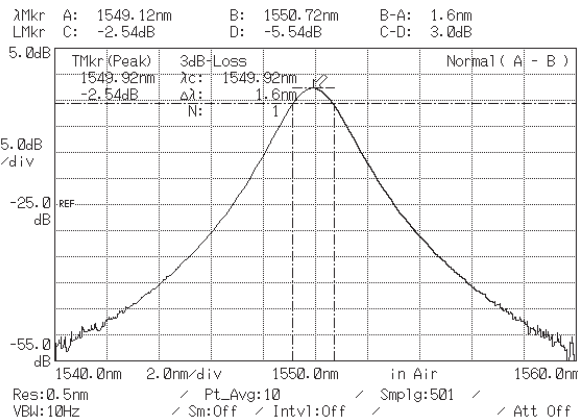
光である $1.55 \mu\text{m}$ の光を合波するためのモジュールである。光源にSLDを使うと、それぞれの入力端からみた損失特性が 1.45 から $1.60 \mu\text{m}$ までの波長範囲で測定できる。ダイナミックレンジの低下を許せば、より広い波長帯域で測定することも可能であるため、光ファイバカプラや光アイソレータの波長特性の測定などに広く利用できる。

5 むすび

光スペクトラムアナライザ MS9710B や WDM テスタ MS9715A に、ガスセルを使った絶対波長基準を測定するための光源が要求された。同時に MS9710B には $1.55 \mu\text{m}$ 帯光部品の波長特性の測定ができるように、従来のSLDにはない広波長帯域、低リップルのSLDを開発した。活性層に無歪量子井戸構造を採用して広帯域化を図るとともに、端面窓構造と無反射コーティングを併用することで端面反射率を抑制し低リップルを実現した。100mA の時、波長半値幅約90nm、スペクトルリップル0.2dB以下、光出力0.32mW が得られた。



(a) シングルパス型



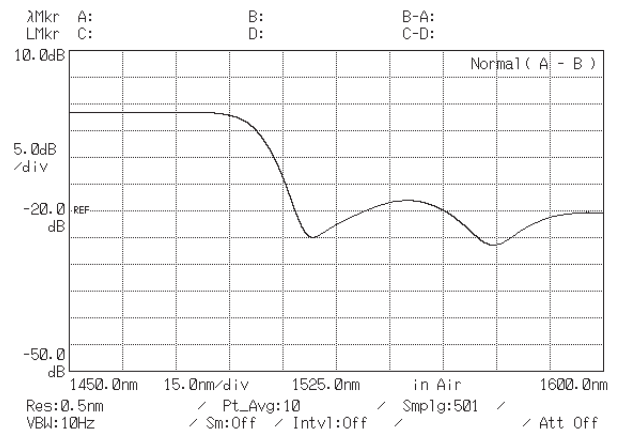
(b) マルチパス型

図9 可変波長フィルタの測定例
Band pass filter measurement

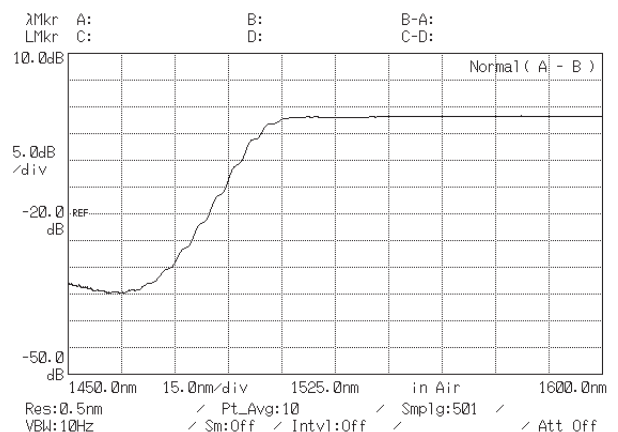
SLDは高出力で広い波長範囲を持つ低コヒーレントな光を指向性良く放射できる特徴を持つため、以前から白色光源や光ファイバジャイロ、高分解能OTDRなどの光計測の分野へ利用されている。近年は、光生体観測や燃焼モニタとしての応用も検討されている。今後はこれらの新しい用途のSLD開発を行っていきたい。また、全MOVPE成長プロセスを導入してコスト低減を図るとともに素子構造を改善し、性能向上をはかる予定である。

参考文献

- 1) 三上: “スーパーミネッセントダイオードの光学的特性と応用”, 光学, 第19巻, 第3号, pp143-149
- 2) 吉田谷: “スーパーミネッセントダイオード”, 光アライアンス, Vol.8, No.8, pp32-35
- 3) V. Vali, W. Shorthill: “Rapid Communications” Appl. Opt. Vol.15, No.5,



(a) Pump入力からの出力方向



(b) Erドープファイバから出力方向

図10 光ファイバ用WDMモジュールの測定例
WDM module for EDFA measurement

pp1099-1100 (1976)

- 4) K. Takada, A. Himeno, and K. Yukimatsu: " High sensitivity and submillimeter resolution optical time-domain reflectometry based on low-coherence interference ", J. Lightwave Technol. vol. 10, 1998-2005, 1992
- 5) 春名 : " 生体光計測の現状と将来 ", 光学 , 26 巻 , 9 号 , pp456-460, (1997)
- 6) M. Komachiya, H. Sonobe, S. Oho, M. Kurita, T. Nakazawa and T. Sasayama: " Multiple in-cylinder pressure measurement utilizing an optical fiber with specific refractive-index composition ", Appl. Opt., 35, pp. 1143-1150 (1996)
- 7) 太田垣, 柿本, 津田, 山口, 石綿 : " ポータブル光スペクトラムアナライザ MS9710B / WDM テスタ MS9715A " アンリツテクニカル No.74, Oct. 1997, pp55-65
- 8) 山口 : " 長波長帯高出力 SLD ";アンリツテクニカル, No.61, Apr. 1991,

pp84-91

- 9) 岡本 : " 超格子構造の光物性とその応用 "; pp2-17, コロナ社, 昭和63年
- 10) 深谷, 谷本, 遠藤, 大立目, 池内, 岡村, 長島 : " 波長可変光源 MG9637A/MG9638A ", No.74, Oct. 1997, pp66-71
- 11) 篠根, 小野, 東門, 金谷 : " 全 MOVPE 成長による長波長帯埋め込み型半導体レーザー ", アンリツテクニカル, No.69, Mar. 1995, pp9-15
- 12) 菊川, 下瀬, 鈴木, 金谷, 篠根 : " EDFA 励起用 MOVPE 成長高出力 MQW レーザ ", アンリツテクニカル, No.64, Oct. 1992, pp78-87
- 13) 山田, 尾坪, 浅井, 篠根, 大貫, 芦田 : " 半導体光増幅器 ", アンリツテクニカル, No.67, Mar. 1994, pp22-27
- 14) 牧田, 山口, 亀田, 浅井, 堀内, 村上, 尾登, 吉田谷 : " 高出力 InGaAsP/InP 系新埋め込み構造半導体レーザー ", No.60, Sept. 1990, pp140-147