

# 解説

## スーパールミネッセントダイオードの光学的特性と応用

### 三 上 修

NTT 光エレクトロニクス研究所光素子研究部 〒243-01 厚木市森の里若宮 3-1

(1989年9月13日受理)

### Optical Properties of Superluminescent Diode and Its Application

Osamu MIKAMI

Photonic Functional Device Laboratory, NTT Opto-electronics Laboratories,  
3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi 243-01

#### 1. はじめに

III-V族化合物半導体を基板とした発光デバイスとして、従来よりレーザーダイオード (LD) と発光ダイオード (LED) が知られている。これらのデバイスは、ここ数年で華々しく開花した光ファイバ伝送システムを支えるキーデバイスとして精力的な研究が行われ、システムの要求に耐えるすぐれた特性をもつデバイスに成長した。その結果、きわめて高度な性能が要求される光伝送システムばかりではなく、光ディスクなど身近な装置にも組み込まれるようになった。発光スペクトル幅が狭く、高出力である LD に対し、LED は発光スペクトル幅が広く、光出力が小さいのが特徴である。

近年、この二つのデバイスの中間に位置するスーパールミネッセントダイオード (SLD) が新しい発光デバイスとして注目されはじめた。新しいとはいっても SLD の最初の研究論文は 1971 年に見いだされる<sup>1)</sup>。SLD はつぎのように定義できる。端面反射による帰還が起こらない工夫をし、一方向に進む光に誘導放出による利得を与えて増幅し、端面から光を放出できる構造とした注入形ダイオードである。この際誘導放出の種となるのは、注入キャリアの再結合によって生成される自然放出光である。したがって SLD は高出力でインヒーレントな光を指向性よく放射できる特徴をもつ。初期の SLD ではパルス動作のみで光出力が十分でなく、注入電流を増加するとレーザー発振が生じる、などの問題点もあった。現在では、これらの問題点は大幅に改善され、室温連続動作はいうまでもなく、光出力も LD 並に 10~20

mW を越えるものも報告されている<sup>5-7,15,16,22)</sup>。発光波長も、GaAs 系の 0.8 μm 帯ばかりでなく<sup>1-8)</sup>、光ファイバの低損失波長である 1.3 μm 帯<sup>9-17)</sup> の SLD が製作されている。可干渉性が小さいことを利用して、LAN (local area network) 等、多数のコネクター、結合器からの反射ノイズの影響が心配される光伝送システムでの用途が検討されている<sup>24)</sup>。さらにコヒーレンス長が短いことを利用したファイバ・ジャイロ<sup>19)</sup>、OTDR (optical time-domain reflectometry)<sup>20,21)</sup>など、最近著しい発展を示している光計測分野での光源として脚光を浴びている。

本解説では、まず最初に、SLD の特徴を LD, LED と比較して説明する。つぎに現在研究が進められている SLD の構造、得られた特性を示すとともに、応用例を述べる。

#### 2. SLD の特徴

LD, LED および SLD ともに、III-V 族化合物半導体の pn 接合に順方向電流を流したときに、キャリアの注入、再結合により生じる発光現象を用いている。また注入キャリアの発光再結合効率を上げるために、バンドギャップの小さい半導体をバンドギャップの大きい半導体でサンドイッチしたダブルヘテロ (DH) 構造を採用している点も共通である。表 1 に、それぞれの特徴を比較して整理した。

LD の断面構造を図 1(a) に示す。光に正帰還を与えるため、発光再結合が生じる活性層の両端面にミラー（通常は劈開面がミラーの役目をしている）があり、共

表 1 LED, LD および SLD の比較

項目	LD	LED	SLD
光の特性	誘導放射光 (自然放出光なし) (両方向ともに利得を受ける)	自然放出光のみ	誘導利得を受けた自然放出光 (一方向性の利得を受ける)
発光スペクトル幅	狭い 5~6 nm 以下 (単一縦モードの場合もある)	広い 1.3 μm 帯: 100 nm	広い (誘導利得のため LED より狭くなる) 1.3 μm 帯: 30~40 nm
可干渉性	高い 可干渉距離: 数 10 cm~数 m	低い 可干渉距離: ~20 μm	低い 可干渉距離: 40~50 μm
光出力パワー	10~100 mW	数 100 μW~1 mW	1~20 mW
広がり角	小さい -3~-4 dB	大きい -10~-20 dB	小さい -3~-4 dB
ファイバ結合効率			
偏光	偏光性あり	無偏光	偏光性あり
動作電流	数 mA~200 mA 閾値あり	数 10~200 mA	100~200 mA
変調帯域	数 GHz	数 10~100 MHz	数 100 MHz

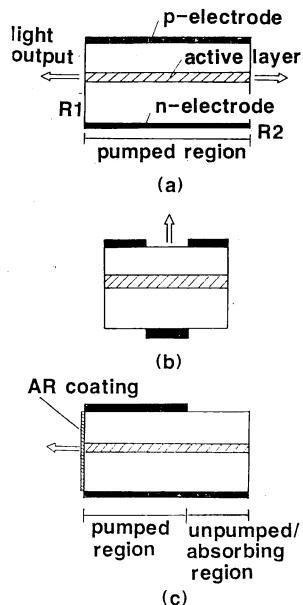


図 1 構造比較  
(a) LD, (b) LED, (c) SLD

振器を構成している。発生した光が活性層を進むうちに次々と光の位相をそろえて増幅 (誘導放出) され、これらの光が両端の反射鏡で何回も反射され、さらに強い光となって発振に至る。レーザー発振開始点にあたる閾値電流  $I_{th}$  が存在し、この  $I_{th}$  以上で光出力は著しく増加するとともに、光のスペクトル幅は急激に狭くなる。発振スペクトルは共振器構造で決定され、特別な共振器構造を用いると单一波長で発振させることも可能である。また端面からの放射広がり角が狭い。すなわち波長

純度、空間的均一性は良好である (コヒーレンシが高い)。また通常発振光の偏光面は、電界ベクトルが接合面内にある TE モード偏光である。これは端面での TE モードの反射係数が TM モードのそれより大きいことにより説明される。光出力は数 10 mW から 100 mW を越え、変調可能な周波数は 10 GHz 以上が報告されている。

LED は、発光領域からの光の取出し方により、端面発光型と面発光型に分類される。端面発光型はエピタキシャル層の接合面に平行方向に光を取り出す構造であり、SLD と類似したところが多い。しかし誘導放出による利得が十分でなく、光出力が小さく、発光スペクトル幅は SLD より数倍広い。面発光型は、接合面に垂直方向に光を取り出す構造で、図 1 (b) にその構造を示す。

発光スペクトル幅は、半導体の価電子帯と伝導帯に分布した電子・正孔の状態間の自然放出遷移から決まるため、SLD と比較すると広くなる。長波長帯の LED ほどスペクトル幅は広く、1.5 μm 帯の InGaAsP 系で 100 nm 程度ある。放射広がり角が大きく、光ファイバとの結合効率は低い。閾値電流  $I_{th}$  は存在せず、注入電流にほぼ比例して、光出力は増加する。光出力は小さく、通常 1 mW 以下である。共振器構造および導波路構造がないため、無偏光である。変調帯域は注入キャリア寿命で決まり、数 10~100 MHz の変調が限界である。

一方、SLD は LD および LED の中間に位置する。構造の一例を図 1 (c) に示す。LD と異なり、共振器構造をもっていない。レーザー発振が起こる原因となる素

子端面での光帰還を防ぐため、さまざまな工夫がされている。一例として、注入用電極の一部がなく、この部分が光の吸収領域となる場合を示す。電流注入部分で十分な誘導利得を得るため、光出力は数 mW から数 10 mW にも達する。また、発光スペクトル幅は LED よりも狭くなる。変調帯域も LED より改善され、数 100 MHz 以上の変調が報告されている。空間的なコヒーレンシが高いため、指向性もよく、光ファイバとの結合効率も高い。光出力の注入電流依存性は、スーパーリニアの特性を示す。

### 3. SLD の構造

前述したように、SLD の活性層内で発生した光は共振器による正帰還を受けず、ストライプに沿って一方向

性的に増幅される。活性層の光導波路としての特性、あるいは素子全体のサイズや電気的特性は LD とほとんど同様であるため、電流を高注入した場合も共振器によるレーザー発振が生じないようにしなければならない。そのため素子端面での光の反射率を可能な限り低減することが重要となる。この目的のためにこれまで図 2 に示すような構造が報告されている。

(a) は、電極の一部を除去し、非励起領域を設置した例である<sup>2,6,13)</sup>。非励起領域で光を吸収するため、励起領域と非励起領域の活性層が同じ組成で構成されている。製作法は簡単であるが、吸収部長が数 mm と長くなる。

(b) は、端面に無反射コートを施した例である<sup>4,9,11,12)</sup>。発光スペクトル幅が広い SLD では、その

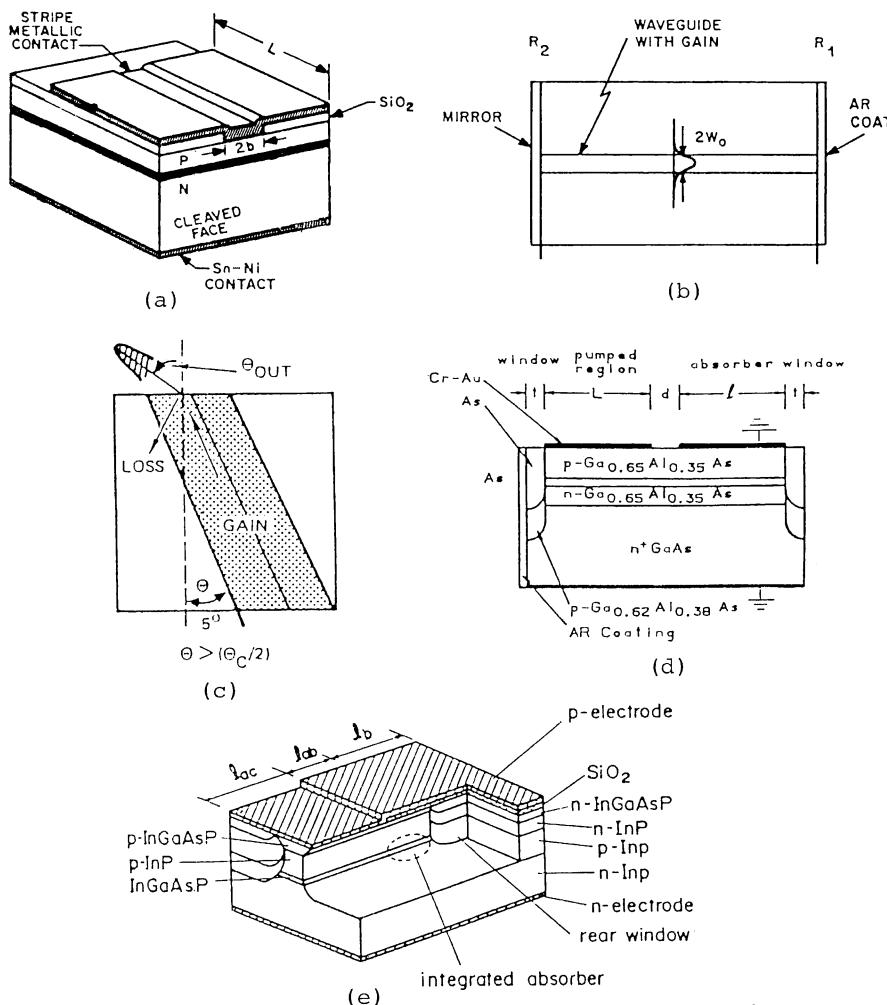


図 2 レーザー発振を抑制するための機構

表2 SLDの研究開発例

構造	波長帯(μm)	端面光出力(mW)	注入電流(CW)(mA)	スペクトル幅(nm)	変調度(m)	研究機関	年代	文献
AR/プロトン注入	0.8	7	160	15~20	—	General Optronics	82	3)
AR/AR	0.8	5	130	6	0.9	Bell	83	4)
AR・窓/非励起・窓	0.8	14	50	20	<0.14	Ortel	87	6)
AR/斜めストライプ	0.8	20	250	19	<0.01	David Sarnoff	89	21)
AR/AR	1.3	2	250	30	0.5	Bell	83	10)
AR/AR	1.3	10	160	30	—	General Optronics	86	12)
AR/非励起・窓	1.3	2	130	40~50	<0.06 (at -40°C)	東芝	88	13)
AR/窓	1.3	2.2	150	30	—	沖	88	14)
AR/非励起・接地電極	1.3	10	175	28	<0.15	Ortel	89	15)
AR/非励起・曲がり	1.3	11.5	200	40	0.06	NTT	89	16)
AR/非励起・溝	1.3	3.5	200	40	0.09	アンリツ	89	17)

波長全域にわたって十分に低い反射防止膜を形成することが重要である。

(c)では、劈開面とストライプ活性層の軸方位が直交せず、両端面が共振器になりにくい構造である<sup>5,7)</sup>。すれ角度が大きいほど反射の抑圧効果は大きくなるが、光の出射方向が端面に垂直でないため、光ファイバと高い結合効率を得るのは困難である。

(d)は、活性層の非励起部に接地電極を付けて、拡散キャリアを吸収しようとする構造である<sup>8,15)</sup>。接地電極は、キャリアを有効に吸収するので、効率よく反射を抑えることができる。

(e)は、光吸収の小さいウインドー層を反対側に設け、ウインドーから光を放射することにより、反射光を抑える構造である<sup>5,6,13,14)</sup>。

表2に、波長 0.8 μm および 1.3 μm 帯の SLD 研究開発例をまとめる。

#### 4. 非励起曲がり導波路を有する SLD

波長 0.8 μm 帯の GaAs/AlGaAs 系 SLD については、10~30 mW の高出力が報告されている<sup>5-7)</sup>。しかし光ファイバの低損失領域である 1.3 μm, 1.5 μm 帯については十分な特性を有する SLD は開発されていない。前述したとおり、高出力の SLD を製作するには、端面でのレーザー発振を抑制することが重要である。新たに試作した非励起曲がり導波路構造を有する波長 1.3 μm の SLD<sup>16)</sup>について説明する。

##### 4.1 素子構造

素子の構造を図3に示す。光放射端を直線導波路、光吸収層を曲がり導波路とし、直線導波路のみに電流注入

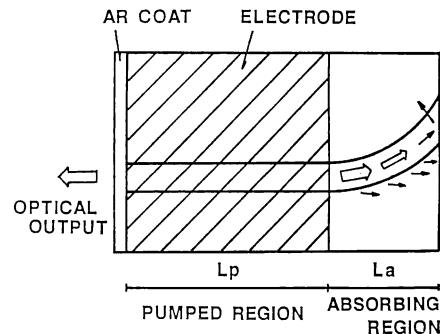


図3 非励起曲がり導波路 SLD の構造

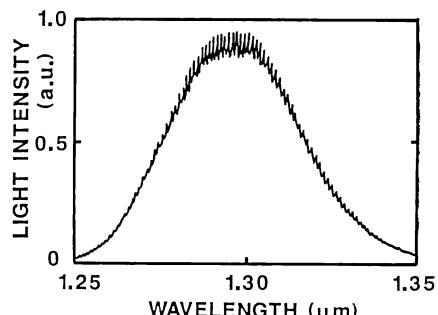


図4 1.3 μm 帯 SLD の発光スペクトル

用の電極を形成した。この曲がり導波部は非励起のため光を吸収する。また一部の光は曲がり部で放射される。最終的に劈開面に達した光も、斜め反射によって、導波路外へ放射され、反対面からの光反射はほぼ完全になくなる。実効的な反射率は  $10^{-6}$  以下と推定される。

素子は液相成長法により成長した DH ウェハを用いて製作した。電流閉込めのため、埋込み構造を採用して

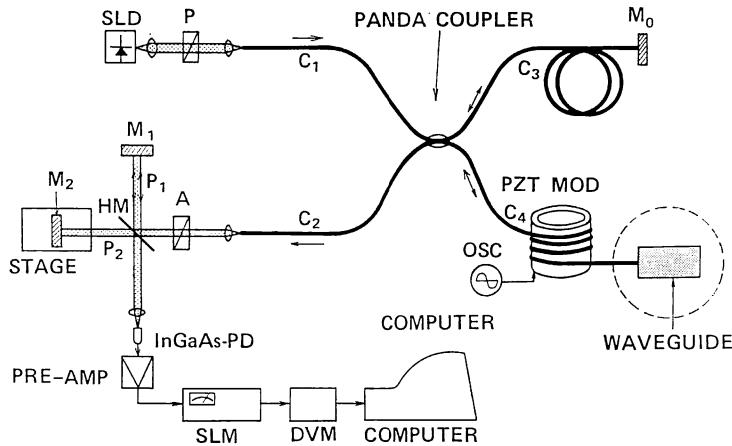


図 5 SLD を用いた OTDR システム

いる。素子寸法は、ストライプ幅  $2 \mu\text{m}$ , 電流注入部の長さ  $400 \mu\text{m}$ , 非励起部の長さ  $200 \mu\text{m}$ , 曲がり導波路の曲率半径  $500 \mu\text{m}$  である。

#### 4.2 素子特性

室温で注入電流  $200 \text{ mA}$  の場合の発光スペクトルを図 4 に示す。出力は  $12 \text{ mW}$  程度を得ている。半値全幅 (FWHM) はおおよそ  $40 \text{ nm}$  である。スペクトルの最大値を  $P_{\max}$ , 最小値を  $P_{\min}$  としたとき,  $m = (P_{\max} - P_{\min}) / (P_{\max} + P_{\min})$  で定義されるスペクトル変調度は  $0.06$  と小さく、この曲がり導波路構造はレーザー発振の抑制に効果的であった。注入電流  $175 \text{ mA}$  のもとで干渉計を用いて測定したコヒーレンス長は  $40 \mu\text{m}$  程度である。

この SLD とコア直径  $10 \mu\text{m}$  のシングルモード光ファイバとの結合効率を検討した。先端を研磨したファイバとの結合損失は  $-3 \text{ dB}$  から  $-4 \text{ dB}$  であり、この損失は通常の LD と同程度の値であり、高い結合効率を有していることを確かめた。

#### 5. 高分解能 OTDR 光源としての応用例

この SLD を図 5 に示した光導波路用高分解能 OTDR システムに適用した結果を述べる<sup>20,21)</sup>。この OTDR は、導波形光回路やバルク形光回路の障害点、散乱点、反射点を  $0.1 \text{ mm}$  以下の分解能で探査し、伝播損失や反射率を測定するもので、光ファイバ形およびバルク形のマイケルソン干渉計からなる。原理はまず、インコヒーレント光源 SLD からの光をカップラーで反射鏡側と導波路側に分岐する。反射鏡からの参照光と導波路からの後方散乱光をカップラーで再び合流し、マイケルソン干渉計に導く。ここでバルク形干渉計内的一方の反射

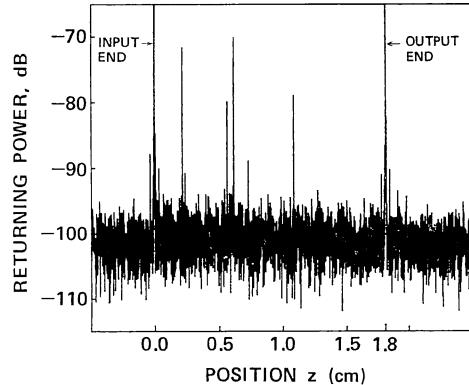


図 6 ガラス導波路の OTDR 測定結果

鏡を移動し、参照光と散乱光を順次干渉させることにより、導波路内の障害点などを検出することができる。

測定対象として長さ  $1.8 \text{ cm}$  の石英系光導波路を用いた場合の測定結果を図 6 に示す。同図より導波部内の 4 点でピークが観測され、散乱体が形成されていることがわかる。SLD のコヒーレンス長が約  $40 \mu\text{m}$  なので、光導波路中の分解能は  $40 \mu\text{m}/2n = 13 \mu\text{m}$  ( $n = 1.5$ ) となり、従来の光パルス法 OTDR より飛躍的に高い分解能を得た。

この高分解能 OTDR の適用対象として、ガラス光導波路のみでなく、 $\text{LiNbO}_3$  導波路デバイス、半導体レーザーを含む各種半導体導波路の評価が考えられる。

#### 6. SLD の広スペクトル化の試み

以上述べてきたように従来の SLD の研究開発においては、端面での光の反射を減少させることに重点がおかれて、その活性層の光学的特性に関してはほとんど注意が

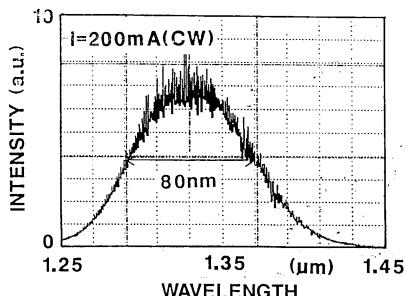


図 7 1.3 μm 帯 STAC-SLD の発光スペクトル

払われず、LD と同じ設計方針で素子製作が行われてきた。すなわち特定のバンドギャップ・エネルギーをもつ一種類の物質からなる活性層のみが利用されてきた。

このため放射される光のスペクトル幅は、従来の LD における増幅された自然放出光のスペクトル幅と同程度であった。インコヒーレント度は発光スペクトル幅に比例するため、インコヒーレント度が大きいことが特徴である SLD では、発光スペクトル幅をできるだけ広くしたい。しかし現状の素子では、この要望には答えられず、この素子の計測応用の分野では測定精度に限界を与えている。

この目的達成のため、光を発生する活性層部に、バンドギャップエネルギーがわずかに異なる 2 個の物質を上下方向に近接して積層した構造 (STAC: stacked active layers) を採用し、従来の SLD に比較し、倍以上の発光スペクトル幅を実現した<sup>18,23</sup>。1.3 μm 帯 STAC 構造 SLD の発光 SLD の発光スペクトルを図 7 に示す。光スペクトルアナライザーを用いて測定したコヒーレンス長は約 18 μm であった。

## 7. む す び

LD および LED に次ぐ第 3 の半導体発光デバイスとして関心が与せられている SLD について、説明した。多種多様なデバイス構造が検討されており、特性もますます向上していくと期待される。光 LAN、光ファイバジャイロ、高分解能 OTDR 用などの光源としての応用が有望である。また波長 1 μm 帯における高出力の「白色光源」として、各種分光特性の測定に用いることも可能であろう。

## 文 献

- 1) L. N. Kurbatov, S. S. Shakhidzhanov, L. V. Bystrova, V. V. Krapukhin and S. I. Kolonenkova: "Investigation of superluminescence emitted by a Gallium Arsenide diode," Sov. Phys. Semicond., 4 (1971) 1739-1744.
- 2) T. P. Lee, C. A. Burrus and B. I. Miller: "A stripe-geometry double-heterostructure amplified-spontaneous-emission (superluminescent) diode," IEEE J. Quantum Electron., QE-9 (1973) 820-828.
- 3) C. S. Wang, W. H. Cheng, C. J. Hwang, W. K. Burns and R. P. Moeller: "High-power low-divergence superradiance diode," Appl. Phys. Lett., 41 (1982) 587-589.
- 4) N. K. Dutta and P. P. Deimel: "Optical properties of a GaAlAs superluminescent diode," IEEE J. Quantum Electron., QE-19 (1983) 496-498.
- 5) J. Niesen, L. Zinkiewicz, P. H. Payton and C. Morrison: "Recent development in 0.83 μm superluminescent diodes at TRW," Proc. SPIE, 719, Fiber Optic Gyros 10th Anniversary Conf. (1986) 208-215.
- 6) N. S. K. Kwong, K. Y. Lau, N. Bar-Chaim, I. Ury and K. J. Lee: "High power, high efficiency window buried heterostructure GaAlAs superluminescent diode with an integrated absorber," Appl. Phys. Lett., 51 (1987) 1879-1881.
- 7) G. A. Alphone, D. B. Gilbert, M. Harvey, E. Depiano and M. Ettenberg: "High-power superluminescent diodes," Technical Digest of Optical Fiber Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Commun., MÉ6 (1987).
- 8) N. S. K. Kwong, K. Y. Lau, N. Bar-Chaim, I. Ury and K. J. Lee: "High power GaAlAs superluminescent diode for fiber sensor applications," OFS '88, FDD-2-1 (1988) 451-454.
- 9) N. K. Dutta, R. J. Nelson, P. D. Wright, P. R. Besomi and R. B. Wilson: "Optical properties of a 1.3 μm InGaAsP superluminescent diode," IEEE Trans. Electron. Devices, ED-30 (1983) 360-473.
- 10) I. P. Kaminow, G. Eisenstein, L. W. Stulz and A. G. Dentai: "Lateral confinement InGaAsP superluminescent diode at 1.3 μm," IEEE J. Quantum Electron., QE-19 (1983) 78-82.
- 11) I. Ladany, P. J. Zanzucchi, J. T. Andrews, J. Kane and E. DePiano: "Scandium oxide antireflection coatings for superluminescent LEDs," Appl. Opt., 25 (1986) 472-473.
- 12) C. S. Wang, J. S. Chen, R. Fu, V. S. Sunderam, R. Varma, J. Zarrabi, C. Lin and C. J. Hwang: "High power long life superluminescent diode," Proc. SPIE, 719, Fiber Optic Gyros 10th Anniversary Conf. (1986) 203-207.
- 13) K. Gen-ei, A. Tanioka, H. Suhara and K. Chinen: "High coupled power 1.3 μm edge-emitting diode with a rear window and an integrated absorber," Appl. Phys. Lett., 53 (1988) 1138-1140.
- 14) Y. Kashima, M. Kobayashi and H. Takano: "High output power GaInAsP/InP superluminescent diode at 1.3 μm," Electron. Lett., 24 (1988) 1507-1508.
- 15) N. S. K. Kwong, N. Bar-Chaim and T. Chen: "High-power 1.3 μm superluminescent diode," Appl. Phys. Lett., 54 (1989) 298-300.
- 16) H. Nagai, Y. Noguchi and S. Sudo: "High-power, high-efficiency 1.3 μm superluminescent diode with a buried bent absorbing guide structure," Appl. Phys. Lett., 54 (1989) 1719-1721.
- 17) 山口茂実, 浅井昭彦, 土屋富志夫, 奥村卓男, 永井治男:

- “新構造 SLD の試作”, 第6回半導体レーザシンポジウム予稿集(1989) p. 5.
- 18) 野口悦男, 八坂 洋, 三上 修: “長波長帯 SLD の広スペクトル化(2重活性層構造)”, 秋季応用物理学会, 28 p-ZH-3 (1989).
- 19) W. K. Burns, C. L. Chen and R. P. Moeller: “Fiber-optic gyroscopes with broad-band sources,” IEEE/OSA J. Lightwave Technol., LT-1 (1983) 98-105.
- 20) K. Takada, I. Yokohama, K. Chida and J. Noda: “New measurement system for fault location in optical waveguide devices based on an interferometric technique,” Appl. Opt., 26 (1987) 1603-1606.
- 21) 高田和正, 野田寿一, 野口悦男, 高戸範夫, 横浜 至: “1.3 μm 帯 SLD を用いた干渉形 OTDR によるガラス導波路の評価”, 秋季応用物理学会, 6 a-ZD-4 (1988).
- 22) G. A. Alphonse, J. C. Connolly, N. A. Dinkel, S. L. Palfrey and D. B. Gilbert: “High power superluminescent and optical amplifier with low spectral modulation: a new design,” CLEO '89 WL2 (1989).
- 23) O. Mikami, Y. Noguchi, H. Yasaka and K. Magari: “Broader spectral width 1.5 μm InGaAsP stacked active layer superluminescent diode (STAC-SLD),” OFS-6, Mo-1-3 (1989).
- 24) 原嶋 稔, 八坂 洋, 首藤晃一, 土屋敏之: “SLDを用いた同一波長双方向伝送実験”, 春季電子情報通信学会(1990)発表予定.