

# 解説

## 最近の光ファイバ

山内 良三・稻田 浩一

藤倉電線(株) 〒285 佐倉市六崎 1440

(1985年12月5日受理)

### Recent Progress of Optical Fibers

Ryozo YAMAUCHI and Koichi INADA

Fujikura Ltd., 1440, Mutsuzaki, Sakura 285

#### 1. はじめに

光源波長  $1.3 \mu\text{m}$  用の単一モードファイバを中心として、現在百万 km/年オーダーの通信用光ファイバが世界中で布設されている。わが国では、その約 10~20% が製造されており、 $1.3 \mu\text{m}$  帯の通信用に関する限り、石英系ファイバは完全な実用段階にあるといえる。その結果、関心は石英系ファイバの極小損失波長である  $1.5 \mu\text{m}$  帯に向いており、ここ数年、同波長域におけるファイバの低損失低分散化の検討が進んだ。また、光ファイバの適用領域も海底、放射線下、高温環境下と大きく広がっており、それぞれに適したファイバの研究開発が進められている。一方、ファイバをたんなる伝送媒体としてだけでなく、導波路型センサーとして用いたり、その非線形光学効果を利用する研究も行なわれている。ここでは、最近の光ファイバの研究開発の状況を概説する。

#### 2. 通信用光ファイバ

##### 2.1 $1.3 \mu\text{m}$ 用光ファイバ

$1.3 \mu\text{m}$  用単一モードファイバ製造法としては、VAD 法<sup>1)</sup>、外付け法、MCVD 法<sup>2)</sup>、P-CVD 法<sup>3)</sup>、がおもなものである。前二つの方法では、平坦なクラッド屈折率を有する matched cladding 型が、後の二つの方法では、クラッドの屈折率をコアの周囲だけ石英ガラスよりも低下させた depressed cladding 型が、主として製造されている。外付け法や、わが国の主たる製法である VAD 法のような soot-process では、低損失化に必要な厚いクラッドをドーパントを含まずに容易に製造できるので matched cladding 型のほうが量産に適していると思わ

れる。いずれにしても、屈折率分布による伝送特性の差はわずかであり、互いに低損失で接続することができる。現在、 $1.3 \mu\text{m}$  用 VAD 単一モード光ファイバの損失レベルは平均値  $0.45 \text{ dB/km}$  以下であり、あまり改善の余地のないところまで低下している<sup>4)</sup>。また、VAD 法を用いて、グレーデッド型多モードファイバや高 NA 大口径ファイバ、さらには、depressed cladding 単一モードファイバも作製できる<sup>5)</sup>。

##### 2.2 水素による損失増加

1983年にあって、それまで安定と考えられてきた石英系ファイバに異常な損失増加が生じることが報告された<sup>6)</sup>。それは、ファイバのコーティング材料中に含まれる水素が光ファイバ内に拡散して、水素分子の吸収を引き起ししたり、ガラスの成分と化学的な反応をして新たなOH基を生成するためとわかった<sup>7)</sup>。図1に示すように、この損失増加は光ファイバ通信で重要な  $1.3 \mu\text{m}$  以上の波長帯に大きい影響を与えるため、わが国を中心に精力的な研究が行なわれた<sup>8~10)</sup>。その結果、次の対策を施すことにより実用上問題のない光ファイバケーブルが製造できることがわかった。(1)OH基生成の引き金となるガラスの構造欠陥が生じやすいドーパントの使用を避ける。リンはその例であるが、とくに、リンとゲルマニウムの co-doping が有害である<sup>11)</sup>。(2)光ファイバのプラスチック被覆材料として水素発生の少ないものを使用する。(3)ケーブル中に浸水したとき、金属材料が電気化学的反応により水素を発生するおそれのある場合は、金属に被覆を施す<sup>12)</sup>。さらに、仮に、水素が発生してもファイバガラス中に水素が拡散しないようにするため、アルミニウムなどの金属や窒化珪素を表面にコー

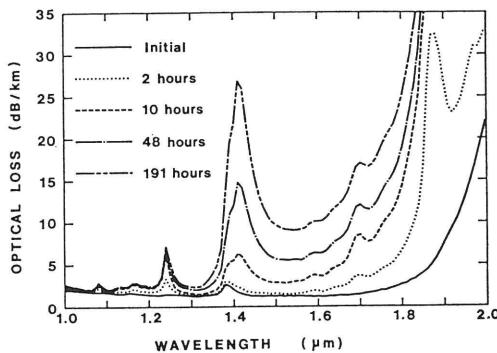


図 1 1気圧、100°C の水素ガス雰囲気下に置かれた MCVD ファイバの損失波長特性<sup>8)</sup>

ディングすることも提案されている<sup>13,14)</sup>。

### 2.3 高強度光ファイバ

海底用光ケーブルでは、深海への布設に耐えるべく、ファイバ全長にわたり高い機械的強度が要求されている。現在、大西洋および、太平洋横断光ケーブルを始め、多くのプロジェクトが進行中である<sup>15,16)</sup>。ファイバに必要なプルーフ強度レベルは 2.0% 伸び前後であるが、この値は、わずか 0.1 μm 程度のファイバ表面傷があれば破断することを意味している。現在、注意深くファイバの線引きを行なえば、2.0% プルーフ強度試験において、ファイバの平均破断間隔 10 km 程度のものが得られるようになった<sup>17,18)</sup>。しかし、この長さでも 50 km 以上の中継器間隔には、はるかに不足であり、ファイバを高強度で融着接続することが必要となる。融着用の熱源として、アーク放電のほか、塩素-水素火炎を用いるものが報告されている<sup>19,20)</sup>。高強度接続により、従来 500 g 前後であった融着接続点の平均引張り強度が、傷のない石英ガラスに近い 4, 5 kg に向上した。

### 2.4 1.5 μm 帯伝送用ファイバ

1.5 μm 帯で 0.20 dB/km 前後の伝送損失を有するファイバを使用した長距離無中継伝送実験がここ数年盛んである。2 年ほどの間にその距離は約 100 km から 250 km に伸びた<sup>21)</sup>。また、伝送容量距離積も最大 250 Gbit/s・km に達している<sup>22)</sup>。前者の距離の延びには、コヒーレント通信方式による信号/雜音比の改善や、1.5 μm 帯用半導体レーザーの高出力化だけでなく、低損失ファイバが安定して製造できるようになったことが大きく寄与している。この結果、次世代の海底伝送システムには、この 1.5 μm 帯が使用されるであろう。

コア径 10 μm、屈折率差 0.3% 程度の 1.3 μm 用单一モードファイバは 1.55 μm 帯で使用すると、波長分散が約 20 ps/km/nm と大きく、大容量伝送には向きで

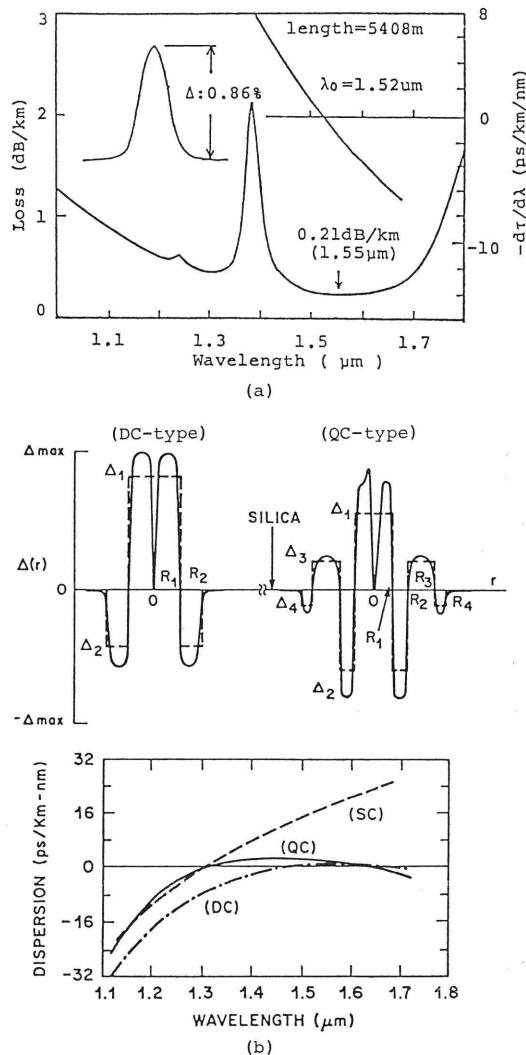


図 2 (a) ガウス型屈折率分布を有する 1.5 μm 帯零分散ファイバの特性<sup>25)</sup>

(b) 分散フラット型ファイバの屈折率分布と波長分散特性<sup>27)</sup>

ある。これを克服するため、零分散波長を 1.5 μm 帯にシフトさせたいわゆる 1.55 μm 分散シフトファイバの開発が進められている。初期の分散シフトファイバの屈折率分布はステップ型であったが<sup>23)</sup>、低損失を得るのがむずかしいため、現在では、三角型、ガラス型など、なだらかな屈折率分布のものが主流となっている<sup>24,25)</sup>。1.55 μm における損失として 0.20 dB/km 前後のものが報告されている。図 2(a)にガウス型分布の例を示す。分散シフトファイバが本領を發揮するのは 100 km 以上の長距離伝送であるが、安定にケーブル化することができるファイバパラメータの決定など残された課題も多い。

い。たとえば、曲げ損失特性、接続特性、ゼロ分散波長近傍における波長分散曲線の傾きなど種々の要求に答えるため屈折率分布をさらに調整する試みも行なわれている。

低分散波長域を広げる試みも数多く報告されている。このようなファイバは分散フラットファイバと呼ばれており、たとえば、W型プロファイルにしたり<sup>26)</sup>、図2(b)のようにコアを複数の層に分割したりすることにより実現できる<sup>27)</sup>。

## 2.5 加入者系への光ファイバの適用

光ファイバ量産化のための製造技術開発も盛んである。グレーデッド型ファイバのコアガラス堆積速度として、plasma-enhanced MCVD法では約2.5 g/min<sup>28)</sup>、VAD法では5 g/min弱<sup>29)</sup>のガラス合成速度が報告されている。また、ファイバ線引き速度も最高1,200 m/minに達している<sup>30)</sup>。これらの技術は、将来大量の需要が見込まれる光ファイバの加入者系への適用にとって重要である。一方、加入者系に、従来のグレーデッド型ファイバに加えて、単一モードファイバを導入するための検討も始まっている<sup>31)</sup>。

## 3. 偏波面保持ファイバ

偏波面保持ファイバはどちらか一方の円偏波もしくは直線偏波を保存して送るためのファイバである。いずれにしてもモード間の結合を抑えるため、モード間の伝播定数の差を大きくするか、損失差を大きくする必要がある。直線偏波用の偏波面保持ファイバとしては、楕円コアや楕円クラッドを有するもののほか、PANDA型やボウタイ型などが提案されている<sup>32,33)</sup>。初期の偏波面保存ファイバの損失は高く、通信用としては物足りないものであったが、PANDA型の出現により急速に低損失化が進み、現在では損失0.25 dB/km(波長1.57 μm),

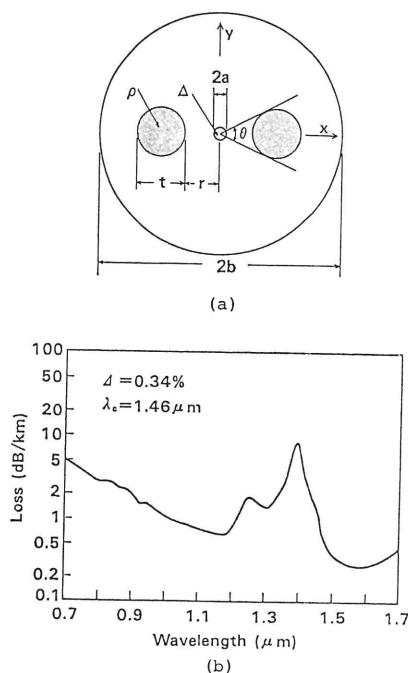


図3 (a) PANDA型の構造  
(b) 低損失PANDAファイバの特性<sup>34)</sup>

偏波モード間のクロストークが-12 dB(100 km換算値)のファイバが報告されている(図3)<sup>34)</sup>。

偏波面保持ファイバをセンサーや光部品用ファイバとして使用する場合には、数百m以下の短尺で良好な偏波モード間のクロストークが要求される。PANDAファイバでは、コアの両側に配置した応力付与部をコアに近づけるほど複屈折 $B$ が大きくなるが、 $B$ が大きいほど応力付与部境界面の揺らぎの影響や微小な対称性のくずれの影響がクロストークを劣化させる。短尺での使用を目的として開発されたPANDAファイバのクロストークとして、最良値-48 dBが実現している<sup>35)</sup>。偏波面保

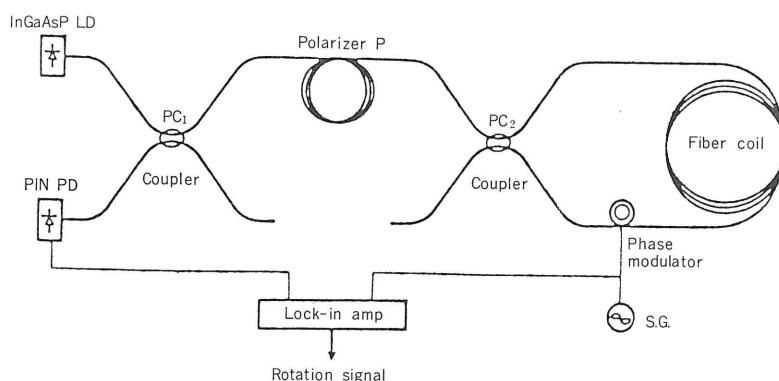
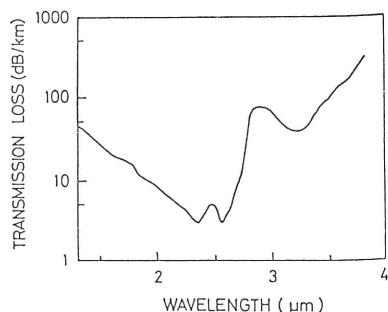


図4 全光路をファイバ化したファイバジャイロ<sup>36)</sup>

図 5  $\text{ZrF}_4$  系フッ化物ガラスファイバの特性<sup>37)</sup>

持ファイバのセンサーへの応用例としては、ファイバジャイロがあるが、ファイバコイル、カップラ、偏光子に至るまですべての光路をファイバで構成したものが報告されている（図 4）<sup>36)</sup>。

#### 4. 中赤外用ファイバ

フッ化物系ガラスの損失は、ここ 2、3 年で急激に低下し、3 dB/km 程度（波長  $2.35 \mu\text{m}$  および  $2.55 \mu\text{m}$ ）のものが報告されている（図 5）<sup>37)</sup>。この例では、 $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-YF}_3\text{-AlF}_3\text{-LiF}$  の組成をもつ素材を build-in-casting 法により作製している。また、損失原因のうち散乱損失については理論値に近い 0.01 dB/km ( $\text{ZrF}_4$  系ガラス、波長  $2.55 \mu\text{m}$ ) が報告されている<sup>38)</sup>。長距離通信信用ファイバとしては、長さ、損失ともに、まだ石英系ファイバとは大きなひらきがあるが、技術的には、素材中の酸素や OH 基の除去、結晶化の少ない組成の選択、長尺線引きなどが今後の課題であろう。その他、 $2 \mu\text{m}$  までの伝送用に  $\text{GeO}_2$  系ガラスや<sup>39)</sup>、 $5 \mu\text{m}$  帯を伝送できるガラス組成として、As, S, Ge, Se, Te を成分とするカルコゲナイトガラス<sup>40)</sup>なども検討されている。

#### 5. その他の光ファイバ

##### 5.1 センサー用ファイバ

PANDA 型以外のセンサー用ファイバも数多く提案、試作されている。たとえば、MCVD 法を利用して、石英系ガラスに Nd, Er などの希土類をドープする試みが報告されている<sup>41)</sup>。これらのファイバは、ファイバレーザーや、蛍光を利用した温度測定に応用できる。また、ファイバのレイリー散乱光強度の温度依存性を利用してファイバ長さ方向に温度分布測定を行うことが行われている（図 6）<sup>42)</sup>。このとき、高温におけるファイバ強度の劣化を抑えるため、Al のような金属がコーティングされる。

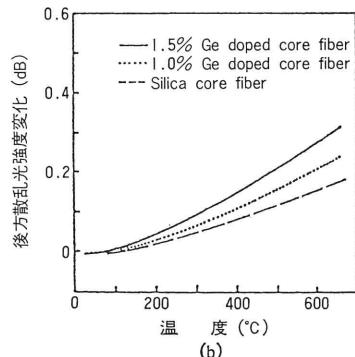
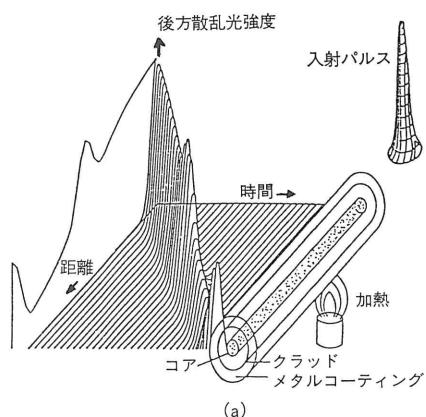


図 6 後方散乱光による温度測定

(a) 原理図

(b) 後方散乱光量変化と温度の関係<sup>42)</sup>

##### 5.2 耐放射線光ファイバ

石英系ファイバの耐放射線性は他のガラスと比べると格段に優れているが、その振舞いは非常に複雑である。すなわち、ドーパントの種類や量、OH 基、塩素などドーパント以外の不純物、線引き条件などガラスの履歴などが大きな影響を与える。また、使用条件におけるアニール効果やファイバ中に光を通すことにより損失が回復する効果 (photo-bleaching) なども考慮する必要がある<sup>43)</sup>。これまでに得られている結果を定性的にいえば次のようになる。（1）最も耐放射線性が優れているのは、純粋石英ガラスである。（2）B や P をドープしたガラスの耐放射線性は悪い。（3）Ge のみをドープしたものは P とともに co-dope したものよりも安定である。（4）F や Cl などハロゲンが残留したファイバのほうが損失増加が大きい<sup>44)</sup>。また、OH 基は損失増加を抑えるが、多量に残留していると  $1 \mu\text{m}$  以上の波長で損失が大きく増大する。図 7 は、ガラス原料として有機シラン系材料を使用することにより、塩素を排除したファイバの損失増加特性である<sup>45)</sup>。1 億レントゲンという高放射線量に

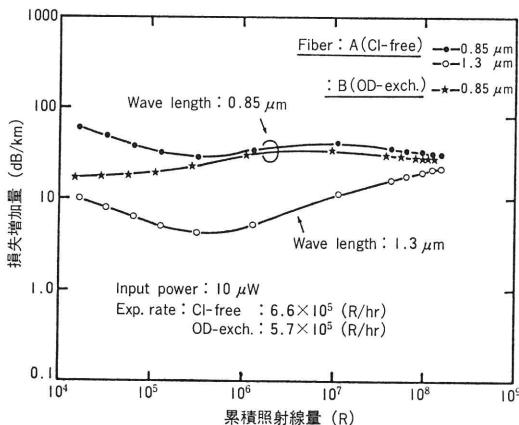


図7 有機シランを原料とする石英系光ファイバの耐放射線特性(コバルト60γ線)<sup>45)</sup>

対しても損失増加は30 dB/kmに留まっており、原子力施設への適用が期待される。また、このガラスを素材としたイメージファイバも利用価値が大きい。

以上述べたほかに、特殊なファイバとして、X線用ファイバがある。これは、ガラスの屈折率の実部がX線領域では1よりも小さくなることを利用して中空ガラスパイプ中にX線を通すものである<sup>46)</sup>。

また、ファイバの非線形効果の応用例として、ファイバ中の誘導ラマン散乱による光增幅を行ない、伝送距離の拡大を図ることも試みられている<sup>47)</sup>。

## 6. あとがき

石英系ファイバの低損失化に大きな精力を割いていた時代と異なり、現在では、光ファイバの種類も多く、応用分野も大きな広がりを見せていることが認識されたと思う。限られたページで全体を語り尽くせないが、諸兄の参考になれば幸いである。

## 文 献

- S. Tomaru, M. Yasu, M. Kawachi and T. Edahiro: Electron. Lett., **17** (1980) 92.
- A. D. Pearson and M. J. Saunders: 8th ECOC (1982) p. 93.
- P. Geittner, H. J. Hagemann, J. Warnier and H. Wilson: IOOC-ECOC'85 (1985) p. 85.
- H. Ishihara, A. Hirooka and K. Sato: 9th ECOC, a post-deadline paper (1983).
- M. Miyamoto, M. Akiyama, T. Shiota, K. Sanada and O. Fukuda: 9th ECOC (1983) p. 9.
- N. Uchida, N. Uesugi, Y. Murakami, M. Nakahara, T. Tanifugi and N. Inagaki: 9th ECOC, a post-deadline paper (1983).
- K. Noguchi, Y. Murakami and K. Ishihara: Electron. Lett., **19** (1983) 1045.
- K. Noguchi, N. Shibata, N. Uesugi and Y. Negishi: IEEE J. Lightwave Technol., LT-3 (1985) 235.
- K. Mochizuki, Y. Namihira and H. Yamamoto: Electron. Lett., **19** (1983) 743.
- Y. Ohmori, H. Itoh, M. Nakahara and N. Inagaki: Electron. Lett., **19** (1983) 1006.
- 伊藤弘樹, 清水誠, 大森保治, 堀口正治: 電子通信学会技術研究報告, OQE 85-111 (1985).
- N. Uesugi, Y. Murakami, C. Tanaka, Y. Ishida, Y. Mitsunaga, Y. Negishi and N. Uchida: Electron. Lett., **19** (1983) 762.
- S. Tanaka, T. Shiota, R. Yamauchi and K. Inada: OFC'85, TUQ 25 (1985).
- K. J. Beales, D. M. Cooper, W. J. Duncan and J. D. Rush: OFC'84, W 15 (1984).
- P. K. Runge and P. R. Trischitta: IEEE J. Lightwave Technol., LT-2 (1984) 744.
- Y. Niilo: IEEE J. Lightwave Technol., LT-2 (1984) 767.
- A. Wada, S. Araki, R. Yamauchi and O. Fukuda: 10th ECOC (1984) 206.
- F. V. DiMarcello, D. L. Brownlow, R. G. Huff and A. C. Hart: OFC/OFS'85, PD 6 (1985).
- 大沢誠, 杉山茂樹, 山田剛, 渡辺興: 昭和60年度電子通信学会, 総合全国大会, No. 2225 (1985).
- J. T. Krause and C. R. Kurkjian: Electron. Lett., **21** (1985) 535.
- T. Matsumoto, K. Ishiwata and T. Imai: IOOC-ECOC'85, a post-deadline paper, Vol III (1985) p. 31.
- A. H. Gnauk, J. E. Bowers and J. C. Campbell: IOOC-ECOC'85, a post-deadline paper, Vol. III (1985) p. 43.
- T. Moriyama, M. Miyamoto, M. Akiyama, K. Sanada, O. Fukuda, T. Miya and K. Chida: 8th ECOC (1983) p. 31.
- T. D. Croft, J. E. Ritter and V. A. Bhagavatula: OFC/OFS'85, WD 2 (1985).
- M. Miyamoto, T. Abiru, T. Ohashi, R. Yamauchi and O. Fukuda: IOOC-ECOC'85 (1985) p. 193.
- S. Kawakami and S. Nishida: IEEE J. Quantum Electron., QE-10 (1974) 879.
- L. G. Cohen and W. L. Mammel: 7th ECOC (1981) 3.3.
- P. B. O'Conner, J. W. Fleming, R. M. Atkins and V. R. Raju: OFC'85, WH 4 (1985).
- 須田裕之, 柴田修一, 中原基博, 堀口正治: 電子通信学会技術研究報告, OQE 85-108 (1985).
- S. Sakaguchi and T. Kimura: OFC/OFS'85, MG 2 (1985).
- P. Kaiser: IOOC-ECOC'85, Vol. II (1985) p. 125.
- Y. Sasaki, T. Okamoto, T. Hosaka and N. Shibata: OFC'82 (1982) p. 54.
- M. P. Varnham, D. N. Payne, R. D. Birch and E. J. Tarbox: 9th ECOC (1983) p. 57.
- 佐々木豊, 保坂敏人, 野田壽一, 堀口正治: 電子通信学会技術研究報告, OQE 85-114 (1985).
- 菊池佳夫, 姫野邦治, 川上登, 福田長: 昭和60年度電子通信学会半導体材料部門全国大会, No. 433 (1985).
- 岡本勝就: 昭和60年春季応物 30p-ZF-6 (1985) p. 182.
- 金森照寿, 坂口茂樹, 高橋志郎: 昭和60年度電子通信学会半導体材料部門全国大会, No. 417 (1985).
- D. C. Tran: IOOC-ECOC'85, Vol. II (1985) p. 13.
- H. Takahashi, I. Sugimoto and S. Yoshida: 9th ECOC (1983) p. 61.

- 40) T. Kanamori, Y. Terunuma, S. Takahashi and T. Miyashita: IEEE J. Lightwave Technol., **LT-2** (1984) 607.
- 41) S. B. Poole and D. N. Payne: IOOC-ECOC'85 (1985) p. 11.
- 42) T. Shiota, H. Hidaka, F. Suzuki, O. Fukuda and K. Inada: IOOC-ECOC'85 (1985) p. 805.
- 43) G. H. Sigel, Jr.: Proc. IEEE, **69** (1980) 1236.
- 44) 柴田修一, 大森保治, 中原基博: 昭和 59 年度電子通信学会光電波部門全国大会, No. 461 (1984).
- 45) 真田和夫, 福田 長, 稲田浩一, 末松達也, 八橋元治: 電気学会研究会資料, EIM-85-30 (1985) p. 37.
- 46) M. Watanabe, T. Hidaka, H. Tanino, K. Hoh and Y. Mitsuhashi: Appl. Phys. Lett., **45** (1984) 725.
- 47) 大橋正治, 北山研一, 中島 隆, 青海恵之: 昭和 60 年度電子通信学会, 総合全国大会, No. 1113 (1985).