

結晶化ガラスフェルール

Glass-Ceramic Ferrules

坂本 明彦

Akihiko SAKAMOTO

日本電気硝子(株) 技術部

和田 正紀

Masanori WADA

日本電気硝子(株) 電子部品事業本部

森下 裕一

Yuichi MORISHITA

昭和電線電纜(株) 情報通信研究開発部

野呂 治人

Naoto NORO

昭和電線電纜(株) 情報通信研究開発部

問合せ/サカモト アキヒコ 〒520-8639 滋賀県大津市晴嵐2-7-1 TEL 077-537-1387 FAX 077-534-3572

E-mail/skm-neg@mx.mesh.ne.jp

キーワード：光コネクタ，フェルール，結晶化ガラス，線引き，研磨，固定減衰器

1 はじめに

本格的な光通信時代を迎えるにあたって光コネクタが大量に必要とされる。図1に代表的な光コネクタの接続原理を示す。フェルールと呼ばれる毛細管の中心孔に光ファイバを挿入・接着固定した後、先端をフェルールと共に球面状に研磨する。次いでフェルールを両側からアライメントスリーブに挿入して押圧すると、フェルールおよび光ファイバ先端が弾性変形によって密着し光信号の伝送が可能になる。二本の光ファイバを正確に対向させるためフェルールにはサブミクロンの寸法精度が要求され、さらに繰り返しの着脱に対する高い耐磨耗性、曲げ強度、および温湿度の変化に対しても形状や物性が安定であること（環境安定性）が必要とされる。

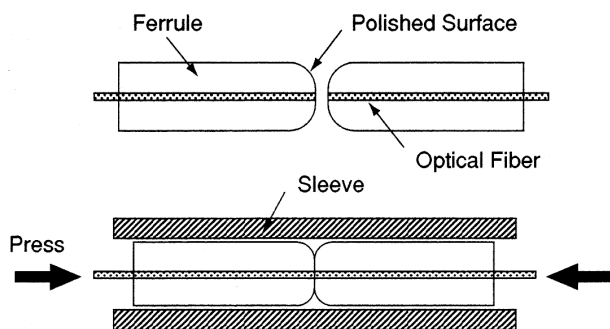


図1 光コネクタの接続原理

フェルールは光コネクタの構成部品のうち最もコスト比率が高く、経済的な光通信網の構築のためにはその低価格化が必須である。現在はフェルール材料としてジルコニアやホウケイ酸ガラスが使用されているが、ジルコニアフェルールは機械的強度に優れる反面、精密加工に手間がかかり低コスト化には限界がある。また、ホウケイ酸ガラスフェルールは耐磨耗性や強度が低いため適用領域が限定される。低コストでかつ高機能なフェールの開発をめざして、ここ数年新しいフェール材料に関する研究が活発に行われてきた^{1)~6)}。中でも結晶化ガラスフェルールは既に量産技術が確立され各種の信頼性試験も終了し、実用化の段階を迎えている。本稿では、結晶化ガラスフェールの製法と材質特性、およびそれを用いた光コネクタの性能について解説する。また、結晶化ガラスフェールの光学的特徴を生かした固定減衰器への応用についても紹介する。

2 結晶化ガラスフェールの製造方法

結晶化ガラスフェルール（Glass-Ceramic Ferrule, 以下 GCF）は、光ファイバやガラス毛細管の製造に用いられる線引き法によって製造される。線引き法は、プリフォームと呼ばれる予備成形ガラスを加熱・延伸して成型する方法で、精密な寸法を有するガラス製品を大

◎特集

量生産するのに適した方法である。以下に、GCFを得るためのプリフォームの設計とGCFの特性について述べる。

2.1 結晶化プリフォーム

一般に線引きは、加熱しても結晶化や分相等が起こらない熱的に安定なガラスを用いて行われる。これに対して結晶化ガラスの原ガラス（結晶化前の非晶質ガラス）は、加熱によって結晶が析出するように組成設計されているため、原ガラスを線引きしてサブミクロンの寸法精度を有する毛細管を製造することは事実上不可能である。この問題を解決するため、予め結晶化させたプリフォームを開発した。プリフォームを予め結晶化させておくことで熱的安定性を高め、加熱時に結晶を析出させることなく延伸することができる。

結晶化プリフォームの基本組成は、 $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系であり、析出結晶は β -スポジューメン固溶体 ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2$, $n \approx 6$)である。固溶体中の SiO_2 モル比 (n)がおよそ6であることはX線回折によって確認した。この結晶化ガラスは熱的に安定で、高強度、高化学耐久性さらに低熱膨張といった特徴を有しており、フェルールの基本組成として適している。図2は $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系のガラス組成を、 β -スポジューメン固溶体を一つの頂点とする三角図で表したものである。図中の各点に付した数値は各組成点における飽和結晶化度（重量%）を示したもので、残りはガラス相である。飽和結晶化度は、 β -スポジューメン固溶体の組成比にはほぼ対応して変化し、組成が β -スポジューメン固溶体の頂点から離れるにつれて飽和結晶化度が低下（残存

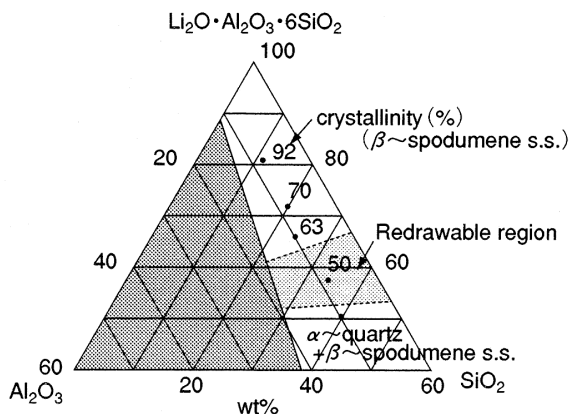


図2 線引き成形可能な結晶化プリフォームの基本組成域

ガラス相が増加) することがわかる。結晶化度と線引き成形性の関係を実験的に調査した結果、基本組成が斜線で示した領域にあれば線引きに適した結晶化度が得られることを確認した。

一般に線引き成形は、プリフォームの粘度がおよそ $10^{5.5} \sim 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ であるような温度域で行われる。したがって結晶化プリフォームには、この温度域において結晶の融解や転移が起こらないことが必要となる。本結晶化プリフォームの線引き温度（粘度： $10^{5.7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ）は約 1150°C であり、析出結晶の融点 ($T_m: 1200^\circ\text{C}$) よりも低く、また、 T_m 以下の温度では結晶の転移も起こらない。

結晶化プリフォーム中の残存ガラス相の安定性は、線引き中の表面結晶化に影響を及ぼす。つまり、線引きによってプリフォームの表面積は著しく増加するので、残存ガラス相が十分に安定でなければ、たとえプリフォームが飽和結晶化度に達していても新たに生じた表面で結晶を析出することがある。これを防止するためには、結晶が析出しにくいような添加物質を加えるなどして残存ガラス相の組成を調整する必要がある。

上述のように設計された結晶化プリフォームの内部構造を図3に示す。析出結晶 (β -スポジューメン固溶体)の粒径はおよそ $0.3\mu\text{m}$ 、結晶化度は約50重量%である。以下に線引きによって製造されたGCFの特性について述べる。

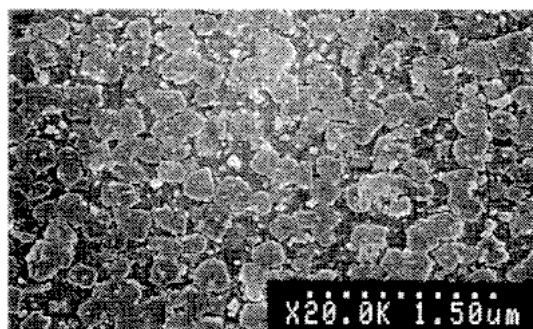


図3 結晶化プリフォームの内部構造

2.2 GCFの特性

線引き成型された結晶化プリフォームの軟化変形部分を図4に、得られた結晶化ガラス毛細管の断面を図5に示す。図5から分かるように、毛細管はフェルールとして十分な寸法精度を有しており、内外径の機械加工を行う必要はない。さらに、毛細管は既に結晶化されて

表 1 GCF の材料特性

	GCF	silica glass	ZrO ₂	B.S.*
Bending strength (MPa)	700 (700)**	140	1350	250
CTE (x10 ⁻⁷ /K)	30	6	85	50
Young's Modulus (GPa)	80	70	190	70
Vickers Hardness	700	760	1200	550
Reflectance(%, at 1.55μm)	4	4	11	4
Absorbance(/mm, at 1.55μm)	0.1	<0.01	-	<0.01
Rubbing rate*** (μm/min.)	21	26	2	34
Volume Change** (ppm)	N.D.	N.D.	1000	N.D.

* Borosilicate Glass
 ** 85 °C, 90% R.H., 1500H
 *** Al₂O₃ #1200, 24.5kPa

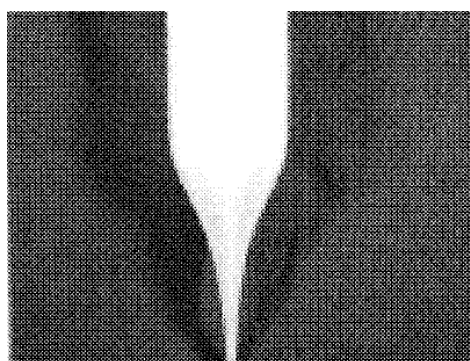


図 4 線引きされた結晶化プリフォームの軟化変形部分

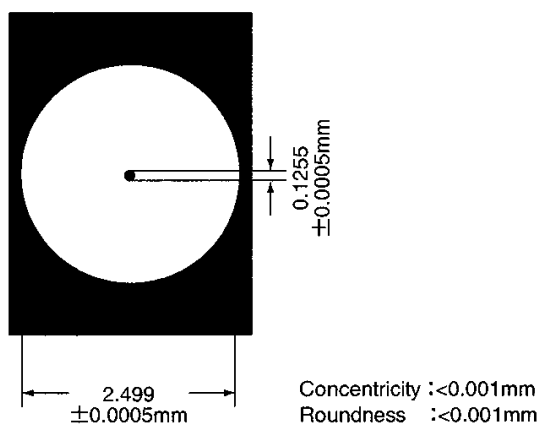


図 5 結晶化ガラス毛细管の断面

比べて高く、廣瀬ら⁷⁾は GCF を用いて光コネクタを作製し強度に問題のないことを確認している。光学的特徴としては、ジルコニアに比べて光通信波長帯での反射率が低く、シリカガラスやホウケイ酸ガラスに比べて吸光度（吸収係数と散乱係数の和）が大きいことがあげられる。これらの光学的特徴は、後述のように特に固定減衰器用として好適である。

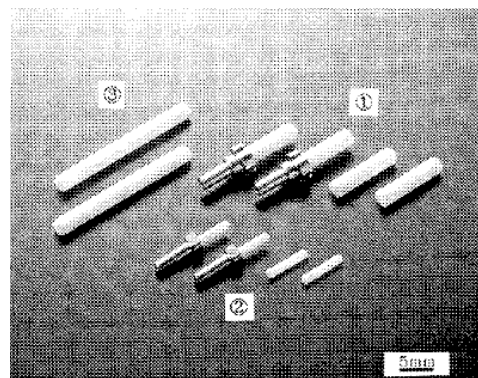


図 6 GCF 製品 ① SC 型 (外径 2.5mm), ② MU 型 (外径 1.25mm), ③ 固定減衰器用 (外径 2.5mm)

いるため、切断、面取り、金属フランジの取り付け等の簡単な加工を経るだけで GCF に仕上げられる (図 6)。

表 1 に GCF の材料特性をジルコニア、シリカガラスおよびホウケイ酸ガラスと比較して示す。GCF の特徴として、硬さおよび被研磨速度が光ファイバ材質であるシリカガラスに近い、ヤング率が小さい、熱膨張係数がシリカガラスに近い、さらに高温高湿環境下での寸法変化がないという点があげられる。曲げ強度は、ジルコニアより低いもののシリカガラスやホウケイ酸ガラスに

3 GCF を用いた光コネクタの特性

3.1 接続特性

(1) ランダム接続特性

図 7, 図 8 に GCF を用いた SC 型 (外径 2.5mm), MU 型 (外径 1.25mm) 光コネクタのランダム接続特性 (無調心) を示す。実験に用いた光ファイバは 1.3μm 零分散 SMF である。図から分かるように接続損失は平均 0.1dB 以下、最大でも 0.25dB 以下であり十分実用レベルにあることが確認された。また、廣瀬ら⁸⁾は

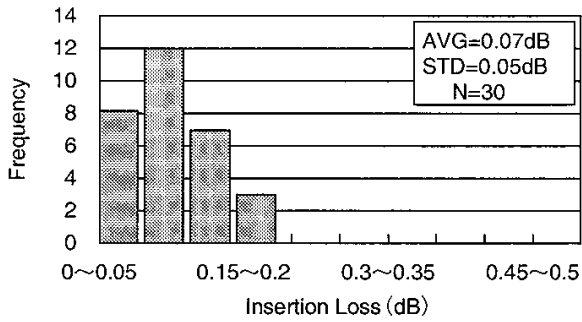


図7 GCFを用いたSC型光コネクタのランダム接続特性

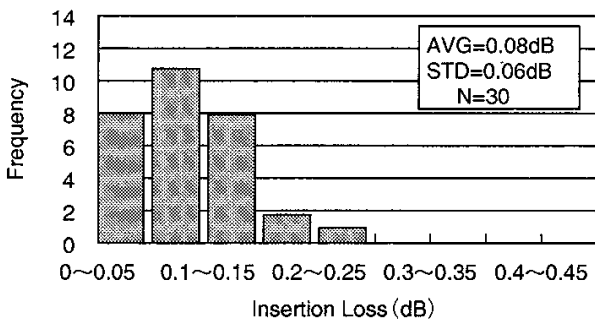


図8 GCFを用いたMU型光コネクタのランダム接続特性

GCFを用いた光コネクタでは、フェルール先端の球面半径の変動および研磨面からの光ファイバの引き込みに対して、光接続の安定性がジルコニアフェルールよりも優れていることを確認している。これはGCFのヤング率がジルコニアに比べて小さくシリカガラスに近似しているため、光接続に必要なフェルール先端の弾性変形がジルコニアよりも小さな応力で達成されるためである。

(2) 繰り返し接続特性

図9、図10にGCFを用いたSC型およびMU型光コネクタにおいて、500回の繰り返し接続を行った場合の接続損失の変化を示した。実験にはジルコニア製アライメントスリーブを用いた。毎回の接続ごとに接続損失の測定を行い、変化量が0.2dB以上となった場合にのみフェルール先端およびスリーブ内を清掃した。図から明らかなように、いずれの場合も500回中2回の清掃が必要であっただけで清掃後に接続損失はもとのレベルに回復した。500回の繰り返し接続後も接続損失の変動はほぼ0.1dB以内であり、GCF表面に傷の発生は見られなかった。これらの結果はジルコニアフェル

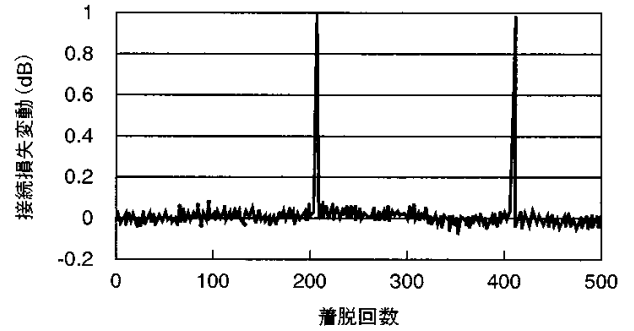


図9 GCFを用いたSC型光コネクタの繰り返し接続試験

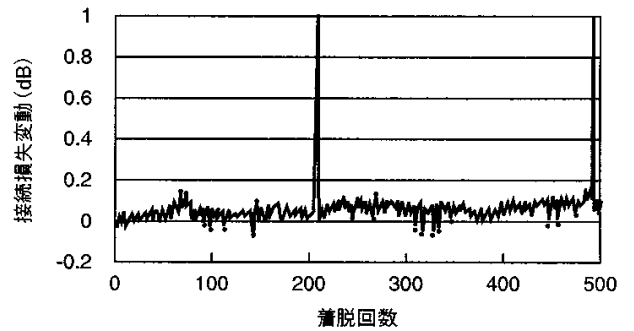


図10 GCFを用いたMU型光コネクタの繰り返し接続試験

ルを用いた場合の試験結果と同等であり、GCFが繰り返し接続に対して十分な信頼性を有していることが確認された。

3.2 研磨特性

光コネクタの低価格化を達成するにはフェルールそのものの価格の他、アセンブリコストの低減が不可欠である。アセンブリコストの中でもフェルールの先端研磨の占める割合が高い。表2にGCFとジルコニアフェルールの研磨条件と反射減衰量を示す。GCFはジルコニアフェルールに比べて少ない工程数で研磨を行うことができ、所定の反射減衰量を達成するための研磨時間をジルコニアフェルールの1/2近くにまで短縮できることが分かる。さらに、GCFは高価なダイヤモンド研磨材を必要とせず、生産性の向上の他、資材費の削減の面からも研磨費用を低減させることができる。これは、表1に示したようにGCFの被研磨特性がジルコニアに比べてはるかにシリカガラスに近いためである。

表 2 GCF およびジルコニアフェルールの先端研磨工程

工程	GCF		ZrO ₂	
	SC	MU	SC	MU
接着剤除去 (秒)	30 (サンドペーパー)	60	15 (サンドペーパー)	15
フラット研磨 (秒)	—	—	90 (ダイヤモンド/水)	90
粗研磨 (秒)	120 (酸化クロムシート/水)	120	120 (アルミナシート/ダイヤモンドスラリー)	120
仕上げ (秒)	120 (酸化クロムシート/水)	120	180 (酸化セリウムシート/SiO ₂ スラリー)	180
総研磨時間 (秒)	270	240	405	405
反射減衰量 (dB)	55	54	54	54

3.3 環境安定性

光コネクタは屋外での使用においても高い信頼性を有していることが必要で、気温や湿度の変化に対する接続安定性は重要な評価項目となる。表 1 から分かるように、GCF の材質は高温高湿環境下でも安定であるが、光コネクタとしてのより詳細な検討が多くの研究者によりなされている。著者らは GCF を用いた SC および MU 型光コネクタに -25℃~70℃ の熱サイクルを与え、接続特性が劣化しないことを確認した⁹⁾。長瀬ら⁴⁾は、GCF を用いた SC 型光コネクタに温湿度サイクルを与えて接続特性に変化がないことを確認した。さらに竹下ら¹⁰⁾は先端の球面半径を種々変化した GCF を用いて温湿度サイクル下における反射減衰量の変化を調査し、GCF が先端の球面半径によらず安定した接続特性を示すことを確認した。これらの結果は、GCF の熱膨張係数が小さいこと、ヤング率が小さく先端の密着状態が良好なこと等による。三田地ら²⁾は 85℃85%RH での長期間の接続後の GCF 接続面の形状を調査し、2000 時間の接続後も接続面の球面半径に変化がないことを確認した。このことは、高温高湿下における接続面の平坦化が指摘されているジルコニアフェール¹¹⁾に対し、GCF がより高い環境安定性を有していることを示している。さらに三田地らは、温水中への浸漬によっても GCF の重量に変化が見られないことも報告した²⁾。

4 金属ドープファイバ型固定減衰器への応用

固定減衰器とは、受光素子への入力部分で光を減衰させて光強度を調整するための光デバイスである。光を減

衰させる方式として金属 (Co²⁺) ドープファイバ型固定減衰器が、性能面、コスト面で優れており注目されている。これに使用される金属ドープファイバ (CoDF) は、光ファイバ中のコアに金属イオンを添加し、その金属イオンの光吸収を用いて光の強度を減衰させている。この CoDF は、固定減衰器に約 20mm の長さのフェルルールの中に実装されている。

固定減衰器を使用するときには、両端に光ファイバを接続して所望の減衰量を得るように設計されている。このとき、入射側に接続した光ファイバとの接続部で生じた損失は CoDF のクラディングを伝搬していく。一般には光ファイバが数十 m 以上と長いために、このクラディングを伝搬するクラディングモードは損失が大きく問題にはならない。しかしながら、固定減衰器の場合は、コアを伝搬する光 (コアモード) の減衰が大きい事、長さが 20mm 程度と短いことから、クラディングモードを無視する事ができなくなる。このクラディングモードは、出射側の接続部分でコアモードと再結合をし、クラディングモードとコアモードで干渉を起こしてしまう。これによって固定減衰器の減衰量の波長依存性を劣化させてしまい、減衰量が不安定となってしまう。このため、CoDF を用いた固定減衰器は、コアを伝搬するコアモードに対してクラディングモードを十分に小さくすることが重要となる。

このクラディングモードを抑圧するためには、クラディングモードを効果的に放射モードにし、減衰ファイバの外側に積極的に放出させる事が重要である。このためには、光ファイバのクラディング部分の屈折率分布の最適化、および CoDF を実装するフェルルールの屈折率・透過率が大切になる。クラディングモードとコアモードの再結合を防ぐためには、光ファイバの

◎特集

屈折率分布としてクラディング外周部分の屈折率を高くすることである^{12, 13)}。このような光ファイバの構造とジルコニアフェルールとを用いた場合、約 20dB 程度の減衰量であればコアとクラディングモードの干渉の影響は小さくなる。しかしながら、これ以上の減衰量あるいは短い CoDF を使う場合は、ジルコニアフェルールの屈折率が高いためにクラディングモードの影響が無視できなくなってくる。これは、光ファイバ(石英ガラス)の屈折率が約 1.45 であるのに対し、ジルコニアの屈折率は約 2.0 程度あるため、クラディングモードがフェルールの内側に反射してクラディングに閉じ込められてしまうからである(図 11)。一方、

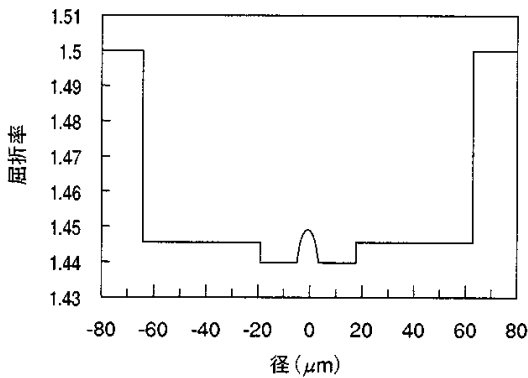


図 11 GCF を用いた場合の屈折率分布

結晶化ガラスフェルールを用いた場合は、その屈折率が約 1.5 と石英ガラスの屈折率とそれほど変わらないために、クラディングモードは CoDF の外側に放射され結晶化ガラスの中に染み込んでいき、結晶化ガラス中で散乱・消失していく。図 12 には、実装するフェルールを GCF とジルコニアと変えたときの 1310nm 帯の減衰量波長特性を示す。図 12 から明らかなように、GCF の場合の方がコアモードとクラディングモードの再結合による干渉の影響がほとんど無く減衰量が波長によって変化するような不安定な状態に無い事が分かる。

5 まとめ

結晶化後に線引き成形が行える新規な結晶化ガラスによって GCF が開発された。GCF は線引きすることでフェルールとして十分な内外径精度を達成することができるため生産性が高く、大幅な低価格化を実現することができる。また、被研磨特性が光ファイバに近く接続

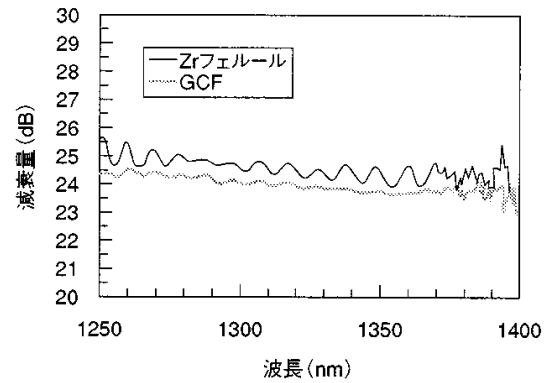


図 12 GCF と Zr フェルールの減衰量の違い

面の研磨が容易なため、光コネクタのアセンブリコストを低減させることも可能である。GCF を用いた光コネクタは種々の条件下で優れた光接続特性を有する他、クラディングモードによる干渉がほとんどないため固定減衰器用としても優れた特性を有する。GCF は今後、低価格で高機能なフェルールとして光通信の普及に寄与していくものと思われる。

[参考文献]

- 1) 坂本明彦 他, '97 信学会ソサエティ大会, C-3-53, (1997).
- 2) S. Mitachi *et al.*, *Glass Technol.*, **39** [3] 98, (1998).
- 3) Y. Takeuchi *et al.*, *IEEE Photonics Tech. Letters*, **9** [11] 1502 (1997).
- 4) R. Nagase *et al.*, *Electronics Letters*, **33** [14] 1243 (1997).
- 5) A. Sakamoto *et al.*, Proc.18th Int. Cong. Glass, **C6**, 62 (1998).
- 6) S. Yanagi *et al.*, IEICE Technical Report, **EMD99-28** (1999).
- 7) 廣瀬 潤 他, 98 信学会ソサエティ大会, C-3-54 (1998).
- 8) 廣瀬 潤 他, 98 信学会総合大会, C-3-25 (1998).
- 9) 坂本明彦, “新しいフォトニクス時代の材料とデバイス”, ティーアイシー, (2000) p.99.
- 10) 竹下潤治 他, 98 信学会総合大会, C-3-26 (1998).
- 11) L. A. Reith *et al.*, 12th Annual Fiber Optic Eng. Conf. 3, p.675 (1996).
- 12) Y. Takeuchi *et al.*, *Electronics Letters*, **33** [14] 1245 (1997).
- 13) 森下 裕一 他, 昭和電線レビュー, **49** [1] 33-36 (1999).