

二段階方式によるファイバグレーティングの温度補償

横内 孝史[†] 藤田 圭生^{††} 増田 裕二^{††} 中川 清[†]
 須崎 嘉文[†] 江島 正毅[†] 水谷 康男^{†††} 山内 誠^{†††}
 木村 雅則^{†††} 木村 進^{†††}

Improved Temperature Compensation for Fiber Bragg Grating by Two-Step Mechanism

Takashi YOKOUCHI[†], Keio FUJITA^{††}, Yuji MASUDA^{††}, Kiyoshi NAKAGAWA[†],
 Yoshifumi SUZAKI[†], Seiki EJIMA[†], Yasuo MIZUTANI^{†††}, Makoto YAMAUCHI^{†††},
 Masanori KIMURA^{†††}, and Susumu KIMURA^{†††}

あらまし ファイバブラッググレーティング (FBG) は、その反射波長に約 10 pm/°C の正の温度依存性を示す。温度による波長変動は、波長多重通信 (WDM) システムでは大きな問題となる。この対策として、FBG 自身にマイナスの熱膨張を与えることにより波長変動を抑える方式が提案されてきた。今後ますます高密度化されるであろう WDM に対応するには、更に高精度な温度補償法が必要である。本論文では接着剤の弾性を利用した二段階方式による温度補償法を提案した。実験の結果、従来の方式の 1/3 以下、つまり -20°C から +80°C 間において波長変動を 8 pm に抑えることができた。

キーワード ファイバブラッググレーティング, 波長多重通信 (WDM), 温度補償, 接着剤の弾性

1. ま え が き

インターネットの伸展に伴いネットワークトラヒックは着実に増えている。この情報量の伸びに対応した伝送容量増加を可能にする技術の一つが波長多重 (WDM: wavelength division multiplexing) 光通信システムである。現在実用化されている WDM では、1 チャンネル 10 Gb/s、160 チャンネルクラスのものが最速である [1]。今後 40Gb/s にアップされることが予想され、チャンネル間隔は 100 GHz に設定される。このとき各チャンネルのメインローブは中心波長から ±40 GHz に広がる。隣のチャンネルとの波長差は約 0.8 nm であ

り、波長変動許容値は約 ±80 pm となる。このような光ネットワークでは、数十 GHz の周波数の違いをフィルタリングする光デバイスが不可欠である。この機能を実現する素子として、光ファイバのコアに周期的な屈折率変化構造を形成したファイバブラッググレーティング (FBG: Fiber Bragg Grating) が注目されている。FBG はブラッグ条件を満たすブラッグ波長 λ_B のみを反射し、それ以外の波長の光は透過させる。 λ_B は、コアの実効屈折率 n と屈折率変化構造の周期 Λ を用いて、

$$\lambda_B = 2n\Lambda \tag{1}$$

で与えられる。

FBG は、光ファイバそのものへの形成であるため構造がシンプルで損失が少ない。しかし、石英ガラスがもつ屈折率の正の温度依存性に起因して、温度変化により反射波長が変動することが知られている。 λ_B は屈折率 n だけでなく周期 Λ にも依存しているので、 n の変化を Λ の変化で相殺することができる。この原理

[†] 香川大学工学部, 高松市
 Faculty of Engineering, Kagawa University, 2217-20 Haya-
 shimachi, Takamatsu-shi, 761-0396 Japan

^{††} 香川大学大学院工学研究科, 高松市
 Graduate School of Engineering, Kagawa University, 2217-
 20 Hayashimachi, Takamatsu-shi, 761-0396 Japan

^{†††} 伸興電線株式会社, さぬき市
 Shinko Electric Wire Co., Ltd., 1298-12 Shido, Shido-cho,
 Sanuki-shi, 769-2101 Japan

を利用した温度補償機構が、いくつか提案されている。Δに負の温度依存性を与えるために、負熱膨張材料を利用した負膨張材料方式や、膨張率の異なる複数の材料を用いたハイブリッド方式である。このような温度補償機構を用いることにより、反射波長の温度依存性は1 pm/°C以内に抑制することが可能であると報告されている[2]。本論文では、このnの変化をΔで相殺する手法について新たな機構を提案し、従来より報告されている方式に比べて良好な温度補償ができたことを報告する。

2. FBG 反射波長の温度依存性

まず、通常用いられるFBGの無補償時における反射中心波長の温度依存性を測定した。使用したFBGは、あらかじめ水素ロードしておいたコーニング社製光ファイバSMF-28に位相マスク法を用いて、KrFエキシマレーザー光を照射して製作したものである。製作したFBGには、実験中の経時変化を抑えるために熱処理を施した。FBGの反射中心波長は+20°C時において1548.540 nm、FBG全長は15 mmである。

図1の構成により、無補償状態におけるFBGの温度変化による反射中心波長の変動を測定した。広帯域光源からの光波をFBGを形成したファイバに入射し、その透過した光波のスペクトルを光スペクトルアナライザで観測した。透過スペクトル波形の減衰帯域中央を反射中心波長とした。スペクトルアナライザの分解能は、2 pmであった。温度変化には恒温槽を用いた。恒温槽の温度設定精度は±0.3°Cである。通常、FBGの使用環境として考えられる-20°Cから+80°Cの温度範囲にわたって20°C間隔で温度を変化させ、中心波長を測定した。それぞれの温度での波長測定は30分以上その温度を保持した後、スペクトルアナライザを用いて行った。測定結果を図2に示す。+20°C時の波長値(1548.540 nm)を基準として、そこからのシフト量をプロットしている。

-20°Cから+80°C間の波長変動量は960 pmであっ

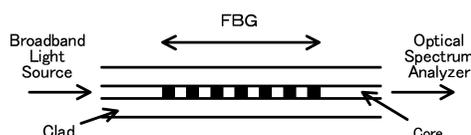


図1 波長変動測定構成

Fig.1 Configuration of measurement for central reflection wavelength of FBG.

た。これより、本研究で用いたFBGのこの温度帯における平均シフト量9.6 pm/°Cを得た。これは従来の報告(約10 pm/°C)とほぼ一致している[3]~[5]。

図2からの読み取りは困難であるが、測定データを詳しく見ると温度依存性は決してリニアなものでもなく、温度上昇につれて波長変動が大きくなっていった。これは、光ファイバの材料である石英ガラスの屈折率及び熱膨張係数の温度特性が非線形な特性を示すことに起因する[3],[6]。反射中心波長の温度依存性を9.6 pm/°Cと仮定し温度補償した場合の計算機シミュレーション結果を図3に示す。FBG温度依存性の非線形性のため、低温部と高温部では十分な補償がなされない[3]~[5]。高精度の補償を行うには、FBG温度依存性を直線ではなく曲線としてとらえた補償システムを構築する必要があると考える。

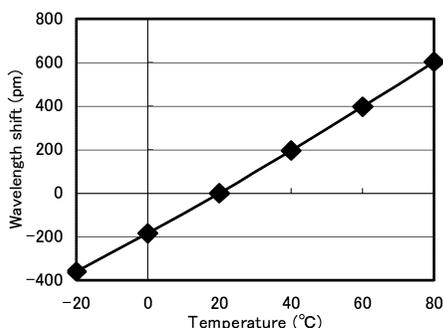


図2 無補償時温度依存性

Fig.2 Temperature dependence of central reflection wavelength of FBG without compensation.

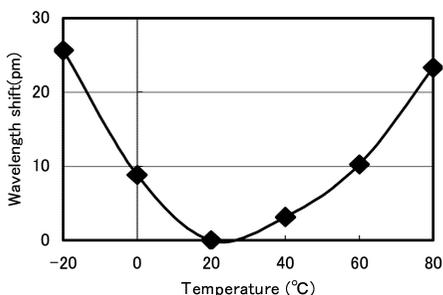


図3 平均シフト9.6 pm/°Cで直線的に波長変動すると仮定して補償した場合のシミュレーション結果

Fig.3 Simulation result on the assumption that the wavelength shift varies linearly with the rate of 9.6 pm/°C.

3. 従来の手法による温度補償法の評価

適切な膨張係数をもつ負膨張材料にFBGを形成したファイバを貼り付けることで、環境温度変化による材料の熱膨張を直接FBGの Δ に反映させ、波長変動を抑える方法が提案されている。本論文ではこの手法を負膨張材料方式と呼ぶ。負膨張材料としては、結晶化ガラス・液晶ポリマなどが提案されている。我々は、N社製負膨張基板(膨張係数 -7.0×10^{-6})とO社製負膨張基板(膨張係数 -7.2×10^{-6})を利用して実際に負膨張材料方式の特性評価を行った。それぞれの材料にFBGを貼り付け、前者を試料A(Sample-A)、後者を試料B(Sample-B)とした。両試料の実装を図4に示す。ファイバの貼付けにはエポキシ系UV硬化タイプの接着剤を用いた。試料A及び試料Bで用いた負膨張材料はFBGの温度補償も目的の一つとして製造・販売されているものであり、メーカー公表のデータによれば、両材料とも -20°C から $+80^{\circ}\text{C}$ 間の熱膨張特性は直線的である。無補償時温度依存性測定と同様に、温度変化による波長変動を測定した。測定結果を図5に示す。図は、 $+20^{\circ}\text{C}$ 時の波長値を基準として、そこからのシフト量をプロットしている。両試料とも、 -20°C から $+80^{\circ}\text{C}$ 間の波長変動は約40pmであった。ここで行われた温度補償は図3にシミュレーション結果を示した直線的な補償に相当しており、実験結果は、低温部及び高温部で十分な補償がなされおらずシミュレーション結果と一致している。

一方正の熱膨張係数を有する2種類の材料を組み合わせた機構にFBGを装着し、各材料の温度変化による膨張量の違いを利用して Δ を適切な値にする温度補償法も提案されている。本論文では、この手法をハイ

ブリッド方式と呼ぶ。この方式の特性を評価するため、図6に示す機構を実際に製作した。低膨張材料として石英ガラス(膨張係数 0.5×10^{-6})、高膨張材料としてアルミニウム(膨張係数 23.1×10^{-6})を使用し、各部分は負膨張材料方式で用いたUV硬化接着剤を使って接着固定した。図のようにアルミニウム片2個を接着点1及び接着点4で石英ガラス台に固定し、接着点2及び接着点3でFBGをアルミニウム片に固定している。環境温度が変化するとき、石英ガラスよりアルミニウムの熱膨張が大きいため、接着点1~接着点4間に位置するFBGにはマイナスの熱膨張が与えられる。この原理によって反射波長の変動を抑制しようとする機構である。最適な温度補償を実現するためには、各材料の配置や接着点を適切に設計することが必要である。前述の温度依存性測定と同様に温度変化による波長変動を測定した結果を図7に示す。この手法でも波長変動は -20°C から $+80^{\circ}\text{C}$ の間で約40pmであり、負膨張材料方式同様、低温部及び高温部で十分な補償がな

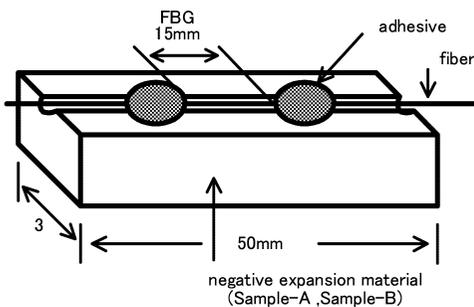


図4 負膨張材料方式

Fig. 4 Configuration of temperature compensation with negative expansion material.

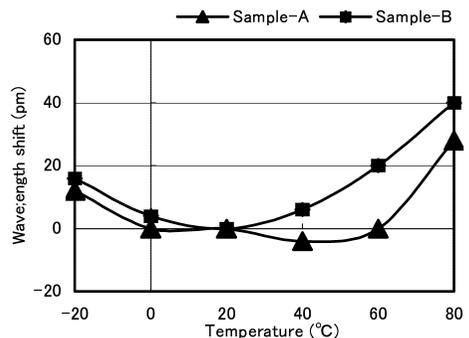


図5 負膨張材料方式結果

Fig. 5 Result of temperature compensation with negative expansion material.

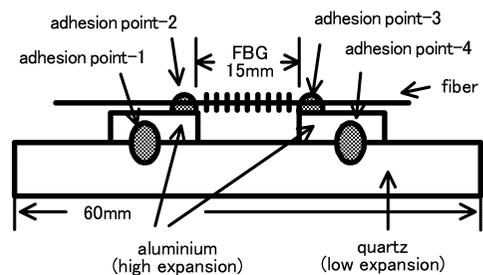


図6 ハイブリッド方式

Fig. 6 Configuration of temperature compensation with two different materials (Hybrid type).

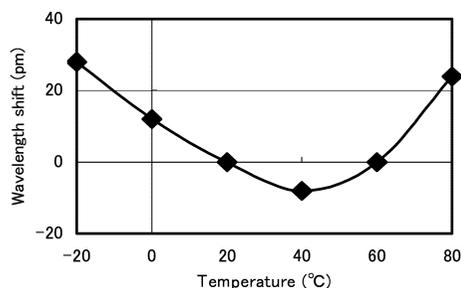


図7 ハイブリッド方式結果

Fig.7 Result of temperature compensation with two different materials (Hybrid type).

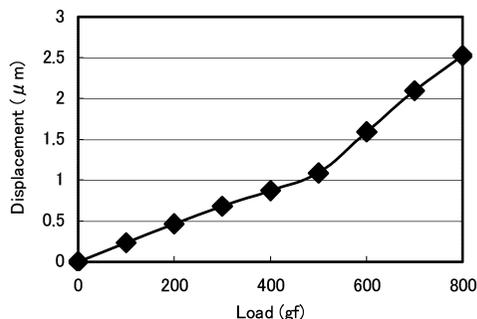


図8 荷重-変位特性

Fig.8 Displacement of the polymer adhesives with load.

れなかった．ハイブリッド方式は2種類の材料の伸縮特性を利用しているが，負膨張材料方式同様，温度補償が線形的であるため，実験結果は図3のシミュレーション結果と一致した．

4. 使用した接着剤の弾性特性評価

我々が提案する温度補償機構では，接着剤の特性が大きな役割を果たすので，本研究で使用した接着剤の弾性復元特性を測定した．測定は図6のハイブリッド方式の機構における，石英ガラス台上に接着した左側のアルミニウム片に，左側から荷重を印加することで行った．印加した荷重により接着点1がひずみ，接着点2がFBG側へ変位する．その結果，FBGの Λ が小さくなり，式(1)に示した関係から反射中心波長は短くなる．そこで，一定荷重を印加したときの反射中心波長を測定することで，あらかじめ求めておいた n を用いて Λ の変化量を求めることができる．得られた Λ の変化量とFBGの層数から接着点2の変位量を算出した．これは接着点1に与えたひずみ量である．この方法により印加した荷重による接着点1の弾性特性を評価した．

印加した荷重と接着点2の変位量の関係を図8に示す．図より接着点1の荷重-変位関係は，荷重が0~500 gfの範囲で線形であり，荷重と変位量は比例している．また，0~800 gfの範囲において，荷重を解放したときにはもとの位置に戻ることを確認した．0~500 gfの範囲での荷重印加を繰り返し行ったが，繰返し印加による弾性特性の劣化は見られなかった．したがって，0~500 gfの荷重範囲においては，接着点1の接着剤ポリマは線形弾性体とみなすことができると考えられる．本研究で製作した機構におけるすべての接着ポイントは，直径2 mm（厚さ約0.1 mm）とした．

したがって，図8のデータは接着点1の測定結果ではあるが，他の接着ポイントもほぼ同様の特性をもつものと推定される．

5. 二段階方式による補償

シミュレーション及び既存手法の実験結果は，FBGの温度依存性を1次関数にあてはめた直線的な補償方法では，波長変動を100°C間で25 pm以下に抑えることは困難であることを示した．直線的な補償では，低温部で補償量が大きすぎ，高温部でその量が小さすぎることが原因である．したがって更に高精度な補償を行うには，温度依存性を直線ではなく曲線としてとらえた非線形な補償を行う必要がある．温度変化により所望の非線形性で伸縮する材料を開発・発見することは容易でないと考えられる．そこで我々は，温度依存性を低温部（-20~+20°C）と高温部（+20~+80°C）に分けて別々に1次近似し，非線形特性を2種類の線形性で補償する方式を提案する．図2のカーブを低温部と高温部に分けて1次近似すると，9.0 pm/°C（低温部）及び10.0 pm/°C（高温部）の傾きが得られる．それぞれに対応する補償を行うには，温度帯により補償係数が変わるメカニズムが必要である．提案する機構を図9に示す．ハイブリッド方式の機構にアルミニウム片を1片付加したものである．アルミニウムの熱伸縮と接着剤ポリマの弾性を利用することにより，2種類の補償係数を切り換えて機能させることが可能である．付加したアルミニウム3は，石英ガラス台にのみ接着し，隣り合わせたアルミニウム1とは接触しているが接着はしていない．接着剤はこれまで同様UV硬化接着剤を使用し，接着作業は+20°Cで行った．

ハイブリッド方式構成部分により，全温度範囲（-20~+80°C）にわたって傾き9.0 pm/°Cを直線的

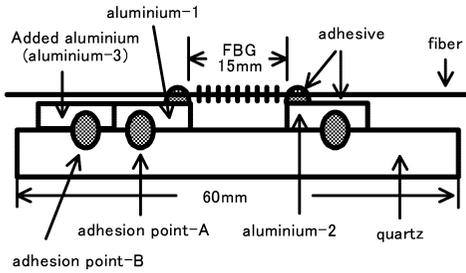


図9 二段階方式による補償構成
Fig. 9 Configuration of the two-step compensation method.

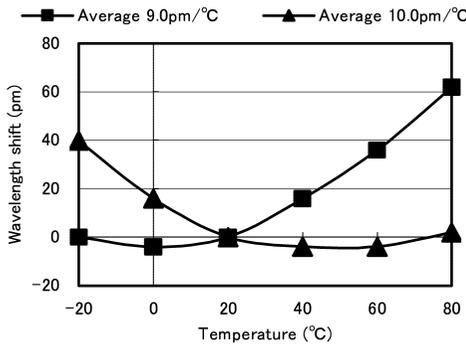


図10 平均シフトが9.0 pm/°C, 10.0 pm/°Cで直線的に波長変動すると仮定して補償した場合のシミュレーション結果
Fig. 10 Simulation results on the assumption that the wavelength shift vary linearly with the rate of 9.0 pm/°C and 10.0 pm/°C.

に補償することとする。ここでは、これを第1段目の補償と呼ぶ。高温時(+20~+80°C)には、付加したアルミニウム3とアルミニウム1との熱膨張による反発で接着点AがFBG側へひずむため、第1段目の補償に新たな補償量加わる。アルミニウム3の動きによる追加補償を第2段目の補償と呼ぶ。接着点Aから接着点Bまでの長さを変えることで第2段目の補償量を調整し、傾き10.0 pm/°Cの補償を行うこととする。高温時にはひずむ接着点Aは、温度下降とともに復元し、+20°C以下では熱収縮によりアルミニウム3とアルミニウム1の反発がなくなるため、外力を受けない。したがって、低温時は第1段目の補償のみとなる。接着剤ポリマの弾性範囲内であれば、环境温度+20°Cを境に2種類の温度補償機構が切り換わって動作することになる。

温度変化によるFBG反射中心波長が9.0 pm/°C及び10.0 pm/°Cで直線的に変動すると仮定し、それぞ

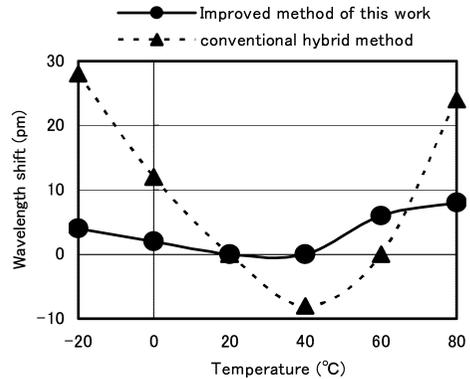


図11 改良した補償法による実験結果
Fig. 11 Experimental result by the proposed compensation method.

れ直線的に温度補償を行った場合のシミュレーション結果を図10に示す。我々が提案する手法により、-20°Cから+20°Cまでの温度範囲では9.0 pm/°Cを補償するカーブをとり、+20°Cから+80°Cの温度範囲では10.0 pm/°Cを補償する機構を機能させれば、100°C間で波長変動を約6 pm程度に抑えることが可能であると読み取れる。図より、+80°C時の波長変動をゼロに抑えるためには第1段目の補償に加えて、約60 pm程度波長を短くする第2段目の補償が必要であることが分かる。この補償は、4. で用いた計算方法により、FBG接着部位を内側に約0.58 μm移動させる外力と同じであると算出できる。これは図8より、アルミニウム1に約250 gfの荷重を加えることに相当する。前述の接着剤ポリマ荷重印加試験結果より、この方式は実現可能なものであると考えられる。また、第2段目の補償は、アルミニウム片の直線的な膨張特性と図8の荷重-変位曲線の直線性から、ほぼ直線的に変化するものと思われる。したがって+20°Cから+80°C間において、第1段目の補償と第2段目の補償を合わせた補償は、ほぼ傾き10.0 pm/°Cをゼロにするカーブをとっているものと推定される。

図9に示した温度補償機構を用いて、提案した方式の性能評価を行った結果を図11に示す。-20°Cから+80°C間における波長変動は8 pmであった。図には、図7に示した従来のハイブリッド方式で得られた温度補償の結果も示している。従来の方式に比べ、良好な温度補償が実現された。図10のシミュレーション結果から、波長変動6 pm程度の温度補償が得られることを期待したが、実際は8 pmであった。これは、製作した機構の不完全さに起因していると考えられる。

FBGを固定するアルミニウム片と第2段目の補償を実現させる追加アルミニウム片間の初期接触圧力を最適に設定できれば、温度補償の性能は向上すると考えられる。しかし実際には、接触圧力を制御して石英ガラスに固定することは困難であった。このシステムで、今回アルミニウム片を付加しなかったもう片方の側へも同様のシステムを構築し負荷を分散すれば接着剤ポリマへの負担が軽減され、機構の寿命や信頼性が向上すると考えられる。

6. むすび

本論文で提案した接着剤の弾性を利用した二段階の温度補償法は、ハイブリッド方式にわずかに手を加えただけの構造であるが、従来の補償方式と比べ、100°C間の波長変動量を1/3以下、8 pmに抑えることができた。これは、予想される許容値約 ± 0.08 nmを大きくクリアしている。今後ますます高密度化されるであろうWDMにも対応可能である。本論文で提案した機構においては、新たな荷重を与えるアルミニウム片は、FBGを固定するアルミニウム片と最適な接触強度(圧力)を保った状態で、石英ガラス台に接着固定することが必要である。安定して高精度な温度補償機構を製作するためには接触強度の制御を含めた工程が必要である。

また、接着剤弾性の経年変化については今のところ、長期間にわたる信頼性を確認していない。今後、更にシステムの改良を考えるとともに信頼性の確認も行っていく予定である。

文 献

- [1] 江村克己, “波長多重光通信技術,” 光学, vol.32, no.1, pp.46-51, Jan. 2003.
- [2] 井上 亨, “ファイバグレーティングの作製とデバイス応用,” 光学, vol.32, no.5, pp.317-319, May 2003.
- [3] G. W. Yoffe, P. A. Krug, F. Ouellette, and D. A. Thorncraft, “Passive temperature-compensating package for optical fiber gratings,” Appl. Optics, vol.34, no.30, pp.6859-6861, Oct. 1995.
- [4] 井上 亨, 岩島 徹, 酒井和明, 伊藤達也, 角井素貴, 榎本正, 金森弘雄, “WDM伝送用ファイバグレーティングの開発,” SEIテクニカルレビュー, vol.152, pp.30-35, March 1998.
- [5] 田村充章, 浦野 章, 井上 亨, 斎藤大輔, 稲井麻紀, 伊藤達也, “温度補償型ファイバグレーティングの開発,” 信学技報, OPE2000-1, May 2000.
- [6] 葛生 伸, “石英ガラスの熱膨張,” 石英ガラスの世界, p.139, 工業調査会, 東京, 1995.

(平成16年2月2日受付, 4月13日再受付)



横内 孝史 (正員)

1986法政大・法・法卒。1999より香川大学工学部技術職員。主として光通信用ファイバデバイスに関する研究に従事。



藤田 圭生

2003香川大・工・材料創造卒, 現在, 同大学院修士課程在学中。光通信用ファイバデバイスに関する研究に従事。



増田 裕二

2003香川大・工・材料創造卒, 現在, 同大学院修士課程在学中。光通信用ファイバデバイスに関する研究に従事。

中川 清 (正員)

1986神戸大学大学院工学研究科修士課程了。1987神戸大工学部助手, 2001より香川大学工学部助教授。博士(工学)。主として光学情報処理・応用光学に関する研究に従事。応用物理学会, 日本光学会各会員。



須崎 嘉文 (正員)

1987阪大大学院工学研究科修士課程了。1988高松工業高等専門学校講師, 1997同校助教授, 2000より香川大学工学部助教授。工学博。主として光通信用ファイバデバイスに関する研究に従事。精密工学会, 応用物理学会, 日本材料学会各会員。



江島 正毅

1973米国コロンビア大学大学院理工学部博士課程了。同年米国プリンストン大学プラズマ研究所ポスドク, 1974米国ゼネラルアトミック社, 1987信越化学工業(株)精密機能材料研究所, 2000より香川大学工学部教授。Ph.D.。主として光通信用デバイス及び素材に関する研究に従事。応用物理学会, 米国物理学会, 米国光学会, 日本材料学会各会員。



水谷 康男

1986東海大・工・応用物理卒．同年伸興電線(株)入社，2002より技術部主任．主として光通信用ファイバデバイスに関する研究に従事．



山内 誠 (正員)

2002香川大・工・知能機械システム卒．同年伸興電線(株)入社，現在技術部所属．主として光通信用ファイバデバイスに関する研究に従事．



木村 雅則

1995香川職業能力開発短期大・制御技術卒．同年伸興電線(株)入社，現在製造部所属．主として光通信用ファイバデバイスに関する研究に従事．



木村 進

1972横浜国大・工・電気化学卒．1984伸興電線(株)入社，2002より同社技術部長．主として光通信用ファイバデバイスに関する研究に従事．