

講義

光ファイバとその応用—VIII

光ファイバ応用部品 (1) —単一モード ファイバ型光デバイス

保立 和夫

東京大学先端科学技術研究センター 〒153 東京都目黒区駒場 4-6-1

(1990年4月5日受理)

Optical Fiber and Its Applications—VIII

Fiber Optic Devices (1) —Single-Mode Fiber-Optic Devices

Kazuo HOTATE

RCAST, Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo,
4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153

1. はじめに

光ファイバは、低損失で広帯域な光伝送デバイスとして開発されたものであるが^{1-3,88-90)}、これを加工することで、さまざまな光機能部品を構成することができる。本講義では、本稿から3回にわたってとくに単一モード光ファイバを加工して作られるファイバ型光機能デバイスに関して、その特性および応用例について概説する。

光ファイバ通信^{1,2)}、光ファイバセンサー³⁾、あるいは光ファイバ情報処理システムにおいて、光波の分岐・合流、偏波の選択・制御、各種変調、波長フィルタリングなどが重要となる。これらの光波制御機能を実現するデバイスを光ファイバを加工して作製できれば、伝送路である光ファイバとの接合が容易になり、その際の損失の低減にも役立つ。すでに上記各機能を実現する数多くのデバイスが研究・開発され、実用化も進んでいる³⁻¹⁰⁾。

今回は光ファイバ応用部品の第1回目として、これら部品の特性を概説し、次回以降はその応用例を紹介する。筆者自身の興味から、応用例の紹介は光センシング分野にその重心を置くことをお断りし、お許しをいただきたい。

2. 単一モードファイバ型光デバイスの研究・開発例

表1に、これまで研究・開発された単一モードファイバ型光デバイスをまとめた。このように、方向性結合器、ポラライザ、デポラライザ、位相変調器、周波数シフタ、波長板、偏波状態制御デバイス、波長フィルタなど、多くの光機能デバイスの開発が見られる。

従来のバルク型光デバイスでは、光をいったんファイバの外部に出して平行光とした後に制御を加え、再度ファイバに導入する必要があった。光ファイバ型のデバイスなら、そのリードファイバを伝送用のファイバに融着接続すればよい。最近の接続装置の特性改善の結果、損失も0.1 dB以下にできる¹⁰⁾。後述するように、変調デバイスの周波数特性等、導波路型の光デバイスの特性に劣るものもあるが、接続損失が少ないという上記の利点は、多くの応用において本デバイスの有用性を引き出している。通常の単一モード光ファイバはもちろん、偏波維持光ファイバ、絶対単一偏波光ファイバ¹¹⁾も活用されている。

3. 光ファイバ方向性結合器

単一モードファイバ型光デバイスで、最も多くの研究が蓄積され、実用化が進んでいるのが方向性結合器で

表 1 単一モードファイバ型光デバイスの研究・開発例

分 類		特 性 例 等
方向性結合器	単一モード光ファイバ	研磨型 <ul style="list-style-type: none"> ● 損失: 0.005 dB¹⁵⁾ ● 100% 結合状態での未結合成分: -50 dB¹⁴⁾ ● 後方散乱: -75 dB¹⁴⁾ ● 温度依存性: 0.2%/度¹³⁾ ● 偏波依存性: -30 dB¹⁴⁾ ● 結合度可変も可能¹⁴⁾ ● 実用化例多数
		融着延伸型 <ul style="list-style-type: none"> ● 損失: 0.05 dB³⁾ ● 100% 結合状態での未結合成分: -30 dB¹⁸⁾ ● 温度依存性: 0.5% (-20~100 度)¹⁷⁾ ● 偏波依存性: -23 dB¹⁷⁾ ● 研磨型に比べ安価 ● 実用化例多数 ● 自動製作装置¹⁶⁾
	偏波維持光ファイバ	研磨型 <ul style="list-style-type: none"> ● 損失: 0.5 dB²¹⁾ ● 偏波クロストーク: -42~-35 dB²¹⁾ ● 実用化例あり
		融着延伸型 <ul style="list-style-type: none"> ● 損失: 0.03~0.1 dB²³⁾ ● 偏波クロストーク: -32 dB²³⁾ ● 損失 0.5 dB で商品化 ● 自動製作装置¹⁶⁾
特殊方向性結合器	波長依存カプラ	<ul style="list-style-type: none"> ● 結合率の波長依存性により波長多重用合・分波器 (1.3/1.5 μm で 43 dB/30 dB のアイソレーション³¹⁾ ● 異なる分散特性のファイバによる構成で 13.6 nm の結合波長域³³⁾ ● 損失 0.25 dB で商品化
	波長無依存カプラ	<ul style="list-style-type: none"> ● 位相整合条件を外して 3 dB 結合時に小さな波長依存性を実現^{34,35)} ● 材料の分散特性を活用する提案
	ポラライジングビームスプリッタ	<ul style="list-style-type: none"> ● 長い結合長のカプラにおける結合度の偏波依存性の利用³⁶⁻³⁸⁾ ● 研磨による偏波維持光ファイバの応力解除の利用 (損失: 0.1 dB, 消光比: 25 dB)^{39,40)}
	3×3 カプラ	<ul style="list-style-type: none"> ● 干渉系構成時に入力位相 θ に対し, $\sin \theta$ 成分と $\cos \theta$ 成分を形成できる⁴¹⁻⁴⁵⁾
偏光子	複屈折ファイバコイル	<ul style="list-style-type: none"> ● 最初の実験 (損失: 2 dB, 消光比: 62 dB)⁴⁶⁾ ● 偏平ファイバの利用 (損失: 0.25 dB, 消光比: 45 dB)⁴⁶⁾ ● 解析による特性把握⁴⁷⁾ ● 実用化例あり
	金属装荷	<ul style="list-style-type: none"> ● 最初の提案 (消光比: 14 dB)⁵¹⁾ ● バッファー層の導入 (損失: 1 dB, 消光比: 45 dB⁵²⁾)
	複屈折結晶装荷	<ul style="list-style-type: none"> ● 複屈折結晶の利用 ● 損失: 数%⁵⁴⁾ ● 消光比: 60 dB 以上⁵⁴⁾ ● 90 dB の消光比の報告もある⁵⁵⁾
	ラミポール	<ul style="list-style-type: none"> ● 損失: 0.2 dB⁶⁰⁾ ● 消光比: 50~60 dB⁶⁰⁾ ● アイソレータへの応用⁶¹⁾
デポラライザ	<ul style="list-style-type: none"> ● 複屈折光ファイバの直交 2 偏波モード間の遅延を用いたデバイス ● 2本のファイバの偏波軸を 45 度だけ傾けて接続⁶²⁻⁶⁵⁾ 	
位相変調器	伸縮型	<ul style="list-style-type: none"> ● PZT シリンドラに巻かれたファイバの伸縮 ● PZT の共振特性による周波数特性 (平坦部: ~数 kHz, 共振周波数: 数百 kHz)⁴⁾
	圧縮型	<ul style="list-style-type: none"> ● ファイバを圧縮することで, 伝播定数を変える ● 450 MHz での動作例⁶⁸⁾ ● PZT⁶⁷⁾, ZnO⁶⁸⁾ を用いる
周波数シフタ	超音波の利用	バルク波 <ul style="list-style-type: none"> ● 入力電力: 2.25 W⁶⁹⁾ ● 効率: 数%⁶⁹⁾ ● 不要側帯波抑圧比: 20 dB⁶⁹⁾ ● キャリア抑圧比: 20 dB⁶⁹⁾ ● 周波数シフト: 15 MHz⁶⁹⁾ ● 偏波維持光ファイバの利用
		表面波 <ul style="list-style-type: none"> ● 効率: 95% (入力電力: 25 W, 周波数シフト: 4.4 MHz, キャリア抑圧比: 25 dB, 不要側帯波抑圧比: 40 dB)⁷⁰⁾ ● 櫛の歯状電極による表面波⁷¹⁾ ● 固定周期構造による位相整合⁷²⁾ ● 偏波維持光ファイバの利用
	2モードファイバ	<ul style="list-style-type: none"> ● 2モードファイバの LP01 モードと LP11 モード間の結合を利用⁷³⁾ ● キャリア抑圧比: 15 dB⁷³⁾ ● 不要側帯波抑圧比: 35 dB⁷³⁾ ● 入力電力: 0.25 W ● 周波数シフト: 8 MHz
位相変調器の利用		<ul style="list-style-type: none"> ● 偏波維持光ファイバと二つの位相変調器の利用⁷⁵⁾ ● 周波数シフト: 5 MHz ● 不要側帯波抑圧比: 20 dB⁷⁵⁾
波長板/偏波状態調整器		<ul style="list-style-type: none"> ● 曲げによるファイバ異方性の活用による波長板⁷⁶⁾ ● $\lambda/2$ 板, $\lambda/4$ 板⁷⁶⁾ ● 偏波状態の制御⁷⁷⁻⁸⁰⁾
波長フィルタ	回折格子型	<ul style="list-style-type: none"> ● 研磨型ファイバカプラの要素と回折格子を活用 ● 波長可変反射型フィルタ (効率: 88%, 分解能: 0.7 nm, 掃引幅: 65 nm)⁸¹⁾ ● 効率: 92%⁸²⁾ ● フォトリソト回折格子⁸³⁾ ● GeO₂ の紫外線露光による回折格子のファイバ内直接形成^{84,85)} ● モアレ回折格子による高分解能 (0.04 nm)⁸⁶⁾
	ファイバカプラ型	<ul style="list-style-type: none"> ● 光ファイバカプラを縦列接続することで周期的透過特性のフィルタ⁸⁷⁾

ある。結合率 50% のいわゆる 3 dB カプラのみならず、任意の結合率のものが実現されているほか、さまざまな波長依存性をもたせたもの、偏波維持特性をもつもの、あるいは偏波ビームスプリッタとして機能するものなどがある¹¹⁾。

図 1 に示したように、2本の単一モード光ファイバのコアを数 μm に近接させると、一方のファイバ中を伝播する光波のエネルギーは徐々に他方へ移行してゆく。2本のファイバが同一であれば、適当な間隔、適当な長さにより近接させることで、100% のエネルギーを他方へ移すこともできる。これら間隔、長さの調整によりいろいろな結合度の光ファイバカプラが得られる。

二つのコアの近接法として、図 1 (a) のような研磨型と、図 1 (b) のような融着延伸型とがある。前者では石英のブロックに弧を描いた溝を刻み、ここにファイバを埋め込んでクラッド部分を研磨する¹²⁾。これを二つ合わせるとファイバカプラになる。表 1 にまとめたように、結合率の温度依存性 0.2%/度¹³⁾、後方散乱 $-70 \text{ dB}^{14)}$ 、100% 結合時の未結合成分 $-50 \text{ dB}^{14)}$ というきわめて良好な特性が発表されている。最も重要なパラメータである損失としても、0.005 dB という極限的な値も見られる¹⁵⁾。本方式では、光波の伝播方向と垂直に二つのブロックをスライドさせることで、容易に結合度を変化でき¹⁴⁾、光回路システムを研究・開発する上で有効なデバイスとなる。融着延伸法は2本のファイバを寄り添わせ、加熱・延伸することで細径化しつつコアを近接させる¹³⁾。細くし過ぎると、光がカプラの外部に漏れ、損失の増大や温度特性等の劣化を招く。現在では、図 2 に示したような自動製作装置が構成され、歩留り、特性とも向上している¹⁶⁾。特性例は、表 1 に示したとおりである^{17,18)}。以上はいずれも通常の単一モード光ファイバで作られるもので、結合度などの偏波依存性¹⁹⁾は少ない。研磨型はとくにそうである¹⁴⁾。

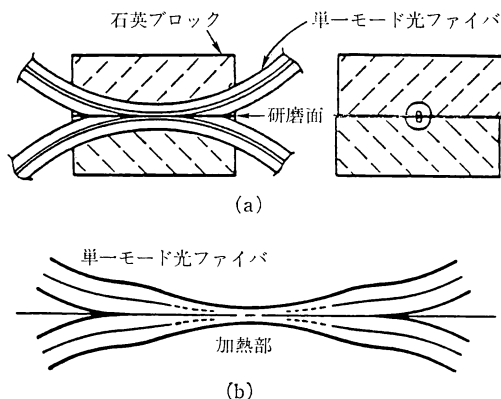


図 1 光ファイバカプラの原理と製造方法
(a) 研磨型、(b) 融着延伸型

る^{17,18)}。以上はいずれも通常の単一モード光ファイバで作られるもので、結合度などの偏波依存性¹⁹⁾は少ない。研磨型はとくにそうである¹⁴⁾。

偏波維持光ファイバを用いた光カプラも開発され²⁰⁻²⁵⁾、研磨型²⁵⁾、融着延伸型^{16,23)}ともに実用化されている。このカプラでは、結合部分で生じる不要偏波成分をどれだけ抑圧できるかが重要なファクタとなる。この偏波クロストークの低減には、2本の偏波維持光ファイバの偏波軸を並行にすることが重要で、顕微鏡でファイバ内の構造を見る方法等^{10,25,26)}が開発されているほか、特殊な断面形状をもった光ファイバの利用もある^{27,28)}。融着延伸法では、図 2 と同様な自動製作装置が実用化されている¹⁶⁾。カプラ断面中の応力分布²⁹⁾や、光波結合の詳細な理論的検討³⁰⁾も進み、作製条件の洗い出しにも進展が見られる。

このほか、表 1 に示したような特殊光カプラもある。カプラの結合度は、一般に使用波長依存性をもつ³¹⁾。これを活用して、たとえば、 $1.3 \mu\text{m}$ の光は結合し、 $1.5 \mu\text{m}$ の光は結合しないといった特性を与えることができる³¹⁾。これは、光通信等で重要な、波長多重技術における合・分波器となる。上述のように、2本の光ファイバが同一のとき 100% の結合が達成される。これは2本の光ファイバを伝播するモードの位相定数が同一であるという条件 (位相整合条件) に対応し、逆に位相定数差があると結合は大きくはなれない。2本の光ファイバの分散特性 (上記位相定数の波長依存性) に違いをもたせ、特別な波長でのみ位相整合がとれるようにして^{32,33)}、半値全幅が 13.6 nm の波長選択カプラを実現した例もある³³⁾。

結合度は波長に対してはほぼ余弦関数的に変化する。位相整合条件を適当に外すことにより、その最大値を 50%

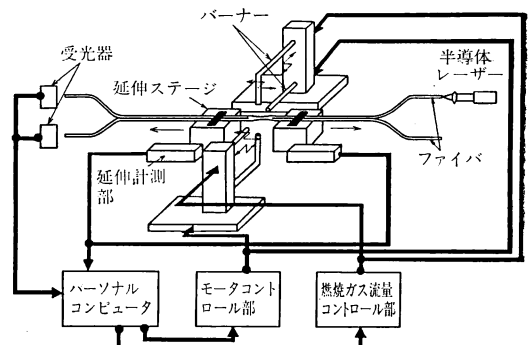


図 2 融着延伸型光ファイバカプラの自動製作装置¹⁶⁾

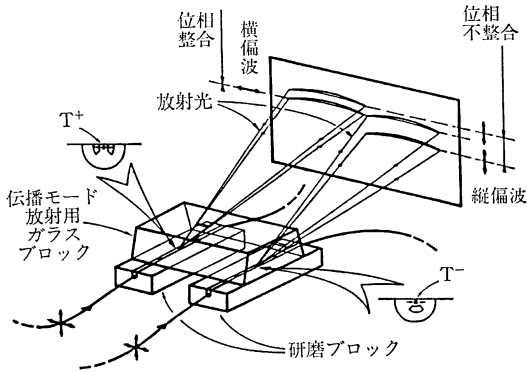


図3 端面研磨された偏波維持光ファイバ中の偏波モードが示す伝播定数の研磨面依存性を利用した偏波ビームスプリッタの原理説明図⁴⁰⁾ 横偏波でのみ位相整合がとれている

に設定することもできる。こうして作られる 3 dB カプラでは、結合度の波長依存性を小さくできる³⁴⁾。これが表 1 に示した波長無依存カプラである^{34,35)}。

カプラにおいて、たとえば縦偏波が結合し、横偏波は透過するならば、これは偏波ビームスプリッタとなる。光ファイバカプラでこれも実現されている³⁶⁻⁴⁰⁾。図3は最近の発明である^{39,40)}。応力付与型の偏波維持光ファイバの偏波軸のうち、長軸方向、および短軸方向に並行な面で研磨した研磨型カプラの要素を作る。このとき、二つある応力付与部の除去され方によって付与されていた応力が異なる解除を受け、伝播定数が変化する⁴⁰⁾。図3は、このように研磨された二つのファイバ中の直交2偏波モードがプリズムを通して出射した際の方向の違いを模式的に示したもので、この方向が各モードの伝播定数に対応する⁴⁰⁾。つまり応力の解除により、1組の偏波モードのみが位相整合条件を満たしうることが示されている。実際この方法で、不要偏波成分の抑圧比 25 dB、損失 0.1 dB の光ファイバ型偏波ビームスプリッタが実現され、商品化もされている^{39,40)}。

このほかの光ファイバ型カプラとして、3×3カプラがあるが⁴¹⁻⁴⁵⁾、これは次回以降、応用の紹介に関連して説明する。

4. 光ファイバ偏光デバイス

図4は、光ファイバ型の偏光子の構成原理図である。第1の方法は、高複屈折率の偏波維持光ファイバを直径 5 cm 程度に巻いただけのものである⁴⁶⁻⁵⁰⁾。偏波維持光ファイバにおいては、直交する二つの偏波モードの伝播定数が大きく異なる^{1,89)}。一般に伝播定数が小さいほど曲げによる損失が大きくなる^{1,88)}。本偏光子は、この性

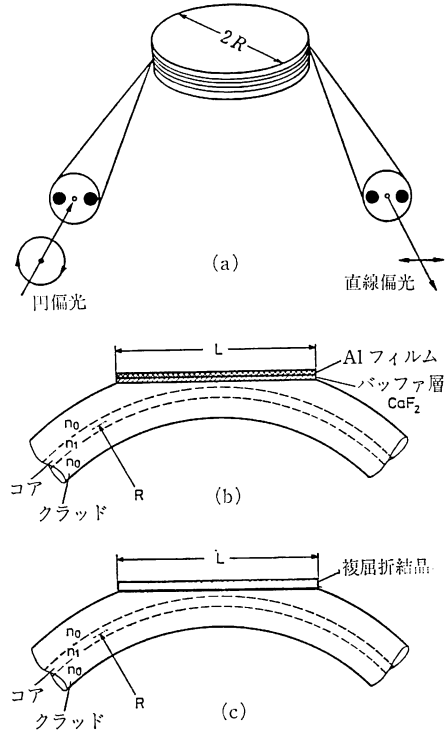


図4 光ファイバ型偏光子の構成法 (a) 複屈折光ファイバコイル型⁴⁸⁾, (b) 金属装荷型⁵²⁾, (c) 複屈折結晶装荷型⁵⁴⁾

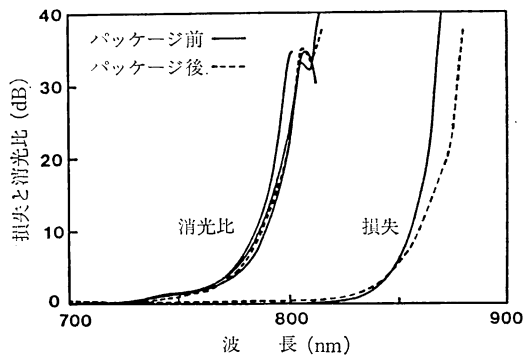


図5 複屈折光ファイバコイル型偏光子の消光比と損失の波長依存性 波長 0.82 μm 用⁴⁶⁾

質を利用したものである。図5は、本原理に基づく最初の実験データであり、波長 820 nm において透過偏波が被る損失 2 dB、消光比 62 dB が達成されている⁴⁶⁾。この後、本機構の理論的検討⁴⁷⁾、損失の低減も図られて、1.3 μm 、1.5 μm 帯でも実用化されている^{49,50)}。

第2の手法は、たとえば3章で述べた研磨型ファイバ

カプラの一方のエレメントのみを用いたものである。コアが研磨面に近接しているところでは、伝播モードの光エネルギーが研磨面外に漏洩している。ここに金属を配置すると、縦偏波と横偏波が異なる損失を受け、偏光子となる⁵¹⁾。初期の段階では透過させたい偏波成分の損失も大きかったが、研磨面と金属の間にバッファ層を介在させることで損失低減が図られた⁵²⁾。表1に示したように、0.2 dB という損失値が達成されている⁵³⁾。

最も大きな消光比が実現されているのは、上記の方法と類似の構成であり、金属の代わりに複屈折結晶を用いたものである⁵⁴⁾。一方の偏波に対しては結晶の示す屈折率がファイバ伝播モードの等価屈折率より低く、他方の偏波に対してはこの等価屈折率と等しいか少しだけ大きくしておく。このとき、後者の偏波成分のみ大きな損失を受ける。図6は、この様子を解析した結果である⁵⁴⁾。結晶の方向を調整することで、その等価的な屈折率を変え、0.2% 程度の挿入損失で、60 dB 以上の消光比を得ている⁵⁴⁾。この消光比については、間接的な実験ながら、90 dB 以上であるとの結果も報告されている⁵⁵⁾。この光ファイバ型偏光子は、光ファイバジャイロの開発の歴史において、きわめて重要な役割を果たした。この点については、次回説明したい⁵⁶⁻⁵⁹⁾。

光ファイバを直接加工した構成ではないが、最近ラミポールと呼ばれる小型の偏光子が開発され、挿入損失 0.2 dB、消光比 50 dB が達成されている⁶⁰⁾。厚さは 10 μm と薄く、ファイバとの整合性も良い。これを用いた小型のアイソレータがファイバピグテール付きの形状で構成されている⁶¹⁾。

偏光子は1方向の直線偏波成分のみを選択する素子である。逆に無偏波状態を作る素子として、デポラライザがある⁶²⁻⁶⁵⁾。同一強度で、かつ直交する二つの直線偏波間に、使用する光源のコヒーレンス長より十分に長い遅延時間差を与えると、両偏波成分はもはや干渉できな

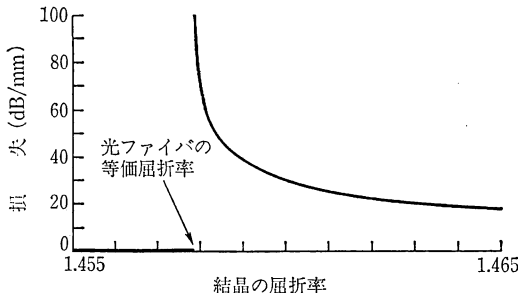


図6 複屈折結晶装荷型光ファイバ偏光子の原理説明図⁵⁴⁾

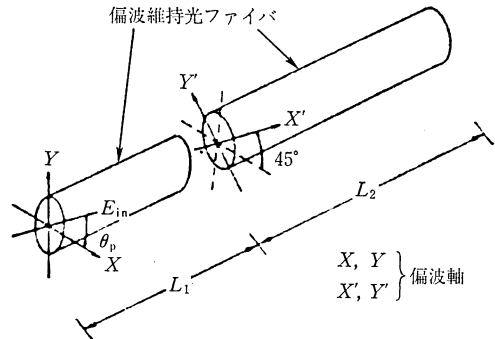


図7 偏波維持光ファイバによるデポラライザの構成原理図⁶²⁾

い。この状態が無偏波状態である。高複屈折率の偏波維持光ファイバを用いることでこの機能が実現できる。図7は、その例である。いかなる偏波が入射しても無偏波状態とするために、長さの異なる2本のファイバを45度だけ偏波軸を傾けて接続している⁶²⁾。

5. 光ファイバ位相変調器

光ファイバの長さを変えれば伝播光の位相が変化する。圧力を加えるなどして、ファイバの屈折率を変化させても同様である。この原理に基づいて、光ファイバ位相変調器が実現されている⁶⁶⁾。図8(a)は、主にファイバ長を変化させる構成である。シリンダ状の圧電素子に光ファイバを巻きつける。この場合、シリンダの機械的共振が変調特性を直接左右する。比較的平坦な周波数特性は、最小の共振周波数以下で実現され、直流からせいぜい数 kHz 程度までである⁴⁾。この領域で、たとえば、 $2\pi \text{ rad}/70 \sim 100 \text{ V-turn}$ が必要である⁴⁾。共振周波数を使えば、数桁の感度向上が図れる。ファイバの曲げ損失を考慮すると、あまり小半径の素子には使えず、結果的に最大共振周波数は、数 100 kHz である⁴⁾。

より高い周波数が必要な場合には、図8(b)のような側圧を与える構成とする。もちろん感度は低下するが、小半径の圧電素子が使え、高い共振が得られる。振動子の材料として、PZT⁶⁷⁾のほか、PVF2 (polyvinylidene) や、ZnO (zinc oxide)⁶⁸⁾ が使われる。ファイバに直接はり付けられた厚さ 5.5 μm 、長さ 3 mm の ZnO フィルムによって、450 MHz の変調周波数が達成されている⁶⁸⁾。

これら位相変調器の周波数特性は、もちろん導波路型のデバイスには劣るものの、低損失性、接続の容易さは有用である。

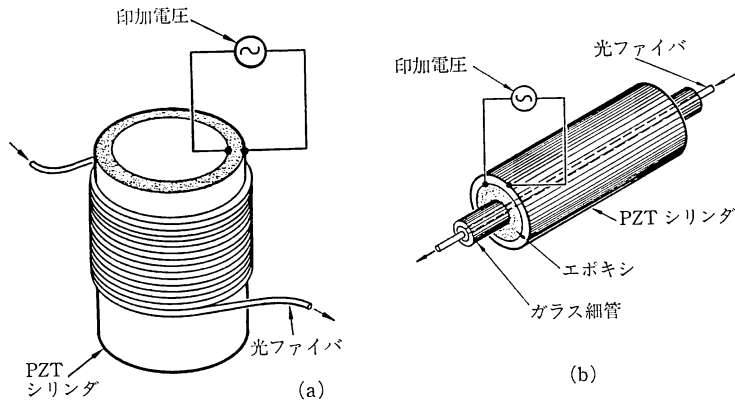


図 8 光ファイバ位相変調器の構成⁶⁶⁾
(a) ファイバ伸縮型, (b) ファイバ圧縮型

6. 光ファイバ周波数シフタ

光ファイバを用いて、光周波数シフタを作ることできる。表 1 に示したように、超音波を用いる方法と、位相変調を用いる方法とが考案されている。前者は、さらに複屈折光ファイバを用いるものと、2モードファイバを用いるものとに分けられる。

図 9 は、超音波を用いた構成の一例である⁶⁹⁾。ここでは高複屈折率の偏波維持光ファイバを活用する。偏波維持光ファイバの二つの直交する偏波モード間には、比較的大きな伝播定数差がある。2章でも述べたように、伝播定数差のある二つのモード間には結合が生じにくい。これが、偏波維持光ファイバの偏波維持特性のゆえんである^{1, 69)}。二つのモードが同時に伝播する際、伝播定数

差があるために、ある距離を伝播すると位相差がちょうど 2π だけ変化する。この距離は、偏波維持光ファイバのビート長とよばれ、約 1mm である。もし、光ファイバに沿ってこのビート長と同じ周期の屈折率の揺らぎがあると、これを介在にして両偏波モード間に結合を起こさせることができる。つまり、周期的な屈折率ゆらぎにより位相整合がとれる。図 9 では、光ファイバ中に超音波を伝播させ、そのファイバ伝播軸に沿う波長を上記ビート長に一致させて位相整合をとり、一方の偏波モードのみを励振して、他方の偏波モードへ結合させる。このとき、超音波は進行波であるので、結合波はドップラシフトを受けて周波数変⁶⁹⁾。その大きさは超音波周波数に等しい。

図 9 (b) に示したように、2.25 W の超音波入力によって、数 % の変換効率で 15 MHz の周波数シフトが得られている⁶⁹⁾。キャリア、および不要側帯成分の抑圧比は 20 dB である。このほか、表面超音波を用いた構成⁶⁹⁻⁷¹⁾、固定周期構造の導入による位相整合の実現手法⁷²⁾等が研究されている。図 10 は、95% の変換効率を達成した例である⁷⁰⁾。キャリア、および不要側帯の抑

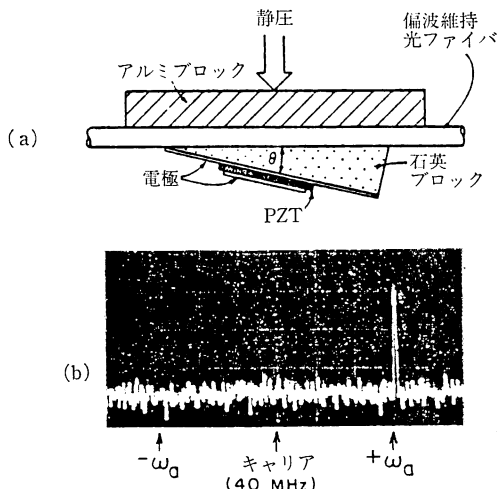


図 9 光ファイバ周波数シフタの構成例 (a) とその特性 (b)⁶⁹⁾

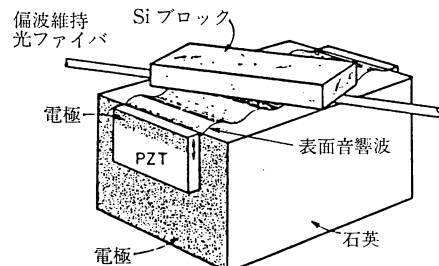


図 10 表面音響波を用いた光ファイバ周波数シフタ⁷⁰⁾

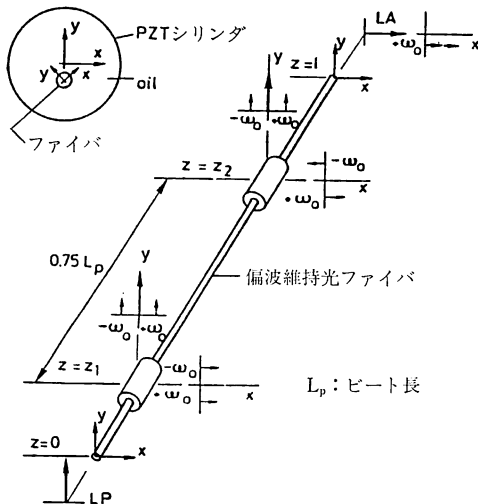


図 11 二つの位相変調器による光ファイバ周波数シフタの構成⁷⁵⁾

圧比は、それぞれ 25 dB, 40 dB と比較的良好が、入力電力は 25 W と大きい。ここでは、超音波とファイバ中の光波の相対的な進行方向を調節して位相整合をとっている。

このほか、最低次の伝播モードである LP₀₁ モードと、第 2 モードである LP₁₁ モードとの結合を用いた光周波数シフタも提案されている^{73,74)}。

図 11 は、二つの位相変調器による周波数シフタである⁷⁵⁾。ここでも偏波維持光ファイバを用いる。位相変調器は、図 8 (b) の構成に近いが、図 11 中に示したようにファイバは PZT シリンダに対して偏心しており、偏波軸もその偏心方向に対して 45° 傾いている。このとき変調器に加える電圧に比例して二つの偏波モード間に結合が生じる。二つの位相変調器は光ファイバのビート長の 3/4 だけの距離隔たり、各変調器への印加正弦波は互いに 90° だけ位相がずれている。このようにすると、一方の偏波モードのみを励振した際、他方の偏波モードとして周波数シフト成分が得られる⁷⁵⁾。

このように、いろいろな手法の研究がみられるが、必要な電力が大きすぎる、不要周波数成分の抑圧比が不足する、といった問題があり、今後なお研究が必要なデバイスである。

7. 光ファイバ波長板/偏波状態調整器

図 12 は、光ファイバを用いた波長板である⁷⁶⁾。ここでは通常の単一モード光ファイバを用いる。光ファイバを曲げると、その曲げ半径に応じてファイバ内に応力が

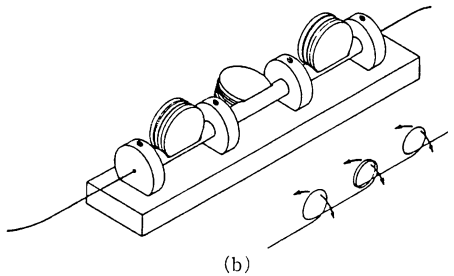
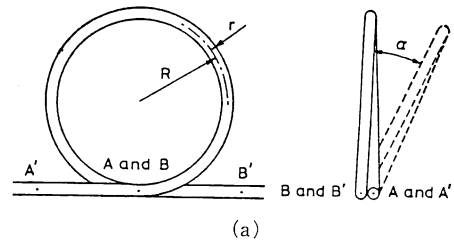


図 12 単一モード光ファイバコイルによる波長板 (a) と、それを用いた偏波状態調整器 (b)⁷⁶⁾

生じる。この結果、曲げの軸に並行な偏波と垂直な偏波の間に伝播定数の差が生じる。したがって、適当な曲げ半径、適当な巻き数を選ぶことで、波長板と等価なデバイスが得られる。たとえば、典型的な 0.85 μm 帯の単一モード光ファイバに対して、曲げ半径を 3.2 cm とすると、巻き数 2 で λ/4 板、巻き数 4 で λ/2 板ができる。

このファイバループを図 12 (a) のように倒せば波長板を回転させたのと同じ効果を得られ、これを活用することで図 11 (b) のような構成により、偏波状態調整器が得られる⁷⁶⁾。このほか、光ファイバに側圧を加える機構を複数設けた手法^{77,78)}や、ファイバをクラック型に曲げた構成による手法⁸⁰⁾も考案されている。これら偏波状態調整器については、次回以降、応用を紹介する際にあらためて説明する。

8. 光ファイバ波長フィルタ

図 13 は、研磨型ファイバカプラのエレメントと同一の加工をした単一モードファイバに、放射状の回折格子を押しあてた構成である⁸¹⁾。回折格子の周期がブラッグ条件を満たすとき、ファイバの伝播光は反射される。つまり反射型の波長フィルタとして作用する。回折格子を図中 y 軸方向に移動させることにより、反射波長を選択することもできる。図 13 (b) はフィルタ特性の例であり、分解能 0.7 nm が達成されている⁸¹⁾。反射効率 92% のものも報告されている⁸²⁾。このほか、回折格子による

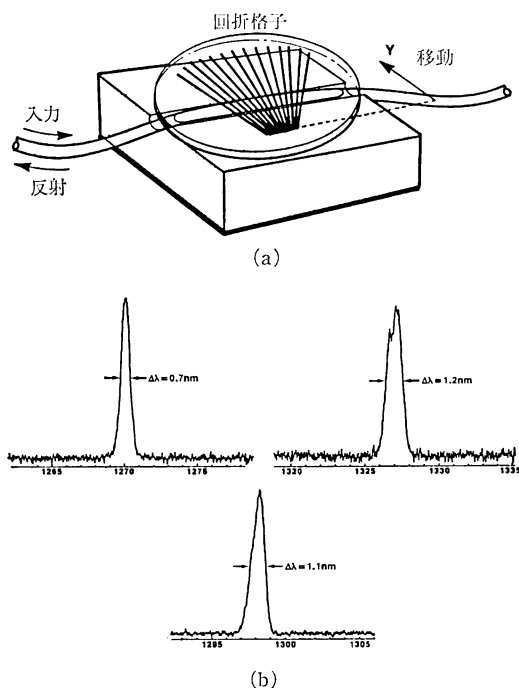


図 13 反射波長が可変な光ファイバ波長フィルタ⁸¹⁾
(a) 構成図, (b) 反射波長を変えた際の特性例

放射光を用いる構成もある⁸³⁾。また、 GeO_2 をドーパントに含むファイバにおいては、紫外線によりその屈折率を変化させることが見いだされ、紫外線による干渉縞で直接ファイバ中に回折格子を形成する手法も研究されている^{84, 85)}。

図 14 は、二つの周期の異なる回折格子を重畳させて作るモアレ格子を用いた構成である⁸⁶⁾。この構成によると、きわめて高い波長分解能が得られることが示されている。図 14 (b) はその実験例で、分解能は 0.04nm である⁸⁶⁾。

このほか、光ファイバ方向性結合器を縦列接続した構成や⁸⁷⁾、2コアファイバの各コア伝播光の結合を用いた構成⁸⁾も提案、実験されている。

9. ま と め

単一モード光ファイバを加工することでいろいろな光機能デバイスが実現できることを概説した。これらのうち、光ファイバ方向性結合器の実用化が最も進み、多くの商品が見られる。偏波維持光ファイバを巻いた構成の偏光子も実用化が進んでいる。光ファイバ型機能素子の特徴は、その低損失性と、ファイバとの接続の容易さで

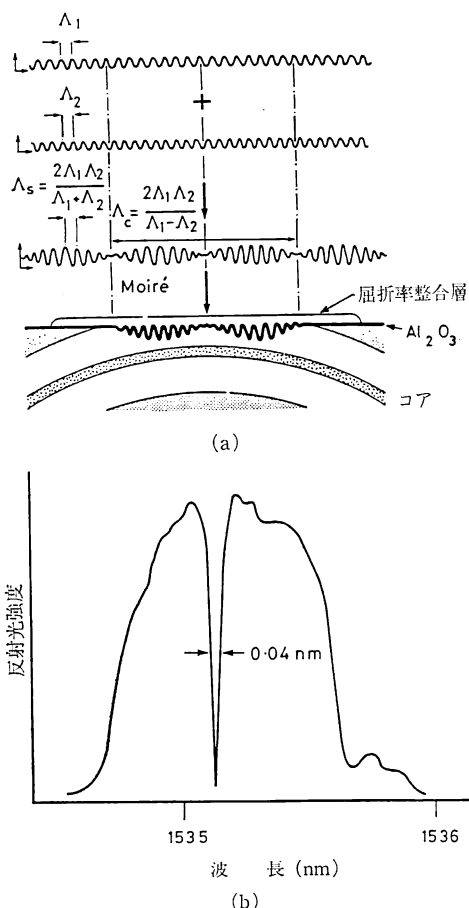


図 14 モアレ回折格子による高波長分解能光ファイバ波長フィルタ⁸⁶⁾
(a) 構成図, (b) 特性例

ある。変調器の周波数特性などは導波路型のデバイスには及ばないものの、上記特徴は多くのシステム応用においてたいへんに魅力的である。

次回以降は、まず、光ファイバ型機能デバイスの研究において重要な推進役を果してきた光ファイバジャイロについて、とくにこれらデバイスの使われ方を中心に述べる。その後、その他の光センサーへの応用、ならびに通信、情報処理分野への応用等を紹介する。今回紹介したものの以外にも、多くのファイバ型光デバイスが研究されている⁴⁻¹⁰⁾。これらについても、次回以降、応用の紹介に関連して説明したい。

文 献

- 1) 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫: 光ファイバ (オーム社, 東京, 1983)。
- 2) T. Okoshi and K. Kikuchi: *Coherent Optical Fiber*

- Communications* (KTK Scientific Publishers, 1988).
- 3) 大越孝敬, 西原 浩, 岡本勝哉, 久間和生, 大津元一, 保立和夫: 光ファイバセンサ (オーム社, 東京, 1986).
 - 4) M. J. F. Digonnet and B. Y. Kim: "Single-mode fiber-optic components," *J. IERE*, **58** (1988) S 66-S 78.
 - 5) J. Noda and I. Yokohama: "Fiber devices for fiber sensors," *Int. Conf. Optical Fiber Sensors (OSA/IEEE, New Orleans, 1988)* pp. 468-471.
 - 6) R. A. Bergh, M. J. F. Digonnet, H. C. Lefevre, S. A. Newton and H. J. Shaw: "Single mode fiber optic components," *Fiber-Optic Rotation Sensors and Related Technology* (Springer-Verlag, Berlin, 1982) pp. 136-143.
 - 7) J. Dakin and B. Culshaw, ed.: *Optical Fiber Sensors I* (Artech House Books, Massachusetts, 1988).
 - 8) 今井正明, 大塚喜弘: "光ファイバ応用干渉計測技術," *光学*, **13** (1984) 472-481.
 - 9) J. Noda, K. Okamoto and Y. Sasaki: "Polarization-maintaining fibers and their applications," *J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 1071-1089.
 - 10) 鈴木文生, 川上 登, 菊地佳夫, 塩田孝夫, 福田 長: "コヒーレント通信用光ファイバ形部品," *信学技報*, **OQE 88-22** (1988).
 - 11) H. J. Shaw: "101 uses for single mode fiber directional couplers," *Int. Conf. Optical Fiber Sensors (SFO, Paris, 1989)* pp. 2-4.
 - 12) R. A. Bergh, G. Kotler and H. J. Shaw: "Single-mode fiber optic directional coupler," *Electron. Lett.*, **16** (1980) 260-261.
 - 13) J. D. Beasley, D. R. Moore and D. W. Stowe: "Evanescent-wave fiber-optic couplers: three methods," *Conf. Optical Fiber Commun., Paper ML5 (OSA/IEEE, 1983)*.
 - 14) M. J. F. Digonnet and H. J. Shaw: "Analysis of a tunable single mode optical fiber coupler," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982) 746-754.
 - 15) D. B. Hall and M. H. Yu: "Low loss fiber optic directional coupler," *SPIE 478, Fiber Optics and Laser Sensors II* (1984) 75-79.
 - 16) I. Yokohama, K. Okamoto and J. Noda: "Fiber coupler fabrication with automatic fusion-elongation processes," *Int. Conf. Optical Fiber Sensors (IEICE-J, Tokyo, 1986)* pp. 267-270.
 - 17) T. Bricheno and A. Fielding: "Stable low-loss single-mode couplers," *Electron. Lett.*, **20** (1984) 230-232.
 - 18) F. Bilodeau, K. O. Hill, D. C. Johnson and S. Faucher: "Compact, low loss, fused biconical taper couplers: overcoupled operation and antisymmetric supermode cutoff," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 634-636.
 - 19) C-L. Chen and W. K. Burns: "Polarization characteristics of single-mode fiber couplers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982) 1589-1600.
 - 20) M. D. Nelson and W. C. Goss: "Polarization preserving single mode fiber optic coupler," *Fiber-Optic Rotation Sensors and Related Technology* (Springer-Verlag, Berlin, 1982) pp. 149-156.
 - 21) B. K. Nayar and D. R. Smith: "Monomode-polarization-maintaining fiber directional couplers," *Opt. Lett.*, **8** (1983) 543-545.
 - 22) M. Kawachi, B. S. Kawasaki and K. O. Hill: "Fabrication of single-polarization single-mode-fibre couplers," *Electron. Lett.*, **18** (1982) 962-964.
 - 23) I. Yokohama, M. Kawachi, K. Okamoto and J. Noda: "Polarization-maintaining fibre couplers with low excess loss," *Electron. Lett.*, **22** (1986) 929-930.
 - 24) M. Abebe, C. A. Villarruel and W. K. Burns: "Reproducible fabrication method for polarization preserving single-mode fiber couplers," *J. Lightwave Technol.*, **LT-6** (1988) 1191-1198.
 - 25) T. Arakawa, F. Suzuki, Y. Kikuchi, O. Fukuda and K. Inada: "Ultra-low-crosstalk polarization maintaining optical fiber coupler," *Int. Conf. Opt. Fiber Sensors (OSA/IEEE, New Orleans, 1988)* pp. 480-483.
 - 26) S. L. A. Carrara, B. Y. Kim and H. J. Shaw: "Elasto-optic alignment of birefringent axes in polarization-holding optical fibre," *Opt. Lett.*, **11** (1986) 470-472.
 - 27) W. Pleibel and R. H. Stolen: "Polarisation-preserving coupler with self aligning birefringent fibers," *Electron. Lett.*, **19** (1983) 825-826.
 - 28) R. B. Dyott and J. Bello: "Polarization-holding directional coupler made from elliptically cored fiber having a D section," *Electron. Lett.*, **19** (1983) 601.
 - 29) N. Shibata, M. Kawachi and S. Seikai: "Stress distributions in the cross section of a polarization-preserving fiber coupler," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 1099-1104.
 - 30) I. Yokohama: "Analysis of mode coupling behavior in fused polarization-maintaining fiber couplers," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 4216-4225.
 - 31) M. Digonnet and H. J. Shaw: "Wavelength multiplexing in single-mode fiber couplers," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 484-491.
 - 32) R. Zengerle and O. G. Leminger: "Narrow-band wavelength-selective directional couplers made of dissimilar single-mode fibers," *J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 1196-1198.
 - 33) O. Leminger and R. Zengerle: "Narrowband directional couplers made of dissimilar single-mode fibers with different cladding refractive indices," *Conf. Optical Fiber Commun. (OSA/IEEE, San Francisco, 1990)* p. 100.
 - 34) V. J. Tekippe: "Fused coupler technology," *Conf. Optical Fiber Commun. (OSA/IEEE, San Francisco, 1990)* p. 28.
 - 35) H. Hanafusa, Y. Takeuchi and J. Noda: "Wavelength-flattened couplers fabricated from single-mode fibers with different core parameters," *Int. Conf. Optical Fiber Sensors (SFO, Paris, 1989)* pp. 334-338.
 - 36) I. Yokohama, K. Okamoto and J. Noda: "Fiber-optic polarising beam splitter employing birefringent-fibre coupler," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 415-416.
 - 37) A. W. Snyder and A. J. Stevenson: "Polished-type couplers acting as polarizing beam splitters," *Opt. Lett.*, **11** (1986) 254-256.
 - 38) R. H. Stolen, A. Ashkin, W. Pleibel and J. M. Dziedzic: "Polarization-selective 3-dB fiber directional coupler," *Opt. Lett.*, **10** (1985) 574-575.
 - 39) H. C. Lefevre, P. Simonpietri and P. Graindorge: "High performance polarization splitting fibre coupler," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 1304-1305.
 - 40) H. C. Lefevre, P. Simonpietri and Ph. Graindorge: "High selectivity polarization splitting fiber coupler," *SPIE 988, Components for Fiber Optic Applications and Coherent Lightwave Communications* (1988) pp. 63-69.
 - 41) K. P. Koo, A. B. Tveten and A. Dandridge: "Passive

- stabilization scheme for fiber interferometers using (3×3) fiber directional couplers," *Appl. Phys. Lett.*, **41** (1982) 616-618.
- 42) R. G. Priest: "Analysis of fiber interferometer utilizing 3×3 fiber coupler," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982) 1601-1603.
 - 43) M. Kawachi: "Fabrication of polarization-maintaining [3×3] single-mode-fibre couplers," *Electron. Lett.*, **19** (1983) 781-782.
 - 44) J. Pietzsch: "Scattering matrix analysis of 3×3 fiber couplers," *J. Lightwave Technol.*, **LT-7** (1989) 303-307.
 - 45) Y. Chen, A. W. Snyder and D. J. Mitchell: "Power flow in triple-core couplers," *Electron. Lett.*, **26** (1990) 76-77.
 - 46) M. P. Varnham, D. N. Payne, A. J. Barlow and E. J. Tarbox: "Coiled-birefringent-fiber polarizers," *Opt. Lett.*, **9** (1984) 306-308.
 - 47) K. Okamoto: "Single-polarization operation in highly birefringent optical fibers," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 2638-2642.
 - 48) K. Okamoto, T. Hosaka and J. Noda: "High birefringence polarization fiber with flat cladding," *J. Lightwave Technol.*, **LT-3** (1985) 758-762.
 - 49) Y. Takuma, H. Kajioka and K. Yamada: "High performance polarizers and sensing coils with elliptical jacket type single polarization fibers," *Int. Conf. Optical Fiber Sensors (OSA/IEEE, New Orleans, 1988)* pp. 476-479.
 - 50) K. Himeno, Y. Kikuchi, N. Kawakami, O. Fukuda and K. Inada: "A high-extinction-ratio and low-loss single-mode single-polarization optical fiber," *Intern. Conf. Optical Fiber Sensors (OSA/IEEE, New Orleans, 1988)* pp. 472-475.
 - 51) W. Eickhoff: "In-line fibre-optic polariser," *Electron. Lett.*, **16** (1980) 762-764.
 - 52) D. Gruchmann, K. Petermann, L. Staudigel and E. Weidel: "Fibre-optic polarizers with high extinction ratio," 9th European Conference on Optical Communication (North-Holland, Geneva, 1983) pp. 305-308.
 - 53) R. B. Dyott, J. Bello and V. A. Handerek: "Indium-coated D-shaped-fiber polarizer," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 287-289.
 - 54) R. A. Bergh, H. C. Lefevre and H. J. Shaw: "Single-mode fiber-optic polarizer," *Opt. Lett.*, **5** (1980) 479-481.
 - 55) R. A. Bergh, H. C. Lefevre and H. J. Shaw: "All single mode fiber optic gyroscope," *Fiber-Optic Rotation Sensors and Related Technology* (Springer-Verlag, Berlin, 1982) pp. 252-255.
 - 56) 保立和夫: "センシング技術への光ファイバの応用," *光学*, **12** (1983) 340-350.
 - 57) 保立和夫: "半導体レーザとコヒーレント光センシング", *材料科学*, **26** (1989) 137-142.
 - 58) 保立和夫: "光ファイバジャイロ", *計測と制御*, **29** (1990) 68-74.
 - 59) 保立和夫: "光ファイバジャイロ干渉方式ならびに共振方式の研究・開発状況—", *電子情報通信学会誌*, **73** (1990) 149-160.
 - 60) K. Baba, T. Kataoka, T. Hirozawa, T. Sato and S. Kawakami: "Fabrication of high extinction/low loss laminated polarizers," 15th European Conference on Optical Communication (EUREL, Gothenburg, 1989) pp. 110-113.
 - 61) K. Shiraishi, T. Yanagi and S. Kawakami: "Fiber embedded optical isolator," 15th European Conference on Optical Communication (EUREL, Gothenburg, 1989) pp. 114-117.
 - 62) W. K. Burns: "Degree of polarization in the Lyot depolarizer," *J. Lightwave Technol.*, **LT-1** (1983) 475-479.
 - 63) K. Bohm, K. Petermann and E. Weidel: "Performance of Lyot depolarizers with birefringent single-mode fibers," *J. Lightwave Technol.*, **LT-1** (1983) 71-74.
 - 64) K. Mochizuki: "Degree of polarization in jointed fibers: the Lyot depolarizer," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3284-3288.
 - 65) W. K. Burns, R. P. Moeller and C-L. Chen: "Depolarization in a single-mode optical fiber," *J. Lightwave Technol.*, **LT-1** (1983) 44-50.
 - 66) R. P. DePaula and E. L. Moore: "Review of all-fiber phase and polarization modulators," *SPIE 478, Fiber Optics and Laser Sensors II* (1984) 3-11.
 - 67) K. Nosu, H. F. Taylor, S. C. Rashleigh and J. F. Weller: "Acousto-optic phase modulator for single-mode fibres," *Electron. Lett.*, **19** (1983) 605-607.
 - 68) A. A. Godil, D. E. Patterson, B. L. Heffner, G. S. Kino and B. T. Khuri-Yakub: "All-fiber acoustooptic phase modulators using zinc oxide films on glass fiber," *J. Lightwave Technol.*, **LT-6** (1988) 1586-1590.
 - 69) W. P. Risk, R. C. Youngquist, G. S. Kino and H. J. Shaw: "Acousto-optic frequency shifting in birefringent fiber," *Opt. Lett.*, **9** (1984) 309-311.
 - 70) W. P. Risk, G. S. Kino and H. J. Shaw: "Fiber-optic frequency shifter using a surface acoustic wave incident at an oblique angle," *Opt. Lett.*, **11** (1986) 115-117.
 - 71) P. A. Greenhalgh, A. P. Foord and P. A. Davies: "All-fibre frequency shifter using piezoceramic saw device," *Electron. Lett.*, **25** (1989) 1206-1207.
 - 72) W. P. Risk and G. S. Kino: "Acousto-optic fiber-optic frequency shifter using periodic contact with a copropagating surface acoustic wave," *Opt. Lett.*, **11** (1986) 336-338.
 - 73) B. Y. Kim, J. N. Blake, H. E. Engan and H. J. Shaw: "All-fiber acoustooptic frequency shifter," *Opt. Lett.*, **11** (1986) 389-391.
 - 74) H. E. Engan, B. Y. Kim, J. N. Blake and H. J. Shaw: "Propagation and optical interaction of guided acoustic waves in two-mode optical fibers," *J. Lightwave Technol.*, **LT-6** (1988) 428-436.
 - 75) K. Nosu, S. C. Rashleigh, H. F. Taylor and J. F. Weller: "Acousto-optic frequency shifter for single-mode fibers," *Electron. Lett.*, **19** (1983) 816-818.
 - 76) H. C. Lefevre: "Single-mode fibre fractional wave devices and polarization controllers," *Electron. Lett.*, **16** (1980) 778-780.
 - 77) R. Ulrich: "Polarization stabilization on single-mode fiber," *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979) 840-842.
 - 78) F. A. Mohr and U. Scholz: "Polarization control for an optical fiber gyroscope," *Fiber-Optic Rotation Sensors and Related Technology* (Springer-Verlag, Berlin, 1982) pp. 163-168.
 - 79) R. Noe, H. Heidrich and D. Hoffmann: "Endless polarization control systems for coherent optics," *J. Lightwave Technol.*, **LT-6** (1988) 1199-1208.

- 80) T. Okoshi: "Polarization-state control schemes for heterodyne or homodyne optical fiber communications," *J. Lightwave Technol.*, **LT-3** (1985) 1232-1237.
- 81) W. V. Sorin, P. Zorabedian and S. A. Newton: "Tunable single-mode fiber reflective grating filter," *J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 1199-1202.
- 82) I. Bennion, D. C. J. Reid, C. J. Rowe and W. J. Stewart: "High reflectivity monomode-fiber grating filters," *Electron. Lett.*, **22** (1986) 341-343.
- 83) P. St. J. Russell and R. Ulrich: "Grating-fiber coupler as a high-resolution spectrometer," *Opt. Lett.*, **10** (1985) 291-293.
- 84) G. Meltz, W. W. Memory, W. H. Glenn and J. D. Farina: "In-fiber Bragg-grating sensors," *Int. Conf. Optical Fiber Sensors (OSA/IEEE, New Orleans, 1988)* pp. 163-166.
- 85) G. Meltz, W. W. Morey and W. H. Glenn: "In-fiber Bragg grating tap," *Conf. Optical Fiber Commun. (OSA/IEEE, San Francisco, 1990)* p. 24.
- 86) D. C. J. Reid, C. M. Ragdale, I. Bennion, D. J. Robbins, J. Buus and W. J. Stewart: "Phase-shifted moiré grating fibre resonators," *Electron. Lett.*, **26** (1990) 10-12.
- 87) M. S. Yataki, D. N. Payne and M. P. Varnham: "All-fiber wavelength filters using concatenated fused-taper couplers," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 248-249.
- 88) 左貝潤一: "光ファイバとその応用—I 光ファイバ構造と設計(1)—光ファイバの導波理論と特性—", *光学*, **18** (1989) 641-650.
- 89) 左貝潤一: "光ファイバとその応用—II 光ファイバ構造と設計(2)—特殊構造光ファイバの設計と特性—", *光学*, **18** (1989) 700-707.
- 90) 左貝潤一: "光ファイバとその応用—III 光ファイバ構造と設計(3)—光ファイバ中の光非線形効果—", *光学*, **19** (1990) 45-51.