

解説

ヴァーティカルフォトリクスと光スイッチ・光制御

川上彰二郎・大寺 康夫

東北大学電気通信研究所 〒980 仙台市青葉区片平

(1995年3月22日受理)

Vertical Photonics for Optical Switches and Light Control

Shojiro KAWAKAMI and Yasuo OHTERA

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University,
Katahira, Aoba-ku, Sendai 980

1. ま え が き

光通信ネットワークにおいては、種々の光部品（偏光子、偏光スプリッタ etc.）、光デバイス（光スイッチ、アイソレータ、波長フィルター、光アンプ etc.）を光ファイバー伝送系内に集積化する技術が必要とされる。今後の光ネットワークの拡がりを見ると、この集積化技術はますます重要になると予測される。光デバイスを大まかに1入力1出力型と多入力多出力型に分けてみる。前者には光アンプ、光アイソレータ、光フィルター、偏光子、on/off スイッチ等があり、後者には多入力・多出力スイッチ、WDM デバイス等がある（一つの伝送路内には通常二つの偏波の自由度があり、これを2と数えることもありまとめて1と数えることもあるので、この区分は絶対的なものではない）。本稿は概略的には1入力1出力型デバイスに関するもので、信号処理のための機能を光ファイバーの中で行おうとするものである。

筆者らの研究グループでは、光回路を光ファイバーと結合する際、従来問題となっていたモード形状の不整合、および高い位置合せ精度の問題を解決する新しい光ファイバー直接集積技術の検討を進めている。最終的にレンズフリー、アラインメントフリーの実装を可能とすることが研究の目的であり、それを実現するために図1のような構成を提案している^{1,2)}。この構造のポイントは、1)局所的に加熱処理を行い、端面付近でモードの界分布を拡大(2~3倍)させた光ファイバーを用いることで、レンズなしでもビームに直進性を与える(回折拡がりを抑える)こと、2)短光路、非導波型のデバイスチッ

プを実現し、これを前記の光ファイバー間に直接複合集積すること、の二つである。この構造においては導波路型の光デバイスとは対照的に、光が板状の素子を垂直に横切ることから、筆者らはこの複合集積化技術を「ヴァーティカルフォトリクス」³⁾と呼んでいる。

ヴァーティカルフォトリクスの技術は、多くの光デバイスに適用が可能であり、筆者らの研究グループでは既にいくつかの基本的な1入力1出力のデバイスについて動作の確認が終了している。on/off型の液晶光スイッチ³⁾はそのひとつで、この後2節でこれまでの成果を紹介する。また図2に示す光アイソレータについても、順方向損失5dB、逆方向損失26dBという値が実験的に得られている⁴⁾。現在はヴァーティカルフォトリクスの次の段階として、半導体型光アンプ⁵⁾、可変波長フィルター⁶⁾、偏波面制御デバイス等への適用を検討している。このうち液晶を用いた偏波面制御デバイスについては、3節で現在の研究状況を紹介することにする。

2. 液晶光スイッチ

液晶材料は従来の電気光学結晶等に比べて、1)原理的に大口径径が容易、2)電極構造の工夫でデバイスのアレイ化が可能、3)消費電力が少ない、等の利点があり、近年ではファイバー通信用の近赤外波長域においてもそれを利用した研究が行われている。

面型光素子という性質上、マトリクス状の空間ビーム波スイッチ⁷⁾中に組み込む偏光回転素子としては液晶は非常に有用であり、256×256の反射型多チャンネル空間光スイッチを平均挿入損失13.8dB、平均クロストーク

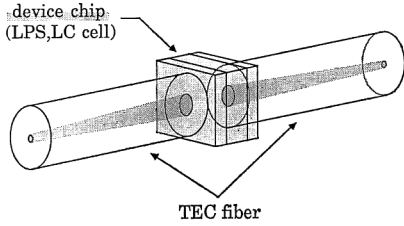


図 1 光ファイバー直接複集合積化構造

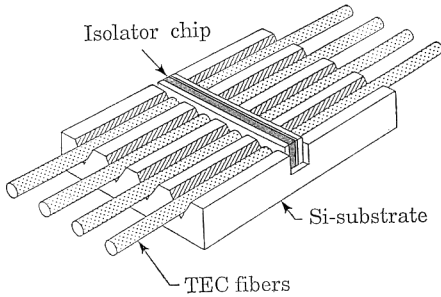


図 2 アレイ状に複集合積した光アイソレータ

-17 dB にて実現した例⁸⁾や、4×4のファイバーアレイを用いて平均挿入損失 8.7 dB, 平均クロストーク -24.8 dB を得た例⁹⁾が報告されている。また、ねじれネマティック (TN) 液晶セルを用いる際に一般に問題となる直線偏光度の悪化についても、それをほぼ補う対策が最近報告され、-37.1 dB という非常に低いクロストークをもつ 1×2 スイッチが実現されている¹⁰⁾。また応答速度についても強誘電性液晶を用いる¹¹⁾などの方法で高速化がなされている。

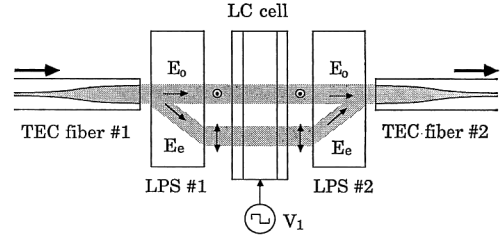
液晶材料はこれに加えてさらに、4) 屈折率変調量が非常に大きいので、短光路でデバイス動作を実現できる、という特長を有するので、ヴァーティカルフォトニクスに適した素子ということができる。

2.1 光スイッチの構造と動作原理

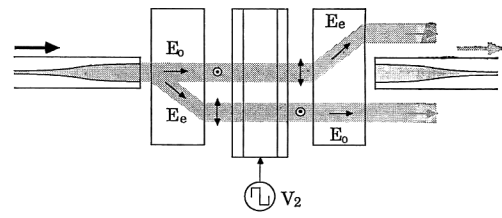
本節ではネマティック液晶を用いた光スイッチについての検討結果について述べる。

一般に光ネットワーク中では、on/off 型だけでなく、 n 対 n の切換えスイッチが必要とされるが、本節で紹介するのはその最も基本的な構成である、1×1 の on/off 型光スイッチである。この光スイッチの構成を図 3 に示す。2 本のコア拡大ファイバー (thermally expanded core fiber, TEC ファイバー¹²⁾) の間に、1 対の積層形偏光分離素子 (以後 LPS¹³⁾ と略す) とネマティック液晶を用いた電界制御複屈折 (ECB) セルを直接複集合積して構成する。

基本的にこのスイッチは、液晶セル中で入射光の偏波



(a) ON State



(b) OFF State

図 3 液晶光スイッチの構成と動作原理

面を回転させて on 状態, off 状態を決定する。TEC # 1 からの入射光は LPS # 1 を通過すると、二つの直交偏波に空間的に分離する。液晶素子中での偏波面の回転がない場合、これらの偏波はそのまま LPS # 2 で再び一つのビームとなり、TEC # 2 へと入射する (on 状態)。液晶素子中での偏波面の回転がある場合、2 本のビームは LPS # 2 を通過後も合成されることはなく、TEC # 2 の中心から軸ずれした位置にパワーが逃げる (off 状態)。on 状態の損失は TEC ファイバー間の回折損失で、また off 状態での損失は (回折+軸ずれ) 損失で決まる。

2.2 各構成素子のあらまし

2.2.1 液晶セル

今回は、印加電圧のチューニングによって比較的精密に素子のリターデーションを設定できる ECB セルを使用した。ECB セルの光学軸は LPS の偏光分離方向と 45 度の角度をなすように配置する。また直接複集合積というデバイスの構造から、実効的な素子長 (素子の長さ/屈折率) を短くして TEC ビームの回折を抑える工夫が必要となる。そこで筆者らはこの液晶セルの基板に、厚さ 120 μm に研磨した Si ウェハ ($n \approx 3.5 @ \lambda = 1.55 \mu\text{m}$) を使用した。これにより、通常ガラス基板 ($n \approx 1.5$) を用いた場合に比べ、実効的な素子長を約 1/2 に抑えている。また液晶材料には MERCK ZLI-1083 ($\Delta n = 0.11$) を用いた。

2.2.2 LPS

偏光分離素子にも短光路で大きな分離幅を有するものを使用すればデバイスの挿入損失の低減が期待できる。

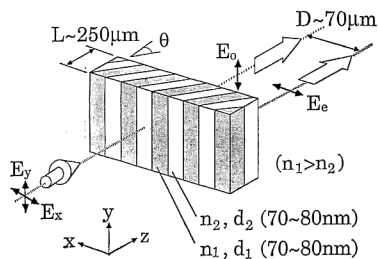


図4 LPSの構造と動作

この要求を満たす素子として、LPS¹³⁾を使用した。LPSの構造を図4に示す。LPSは高屈折率材料(a-Si:H)と低屈折率材料(SiO₂)の交互多層膜を光の入射方向に対し斜めに切り出したものであり、その構造異方性から多層膜の積層方向を光軸とする一軸異方性媒質であるとみなすことができる。光軸が入射光の波面法線に対して傾いているため、常光と異常光を空間的に分離することが可能である。動作はルチル等の複屈折結晶と同様であるが、その偏光分離角は天然の結晶に比べて3倍以上も大きい。つまり、同じ分離幅を得るのに必要な素子長が非常に薄くてすむことになる。LPSを構成する多層膜の積層厚さは200 μm程度までのものが筆者らの研究室内で現在実現されている¹³⁾。今回は素子長105 μm(偏光分離幅34 μm)に加工して実験に使用した。

2.2.3 TEC ファイバー

TECファイバーは石英系SMFの一部を局部的に加熱することでコア中の屈折率制御用ドーパントを拡散させ、モード分布を拡大させたファイバーである。ファイバーの断面内でドーパントの総量は一定であるため、拡散の前後で正規化周波数が変化しないという特長をもつ。

TECファイバーの作製方法としては電気炉を用いる方法¹²⁾とマイクロバーナーで加熱する方法¹⁴⁾とがある。電気炉を用いた場合、最大でMFD=40 μmまでの拡散が可能となっている¹²⁾。またマイクロバーナーによる加熱方式ではファイバーの被覆除去部の長さ1cm、加熱時間40分でMFD31 μm、ファイバーの外径減少2 μm以下等の結果が得られている。今回は電気炉で作製したV=1.82, MFD16 μmのものを実験に使用した。

2.3 光スイッチの設計

本節ではこのファイバー間の接続特性を中心としたスイッチ特性の設計について述べる。ただし応答速度は液晶材料とセル構造に依存するが、普通数十msの値をとる。

TECファイバーのモード界形状はガウス型ではなく、

その接続特性(特に軸ずれ損失)もガウスビームのそれとは異なる¹⁵⁾。したがってガウスビーム近似でデバイス性能を予測することはできない。そこでまず、TECファイバー間の接続特性を正確に予測することが必要になる。

2.3.1 TEC ファイバーのモード界形状

ステップインデックス型のファイバーから出発してTECファイバーを作製した場合、熱拡散後のドーパントは半径方向にガウス分布するとみなせる。すなわち、屈折率分布もガウス型になる。また、拡散の前後でファイバーのV値は一定に保たれる。この形の屈折率分布をもつ光ファイバーのモード界形状を解析的に解くのは困難であるが、有限要素法等を用いて数値的に求めることは可能である。

計算結果の一例を図5に示す。ここでは特に以下の点に注意されたい。1) TECファイバーのモード界形状はガウスビームに比べ、裾の部分で大きな値をもつ。2) Vの大きなTECファイバーほど、界の閉込めが強く、裾のきれが良くなる。3)したがって、Vが大きいファイバーほど、軸ずれ損失が増加する。

本稿で取り上げているタイプの光スイッチでは、光のパワーを受け側ファイバーの中心から軸ずれした位置に逃がすことでoff状態を得ているため、特に3)の特性は重要なポイントである。

2.3.2 回折損失/軸ずれ損失

入射側のTECファイバーを出射した光は、横方向に一樣な屈折率分布をもつ光素子(LPS, 液晶セル)中を伝搬するうちに回折していくぶん拡がり、出射側のTECファイバー端面へと到達する。種々の回折距離に対してこの回折後の界形状を計算し、出射側のTECファイバーのモード界形状との結合効率を計算する。ここからこの光スイッチのon状態での損失(挿入損失)を求める

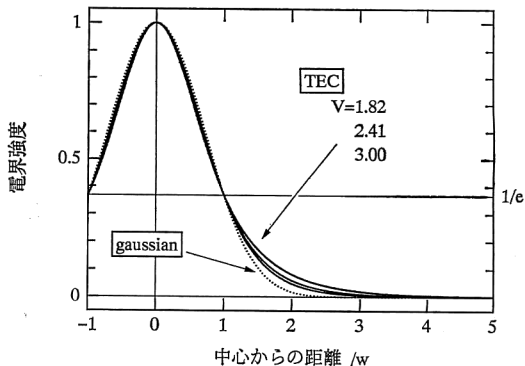


図5 TECファイバーのモード界形状の計算例

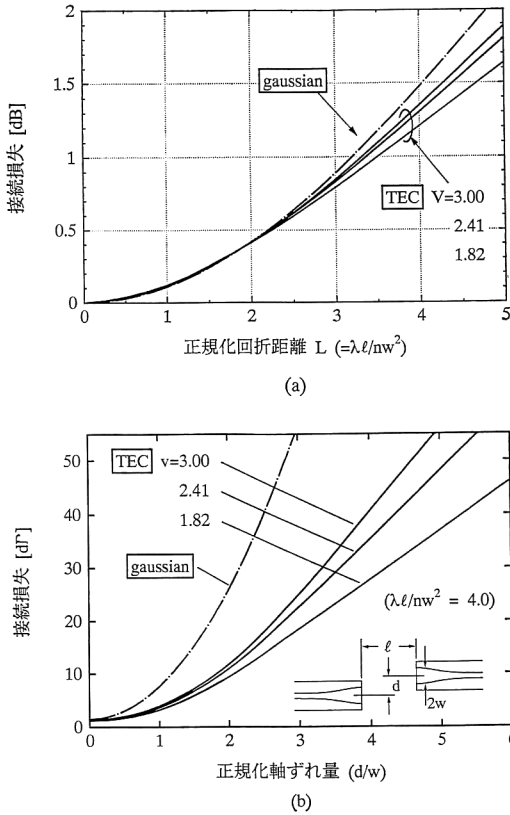


図 6 TEC ファイバーの接続特性 (a) 軸ずれなし, (b) 軸ずれあり.

ことができる。また、ここで両者を軸ずれさせてその結合効率を取れば、光スイッチの off 状態での損失が求まる。

計算結果を図 6 に示す。なお TEC ファイバー間に挟み込む素子の厚さに対応する回折距離、および off 状態での軸ずれ量はスポットサイズ (w) など正規化して表示してある。この計算の要点は次のとおりである。1) 軸ずれなしの TEC ファイバー間の純粋な回折損失は、素子長が比較的短い場合、ガウスビームのそれと同じ程度の値をもつ。2) 軸ずれ損失は回折距離にはそれほど依存せず、ほとんどスポットサイズと軸ずれ量との比のみで決まる。3) V の大きなファイバーを使うことで、軸ずれ損失を数~10 dB 程度増加させることができる。

なおこの TEC ファイバー間の接続特性は光スイッチのみならず、ヴァーティカルフォトニクスを応用した光デバイス全般の設計において重要な要素となる。

2.4 設計値と実験結果

低挿入損失、高 on/off 比を有する光スイッチを実現するためには、前節の結果から、正規化した回折距離を

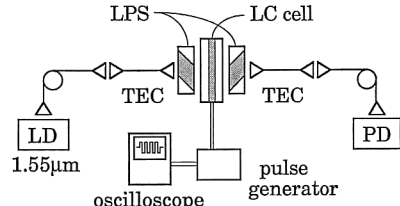


図 7 液晶光スイッチの測定系

短く、そして軸ずれ量をなるべく大きくすればよい。これは、スポットサイズの大きな TEC ファイバーを用い、さらに偏光分離幅の大きな LPS を用いることで実現できる。これら両者はトレードオフの関係にあるため、実際には挿入損失と on/off のバランスを考慮して素子パラメータを設定することになる。

筆者らは光スイッチの設計値の一例として、挿入損失 1.5 dB 以下、on/off 比 30 dB 以上を取り上げ、実際に作製を行った。ここから図 6 と同様の計算を行い、2.2 項で述べた素子パラメータに加工した。なお光源には波長 1.55 μm の LD を用いている。図 7 の系にて測定を行い、on 電圧 1.8 V、off 電圧 1.4 V にて on/off 比 27 dB を得た。on/off 比について比較的設計値に近い値が得られたことがわかる。また、今回の実験では挿入損失が設計値よりも大きな値を示しており、この低減が今後の課題となる。損失の内訳としては液晶セル基板での反射損失のほかに、主に各光素子を通過する際に生じるビームの波面の乱れが原因として考えられる。これは各素子のクオリティと加工技術の両者の向上によって低減することが可能である。最近、筆者の研究室の研究グループでは、同様に 2 枚の LPS と波長板、ファラデー回転素子を TEC ファイバー間に直接複合集積化した偏波無依存型アイソレータの試作を行った⁴⁾が、このアイソレータにおける挿入損失は 5 dB となっている。設計値 (1.3 dB) との間にはまだ開きがあるが、改善の効果が確かめられつつある。

3. 偏波面制御デバイス

コヒーレント光通信システム等に応用される偏波面制御デバイスの動作として、入射光の偏波面を任意の方位に補正するには一般に回転可能な $\lambda/4$ 板と $\lambda/2$ 板が必要である。具体的には LiNbO_3 導波路に複数の位相変調セクションを設けて実現したもの¹⁶⁾、バルクの PLZT に回転電界を印加し、回転波長板の効果をもたせたもの¹⁷⁾等がある。筆者らは特に高速な動作は通常要求されない場面での応用を考え、ヴァーティカルフォトニクスの技

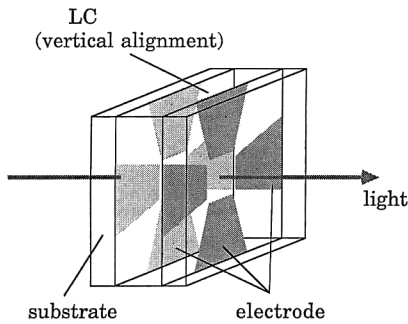


図8 液晶回転波長板の構造

術を応用するデバイスとして、液晶セルを用いた偏波面制御デバイスに注目し、検討を行っている。

3.1 構造と原理

回転波長板を機械的可動部分なしに実現するために、筆者らは図8のような電極構造の液晶セルに注目した。これはp型のネマティック液晶を用いた垂直配向セルであり、基板面と平行な方向に電界を印加して、その方向に液晶の異方性を発現させて波長板として使用する。直交する2対の電極間に印加する電界の振幅比を調整することで、その方位を電氣的に回転させることができる。

この構造では、個々の液晶分子がその場で動くだけなので、全体を波長板としてみたときの回転角には制限が存在しない。つまり endless な動作が可能である。また垂直配向セルに一樣な横方向電界を印加すると、液晶中に分子の配向が空間的に異なるパターンをもつドメインが発生してディスクリネーションラインが生じるおそれがある。これを避けるために、筆者らは2枚の基板の両方に電極を設け、電界ベクトルの方向を若干斜めにして液晶分子の倒れる方向を規定するという対策を取っている。

3.2 液晶セルの動作特性

駆動電圧が低く、比較的応答時間の速いデバイスを実現するには、電極形状、セルギャップ、液晶材料等の最適化が必要であるが、筆者らはまず原理検証を目的として以下のパラメータにてセルを試作し、測定を行った。

電極間隔(基板面内)	150 μm
セルギャップ	25 μm
液晶材料	MERCK ZLI-1083
使用波長	$\lambda = 1.3 \mu\text{m}$

結果として、印加電圧 19.5 V にて $\lambda/4$ 板、25 V にて $\lambda/2$ 板、さらに 37 V で $3\lambda/4$ 板としての動作を確認した。

なお、波長板方位の回転の応答時間は現段階ではまだ

100 ms のオーダーであるが、これは小型化や材料の選定などの最適化によって今後さらに短縮できる。

この液晶を用いた偏波面制御デバイスは実証実験を最近開始したものである。今後 $\lambda/4$ 板と $\lambda/2$ 板という2種類のセルを用いて実際の偏波面制御の実験を行い、さらに小型集積化を進めていく予定である。

4. おわりに

光ファイバー線路中にシンプルに光機能デバイスを実装する技術であるヴァーティカルフォトニクスについて簡単に解説し、その応用例として液晶光スイッチ、偏波面制御デバイスに絞って現在の研究状況を紹介した。ヴァーティカルフォトニクスの目標とするところは、作製プロセスが簡単でかつ既存の光部品と同等以上の特性をもつデバイスを実現することにある。本稿で取り上げた光スイッチは原理検証の段階を終了しており、その高性能化の実現と併せて、より複雑な機能を有するデバイス(偏波面制御デバイス、可変波長フィルター、面型光増幅器など)の実証が今後の研究の主な焦点となろう。

文 献

- 1) S. Kawakami: "In-line fiber components: a new way to integrate functional devices," *9th Optical Sensors Conference, Paper Th 2.12*, Firenze, Italy (1993).
- 2) 川上彰二郎, 花泉 修: "ヴァーティカルフォトニクス", 信学論 (C-I), J77-C-I, 5 (1994) 334-339.
- 3) 大寺康夫, 花泉 修, 佐藤 尚, 川上彰二郎: "ファイバ集積形液晶光スイッチ", 信学技報, **OPE 94-11** (1994).
- 4) 入江 剛, 佐藤 尚, 富沢拓也, 白石和男, 馬 曉明, 相沢芳三, 川上彰二郎: "積層形偏光分離素子を用いた偏波無依存ファイバ集積型アイソレータの作製", 1995 春季信学全大, C-277.
- 5) 川上彰二郎, 花泉 修, 鄭 期太: "光励起された MQW 面型光増幅器について", 信学技報, **OPE 94-79** (1994).
- 6) 大寺康夫, 依田秀彦, 川上彰二郎: "ファイバ集積型液晶可変波長フィルタの作製", 平6 東北連大, 1A4 (1994).
- 7) K. Noguchi, T. Sakano and T. Matsumoto: "A rearrangeable multichannel free-space optical switch based on multistage network configuration," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **9** (1991) 1726-1732.
- 8) 坂野寿和, 木村一夫, 野口一博, 内藤 昇: "256×256 反射型多チャンネル空間光スイッチの検討", 1994 信学春季全大, C-415.
- 9) 中神隆清: "偏光制御型空間光スイッチ", 信学技報, **IPT 93-2** (1993).
- 10) Y. Fujii: "Low-crosstalk 1×2 optical switch composed of twisted nematic liquid crystal cells," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **5** (1993) 206-208.
- 11) S. Fukushima, T. Kurokawa and S. Matsuo: "Bistable spatial light modulator using a ferroelectric liquid crystal," *Opt. Lett.*, **15** (1990) 285-287.
- 12) O. Hanaizumi, Y. Aizawa, H. Minamide and S. Kawakami: "Fabrication of an expanded core fiber having

- MFD of 40 μm preserving outer diameter," IEEE Photon. Technol. Lett., **6** (1994) 842-844.
- 13) 佐藤 尚, 李 備基, 高橋 功, 大野 潤, 花泉 修, 室田 淳一, 川上彰二郎: "1.55 μm 帯及び 1.3 μm 帯用積層形偏光分離素子の作製", 信学技報, **OPE 94-70**(1994).
 - 14) H. Hanafusa and M. Horiguchi: "Thermally-diffused expanded core fibers for low-loss and inexpensive photonic components," Electron. Lett., **27** (1991) 1968-1969.
 - 15) 柳 拓也, 白石和男, 川上彰二郎: "コア拡大ファイバ間の接続特性", 1991 信学春季全大, C-277.
 - 16) F. Heismann and M.S. Whalen: "Fast automatic polarization control system," IEEE Photon. Technol. Lett., **4** (1992) 503-505.
 - 17) H. Shimizu and K. Kaede: "Endless polarization controller using electro-optic waveplates," Electron. Lett., **24** (1988) 412-413.