

# 解説

## 液晶を用いた光処理デバイス

黒川 隆志・福島 誠治・平林 克彦

NTT 光エレクトロニクス研究所 〒243-01 厚木市森の里若宮 3-1

(1991年11月1日受理)

### Optical Processing Devices Using Liquid Crystal

Takashi KUROKAWA, Seiji FUKUSHIMA and Katsuhiko HIRABAYASHI

NTT Opto-electronics Laboratories, 3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi 243-01

#### 1. はじめに

液晶材料はその大面積化, 低電圧駆動, 低コストといった特長から主に表示への応用がこれまで進められてきた。一方液晶を物性的に見直してみると, これほど低い電圧で大きな屈折率変化を生じる材料は他になく, 表示以外にも多くの光素子・部品への応用が期待される。従来応用に供されてきたネマチック液晶材料は10msオーダーの応答速度であり, 決して速いとはいえないがそれでもその取扱いの容易さと低コストの面から多くの応用面の魅力がある。また最近開発されている強誘電性液晶材料は10 $\mu$ s程度と従来より約3桁速い応答速度とメモリ性を持つことから, 駆動技術と部品化の両面からその特長を生かした応用の検討が進められつつある。

一方, 通信・情報処理の分野では光技術の導入が近年著しく進んでいる。液晶に関していえばその研究は材料および表示応用に集中しているが, 液晶の特長を考えればスイッチ, 変調器, フィルタ等の受動光部品がその対象となりえ, 実際液晶の開発が始まった古い時期にこれらの原理的な応用がすでに提案<sup>1)</sup>された。それ以降本格的な検討はほとんどされなかったが, 最近になって具体化に向けた研究が盛んになってきた<sup>2)</sup>。

液晶は応答速度は遅いものの, 低電圧で大きな屈折率変化が得られ2次元形状も作りやすいことから, 先に述べたような光通信・光情報処理用の素子への応用は多数あると考えられる。光スイッチでも特に高速性ではなく並列性が必要なものなど<sup>3)</sup>, 液晶の特長を生かした形状, 適用領域を考えていくべき段階にきていると思える。本稿では液晶を用いた光処理素子のうち, 空間光変調器,

波長フィルタの最近の筆者らの研究について紹介する。

#### 2. 強誘電性液晶空間光変調器

##### 2.1 デバイスの構造, 原理, 特長

空間光変調器 (spatial light modulator, SLM) は, 画像情報を光のまま取り込み, 記憶し, 任意の時間に読み出すことのできる, いわば実時間フィルムの機能を持つデバイスである。これにより, 画像の増幅, 反転, インコヒーレント-コヒーレント変換, 波長変換などを行うことができる。これまでネマチック液晶や電気光学結晶等を用いてさまざまなSLMが開発され, ディスプレイ, 画像処理, 光演算などへの適用が検討されているが, 応答速度, 分解能などの点でまだ十分実用的な特性をもつに至っていない<sup>4)</sup>。われわれは高速応答, 双安定性の特長をもつ強誘電性液晶 (FLC) を用いた空間光変調器の開発を進めている。この空間光変調器は, 印加電圧の極性によってポジ・ネガ両画像を読み出す特長をもつことから, BSLM (bipolar-operational SLM) と呼んでいる<sup>5)</sup>。

BSLMの構造を図1に示す。透明電極をコートした2枚のガラスの間隙にアモルファス・シリコン光伝導層(2~7 $\mu$ m厚), 誘電体ミラー(1 $\mu$ m厚), FLC(1 $\mu$ m厚)がサンドイッチ状にはさま込まれている。それぞれの層は面内において均一である。書き込み感度は可視光全域にあり, 読み出し波長はミラー厚とFLC厚を変えることで任意に設定可能である。上記の厚さはHe-Neレーザーによる書き込み, 読み出しに対応する。BSLMは, 電気的には光伝導層の抵抗と誘電体ミラーとFLCの二つのキャパシタの直列回路であると考えられる。し

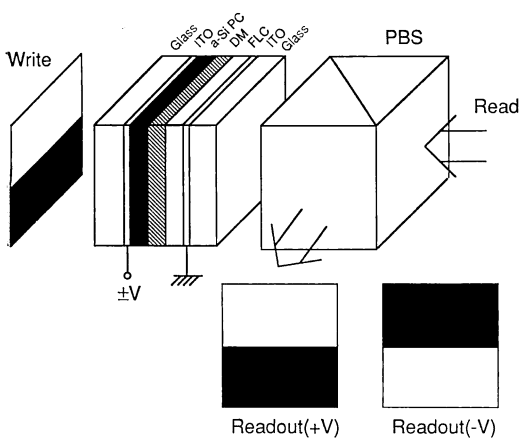


図 1 BSLM の構造と動作のための光学系

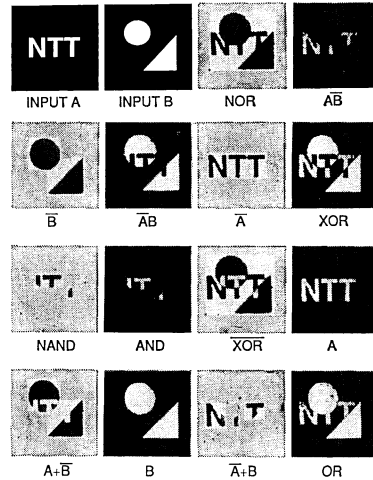
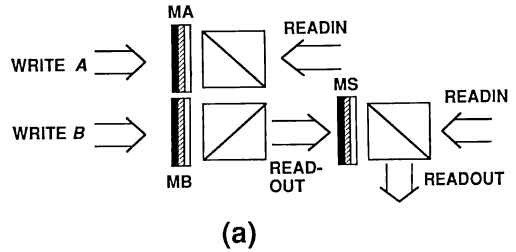
たがって、図1の光学系を構成し電圧パルス を BSLM に印加すれば、書き込み光パターンは光伝導膜の作用によって FLC 上への2次元的な電圧分布に変換される。あらかじめ全面の FLC が負電圧印加により光学的にオフ状態へ配列されていると、書き込み光照射により電圧パルス(正)がしきい値を越えた領域のみがオン状態へと配向がスイッチする。オンとオフの領域はいずれも電圧パルスおよび書き込み光が取り除かれた後も安定であり、書き込まれた画像はそのままメモリーされる。FLC の配列の変化は光学的な複屈折を生じるので、図1に示すように偏光ビームスプリッター (PBS) を用いて像を読み出すことができる。

以上説明した動作では書き込み画像と同じポジ画像が読み出される。一方、正電圧パルスで FLC をオンに初期化し書き込み時に負電圧パルスを印加すれば、入力に対して反転した画像を読み出すことができる。

BSLM の諸特性は以下のとおりである。感度 (633 nm) 200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 応答時間 70  $\mu\text{s}$ , コントラスト 60 : 1 以上, 分解能 135 lp/mm (MTF=1/2), 有効面積 12  $\text{mm}^2$ . 分解能は光伝導膜の厚さに対して強く依存し、薄いほど高分解能が得られる。上は厚さ 2  $\mu\text{m}$  の BSLM の特性であり、分解能 200 lp/mm 以上の干涉縞まで書き込むことができた。

### 2.2 画像演算

BSLM は印加する電圧の極性を変えるだけでポジ・ネガの読み出しモードを選択できるので、複数の BSLM を組み合わせることによって画像間の並列演算が可能になる<sup>6)</sup>。二つの画像間の 16 通りのブール代数演算をプログラムブルに実行した例を次に紹介する。画像演算系は図 2(a)に示されるように 3 個の BSLM (MA, MB,



(b)

図 2 (a)画像演算光学系, (b)画像演算結果

MS) から構成される。画像が入力される二つの空間光変調器 MA と MB は、それぞれの読み出し面がカスケードに接続されており、書き込み時にそれぞれの BSLM に印加する電圧を組み合わせることで  $\bar{A}\bar{B}$ ,  $A\bar{B}$ ,  $\bar{A}B$ ,  $AB$  の 4 通りの演算結果を出力することができる。すなわち MA と MB への印加電圧を順に(-, -), (+, -), (-, +), (+, +) とすることにより対応する演算がえられる。「+」がポジティブモードに、「-」がネガティブモードに対応する。論理値は書き込み側と読み出し側の両方において明状態を 1, 暗状態をゼロと考える。

二つの空間光変調器 MA, MB から出力された先の四つの演算結果を 3 番目の空間光変調器 MS 上に重ね書きすることで、演算を 16 種類に拡張することができる。BSLM はメモリー作用を持つため、画像の多重記録が可能である。四つの基本演算  $\bar{A}\bar{B}$ ,  $A\bar{B}$ ,  $\bar{A}B$ ,  $AB$  のどれを MS 上に書き込むかによってすべてのブール論理をプログラムブルに実行でき、その出力論理 R は、

$$R = \bar{A}\bar{B}T_0 + A\bar{B}T_1 + \bar{A}BT_2 + ABT_3$$

で表される。ただし、 $T_0, T_1, T_2, T_3$  は MS に対

するインストラクションで、その論理値は、正電圧パルス印加が1でパルス無印加がゼロに相当する。これは符号化信号に対する時系列のアレイロジックに対応する。

画像演算の結果を図2(b)に示す。画像の大きさはすべて  $10\text{ mm}^2$  である。この実験では図2(a)には示されないが、書き込み側と読み出し側の両方においてレンズによる等倍の結像系が組まれている。得られたコントラストは10~30程度であった。BSLM単体のそれが60であるのに対して、画像演算においては重ね書きを行うためのレベルが上がったことによる劣化である。この画像演算はBSLMの高分解能、高速応答性により、通常のテレビ信号の画素数、フレームレートを上回る1,000フレーム/秒の画像演算が可能となる。この画像演算を応用して、高速な画像の暗号化および復号化の可能性も示されている。

### 2.3 実時間ホログラム

BSLMは200lp/mm以上の分解能を持つため不十分ではあるがホログラム記録・再生が可能になる<sup>7)</sup>。空間光変調器によるホログラムはその実時間動作に最大の利点がある。書き換え可能なホログラムとしてはフォトクロミック材料、フォトリフラクティブ材料などが研究されているが感度、応答速度の点で空間光変調器ははるかに優れた性能をもつ。空間光変調器をホログラムとして使用した場合の回折効率を以下のようにして求めた。BSLMに2本のHe-Neレーザー(波長633nm)のコリメート光を照射して干渉縞を記録し、読み出しにもHe-Neレーザーを用いPBSを介して反射光と1次の回折光を測定した。回折効率 $\eta$ を $\eta = I_{+1}/(I_{-1} + I_0 + I_{+1})$ で定義した。 $I_{+1}$ 、 $I_{-1}$ は1次の回折光強度、 $I_0$ は反射光強度である。FLCのダウン軸と偏光子軸が一致した場合、形成されるホログラムは吸収形となり、回折効率は低周波域(25lp/mm)で9%であった。また、偏光子軸をアップ軸とダウン軸のちょうど中間に設定し、位相形ホログラムを構成すれば回折効率は40%に達した。

BSLMはこのように吸収形、位相形両方の実時間ホログラムとして動作できることを、次のようなフレネル・ホログラムの記録再生実験によって確認した。図3に記録および再生の光学系を示す。書き込み光のうち1本は参照光として作用し、もう1本で途中で画像マスクが配置された方のビームは物体光として作用する。また、読み出し光はこれまでと同様FLC面に照射し、その回折光を観測した。BSLMからマスクまでとスクリーンまでの距離はいずれも1mである。図3内の写真に示されるように正しく結像して再生されており、スクリーン

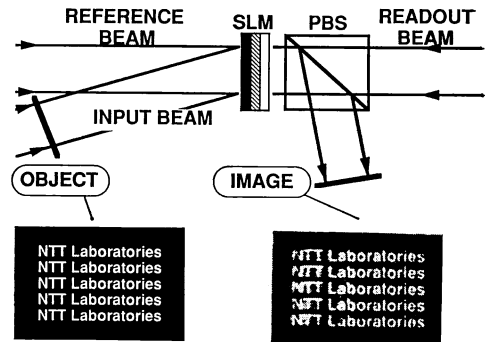


図3 実時間ホログラムの記録再生光学系と読み出し像

を前後に移動させると像がぼけるのが観測された。物体光と参照光はいずれも  $0.3\text{ mW/cm}^2$  で、書き込みの光エネルギーは  $100\sim 200\text{ nJ/cm}^2$  であった。また類似の光学系で位相共役像の生成も確認されている。

## 3. 液晶可変波長フィルタ

液晶の色フィルタの応用についてはいくつかの検討がなされている<sup>9)</sup>。液晶は電界にたいして大きな屈折率変化を示すため、原理的に大きな可変範囲を持つフィルタを実現できる。しかし狭帯域のQ値の大きいフィルタを作製するためには液晶層の散乱を極力抑えたキャビティが必要でありそのための光学的設計の検討はほとんどなされていない。最近、波長多重通信への適用をめざした狭帯域液晶可変波長フィルタの研究が進められている<sup>9,10)</sup>。これはファブリペロエタロン内に液晶を充填した構造で、波長多重化された光信号を選択するための光チューナを実現するためのキデバイスとして期待されている。波長多重通信に研究されている可変波長フィルタとしては、機械式グレーティング、機械式ファブリペロエタロン、光導波路形マッハツェンダ干渉計などがあるが、液晶可変波長フィルタはこれらに対して、小型、低電圧、低コストという特徴を持つ。ここでは以下にその構造、特性、応用を紹介する。

### 3.1 フィルタの構造と原理

液晶可変波長フィルタの構造と原理を図4に示す。ホモジニアス配向させたネマチック液晶(液晶がガラス基板に対して平行に配向)をガラス板、透明電極、誘電体ミラー、液晶用配向膜でサンドイッチした構造を持つ。電圧を印加することにより、液晶層の屈折率を変化させて、ファブリペロエタロンの共振波長を変化させる。通常の電気光学材料では最大でも1%程度しか屈折率が変化しないのに対し、液晶の屈折率は数Vの電圧印加で10~20%程度変化するため、大きな波長シフトが期待で

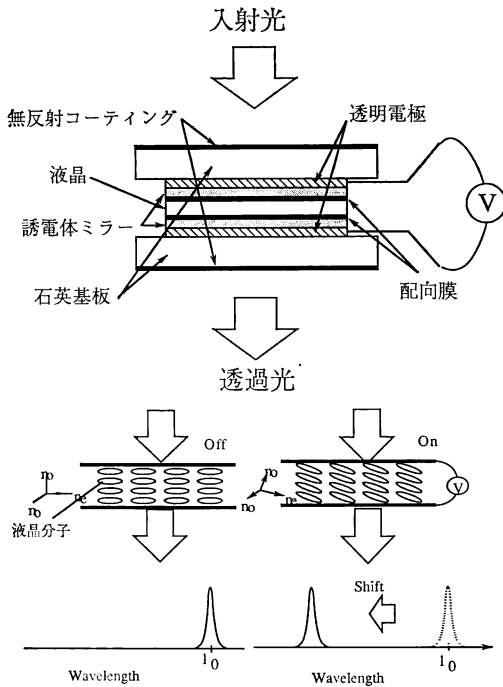


図 4 液晶可変波長フィルタの構造と原理

きる。ファブリペロエタロンの特性は以下の式で与えられる。

$$\text{共振波長} : \lambda_0 = 2nL/m \quad (m \text{ は整数}), \quad (1)$$

$$\text{透過スペクトル} : T = \frac{T_{\max}}{\{1 + (2F/\pi)^2 \sin^2(2\pi nL/\lambda)\}^2}, \quad (2)$$

$$\text{最大透過率} : T_{\max} = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha L)}{\{1 - R \exp(-\alpha L)\}^2}, \quad (3)$$

$$\text{フィネス} : F = \pi \frac{\{R \exp(-\alpha L)\}^{1/2}}{1 - R \exp(-\alpha L)}, \quad (4)$$

$$\text{バンド幅} : FWHM = \lambda_0^2 / 2nLF, \quad (5)$$

ただし、 $n$  : 液晶の屈折率、 $R$  : ミラーの反射率、 $L$  : キャビティ長、 $\alpha$  : 液晶の吸収散乱係数である。

ここで基板の表面荒れ、平行度、ミラーのロスは無視した。素子の特性 (バンド幅, 最大透過率) を決めるのは液晶のロス  $\alpha$ , ミラーの反射率  $R$ , キャップ長  $L$  である。液晶自体の損失は波長  $1.3 \mu\text{m}$  において  $0.5 \text{ cm}^{-1}$  と推定され、この値を式(1)~(5)に入れるとミラー反射率 99.5%, 共振器長  $15 \mu\text{m}$  の液晶エタロン形フィルタの場合、フィネス約 500, ロス約 2dB, バンド幅約 0.1nm, 可変波長幅  $>100 \text{ nm}$  となり、優れた可変波長フィルタが実現できると期待できる。実際には配向状態, 基板の平坦度などの要因が加わるため、優れた特性を得ることは容易ではない。

### 3.2 特 性

実際に作製した液晶可変波長フィルタ (ミラー反射率 99.5%, ギャップ長  $15 \mu\text{m}$ ) の波長可変特性を図 5 に示す。光源としてスーパーluminescentダイオードを用いコリメータレンズ付きのシングルモードファイバで光ビームを  $100 \mu\text{m}$  として、液晶可変波長フィルタに入射させ、再度ファイバで受けて、スペクトラムアナライザ (分解能  $0.1 \text{ nm}$ ) で測定した。バンド幅は  $0.17 \text{ nm}$ , ロス 7 dB, フィネス 400 以上, 可変幅  $50 \text{ nm}$  以上である。これらの特性は波長多重通信に適用するのに十分である。

さらに狭帯域化を目的として、キャビティギャップを  $70 \mu\text{m}$  と厚くした素子を作製した。その際キャビティ内のロスの低減のため、液晶層の一部を薄いガラス板で置き換えた構造 (2層キャビティ構造) を採用した<sup>11)</sup>。結果としてバンド幅 ( $0.07 \text{ nm}$ ), 可変幅  $12 \text{ nm}$  の素子が作製できた。また 2層キャビティ素子と通常構造素子を積層することにより、バンド幅  $0.07 \text{ nm}$ , 可変幅  $130 \text{ nm}$  の素子を実現できた。ファブリペロ形のフィルタでは、バンド幅の 3 倍で 15 dB の消光比を得ることができるため、 $0.2 \text{ nm}$  間隔で 600 波以上多重した光の一つを可変に選択することが可能である。

一方コンパクト化を目的として、ファイバ対向形のファブリペロエタロン内に液晶を充填して、ファイバコネクタサイズ (本体のサイズ 1cc) のピグテール形の液晶可変波長フィルタを実現している。

本フィルタは以上のように優れた特性を有するが、液晶の屈折率変化を利用するため、原理的に偏波依存性があるという欠点を持つし、さらに液晶は温度に対しても屈折率が変化するため、温度変動に対して波長が変化する ( $0. \text{数} \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ) という欠点もある。偏光ビームスプリッタに分けられた二つの偏波光路のそれぞれにフィルタを配置して偏波無依存化を図れる。温度変動に対しては、ペルチェ素子による温度安定化、温度補償回路が有効である。

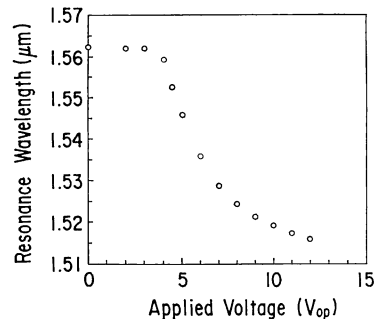


図 5 液晶可変波長フィルタの共振波長の電圧依存性

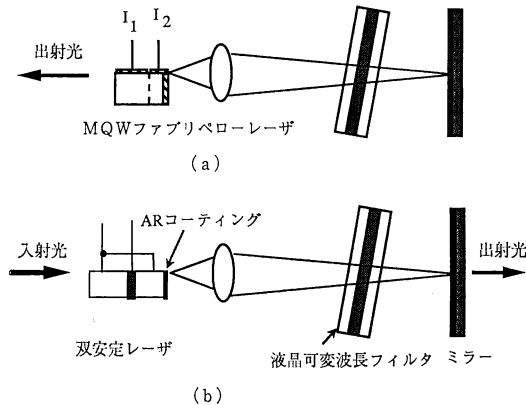


図6 (a)外部共振器形可変波長レーザーの構造,  
(b)外部共振器形波長変換レーザーの構造

### 3.3 応用デバイス

可変波長フィルタとしての応用のほかに、半導体レーザーと組み合わせて外部共振器形の変換波長レーザー<sup>12)</sup>、波長変換素子<sup>13)</sup>の応用も検討されている。その構造を図6(a)および(b)に示す。可変波長レーザーでは位相調整領域付きのファブリペロ形MQWレーザーと外部ミラーとで構成される外部レーザーキャビティ内に液晶フィルタを置き、その発振波長を制御する。波長可変幅40nm、出力1~2mWを得ている。波長変換レーザーでは可飽和吸収体を持つファブリペロ形双安定レーザーの外部キャビティ内に液晶フィルタを配置し、任意の波長の光入力に対して発振する出力光の波長を可変に制御する。入力波長可変幅20nm、出力波長可変幅40nmと、モノリシックな半導体レーザーよりも1桁大きな波長可変範囲を実現できる。従来この種のレーザーには、機械式グレーティングが用いられてきたが、装置が大型となるという欠点があった。液晶可変波長フィルタを用いて、高速、安定で小型な装置化が期待できる。

## 4. まとめ

液晶材料の光通信・光情報処理用素子への応用について、筆者らのグループで進めている空間光変調器、波長フィルタの研究を中心に紹介した。空間光変調器は画像の処理ができる点でこれからの光情報処理のキデバイスとなりえるものであり、特に強誘電性液晶を用いることによりメモリ性、高速性、高感度といった特長が加わる。一方、ファブリペロエタロン内に液晶を充填した可変波長フィルタは画像用の色フィルタとしてだけでなく、その高フィネス化により波長多重通信の光チューナなど光通信用部品としての応用も期待できる。そのほか光スイッチなど液晶の大きな電気光学効果を利用した光

処理素子は今後さらに進むものと期待される。一方、通信や情報処理で使われている近赤外の波長帯(0.8~1.5 $\mu$ m)での液晶の光学特性や、半導体レーザーの強いパワーに対する液晶の安定性などはほとんど調べられていない。応用の検討とともに液晶材料のこのような基礎データも積み重ねていくことが必要であろう。

本稿で紹介した分野が本格的に検討され始めたのは最近であり今後、特性改善、新デバイスへの創出に向けて、液晶材料と光デバイスの両面からの研究が進むことを期待したい。

## 文 献

- 1) E. Wagner and J. Cheng: "Electrically controlled optical switch for multimode fiber applications," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 2921.
- 2) T. Kurokawa and T. Yoshizawa: "Optical switches using liquid crystals," *Topical Meeting on Photonic Switching, Kobe, 13C-35* (1990) p. 152.
- 3) H. Ito, T. Yamamoto and T. Nakagami: "A polarization-switched optically reconfigurable interconnection network," *Topical Meeting on Photonic Switching, Kobe, 13C-6* (1990) p. 65.
- 4) J. A. Neff, R. A. Athale and S. H. Lee: "Two-dimensional spatial light modulators: A tutorial," *Proc. IEEE*, **78** (1990) 826-855.
- 5) S. Fukushima, T. Kurokawa, S. Matsuo and H. Kozawaguchi: "Bistable spatial light modulator using a ferroelectric liquid crystal," *Opt. Lett.*, **15** (1990) 285-287.
- 6) S. Fukushima and T. Kurokawa: "Optical parallel processor for binary images with cascaded bipolar-operational spatial light modulators," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **3** (1991) 682-684.
- 7) S. Fukushima, T. Kurokawa and M. Ohno: "Real-time hologram construction and reconstruction using a high-resolution spatial light modulator," *Appl. Phys. Lett.*, **58** (1991) 787-789.
- 8) 佐藤多俊, 加藤直樹, 加野 偉, 花澤康行, 内田龍男: "液晶を用いた波長可変型オプティカル・バンドパスフィルタ", *信学技報*, **EID 89-100** (1990) 75-80.
- 9) K. Hirabayashi, H. Tsuda and T. Kurokawa: "Narrowband tunable wavelength selective filter," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **3** (1991) 213-215.
- 10) J. S. Patel, M. A. Saifi, D. W. Berreman, C. Lin, N. Andreadakis and S. D. Lee: "Electrical tunable optical filter for infrared wavelength using LC in a Fabry-Perot etalon," *Appl. Phys. Lett.*, **57** (1990) 1718-1720.
- 11) K. Hirabayashi, H. Tsuda and T. Kurokawa: "New structure of wavelength-selective filter with a LC for FDM systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **3** (1991) 741-743.
- 12) H. Tsuda, K. Hirabayashi, Y. Tohmori and T. Kurokawa: "Tunable light source using a LC FPI," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **3** (1991) 504-506.
- 13) 津田裕之, 植之原裕行, 岩村英俊, 平林彦彦, 黒川隆志: "液晶可変波長フィルタと MQW 双安定レーザを用いた外部共振器形波長変換", *応用物理学会秋季大会予稿集*, 12a-ZN-3 (1991) p. 1058.