

研究報告

異常光起電力膜による導波型光変調器の特性安定化

加藤直彦, 元廣友美, 日置辰視, 市川正, 伊藤博

Gain Stabilization of Optical Waveguide Modulator Using Anomalous Photovoltaic Film

Naohiko Kato, Tomoyoshi Motohiro, Tatsumi Hioki, Tadashi Ichikawa, Hiroshi Ito

要 旨

CdTeとCdSの同時斜め蒸着法により作製した異常光起電力膜 (CdTe-CdS膜) をMach-Zehnder干渉計型のLiNbO₃導波型光変調器上に集積化した。低パワー (1mW), 低コストの波長830nmのレーザ光を異常光起電力膜に照射して, 光変調器の半波長電圧 (5V) 程度の光起電圧を発生させ, 光導波路内の信号光を制御した。光導電性をもつCdSの添加により, 膜を低抵抗化できたために, 異常光起電力特性をもつことが知られているCdTe斜め蒸着膜よりも速い応答 (応答時間0.1sec.) を達成した。

CdTe-CdS膜を集積化することにより, 周辺温度の変動によるLiNbO₃導波型光変調器の動作点の変動を補償する特性安定化システムを構築し, 全光制御による動作点の自動安定化を実現した。本システムは, 動作点安定化用の補償電圧の供給に電線を使用しないため, 電線で誘起される電磁ノイズの影響を受けることなく, 高い信号/ノイズ比の光変調を可能にする。さらに, 本システムを電磁界の計測器に利用する場合には, 被測定電界を乱さずに高精度の電界計測ができる利点がある。

Abstract

An anomalous photovoltaic film formed by simultaneous oblique sputter deposition of CdTe and CdS was integrated on a LiNbO₃ optical waveguide modulator which works as a Mach-Zehnder interferometric modulator (MZM). Light irradiation with a low power (1 mW) and a low cost laser source with a wavelength of 830nm induced the photovoltage around 5V which is as high as the half-wave voltage of the MZM. This photovoltage was used to control the signal light in the waveguide. Since the addition of the photoconductive CdS decreased the film resistance, the rise time of the photovoltage became much shorter than that of the conventional anomalous photovoltaic film formed by the oblique deposition of CdTe. An auto-

stabilizing system was constructed, which compensates the drift of the optical working point of the MZM by negatively feeding back the drift value as the light intensity irradiated on the film. This all optical feedback control system successfully attained the auto-stabilization of the modulator. This system enables a light modulation of a high signal noise ratio, since it does not use the electric wire causing an electromagnetic noise to transmit the feedback voltage. When the system is used to stabilize a system for measuring an electromagnetic field, it enables the high accurate measurement without disturbing the electromagnetic field to be measured.

キーワード

異常光起電力膜, 光制御, 導波型光変調器, 安定化, 温度ドリフト, LiNbO₃, CdTe-CdS, 2元同時斜め蒸着法

1. はじめに

基板上に形成された導波路内を伝搬する光を制御する光変調器や光スイッチなどの能動的な光導波素子は、光通信機器や電磁界を検出する光計測器における重要な光部品である。例えば、導波型光変調器を用いる電界計測器は、広い周波数帯域、測定範囲を有し、強電磁界下でも電磁妨害などの影響を受けずに高精度の計測が可能であるという特徴があり、小型であることから自動車内の狭い場所での電磁界計測用として有望視されている¹⁾。

典型的な導波型光変調器はLiNbO₃ (以下LNと略す)などの強誘電体結晶の電気光学効果による屈折率変化を利用し、素子に電圧または電界を印加して駆動する。例えば、Mach-Zehnder干渉計型(MZ型)光変調器の場合は式(1)に示すように出力光強度 I は印加電圧 V の余弦関数的に変調される。

$$I = I_0 \cos^2[(\phi/2) - \{\pi/(2V_\pi)\}V] \quad \cdots \cdots (1)$$

ϕ : 位相バイアス, I_0 : 入力光強度

V_π は半波長電圧と呼ばれ、導波路内を伝搬する光の位相が π だけ変化するのに必要な電圧を示す。この際、動作点を安定化させることは重要な技術である。MZ型光変調器では動作点である位相バイアスを $\pi/2$ に設定すると最も高感度で、広いダイナミックレンジの特性が得られる。ところが、Fig. 1に

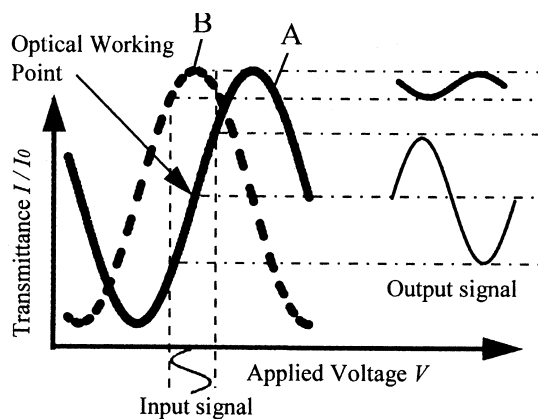


Fig. 1 Characteristics of Mach-Zehnder interferometric waveguide modulator.
A : Optimized characteristics
B : Characteristics drifted by temperature change

示すように周辺温度の変動により動作点変動し、感度及び測定精度が低下する問題(温度ドリフトと呼ぶ)がある²⁾。光通信用の光変調器では、動作点の変動に相当する電圧を外部から電線を用いて印加する温度ドリフト補償技術が提案されている³⁾が、上記の電界計測器には適用できない。金属製の電線を用いる手法では、電磁界を乱したり、妨害電圧が誘起され信号/ノイズ比が低下するために測定精度が低下するからである。このため、光変調器をセンサ部に用いる電界計測器は、温度範囲を制限して使用されている。

今回、我々は、異常光起電力膜を集積化した光制御型の導波型光変調器を開発し、光ファイバを用いて制御光を光起電力膜に供給することにより、光変調器の動作点の変動に相当する電圧を発生させ、温度ドリフトを補償する光制御型の導波型光変調器特性安定化システムを提案し、その性能を評価した。本報告では、最初に、導波型光変調器に適用できる異常光起電力膜について検討し、上記膜を集積化した光制御型光変調器の性能について述べ、最後に、特性安定化用の光/電気回路系を構築し、システムの性能を評価した結果を報告する。

2. 異常光起電力膜の探索

2.1 膜に対する要求仕様

膜には、以下の3項目の仕様が要求される。

(1)MZ干渉計型光変調器では、光変調器の V_π (約5V)より高電圧が印加されると出力光強度が振動し、光変調器が安定に動作しない。従って、制御用レーザ光照射(波長 λ :830nm帯、照射強度:10mW/cm²以下)で V_π 相当の光起電圧を発生することが必要である。なお、制御用レーザ光の波長 λ を830nm帯とするのは、光源の低価格化と石英系光ファイバでの低損失性のためである。

(2)光起電圧特性の安定性としては、相対湿度90%、温度45℃の大気中で、1年間を通じて光起電圧の変動量5%以下が要求される。

(3)膜の製造法としては、LN基板の損傷を抑制するためにスパッタ蒸着などのソフトな成膜法が求められ、基板温度は室温が望ましい。

2.2 膜の作製及び評価方法

これまでに、LN光変調器上に集積化する光起電

力膜としては、2種類が提案されている。1つは、pn接合を形成した非晶質Si膜（a-Si太陽電池）である⁴⁾。この膜は、応答速度が速い（時定数5 μ sec.）という利点があるが、1個のa-Si太陽電池では0.8V程度の光起電圧しか得られないため、 V_{π} （ $\sim 5V$ ）を得るため6個以上のa-Si太陽電池を集積化する複雑な作製プロセスが必要で、さらに波長830nmでの感度が悪いなどの欠点がある。もう一つは、大きな光起電力を発生するCdTeなど半導体の斜め蒸着膜である⁵⁾。絶縁性基板上の半導体の斜め蒸着膜では、微弱光量の照射によりバンドギャップに相当する光起電圧より数10～100倍高い異常光起電圧を発生することが知られている⁶⁾。この異常光起電力膜は一回の蒸着で作製できるという利点があるが、膜の内部抵抗が高いため入射光に対する光起電圧の応答速度が遅い、蒸着条件で特性が大きく変動するなど様々な問題があり、実用化されるに至っていない。

上記の問題を克服し、応答性の速い異常光起電力膜を開発するために、我々は、異常光起電力を有するCdTeと光導電性を示すCdSを同時に斜めスパッタ蒸着して形成した膜に着目した⁷⁾。以後、この膜をCdTe-CdS膜と記述する。**Fig. 2**の2源同時斜め高周波スパッタ蒸着装置により上記膜を作製した。2つのスパッタ陰極の軸は、LN基板の法線より70°傾斜させ、CdTeターゲットは左側の陰極に、

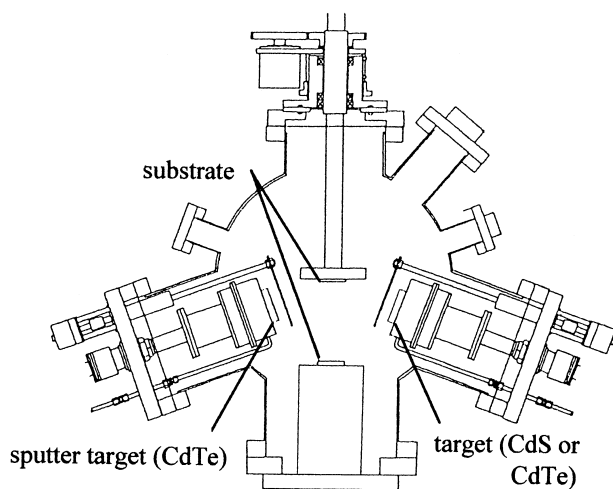


Fig. 2 Schematic drawing of the sputtering apparatus to form the anomalous photovoltaic substance.

CdSあるいはCdTeターゲットは右側の陰極に配置した。単相のCdTe-CdTe膜をCdTe-CdS膜との比較のため作製した。なお、LNの保護のため基板温度は室温とした。各ターゲットへの投入電力を変化させて、蒸着速度を制御し、組成の異なる膜を作製した。**Table 1**に蒸着条件と膜組成を示す。CdSの蒸着速度及び膜中のS成分比はCdSの投入電力にほぼ比例し、容易に制御できた。

以下の方法で測定した光照射時の開放端電圧（ V_{oc} ）と内部抵抗（ ρ ）を、膜の光起電力特性の指標とした。あらかじめ、Alの橢型電極（電極間隔1mm）を電子ビーム蒸着でLN上に形成した基板を用い、半導体レーザ光（ $\lambda 830nm$ 、光出力1mW）を膜面に垂直に照射した時の電極間の V_{oc} と ρ をエレクトロメータ（入力インピーダンス $10^{14}\Omega$ ）で測定した。なお、光起電圧の極性は、CdTeターゲットに近い電極電位がCdTeターゲットに遠い側の電極電位よりも高い場合に+と表記した。

2.3 膜の光起電力特性と構造

光変調器の V_{π} 相当の光起電圧（ $\sim 5V$ ）を得るために膜の光起電力特性の膜組成比依存性を調べた。**Fig. 3**にCdTe-CdS膜の V_{oc} と ρ の膜組成比依存性を示す。どの組成でも V_{oc} の極性は+であった。膜中のS成分比の増加に伴い、 V_{oc} 及び ρ が低下した。S成分比が0.24原子数比のCdTe-CdS膜では V_{oc} は V_{π} にほぼ一致するため、光変調器に適用できる。膜中のS成分比の増加に伴い膜の抵抗が減少し、また、

Table 1 The deposition condition and the composition of the films.

Electric power (P) supplied to the target P/W		Deposition rate /nm sec ⁻¹		Film composition /at. %		
CdTe	CdS	CdTe	CdS	Cd	S	Te
30	20	0.17	0.11	42.2	16.4	41.3
30	30	0.17	0.15	48.1	19.1	32.8
30	40	0.17	0.18	48.7	21.7	29.6
30	50	0.17	0.22	51.6	24.1	24.3
30	60	0.18	0.25	49.7	26.6	23.7

Supettering gas : Argon
Gas pressure : 0.333Pa

光起電圧の立ち上がりの時間も短くなった。**Fig. 4**に応答時間 τ の組成比依存性を示す。なお、光照射後の光起電圧の過渡応答曲線が時間に対し指数関数的に変化すると仮定し、光起電圧が収斂値の63%に達するまでに経過した時間を応答時間 τ と定義した。S成分比が0.24原子数比のCdTe-CdS膜の τ は単相のCdTe-CdTe膜の τ の1/5に短縮した。なお、同組成比よりもS成分に富む膜では、 τ はより短くなるが V_{oc} が V_{π} より低下するために光変調器に集積化する膜には不適當である。

Fig. 5に示す光電流の分光感度特性から、CdTe-

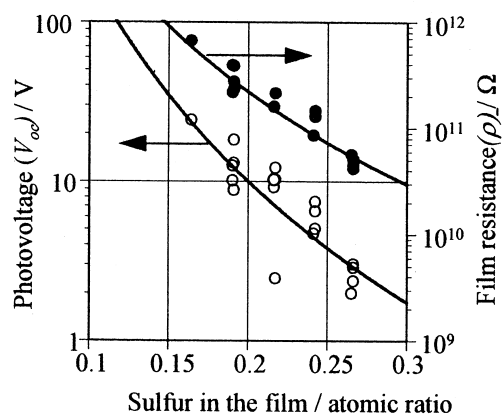


Fig. 3 Compositional dependence of the photovoltage and the internal resistance of the CdTe-CdS film.

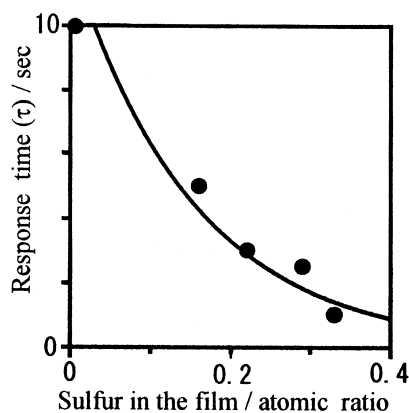


Fig. 4 Compositional dependence of the response time to photo-irradiation.

CdS膜は、2.3eVの光子エネルギーで強いピークを、CdTe-CdS膜では1.6eV付近に弱いピークをもつことがわかる。これらのピーク位置はCdS, CdTeのバンドギャップにほぼ等しいことから（それぞれ2.4eV, 1.5eV），CdTe-CdS膜はCdS成分の添加で生じる光導電性に起因して、膜が低抵抗化し、光起電圧の立ち上がり時間が改善されたと考えられる。

次に、CdTe-CdS膜の構造について述べる。2源同時斜め蒸着法で得られる薄膜は、基板面内に異方性のあるnmレベルの周期的な複合構造をもつことが絶縁体と半導体の2元系（例ZnS-SiO₂）で確認されているが⁸⁾、半導体同志の系の構造については報告例が無い。そこで、透過電子顕微鏡（TEM）観察及びX線回折（XRD）を用い、CdTe-CdS膜の構造を調べた。**Fig. 6**にTEM像を示す。CdTe-CdS膜には10nm程度の結晶子が認められるが、ZnS-SiO₂系のような周期構造は確認できなかった。**Fig. 7**にCdS, CdTeの単独膜及びCdTe-CdS膜のXRDパターンを示す。CdTe-CdS膜では回折線は、立方晶のCdTe, CdSに帰属できず、格子面間隔はCdS, CdTeの間の値を示した。以上からCdTe-CdS膜は、nmレベルの周期的な複合構造が熱的に緩和し、一部にCdS_xTe_{1-x}の固溶体を含んだ構造であると推察される。

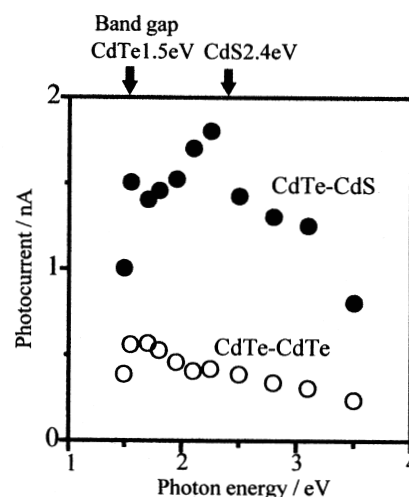


Fig. 5 Spectral sensitivity of photocurrents of CdTe-CdS film and the single phase CdTe-CdTe films. The number of incident photons were same for both films.

2. 4 光起電力発生機構

1元斜め蒸着膜では、異常光起電力は傾斜した柱状構造に由来し、柱状構造内に形成された微小な光電池が基板面内に直列に接続して高い光起電圧を発生するとされている⁹⁾。ただし、微小な光電池自体は確認されていない。今回作製したCdTe-CdS膜において、その異常光起電力の発生に傾斜した柱状構造が必要か否かを検討するために、CdTe-CdS, CdTe-CdTe系で両側から等量を蒸着させ、基

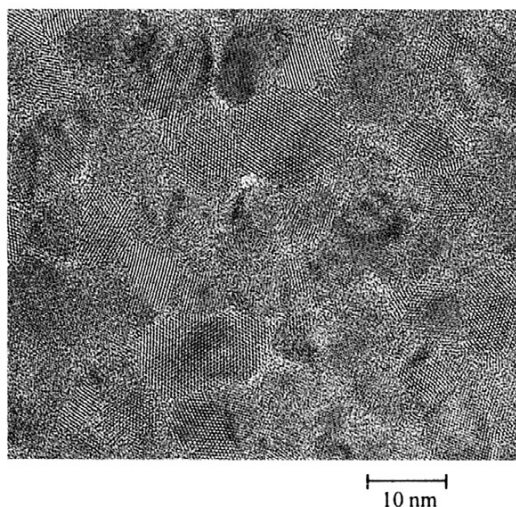


Fig. 6 TEM image from the surface of the CdTe-CdS film.

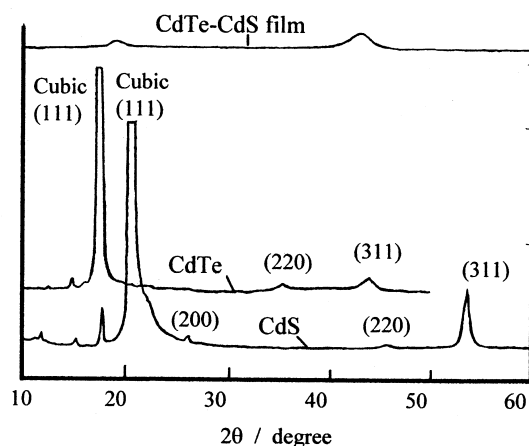


Fig. 7 XRD patterns of the CdTe-CdS film, the single phase CdTe film and the single phase CdS film.

板に垂直な柱状構造をもつ膜を作製し、その光起電力特性を比較した。

Fig. 8にCdTe-CdS膜断面のSEM像を示す。膜厚200nmでは、柱状構造が基板に垂直に成長したが、膜厚1000nmでは表面近傍で柱状構造の癒着が観察された。**Fig. 9**に示すように光起電圧は200nmの薄

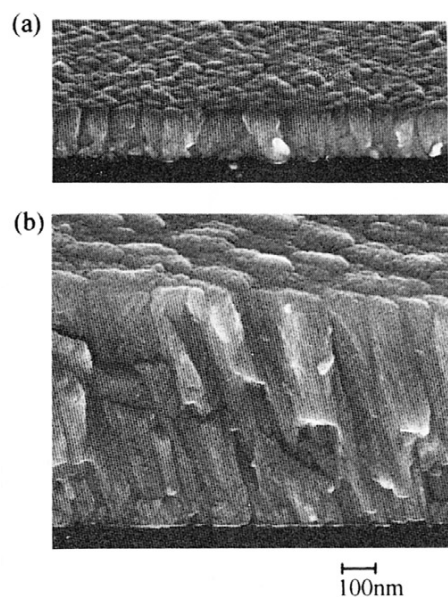


Fig. 8 SEM images of the cross section of the CdTe-CdS films.
Film thickness : (a)200nm (b)1000nm

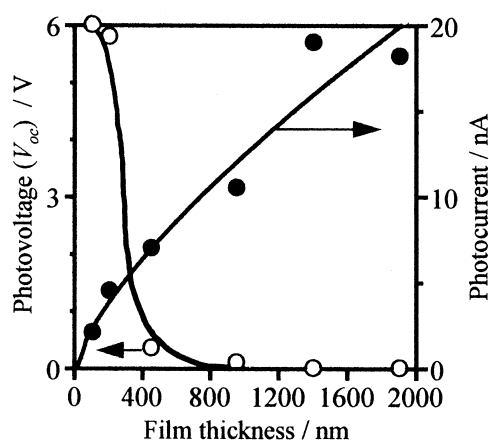


Fig. 9 Dependence of the photovoltage and photocurrent of the CdTe-CdS film on the film thickness.

膜で発生したが、1000nmの厚膜では発生しなかった。一方、1000nmの膜厚までは、膜厚の増加に伴って光電流は増大したことから、膜厚1000nmの膜では柱状構造が癒着し均質化したために、表面近傍で短絡して電圧降下したと推察した。つまり、異常光起電圧の発生には、柱状構造が必要であると考えた。ところで、CdTe-CdS膜では柱状構造は傾斜していなくても、高い V_{oc} を発生した。他方、垂直な柱状構造のCdTe-CdTe膜では V_{oc} はほぼ0Vだった。**Fig. 10**に光電流の照射角依存性を示す。CdTe-CdS膜では光電流の大きさは照射角に依存し、垂直入射で最も大きくなった。他方、CdTe-CdTe膜では光電流の大きさは照射角に依存しなかった。以上の結果から、**Fig. 11**に示す異常光起電力発生機構を提案した。CdTe-CdS膜では、膜内部の寄与が大きいため、面内の組成の不均一性に起因して、柱状構造内でpn接合のような電位勾配が形成され、それが相加的に結合して高い光起電圧を発生する。一方、CdTe-CdTe膜では、表面の寄与が大きく、光生成電荷の拡散によって膜厚方向に電位勾配が生じるが、垂直な柱状構造では、膜面内方向の電位差成分がないため V_{oc} は発生しないと推察した。

3. 光制御式導波型光変調器

3. 1 光変調器の試作と評価

MZ型の光変調器を分岐部で半分に切断し、端面

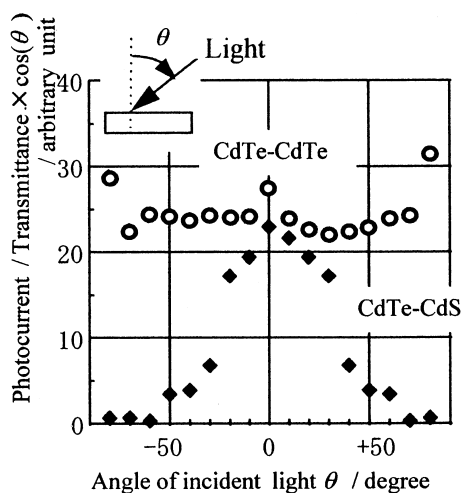


Fig. 10 Dependence of the photocurrent on the angle of the incident light.

に反射膜を設けた反射型の導波型光変調器を試作した。**Fig. 12**に光変調器の外観図を示す。光導波路は光リソグラフィを用いて作成したTiパターン(幅7 μm , 厚さ50nm, 分岐間隔24.5 μm)をZ-cut-LN基板に熱拡散(1025 $^{\circ}\text{C}$ 8時間)して作製した。SiO₂(厚さ200nm)の緩衝層, Al(厚さ1 μm)電極を順に導波路上に形成した後, CdTe-CdS膜(2mm $\times$ 1mm, 膜厚200nm)を前記手法で作製した。LN基板はセラミック板にエポキシ樹脂で固定し, 導波路端面に偏波面保存仕様の光ファイバ(PMF)を

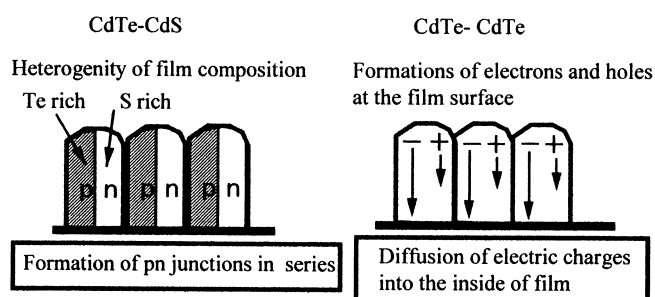


Fig. 11 Mechanisms of anomalous photovoltaic effects the CdTe-CdS film and single phase CdTe-CdTe film.

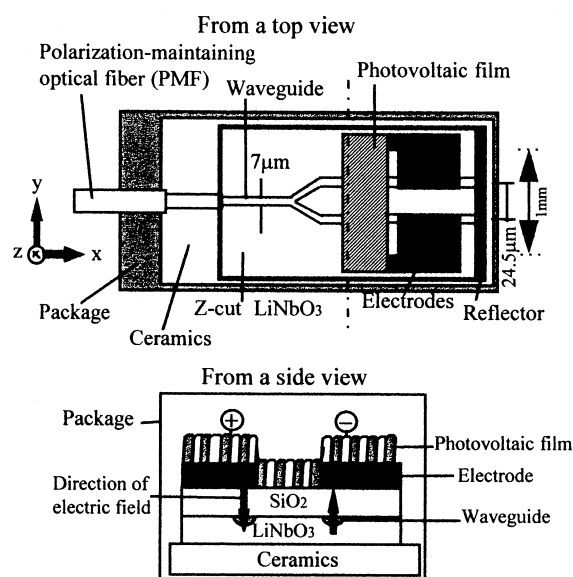


Fig. 12 Retroreflective Mach-Zehnder interferometric waveguide modulator integrated with the photovoltaic film.

接続し、プラスチック製の容器に保持した。さらに、マルチモードファイバ (MMF) の先端にプリズムを接着し、それをプラスチック製のふたに固定した。次にMMFを固定したふたでLN変調器を保持した容器を覆い、パッケージとした。

光変調特性はFig. 13に示す光学系を用いて評価した。入力信号光として波長 $\lambda 1.3\mu\text{m}$ のInGaAsPのレーザ光 (2mW) をPMFで導波路端面に伝送した。制御光は $\lambda 830\text{nm}$ のレーザ光をMMFとプリズムを介してCdTe-CdS膜に照射した。変調された出力信号光はビームスプリッタで分岐して、光検出器で検出した。制御光及び出力信号光強度をオシロスコープで観測した。なお、光変調器は密閉フラスコ内に設置し、フラスコ内の湿度を加湿器で制御して、特性の湿度依存性を評価した。

Fig. 14に光変調器の光-光変調特性を示す。矩形波の制御光照射による出力信号光の変調を確認した。CdTe-CdS膜の組成比により応答波形が変化した。S原子数比0.24の膜では、出力信号光の波形は制御光と対応し、たち上がり時間0.1sec.で応答した。なお、出力光の応答時間は、Fig. 4に示す同じ組成比の膜の光起電圧の立ち上がりの応答時間 (2sec.) より短い。これは、素子の電極間容量 (C) の違いによる。応答時間の時定数は、Cと膜の内部抵抗 (ρ) の積に対応する。同じ組成比の膜では ρ は同じであるが、光変調器のCは膜の光起電圧を測定した素子のCよりも約10倍小さいため、光-光変調の応答時間は約1/10に短縮した。一方、

S原子数比0.16では、出力信号光の波形は振動した。最適組成 (S原子数比0.24) よりCdTeに富む組成では、変調器の V_{π} 以上の V_{oc} が発生するため波形が振動し、光変調器に集積化する膜として不適当なことが確認された。

3.2 湿度の影響と対策

上記光変調器の特性は湿度に対し大きく変動する問題があった。Fig. 15に光変調特性の湿度依存性を示す。光変調器を大気中に曝した状態では、湿度10%時の膜の光起電圧を100%とすると、湿度

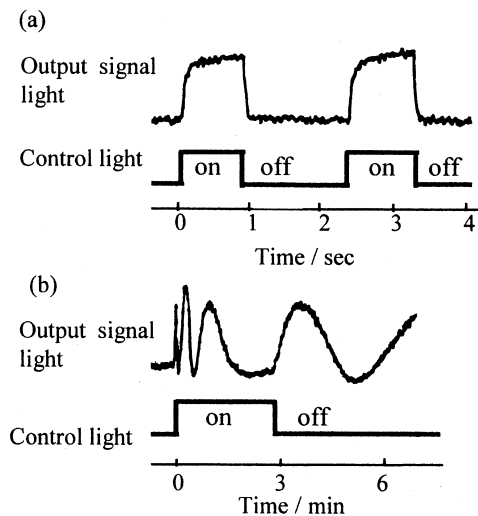


Fig. 14 Optical output signal patterns of the modulator. Photovoltaic film composition : (a)0.24 S atomic ratio. (b)0.16 S atomic ratio.

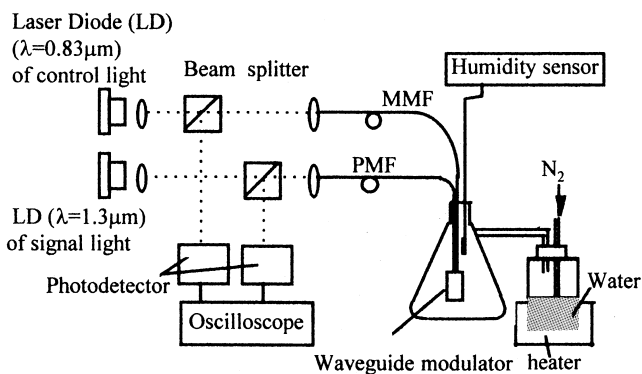


Fig. 13 Evaluation system of the waveguide modulator property.

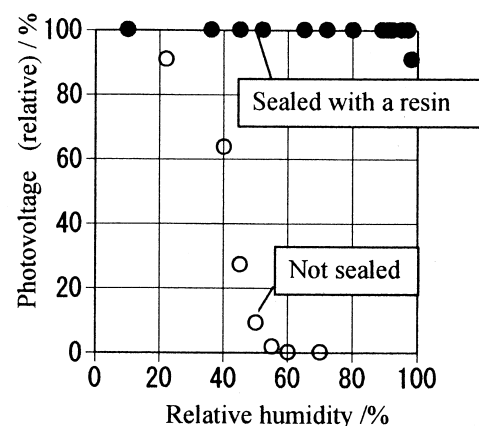


Fig. 15 Dependence of photovoltage on the relative humidity.

50%以上では光起電圧（相対値）は0%になった。LN基板を覆うパッケージを紫外線硬化樹脂で気密封止することにより、相対湿度90%で8時間保持した時の特性の変動を5%以下に低減できた。

4. 光変調器の特性安定化システム

光制御型光変調器を用いて特性を安定化するシステムを考案し、電界計測装置に応用した結果を述べる。Fig. 16に同装置の概要を示す。装置は電界センサ部と安定化部から構成される。電界センサ部は、既報と同じ構成である²⁾。計測用レーザ光（ $\lambda 1.3\mu\text{m}$ ）をPMFを通じて、センサ部の光変調器に伝送すると電界強度に応じて変調された信号光が反射鏡で反射され戻ってくる。これを光検出器（PD）で受け、高周波通過回路を介して被測定電界強度を計測する。安定化部は制御用レーザ（LD）、低周波濾波回路（LPF）、同期検波器（LA）から構成される。制御用LDを直流電圧と5Hzの交流電圧を重畳した信号で駆動し、制御光（ $\lambda 830\text{nm}$ ）をMMFを通じて光変調器の異常光起電力膜部に照射した。これより発生した V_{oc} が電極に印加され、信号光の出力光強度は5Hzで変調される。この信号をPDで電圧変換した後、LPFで低周波成分のみを抽出し、制御用LDに印加した交流信号を基準としてLAで同期検波し、素子の位相バイアス変動、すなわち、動作点の変動量に比例した電圧を抽出した。これを制御用LDの駆動電圧に負帰還し、動作点の

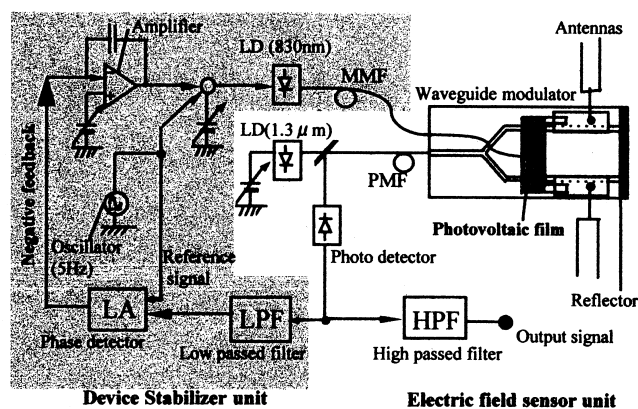


Fig. 16 Gain stabilization system of the waveguide modulator.

変動を補償した。

Fig. 17には、周辺温度を変化させた時に光制御安定化システムを駆動した場合と駆動しない場合の動作点の変動を示す。なお、動作点の変動量は位相に変換して表示した。安定化を行わない場合には 20°C から 40°C の温度変動で、動作点は $\pi/4$ 変動するが、安定化システムの付加により動作点変動は $\pi/60$ 以下、感度変動は1%以下に抑制できた。

5. まとめ

(1) CdTe-CdSの2源同時斜め蒸着法により作製した薄膜は異常光起電力効果を発現し、CdSの添加により膜の光導電性が増加したため、光起電圧の立ち上がり時間が従来のCdTe斜め蒸着膜の1/5に短縮した。

(2) 上記CdTe-CdS膜をMach-Zehnder型導波型光変調器に集積化することにより、導波光の変調が1mWの光により生じ、その立ち上がり時間は0.1sec.であった。

(3) 温度変動による光変調器の動作点の変動量に相当する電圧を抽出し、制御光の駆動回路へ負帰還する安定化システムを構築し、光変調器の動作点の自動安定化を実現した。

参考文献

- 1) Ito, H. et al. : IEICE Tech. Report, EMCJ90-96(1990), 25
- 2) 伊藤博, 市川正 : 豊田中央研究所R&Dレビュー, 29-3(1994), 13
- 3) 朝日光司 : 特公平5-232412
- 4) Yajima, H. et al. : Appl. Phys. Lett., 45(1984), 214
- 5) 辻本好信, ほか : 特公昭60-44647

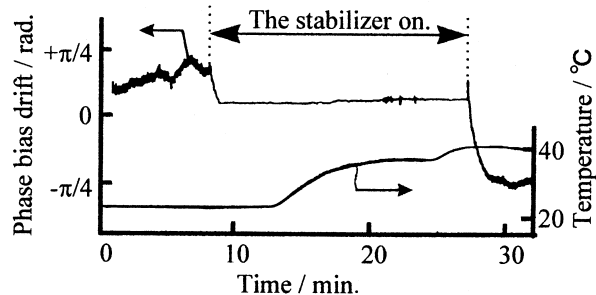


Fig. 17 Stability of the waveguide modulator under the temperature variation.

- 6) Goldsten, B. and Pensak, L. : J. Appl. Phys., **30**(1959), 155
- 7) Kato, N. et al. : Solar Energy Material & Solar Cells, **35**(1994), 285
- 8) Motohiro, T. et al. : Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **206**(1991), 423
- 9) Sharma, S. K. and Srivastava, R. S. : Thin Solid Films., **150**(1987), 217

著者紹介



加藤直彦 Naohiko Kato

生年：1965年。

所属：物性研究室。

分野：光機能材料，デバイスの研究・開発（無機光回路材料，情報記録材料）。

学会等：応用物理学会会員



元廣友美 Tomoyoshi Motohiro

生年：1953年。

所属：物性研究室。

分野：触媒反応解析。情報記録材料。

学会等：応用物理学会，日本光学会，日本表面科学会，MRS会員
工学博士。



日置辰視 Tatsumi Hioki

生年：1947年。

所属：LB開発研究室。

分野：電池の研究開発。

学会等：日本物理学会，粉体粉末冶金協会会員

1987年日本金属学会論文賞受賞。

1988年粉体粉末冶金協会研究進歩賞受賞。

理学博士。



市川正 Tadashi Ichikawa

生年：1961年。

所属：光応用研究室。

分野：光集積回路の研究・開発。



伊藤博 Hiroshi Ito

生年：1949年。

所属：光応用研究室。

分野：光集積回路。光応用計測。

学会等：応用物理学会，計測制御学会，電子情報通信学会会員