

論文

Mach-Zehnder型光変調器を用いた電界センサのオプティカルバイアス角調整法

小林 隆一^{†*} 田島 公博[†] 桑原 伸夫[†] 徳田 正満^{††}

Optical Bias Angle Control Method for Electric-field Sensor using Mach-Zehnder Interferometer

Ryuichi KOBAYASHI^{†*}, Kimihiro TAJIMA[†], Nobuo KUWABARA[†], and Masamitsu TOKUDA^{††}

あらまし Mach-Zehnder型光変調器を用いた電界センサは、小型で広帯域、電磁界を乱さないといった特徴をもつため、EMC計測への応用が期待されている。しかしながら、電界センサに使用する光変調器の動作点（オプティカルバイアス角）を調整する方法が明らかにされていないため、そのダイナミックレンジが制限されているという問題点があった。本論文では、光変調器が形成されている光学結晶基板の1点に外力を加えて変形させ、Mach-Zehnder型光変調器の導波路長を変えることにより動作点を調整する方法を提案している。まず、基板に外力が加わった場合に生じる導波路長の変化と応力の変化による導波路の屈折率変化を考慮して外力とオプティカルバイアス角の関係を理論解析により求め、導波路長の変化が応力による屈折率変化より支配的であることを明らかにする。つぎに、実際に電界センサを作製し、理論どおり電界センサのオプティカルバイアス角を調整できること、周囲温度変化に対する特性変動は、従来の電界センサとほぼ同等であることを示す。

キーワード 電界センサ、オプティカルバイアス角、応力、光弾性効果、Mach-Zehnder型光干渉計、EMC

1. まえがき

最近の技術の進歩により、電子機器に重要な役割が要求されてきており、電子機器の電磁両立性（EMC：Electromagnetic Compatibility）の評価を行うことは、信頼性の高いシステムを構築するためにますます重要になってきている。EMCの評価を行うためには、電子機器が設置される電磁環境の評価だけでなく、電子機器自身の両立性も試験する必要がある。電子機器からのエミッション、イミュニティの試験が行われている。

電磁環境の評価やこれらの試験に用いる試験装置の評価には電磁界強度の測定が必要であり、現在、電界測定用のセンサとして、FETを入力に用いたセンサ[1]、E/O変換器を内蔵したセンサ[2]等、さまざまなセンサが開発されている。なかでも光変調器を用いた電界センサは、(1)センサロッド以外は非金属材料で構

成されているため、測定電界を乱さず、正確な電界測定が可能である、(2)光変調器が広帯域で動作するため、広帯域な周波数特性をもつ、(3)小型で、バッテリーを必要としないため、長期間の測定や、電子装置近傍の電界の測定が可能である、といった利点をもつため、EMCの評価に利用する電界センサとして開発が進められている[3]~[7]。

光変調器を用いた電界センサには、LiNbO₃等の光学結晶を用いたタイプ[3]、[4]とLiNbO₃等の基板上にMach-Zehnder型光干渉計を形成しこれを光変調器として用いたタイプ[5]~[7]の2種類が主に検討されている。このうちMach-Zehnder型光干渉計を用いた電界センサは、最低検出可能な電界強度が1mV/m以下と感度が高いため[4]、広い応用範囲をもつ電界センサとして開発が進められている。

電界センサは最もダイナミックレンジを大きくとれる位置にその動作点（オプティカルバイアス角）を設定するのが理想であるが、Mach-Zehnder型光干渉計を用いた光変調器の場合、サブミクロン単位で導波路の長さを調整する必要があり、光変調器を製造する段階で調整を行うのは困難である。そのため、光変調器に

[†] NTTマルチメディアネットワーク研究所、武蔵野市

NTT Multimedia Networks Laboratories, Musashino-shi, 180-8585 Japan

^{††} 九州工業大学工学部電気工学科、北九州市

Department of Electronic Engineering, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu-shi, 804-0015 Japan

*現在、NTT技術協力センター

直流電圧を印加して調整したり，製造後の光変調器のなかから目的にあったオプティカルバイアス角に近い値をもつものを選んで使用していた．しかし，前者の方法では金属製の電源の内蔵により小型で被測定電界に影響を与えないという電界センサの特徴を損なう点や，後者の方法では一つの電界センサ用に複数の光変調器を作らなければならないといった点から，電界センサに適用することはむずかしく，より簡易にオプティカルバイアス角を調整する方法の実現が望まれていた．

本論文では，電界センサの光変調器として用いる Mach-Zehnder 型光干渉計が形成された基板の一点に力を加えて基板を変形させ，導波路の長さを変えることによって，電界センサのオプティカルバイアス角を調整する方法を提案している．まず，オプティカルバイアス角とダイナミックレンジの関係について述べる．つぎに，Mach-Zehnder 型光干渉計が形成された基板の一端を固定し，もう一端に力を加えると，導波路の長さや導波路の屈折率が変化し，オプティカルバイアス角を調整することが可能であることを理論解析により示す．最後に，オプティカルバイアス角の調整可能な電界センサを作製し解析結果との比較を行う．

2. 電界センサの動作原理とオプティカルバイアス角

図1に光変調器として Mach-Zehnder 型光干渉計を用いた電界センサの構造を示す．図のように，電界センサは光源部 (Optical source)，センサ部，光検出部 (Photo-detector) の三つに分かれる．センサ部は，電界を検出するセンサロッド部 (Sensor rod) と，光変調器およびそれを収めるきょう体からなっている．光源部-セ

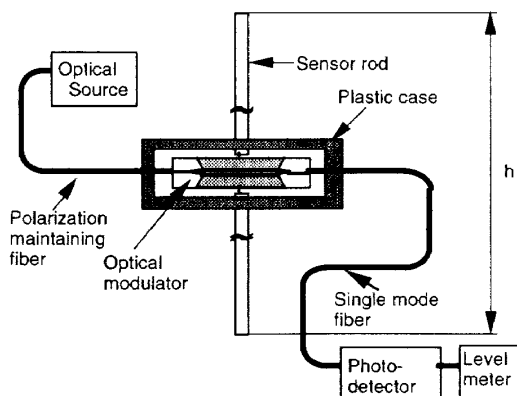


図1 Mach-Zehnder 型光干渉計を用いた電界センサの構造
Fig. 1 Configuration of the electric field sensor using Mach-Zehnder interferometer.

ンサ部間は偏波面保持ファイバ (Polarization maintaining fiber) により接続され，センサ部-光検出部間はシングルモードファイバ (Singlemode fiber) により接続されている．光源から出た光は，偏波面保持ファイバを通り光変調器に入射される．このとき，センサ部周囲に電界が印加されると，電磁結合によりセンサロッド間に起電力 V_m が誘起される．この電圧は光変調器に印加され，この電圧により，各導波路内に電界が生じる．電気光学効果によって各導波路の屈折率が変化し，各導波路内を通る光に位相差が生じる．この位相差により，二つの光の合成後，強度変調された光信号となる．この強度変調は印加された電気信号の変化に比例するため，印加された電気信号が光信号に変換される．Mach-Zehnder 型干渉計を用いた光変調器の場合，入射光を I_{in} とすると，出力される光の強度は以下の式で表される [8], [9]．

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{2} \left\{ 1 + \cos \left(\pi \frac{V_m}{V_p} + \varphi \right) \right\} \quad (1)$$

ここで， I_{in}, I_{out} はそれぞれ入射光および出射光の強度， V_p は光の位相を半波長だけ変化させるのに必要な電圧で，半波長電圧と呼ばれる． φ は光変調器の動作状態を決定するオプティカルバイアス角である．電界強度を E ，電界センサのロッドの実効長を h_e とすると，電界方向とセンサが平行な場合，O/E 変換器からの出力電圧は以下の式で与えられる [4]．

$$V_{out} = \frac{\eta \eta_m I_{in}}{2} \left\{ 1 + \cos \left(\frac{\pi}{V_p} \right. \right. \\ \left. \left. \times \left| \frac{1 / (1 + j\omega C_m R_m)}{Z_{in} + 1 / (1 + j\omega C_m R_m)} \right| E h_e + \varphi \right) \right\} \quad (2)$$

ここで， Z_{in} はセンサロッドの駆動点インピーダンス， C_m は光変調器の入力キャパシタンス， R_m は光変調器の入力抵抗， η_m は O/E 変換器の変換効率， η は光源から O/E 変換器までの伝搬損失を表している．

Mach-Zehnder 型光干渉計は入射した光を二つの導波路に分け，それぞれの導波路で位相差を与え，再び合成することで光に強度変調を加えている．この場合オ

プティカルバイアス角は、導波路の長さの違いや屈折率の違いにより決定される。

図2にオプティカルバイアス角と入-出射光の関係を示す。図の横軸は光変調器の電極への印加電圧 V_m 、縦軸が出射光強度 I_{out} である。図の実線はオプティカルバイアス角 90 度の場合、点線は 0 度の場合である。オプティカルバイアス角が 0 度の場合、変調器電極への印加電圧に対してその出射光は図に示すようにもとの波形を復元せず、また変換効率、強度も小さなものとなる。一方、オプティカルバイアス角 90 度の場合、出射光のダイナミックレンジ、変換効率は最大となる。以上より、光変調器を用いた電界センサの感度およびダイナミックレンジを向上するためには、オプティカルバイアス角を 90 度に調整する手法を確立する必要がある。

オプティカルバイアス角を調整する方法としては光変調器の電極に直流電圧をバイアスとして印加する方法や Mach-Zehnder 型光干渉計の製造時に二つの導波路の位相差を調整する方法が、従来より採用されている。しかし、本電界センサにこれらの方法を採用する場合、前者については電界センサ内部に金属性の電源を内蔵する必要があるため、周囲電界分布に与える影響が問題となる。また、後者については導波路の長さを使用している光源の波長以下であるサブミクロンオーダーで調整する必要があり、技術的に困難である。

そこで、本論文では Mach-Zehnder 型光干渉計が形成された基板に力を加えて変形させ、それにより生じる導波路の長さの変化や屈折率変化によってオプティカルバイアス角を調整方法を提案する。

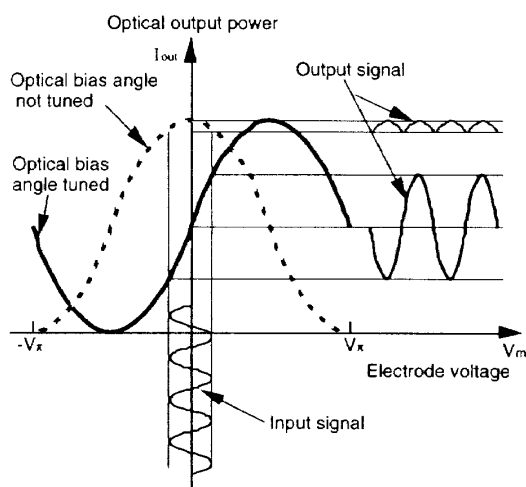


図2 オプティカルバイアス角と出力光の関係

Fig. 2 Relationship between optical bias angle and output optical power.

3. オプティカルバイアス角の調整方法

図3に本論文で述べる光変調器のオプティカルバイアス角の調整方法を示す。図に示すように Mach-Zehnder 型光干渉計が形成された基板 (Substrate) の一端を固定し、もう一端に力を加えて変形させる。このとき、導波路が基板の中心軸に対して対称に配置されていれば、一方の導波路には引張り応力が働き、もう一方の導波路には圧縮応力が働くので、導波路の長さや屈折率が変化して、位相差が生じる。この位相変化を用いてオプティカルバイアス角を調整できる。

基板に力を印加したときに生じる位相変化の要因として、

- (1) 導波路に加えられた応力の差により二つの導波路の伸びに差が生じて起こる位相差
- (2) 導波路に加えられた応力の差により二つの導波路の屈折率に差が生じて起こる位相差

が考えられる。

このとき、式(1)に示すオプティカルバイアス角 φ は以下のように表される。

$$\varphi = \varphi_d + \varphi_e + \varphi_0 \quad (3)$$

ここで、 φ_d は導波路の伸びの差による位相差、 φ_e は導波路の屈折率の差による位相差、 φ_0 は製造時に生じた二つの導波路長の差や屈折率の差による位相差である。

以下で、印加した力と位相差の関係について述べる。

3.1 導波路の伸びによる位相差

図3に示すようなモデルを用いた場合、力が加わることにより、基板の長手方向に曲げ応力が現れる。計算のための座標系は図3に示すように定めるとする。

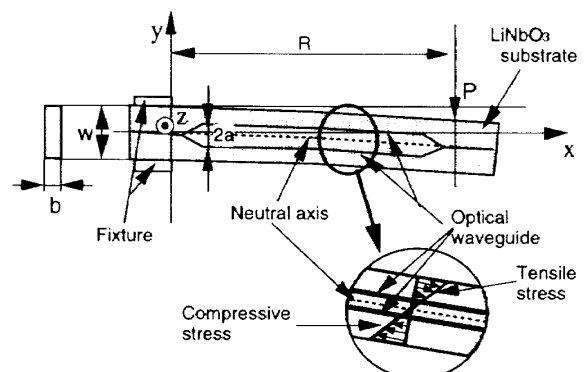


図3 オプティカルバイアス角の調整方法

Fig. 3 Optical bias control method.

光変調器に使用される LiNbO₃ 等の光学結晶は異方性結晶のため、応力 T はテンソルで考える必要がある [10]. すなわち、

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

である. ここで, T_{ij} は結晶に働く応力を表し, i 番目の軸に垂直な面に働く j 軸方向の応力である. 図 3 と式 (4) の対応は, $i,j=1$ が x 軸, $i,j=2$ が y 軸, $i,j=3$ が z 軸を表している. 応力 T は対称 2 階テンソルであるから, その対称性から $T_{ij}=T_{ji}$ が成立するので, 簡略化のため添字 ij を以下のように置き換える.

$$\left. \begin{array}{l} 11 \rightarrow 1, 22 \rightarrow 2, 33 \rightarrow 3, \\ 23, 32 \rightarrow 4, 31, 13 \rightarrow 5, 12, 21 \rightarrow 6 \end{array} \right\} \quad (5)$$

応力とひずみの関係は以下の式で与えられる.

$$[S_k] = [s_{ik}][T_i] \quad (6)$$

ここで $[s_{ik}]$ は弾性コンプライアンス定数である. 基板に印加する力は十分に小さく, 長手方向以外の曲げ応力の成分は小さいものと仮定して考え, 式 (4) の各成分を以下のようにおく.

$$\left. \begin{array}{l} T_1 \neq 0 \\ T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = T_6 = 0 \end{array} \right\} \quad (7)$$

ここで, 添字 i ($i=1,2,3,4,5,6$) は, 式 (5) で与えられる応力の印加方向とその作用面を表している. このとき導波路にかかる曲げ応力は以下の式で与えられる [11].

$$T_1(x,y) = -12 \frac{Py}{bw^3} x \quad (8)$$

ここで, T_1 は x と y の関数であり, 基板上で大きさが変化する. また, P は印加された力, w, b はそれぞれ, 基板の幅および厚さである.

導波路上では, $y = \pm a$ であり, 式 (6)~(8) および LiNbO₃ の弾性コンプライアンス定数から, 曲げ応力による導波路の伸びは, 導波路上のひずみを積分することにより以下の式で与えられる.

$$\Delta L_{d+} = \int_0^R s_{11} T_1(x,a) dx = -6s_{11} \frac{Pa}{bw^3} R^2 \quad (9)$$

ここで, s_{11} は弾性コンプライアンス定数, R は基板の固定点から外力印加点までの距離, $2a$ は 2 本の導波路

の間隔, 添字 $+$ は y 軸の $+$ 側方向にある導波路の伸びを意味している. この式 (7) から, 各導波路の長さの差は以下の式で与えられる.

$$\Delta L_d = L_{d+} - L_{d-} = -12s_{11} \frac{Pa}{bw^3} R^2 \quad (10)$$

よって, 導波路内の光の波長 λ_g を用いることにより, 導波路間の位相差は以下の式で与えられる.

$$\Phi_d = \frac{2\pi}{\lambda_g} \Delta L_d = -\frac{24\pi n_e s_{11}}{\lambda} \frac{Pa}{bw^3} R^2 \quad (11)$$

ここで, n_e は LiNbO₃ の異常光に対する屈折率, λ は真空中の光の波長である.

3.2 導波路の屈折率差による位相差

光変調器に使用される LiNbO₃ 等の光学結晶は応力が加わると光弾性効果により屈折率が変化する. 従って, 各導波路に生じる応力を求め, 屈折率変化による位相差を求めた. いま, 基板への印加電圧は 0 V であるとする, 屈折率だ円体の式は, 以下のように与えられる [12].

$$B_1 x^2 + B_2 y^2 + B_3 z^2 + 2B_4 yz + 2B_5 zx + 2B_6 xy = 1 \quad (12)$$

ここで, 係数 B_k は

$$[B_k - 1/n_k^2] = [\pi_{ik}][T_i] \quad (13)$$

で与えられる, ここで π_{ik} は光弾性係数, k, l ($=1,2,3,4,5,6$) は式 (5) で与えられる力の方向とその作用面を表す係数である. LiNbO₃ の定数および, $n_1=n_2=n_o$, $n_3=n_e$, $n_4=n_5=n_6=0$ の条件から, 式 (13) は以下のようになる.

$$\left. \begin{array}{l} B_1 - 1/n_o^2 = \pi_{11} T_1 \\ B_2 - 1/n_o^2 = \pi_{21} T_1 \\ B_3 - 1/n_o^2 = \pi_{31} T_1 \\ B_4 = \pi_{41} T_1 \\ B_5 = 0 \\ B_6 = 0 \end{array} \right\} \quad (14)$$

ここで, T_1 は外力の印加により x 方向に発生する曲げ応力, n_e, n_o はそれぞれ, 異常光, 常光に対する屈折率, π_{ij} は光弾性係数である. 式 (12), (14) から, 結晶に x 方向の曲げ応力が現れることにより, 屈折率だ円体に変化し, z 軸および y 軸が回転することがわかる. いま, 印加する力による変位が微小であるという条件に対しては, この回転角は十分小さく, 光学軸である z

軸の変化は無視できると考えられる。従って、導波路の基本モード (E_{300}) に対しては、屈折率が円体の z 軸方向成分の屈折率の変化を考えればよい。式 (12) に式 (14) を代入し、回転の成分を無視することにより y, z 軸に関する屈折率円体は以下の式で与えられる。

$$\frac{1}{n_0^2} \left(1 + \pi_{21} n_0^2 T_1 \right) y^2 + \frac{1}{n_e^2} \left(1 + \pi_{31} n_e^2 T_1 \right) z^2 = 1 \quad (15)$$

このとき、屈折率の変化分に関して、

$$\left| \pi_{21} n_0^2 T_1 \right| \ll 1, \left| \pi_{31} n_e^2 T_1 \right| \ll 1 \quad (16)$$

が成立する場合、式 (15) は以下ようになる。

$$\frac{y^2}{n_0^2 \left(1 - \frac{1}{2} \pi_{21} n_0^2 T_1 \right)^2} + \frac{z^2}{n_e^2 \left(1 - \frac{1}{2} \pi_{31} n_e^2 T_1 \right)^2} = 1 \quad (17)$$

従って、 z 軸方向の屈折率変化は

$$n_z = n_e - \Delta n_z \quad (18)$$

となり、導波路上 ($y = \pm a$) のある点の屈折率の変化分は以下の式で与えられる。

$$\Delta n_z(x) = \frac{n_e^3}{2} \pi_{31} T_1(x, a) \quad (19)$$

導波路上に加わる応力は位置により変化するから、導波路全体での位相変化は、式 (19) に式 (8) を代入して以下の積分を行うことにより求められる。

$$\varphi_e = 2k_0 \int_0^R (\Delta n_{z+} - \Delta n_{z-}) dx \quad (20)$$

ここで、 k_0 は光の波数、 $\Delta n_{z+}, \Delta n_{z-}$ は、それぞれ y 軸の + 側および - 側の屈折率変化を表している。従って、導波路の屈折率変化に対する位相差は以下の式で与えられる。

$$\varphi_e = \pi \frac{T_1(R, a)}{T_\pi} \quad (21)$$

但し、

$$T_1(R, a) = -12 \frac{Pa}{bw^3} R \quad (22)$$

$$T_\pi = \frac{\lambda}{n_e^3 \pi_{31} R} \quad (23)$$

ここで、 P は印加された外力の大きさ、 w, b はそれぞれ、 LiNbO_3 基板の幅と厚さである。また、 T_π は光の位相を π だけ変化させるのに必要な応力を表している。

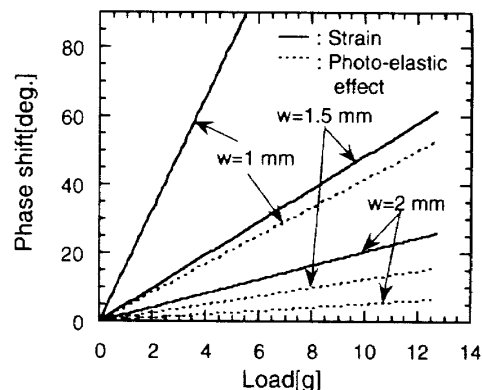


図4 印加した力に対する位相変化量
Fig. 4 Relationship between applied load and phase shift.

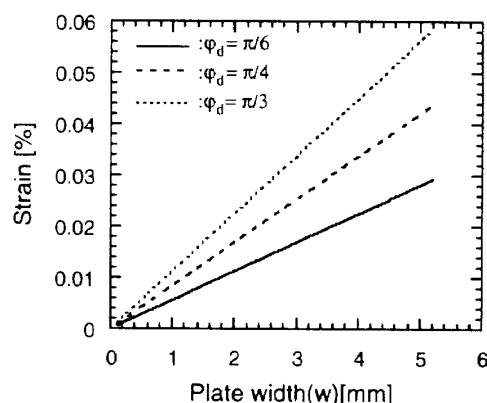


図5 基板の幅と最大ひずみの関係
Fig. 5 Relationship between plate width and maximum strain.

3.3 解析結果

解析結果を図4、図5に、解析に用いた定数を表1に示す。解析は現在電界センサに使用されている定数値 [13] を使用した。また、導波路の間隔についても同様に、電界センサに使用される Mach-Zehnder 型光変調器に用いられている値を代表値として使用した。

図4は印加した力に対する位相変化量を示している。パラメータは基板の幅である。また、実線は導波路の伸びによる位相変化量、破線は屈折率の変化による位相変化量である。図から、幅1 mmの基板の場合、5 g程度の力を加えるだけで位相を90度程度変化させることができることがわかる。また、導波路の伸びによる位相変化は、屈折率の変化による位相変化の3倍程度であり、外力印加による位相変化に関しては、導波路の機械的な伸びが支配的であることがわかる。更に、基板の幅が増加すると同じ位相変化を生じさせるのに必要な力が増えることがわかる。

図5は LiNbO_3 基板に印加される最大ひずみについて求めた結果である。ここで、最大ひずみは以下の式で

表1 計算パラメータ
Table 1 Calculation parameter.

Constants		Values
Distance between load applied and fixed points (R [mm])		45
Distance between waveguides ($2a$ [μm])		20
Substrate width (w [mm])		1
Substrate thickness (b [mm])		0.5
Photo-elastic constant ($\times 10^{-10}$ [N/m^2])	π_{31}	0.64
	π_{21}	0.37
Elastic compliance constant (S_{11}) ($\times 10^{-12}$ [m^2/N])		5.78
Refractive index (n_e) (extraordinary ray)		2.14
Wave-length (λ [μm])		1.3

定義した.

$$\varepsilon = s_{11} T_1 \left(R, \frac{w}{2} \right) \quad (24)$$

ここで, s_{11} は応力印加方向の弾性コンプライアンス定数である.

図において, パラメータは伸びによる位相の変化量である. 図から, 基板の幅が増えるに従い, 同じ位相変化量を得るための基板の最大ひずみが大きくなるのがわかる. このことから, 本論文で提案する方法を幅の大きな基板に適用した場合, ひずみにより基板を破損する可能性があることを示している.

4. 測定結果

オプティカルバイアス角の調整方法を検証するため, Mach-Zehnder型光変調器を用いた電界センサを作製し, 加える力とオプティカルバイアス角の関係を求め, 3.で得られた理論値との比較を行った.

4.1 電界センサの構成

図6にオプティカルバイアス角が調整可能な構造とした電界センサの構成図を示す. 図のように, 電界センサのきょう体内の光変調器の一端を固定し, もう一方の端にナイロン製のねじを取り付け, 基板の側面に力が加わるような構造になっている. 表1に使用した電界センサのパラメータを示す. 光変調器は, 長さ55 mm \times 幅1 mm \times 厚さ0.5 mmの細長いz-cut LiNbO₃基板上にMach-Zehnder型光干渉計がTi拡散により形成されている.

4.2 測定系

図7に, 印加する力とオプティカルバイアス角との

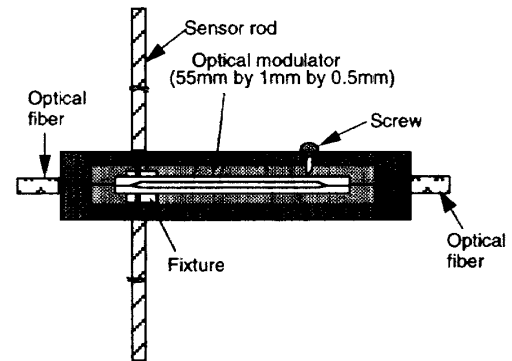


図6 オプティカルバイアス制御型電界センサの構造
Fig. 6 Configuration of the electric field sensor with optical bias control.

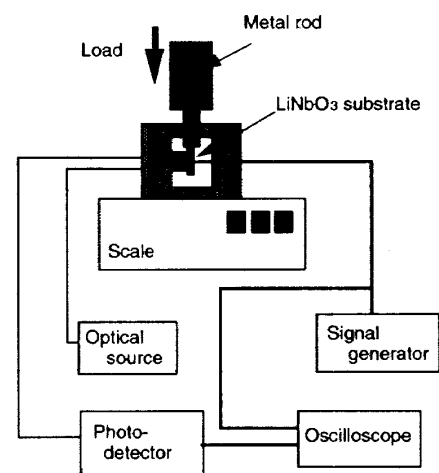


図7 測定系
Fig. 7 Measurement setup.

関係を求めるための測定系の構成図を示す. 図のように, 光変調器には金属の棒により力を印加する. その印加した力の大きさは, 光変調器の下に置かれた電子秤により測定される. 光変調器には, シグナルジェネレータから三角波形を印加し, 光変調器の出力波形と印加波形との関係をオシロスコープにより測定することで, オプティカルバイアス角を求める.

図8にオプティカルバイアス角の測定例を示す. 図の横軸は変調器への印加電圧を表し, 縦軸は光検出器からの出力を表している. 図の2本の実線(カーブ)は, 外力を印加していない場合の光検出器からの出力の変化と, 外力を印加しオプティカルバイアス角を90度に調整した場合の出力変化をそれぞれ示している. この図より, 作製した電界センサに用いている光変調器は, 外力を加えない場合, オプティカルバイアス角は0度に近い値となっているが, 適当な外力を加えることにより, オプティカルバイアス角を90度付近に調整可能であることがわかる.

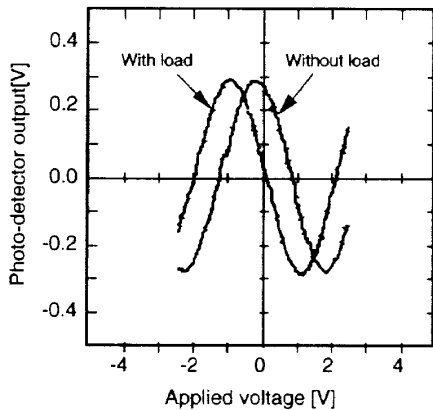


図8 オプティカルバイアス角の測定結果
Fig. 8 Measurement example of the optical bias angle.

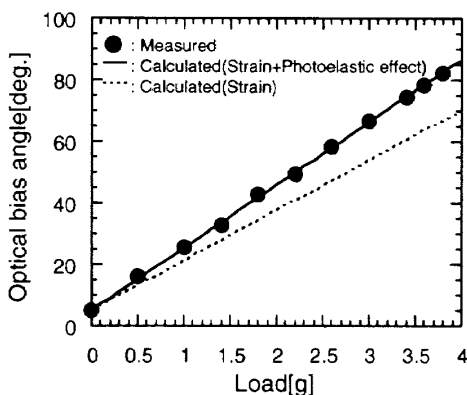


図9 印加した力に対するオプティカルバイアス角の変化
Fig. 9 Applied load versus optical bias angle.

4.3 印加した力とオプティカルバイアス角の関係

図9に、印加した力に対するオプティカルバイアス角の変化の測定結果を示す。図の黒丸(●)は測定値である。図から、オプティカルバイアス角の変化は、印加した力の大きさに比例していることがわかる。図の点線は、式(11)で与えられる力学的な伸びのみを考えた計算値である。力学的な伸びのみを考えた計算値は測定値とは一致せず、より小さな値となっている。そこで、式(21)で与えられる光弾性効果による位相変化も考慮した計算結果を実線で示す。その結果、測定値と計算値はよく一致していることがわかる。このことから、オプティカルバイアス角の変化は、力学的な伸びによる各導波路長の差による位相差と光弾性効果による屈折率変化による位相差の二つの要因により生じていることがわかる。更に、計算値と実験値の一致から、3.1で述べた解析方法によって、応力によるオプティカルバイアス角の変化が解析可能であることがわかった。

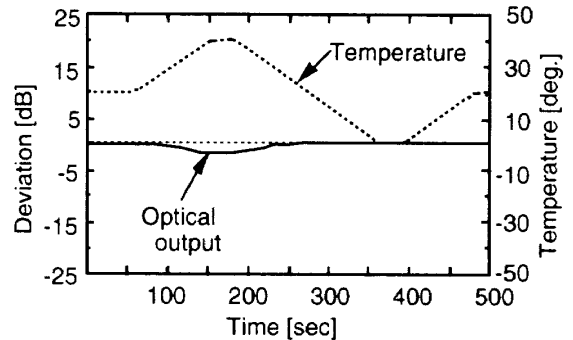


図10 オプティカルバイアス制御型電界センサの温度特性測定結果

Fig. 10 Temperature dependence of the electric field sensor with optical bias control.

4.4 電界センサの温度特性

基板に力を印加してオプティカルバイアス角を調整する方法を実用化する場合、想定される問題点の一つとして温度依存性が考えられる。これは、常に基板がひずみを受けた状態にあるため、温度変化により生じる熱応力がそれに加わって、電界センサの温度特性を劣化させることが想定されるからである。

そこで、図6に示す電界センサの温度依存性の測定を行った。電界センサを恒温槽に入れ、周囲温度を0～40度まで変化させたときの挿入損失の変化を測定することにより温度依存性を得た。測定結果を図10に示す。図に示すように、この電界センサの挿入損失の温度変化は2 dB以内であり、オプティカルバイアス角の調整機能をもたない電界センサとほぼ同等の特性[14]をもつことがわかった。

5. むすび

本論文では、Mach-Zehnder型光干渉計が形成されている光学結晶基板に外力を印加する方式による電界センサのオプティカルバイアス角調整方法を提案し、理論的および実験的検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 光変調器基板に力を加えることにより、変調器のオプティカルバイアス角を調整することが可能である。
- (2) 印加した力とオプティカルバイアス角の関係は、導波路の伸びおよび導波路上の応力による屈折率変化を考慮した理論解析により求めることができる。
- (3) 電界センサを作製して、その特性を測定した結果、測定値は理論値とよく一致し、理論の妥当性を示した。

(4) 電界センサの温度特性はオプティカルバイアス角の調整機能をもたない電界センサとほぼ同じであり、本方法が実用性の高い方法であることを示した。

本論文で提案する手法は、簡単にオプティカルバイアス角の調整が可能であり、電界センサにおける動作点調整法として有効なものである。しかし、機械的に応力を加えているため、その経年変化の影響が考えられるので、今後この点について検討する必要がある。

謝辞 本研究を行うにあたり、有意義な御助言、御指導を頂いたNTTマルチメディアネットワーク研究所ネットワークインテグリティ研究部山本尚生部長、福井工業大学芳野越夫教授、住友大阪セメント(株)中央研究所箕輪純一郎部長に感謝致します。

文 献

- [1] 松井利己, 横島一郎, "FETトランジスタを用いたダイポール電界センサ," 信学技報, IM-86-15, pp.29-36, April 1986.
- [2] 村川一雄, 桑原伸夫, "光/電気変換器を用いた球状ダイポールアンテナ," 信学論(B-II), vol.J74-B-II, no.12, pp.699-706, Dec. 1991.
- [3] J.C.Wyss and S.T.Sheeran, "A practical optical modulator and link for antenna," IEEE J. Lightwave and Technol, vol.LT-3, no.2, pp.316-321, April 1985.
- [4] 小林隆一, 田島公博, 桑原伸夫, 徳田正満, "LiNbO₃光変調器を用いた電界センサの感度解析," 信学論(B-II), vol.J79-B-II, no.11, pp.734-743, Nov. 1996.
- [5] C.H.Bulmer and S.C.Hiser, "Linear Ti:LiNbO₃ Modulator at 1.3 mm for Electromagnetic Field Sensing," SPIE, vol.517, pp.177-185, 1984.
- [6] N.Kuwabara, K.Tajim, F.Amemiya, and R.Kobayashi, "Development and Analysis Electric Field Sensor Using LiNbO₃ Modulator," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.34, no.4, Nov. 1992.
- [7] M.Kondo, Y.Tokano, T.Tanabe, and R.Muramatsu, "Reflection type electro-optic electric field sensor with LiNbO₃ Optical waveguide," 1994 IEEE International Symposium on Electromagn. Compat., Sendai, 19P606, pp.774-777, May 1994.
- [8] 久間和生, 布下正宏, 光ファイバセンサ《基礎と応用》, pp.233-258, 情報調査会, 1985.
- [9] 大越孝敬編, 光ファイバセンサ, pp.101-124, オーム社, 1986.
- [10] 小川智哉著, 結晶物理光学, pp.176-178, 裳華房, 1976.
- [11] 竹内洋一郎, わかる材料力学, pp.138-147, 日新出版, 1969.
- [12] 西原 浩, 春名正光, 栖原利明, 光集積回路, pp.103-117, オーム社, 1985.
- [13] N.Kuwabara and R.Kobayashi, "Development of electric field sensor using Mach-Zehnder Interferometer," 1995 International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zurich, Switzerland, 92N8,

pp.489-494, March 1995.

- [14] 桑原伸夫, 小林隆一, "光変調器を用いた電界センサの特性改善(周波数帯域, 感度, 温度依存性の改善)," 信学'93春大, 分冊2, no.SB-3-3, pp.641-642, March 1993.

(平成9年7月9日受付, 12月4日再受付)



小林 隆一 (正員)

平3電通大・電気通信・通信卒。平5同大学院修士課程了。同年日本電信電話(株)通信網総合研究所入所。以来、EMCにおける光計測技術、電磁妨害波の伝搬方向特定、波源探査技術の研究・開発に従事。現在、NTT技術協力センタ勤務。IEEE会員。



田島 公博 (正員)

昭61熊本大・工・電気卒。平元同大学院修士課程了。同年日本電信電話(株)通信網総合研究所入所。EMCにおける光計測技術の研究に従事。平3~5 NTT技術協力センタにおいて、フィールドでの通信EMC障害における技術者への技術的サポートに従事し、保守支援ツール、ノイズフィルタ等、電磁防護品を開発。現在、1 GHz以上における通信EMCの研究、光計測技術の研究に従事。NTTマルチメディアネットワーク研究所勤務。研究主任。IEEE会員。



桑原 伸夫 (正員)

昭50静岡大・工・電気卒。昭52同大学院修士課程了。同年日本電信電話公社(現、NTT)茨城電気通信研究所入所。以来、通信システムの雷防護、光ファイバの信頼性評価、通信システムのEMI評価、EMCにおける光計測技術等に関する研究・開発に従事。現在、NTTマルチメディアネットワーク研究所ネットワークインテグリティ研究部グループリーダー。工博。IEEE会員。



徳田 正満 (正員)

昭42北大・工・電子卒。昭44同大学院修士課程了。同年日本電信電話公社(現、NTT)電気通信研究所入所。以来、光ケーブルの伝送特性測定法、通信装置のEMC技術に関する研究に従事。現在、九工大・工・教授。工博。昭61年度業績賞受賞。IEEE会員。