

## Mach-Zehnder型光変調器を用いた電界センサの周波数特性改善方法

小林 隆一<sup>†\*</sup> 田島 公博<sup>†</sup> 桑原 伸夫<sup>†</sup> 徳田 正満<sup>††</sup>

Improvement of Frequency Characteristics of Electric Field Sensor using Mach-Zehnder Interferometer

Ryuichi KOBAYASHI<sup>†</sup>, Kimihiro TAJIMA<sup>††</sup>, Nobuo KUWABARA<sup>††</sup>, and Masamitsu TOKUDA<sup>†††</sup>

あらまし 電子装置の進歩と共に、装置のEMCに対する評価が重要な課題となっている。EMC評価のためには、装置近傍での電磁界を正確に把握する必要がある。そのため、現在さまざまな電界測定用のセンサが開発されている。そのなかで、Mach-Zehnder型光変調器を用いた電界センサは、広帯域、高感度、高分解能といった特徴をもつため、EMC計測における応用が期待されている。しかしながら、数MHz以上の周波数において原因不明の感度変化が発生し、正確な電界強度の測定を困難なものにしている。本論文では、この感度変化が、光変調器を形成している光学結晶基板の圧電効果による共振現象によるものではないかと考え、理論的に求めた共振周波数と測定値を比較し、これが基板の幅方向の共振によるものであることを明らかにしている。つぎにこの結果に基づき、基板の幅を長手方向に変化させることにより、共振現象を抑制する方法を提案している。最後に、長手方向に幅を変化させた光学結晶基板を用いた光変調器を作製し、それを電界センサに使用することにより、周波数特性が改善できることを明らかにしている。

キーワード Mach-Zehnder型光干渉計, 圧電効果, 共振周波数, 電界センサ, EMC

### 1. ま え が き

電子装置のデジタル化や移動通信の発達により、我々を取りまく電磁環境は年々複雑なものとなっている。そのため、電磁両立性(EMC: Electromagnetic Compatibility)の評価が重要であるとされているが、これには中波放送帯から、移動体通信の準マイクロ波領域にわたる広い周波数領域の電磁波の測定が必要である。また、移動通信端末や高速無線LAN等の発達により、これら端末の近傍電磁界や電子レンジ等に代表されるISM装置の近傍電磁界を測定することも新たな課題とされている。このようなことから、EMCの計測においては、広帯域な周波数特性をもち、電子装置の近傍で電界の測定が可能な電界センサが必要とされている。

上記の目的のための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[3]~[10]は、(1)センサロッド以外は非金属材料で構成されており、測定電界を乱さず、電子装置近傍でも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)小形で、バッテリーを必要としないことから、長期間の測定が可能である、といった利点をもつので、EMC計測における応用が期待されている。

光変調器を用いた電界センサには、LiNbO<sub>3</sub>等の光学結晶を用いたタイプ[3]、[4]とLiNbO<sub>3</sub>等の光学結晶基板上にMach-Zehnder型光干渉計を形成したタイプ[5]、[6]の2種類が報告されている。特にMach-Zehnder型光干渉計を用いた電界センサは、アンテナ長を短くし、準マイクロ波帯まで測定可能とした微小エレメント型[7]や、光ファイバの数を減らした反射型[8]、また、電極パターンを変化させ感度向上をはかった電界センサ[9]等、さまざまな種類の電界センサが報告されている。

しかしながら、光変調器を用いた電界センサの感度は、原理的に周波数依存性がないにもかかわらず、測定を行うと1 MHz以上の周波数帯域で細い感度変化があり、これが電界測定の精度を劣化させる原因となっていた。

<sup>†</sup> 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

<sup>††</sup> 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, 804-8550 Japan

\* 現在, NTT技術協力センタ

そこで、本論文では、この細い感度変化の原因を明らかにし、その改善方法を提案することを目的としている。まず電界センサの感度特性を測定し、1 MHz以上で細い感度変化が生じていることを示す。つぎにこの現象が光学結晶基板のもつ圧電効果に基因する共振現象により生じていると考え、理論解析から共振周波数を求め、測定結果と比較している。更にこの結果より、周波数特性の劣化の原因になっている共振モードを求め、改善方法を提案する。最後に、この改善方法を適用した電界センサを作製し、その改善効果の確認を行っている。

## 2. 電界センサの感度特性の周波数依存性

### 2.1 電界センサの構造

光変調器を用いた電界センサの構造を図1に示す。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、この電圧により変調器内部を通る光が強度変調される。入射光を  $I_{in}$  とすると、出力光強度  $I_{out}$  は以下の式で

表される[10].

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

ここで、 $V_{\pi}$  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。 $\phi$  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と呼ばれる値である。

電界強度を  $E$ 、電界センサの実効長を  $h_e$  とすると、電界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[3].

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

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、 $\eta_m$  はO/E変換器の変換効率、 $\eta$  は光源からO/E変換器までの損失を表している。

本論文では、一般に光変調器として用いられているLiNbO<sub>3</sub>基板上に形成されたMach-Zehnder型光干渉計の場合について検討を行う。

図2にMach-Zehnder型光干渉計の構造を示す。図のように、LiNbO<sub>3</sub>基板上にTi拡散により、導波路が形成されている。変調器に入射された光は、導波路に入りY分岐により二つの光に分けられる。このとき電極上に電圧が印加されると、各導波路の屈折率の変化により、各導波路を通る光に位相差が生じ、それが再び合成される。このとき各導波路間の光の位相差により、

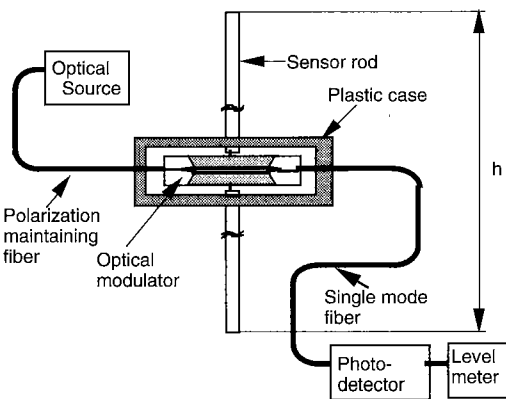


図1 光変調器を用いた電界センサの構造

Fig. 1 Configuration of the electric field sensor using optical modulator.

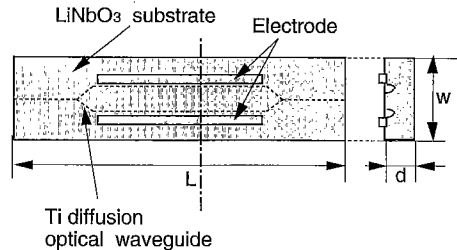


図2 Mach-Zehnder型光変調器の構造

Fig. 2 Configuration of the Mach-Zehnder interferometer.

合成された光は式(1)で与えられる強度変調光となる。

### 2.2 電界センサの周波数特性

図3に示す測定系を用いて、電界センサの感度の周波数特性を測定した。電界の発生装置には方形部分の大きさが長さ70 cm、幅70 cm、高さ70 cmのTEMセルを用いた。図に示すように、TEMセルへの印加信号は、スペクトルアナライザに同期させたトラッキングジェネレータから得られる掃引信号を用いた。TEMセル内部に電界センサを設置し、掃引信号に対する電界センサからの光信号の変化を、光検出器により電気信号に変換し、それをスペクトルアナライザで検出することにより、センサの周波数特性を得ることができる。その際、印加される電界はTEMセルの終端側の電圧を測定することにより求めた。

図4にMach-Zehnder型光変調器を用いた電界センサの周波数特性の測定結果を示す。図に示すように、2 MHz以上の周波数において鋭い共振特性をもつ±4 dB程度の感度変化が生じている。この感度変化の間隔は必ずしも一定ではないが、規則性があると考えられる間隔で生じている。また周波数が10 MHzを超えると感

度の変動幅は小さくなるものの、共振しているとみられる30 MHz以外の帯域においても±0.5 dB程度の感度変動を示している。このことは、電界センサの感度が±0.5 dB程度の誤差を常にもっていることを意味しており、これを改善することは、高精度な電界測定を実現するうえで重要な課題である。

### 3. 電界センサの共振周波数の解析

数十kHzから数MHz帯でLiNbO<sub>3</sub>結晶を用いた光変調器の感度変化の原因の一つとして、圧電効果による共振現象が報告されている[11], [12]。そこで、本論文で述べているようなLiNbO<sub>3</sub>基板上に光導波路が形成されたMach-Zehnder型光変調器を用いた電界センサにもこの現象が生じているのではないかと考え、理論解析により共振周波数を求め、図4の測定結果と比較を行った。

#### 3.1 共振周波数の解析

光変調器基板の圧電効果による振動を解析するためには、厳密には結晶内での機械的な影響を表す弾性体の運動方程式、および電磁気的な影響を表すマクスウェルの方程式の二つの方程式を考慮する必要がある。しかしながら、一般にこの二つの方程式を用いて異方性結晶の振動を解析することは複雑であり、時間がかかる。よって本論文では、印加された電気信号の周波数と、基板の機械的な共振周波数が一致したとき、電界センサの周波数特性上に共振が現れると考え、より簡易な計算方法として電氣的条件を無視し機械的な振動による共振のみに着目した解析を行うこととする。

解析のためのモデルを図5に示す。ここで測定に使用したMach-Zehnder型光干渉計はZ-cut:LiNbO<sub>3</sub>基板上に形成されているため、座標系を図のようにとり、導

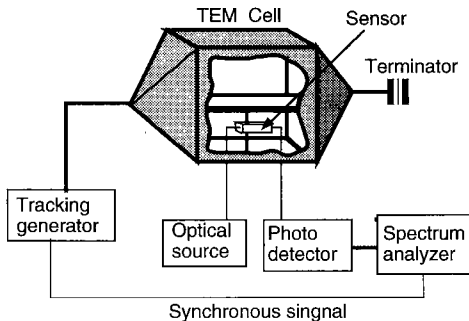


図3 周波数特性の測定系  
Fig. 3 Measurement setup for frequency characteristics.

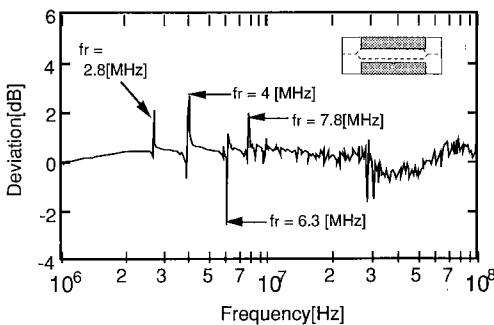


図4 周波数特性測定結果  
Fig. 4 Measurement result of frequency characteristics.

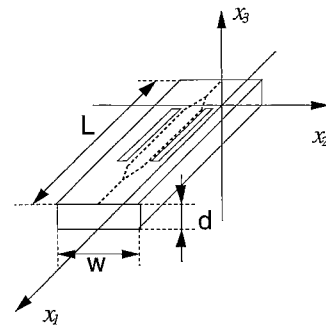


図5 解析モデル  
Fig. 5 Calculation model.

波路を通る光は、 $x_j$ のマイナス方向から $x_j$ のプラス方向に向かって伝搬すると考える。印加された電気信号との共振が発生することにより、光変調器基板には機械的な振動が生じ、それが音波となって基板内を伝搬していると考えられる。基板内の振動による応力やひずみが導波路に働くことにより、導波路の屈折率が変化する。それが二つの導波路間の光の位相差を変化させ、電界センサの感度特性の変動が現れる。

音波の共振周波数は、基板に働く力を電圧、粒子の速さを電流と考えることにより、分布定数回路と等価的に考えることができる。このような考えに基づくと $x_i$ 軸に伝搬する音波の共振周波数 $f_{ri}$ は以下の式で与えられる[13]。

$$f_{ri} = \frac{nv_i}{2L} \tag{3}$$

ここで、 $v_i$ は $x_i$ 軸方向に伝搬する音波の速さ、 $L$ は音波の伝搬方向の寸法、 $n$ は共振の次数である。従って、各伝搬方向の音波の速さを得ることにより、共振周波数を求めることができる。

通常、弾性体中を伝搬する音波の速さはヤング率を $E$ 、体積密度を $\rho$ とすると、

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{4}$$

で与えられる[13]。しかし、LiNbO<sub>3</sub>結晶の場合、異方性のため、音波の速さを求めるためにはテンソルを用いて解く必要がある。文献[14]に示されている手法に従ってLiNbO<sub>3</sub>の定数を用いて異方性媒質中の運動方程式を解くことにより、各軸を伝搬する音波の速さを求めることができる。この際、文献[14]では、計算する軸方向に平面波が伝搬すると仮定している。

$x_i$ 軸方向を伝搬する音波の速さは以下のように与えられる。

$$v_1|_{x_1} = \sqrt{c_{11}/\rho} \tag{5}$$

$$v_2|_{x_1} = \sqrt{\frac{c_{55}+c_{66}+\sqrt{(c_{55}+c_{66})^2-4(c_{55}c_{66}-c_{14}^2)}}{2\rho}} \tag{6}$$

$$v_3|_{x_1} = \sqrt{\frac{c_{55}+c_{66}-\sqrt{(c_{55}+c_{66})^2-4(c_{55}c_{66}-c_{14}^2)}}{2\rho}} \tag{7}$$

ここで、 $\rho$ はLiNbO<sub>3</sub>の体積密度、 $c_{ij}$ はLiNbO<sub>3</sub>結晶の弾

性スティフネス係数である。 $v_1, v_2, v_3$ は音波の振動（縦波、横波等）の違いにより定まる音波の速さの値[14]であり、一つの伝搬方向に対し、三つの速さの値が得られる。また、添字の“ $|_{x_i}$ ”は $x_i$ 方向に伝搬する音波であることを示している。

同様に、 $x_2$ 軸方向を伝搬する音波の速さは以下の式で与えられる。

$$v_1|_{x_2} = \sqrt{c_{66}/\rho} \tag{8}$$

$$v_2|_{x_2} = \sqrt{\frac{c_{11}+c_{44}+\sqrt{(c_{11}-c_{44})^2+4c_{14}^2}}{2\rho}} \tag{9}$$

$$v_3|_{x_2} = \sqrt{\frac{c_{11}+c_{44}-\sqrt{(c_{11}-c_{44})^2+4c_{14}^2}}{2\rho}} \tag{10}$$

更に、 $x_3$ 軸方向を伝搬する音波の速さは以下の式で与えられる。

$$v_1|_{x_3} = v_2|_{x_3} = \sqrt{c_{55}/\rho} \tag{11}$$

$$v_3|_{x_3} = \sqrt{c_{33}/\rho} \tag{12}$$

### 3.2 共振周波数の解析結果

前節で得られた式(5)~(12)を式(3)に代入して、伝搬方向の長さに対する共振周波数の変化を計算した結果を図6に示す。ここで、計算に必要な定数は表1に示す。LiNbO<sub>3</sub>基板のサイズは電界センサに使用されているMach-Zehnder型光変調器の数値例[6]を、LiNbO<sub>3</sub>のコンプライアンス定数、体積密度は文献[14]に示された値

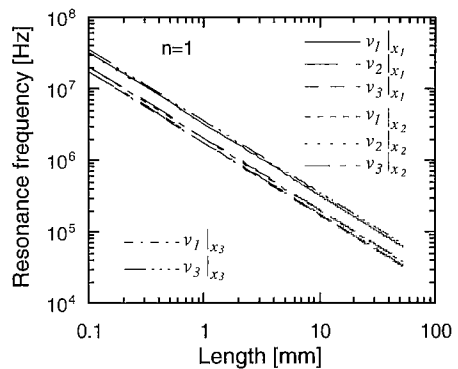


図6 音速の計算結果  
Fig. 6 Calculation results of sound verocity.

表1 LiNbO<sub>3</sub>基板の定数  
Table 1 Parameter of the LiNbO<sub>3</sub> substrate.

Constants		Values
Substrate size [mm]	L	55
	w	1.0
	d	0.5
Compliance constant [N/m <sup>2</sup> ]	c <sub>11</sub>	2.0 × 10 <sup>11</sup>
	c <sub>14</sub>	9.0 × 10 <sup>9</sup>
	c <sub>44</sub>	6.0 × 10 <sup>10</sup>
	c <sub>66</sub>	7.5 × 10 <sup>10</sup>
Volume density [kg/m <sup>3</sup> ]	ρ	4.6 × 10 <sup>-3</sup>

表2 共振周波数の計算値と測定値  
Table 2 Calculation and measurement results of the resonance frequency.

Direction	Resonance frequency	
	Calculated	Measured
x <sub>1</sub> -axis	1	2.8 [MHz]
		4.0 [MHz]
		7.8 [MHz]
x <sub>2</sub> -axis	1	6.3 [MHz]
	2	7.8 [MHz]
		7.8 [MHz]
		7.8 [MHz]
	3	7.8 [MHz]
		7.8 [MHz]
		7.8 [MHz]
x <sub>3</sub> -axis	1	7.2 [MHz]
		7.2 [MHz]

を使用した。図から、各方向に伝搬する音波による共振は寸法が同じであれば、ほぼ同じ周波数領域に集中して発生することがわかる。このことから、共振周波数の違いは基板の寸法の違いにより決定されると言える。また、伝搬方向の長さが短いほど、高い周波数で共振が発生することがわかる。

### 3.3 解析結果と測定結果との比較

解析から得られた共振周波数と図4に示す測定結果より得られた共振周波数を表2に示す。表にはすべての方向に伝搬する音波の共振周波数の計算値とその高次成分の値を示す。表から、x<sub>1</sub>方向に伝搬する音波の

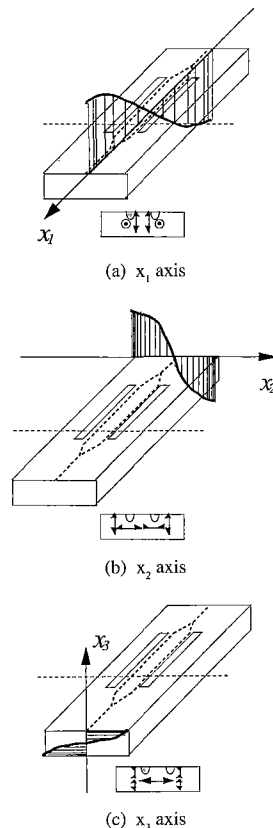


図7 各軸に対する振動と導波路の関係  
Fig. 7 Relationship between vibration mode and waveguides.

共振は測定されている共振周波数よりずっと低い値であり、共振周波数として現れているのは、x<sub>2</sub>軸がx<sub>3</sub>軸を伝搬する音波による共振であると考えられる。

音波の伝搬方向と導波路の影響を考えると、図7に示すような関係が得られる。ここでは便宜上、各方向に伝搬する縦波と横波のみを示した。このうち、x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>軸に伝搬する波による振動の影響は、二つの導波路に対し等しく加わるため、結果的に導波路間の位相差としては現れない。一方、x<sub>2</sub>軸方向に伝搬する波による振動は、導波路に対し差動的に加わるため、その影響は導波路内部を通る光の位相差として現れ、感度を変化させることになる。そのため、x<sub>2</sub>軸方向に伝搬する音波による共振が電界センサの感度変化に大きな影響を与えていると考えられる。表2のx<sub>2</sub>軸方向の計算値と測定値を比較すると、解析によって得られた周波数近傍に共振が存在していることがわかる。また、測定結果には解析によって得られなかった周波数での共振も生じているが、これは結晶中の電磁界の成分による

影響を考慮していないこと、および音波の伝搬方向以外の結晶の寸法を無視しているために生じていると考えられる。しかしながら、この表2の結果から、基板の機械的振動のみを考えた方法でも、ある程度共振周波数の解析が可能であると言える。

3.4 改善方法

電界センサの周波数特性上に現れた共振現象は、電気信号の周波数と、結晶基板の寸法で定まる機械的振動による共振周波数が一致することによるものであることが、前節の結果より確認できた。そのため、光学結晶基板の機械的共振が結晶の寸法に依存するものであれば、光学結晶基板の形状を変えることによりその制御が可能であると考えられる。

図8にその改善方法のモデルを示す。(a)は従来の基板の形状のモデルであり、(b)は基板の幅を長手方向に変えたモデルである。図に示すように、基板を長手方向に分割したとき、その分割された*i*番目の領域における導波路上に加わる応力による光信号の位相変化は以下の式で与えられる。

$$\Delta\phi_i(f_{ri}) = 2k\Delta n_{ei}(f_{ri})\Delta L_i \tag{13}$$

ここで、 $f_{ri}$ は*i*番目の分割領域における共振周波数、 $\Delta n_{ei}(f_{ri})$ は共振周波数 $f_{ri}$ の振動による応力やひずみによって*i*番目の領域の導波路に生じる屈折率変化、 $\Delta L_i$ は*i*番目の領域の長手方向の長さ、 $k$ は使用する光の波数である。

(a)の場合、幅方向の共振により、導波路には全体で一定の周波数で一樣に変化する応力やひずみがかかることになる。そのため、分割された領域ごとの共振周波数の値に変化はなく、従って共振周波数 $f_r$ で振動して

いるときの全体での位相変化 $\phi$ は以下の式になる。

$$\phi(f_r) = 2k\Delta n_e(f_r)L \tag{14}$$

ここで、 $\Delta n_e(f_r)$ は共振周波数 $f_r$ で振動しているときの屈折率変化、 $L$ は導波路の長さである。

一方、(b)の場合、分割された部分ごとに幅方向の寸法が異なるため、導波路に影響を与える振動の共振周波数は各部分ごとに異なる。従って、各分割された領域での導波路に生じる位相差は、式(13)で表され、領域ごとに共振周波数、位相変化が異なることになる。従って、領域の分割数を増やし、基板の幅方向の変化を滑らかなものにする、 $\Delta L_i \rightarrow 0$ となり、式(13)で与えられる位相の変化は0となる。

以上の考え方に基づき、基板の寸法を台形にしたMach-Zehnder型光変調器を作製した。その構造を図9に示す。図のように、中心を対称にY分岐導波路が形成されており、基板の幅が、徐々に細くなる台形の形状になっており、式(13)で与えられる位相変化が低減できる構造になっている。

この光変調器を用いた電界センサを作製し、その周波数特性を図3の測定系により測定した。測定結果を図9に示す。図から、基板の形状を変更することによ

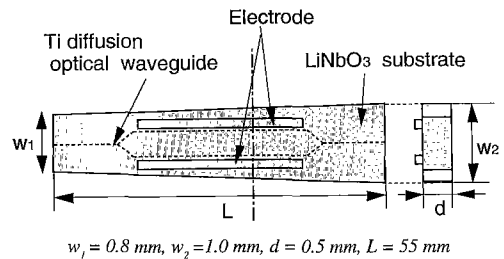


図9 形状を変えたMach-Zehnder型光変調器の構造  
Fig. 9 Configuration of the Mach-Zehnder interferometer which improve its shape.

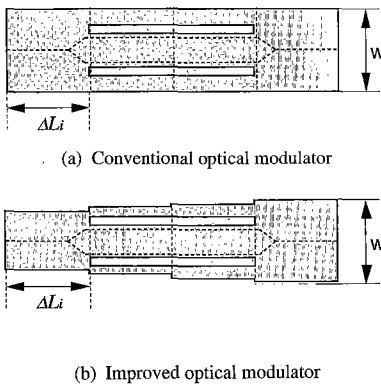


図8 共振改善のための評価モデル  
Fig. 8 Estimation model for the improvement of resonances.

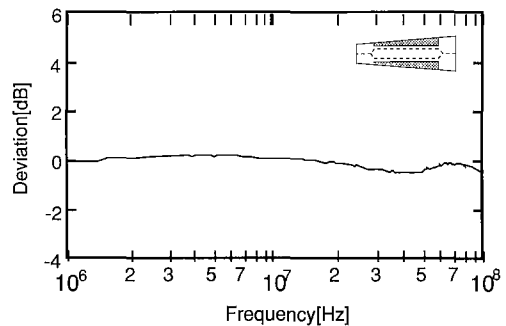


図10 改善された周波数特性  
Fig. 10 Frequency characteristics after improvement.

り、1~100 MHzの範囲に現れた共振がなくなっていることがわかる。従って、基板の形状を台形に変更することにより、圧電性により発生していた共振現象を改善できることが確認できた。

#### 4. む す び

本論文では、Mach-Zehnder型光変調器を用いた電界センサの圧電効果による共振現象の解析方法およびその発生機構の解明を行った。また、共振現象の改善方法を提案し、有効性の検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 光変調器を用いた電界センサの1~100 MHzに発生する共振現象は、光学結晶に印加された電気信号の周波数と結晶の寸法で定まる機械的共振周波数が一致した場合に発生する。

(2) 電界センサの周波数特性上に現れる共振周波数は、光学結晶基板の機械的な振動のみを考慮することにより、ある程度解析可能であり、その値は基板の寸法により決定される。

(3) 電界センサの感度変化の原因は、基板の幅方向に伝搬する音波によるものである。

(4) LiNbO<sub>3</sub>基板の幅方向の寸法を変更することにより、共振のエネルギーを分散でき、電界センサの周波数特性を改善することが可能である。

今後は、この共振現象の厳密な解析を行い、電界センサの設計方法に反映させる予定である。

**謝辞** 本研究を行うに当り有意義な御助言、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、(株)住友大阪セメント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, 1986.
- [2] 村川一雄, 桑原伸夫, 井手口健, "光/電気変換器を用いた球状ダイポールアンテナ," 進学論(B-II), vol.J74-B-II, no.12pp.699-706, Dec. 1991.
- [3] 小林隆一, 田島公博, 桑原伸夫, 徳田正満, "LiNbO<sub>3</sub>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.
- [4] J.C.Wyss and S.T.Sheeran, "A Practical Optical Modulator and Link for Antenna," IEEE J. of LightWave Technol., vol.LT-3, no.2, pp.316-321, April 1985.
- [5] C.H.Bulmer and S.C.Hiser, "Linear Ti:LiNbO<sub>3</sub> Modulator at 1.3 μm for Electromagnetic Field Sensing," SPIE, vol.517, pp.177-185, 1984.

- [6] N.Kuwabara, K.Tajim, F.Amemiya, and R.Kobayashi, "Development and Analysis of Electric Field Sensor Using LiNbO<sub>3</sub> Optical Modulator," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.34, no.4, Nov. 1992.
  - [7] 田島公博, 小林隆一, 桑原伸夫, 徳田正満, "マッハツェンダー型光変調器を用いた微小エレメント電界センサの特性評価," 信学論(B-II), vol.J79-B-II, no.11, pp.744-753, Nov. 1996.
  - [8] M.Kondo, Y.Tokano, T.Tanabe, and R.Muramatsu, "Reflection Type Electro-Optic Electric Field Sensor with LiNbO<sub>3</sub> Optical Modulator," 1994 International EMC Symposium Sendai, Sendai, 19P606, pp.774-777, May 1994.
  - [9] 戸吐祐一, 田辺高信, 村松良二, 近藤充和, 佐藤由郎, "光電界センサの高感度化," 信学技法, EMCJ-94-26, pp.1-7, Sept. 1994.
  - [10] 大越孝敬編, 光ファイバセンサ, pp.101-124, オーム社, 1986.
  - [11] 川澤俊夫, 増永真弓, 菊田和宏, 大野 豊, "バルク型電気光学効果素子の共振周波数近傍における基礎特性," 日大理工学部学術講演会論文集, M-51, pp.611-612, 1989.
  - [12] P.Bienkowski and H.Trzaska, "Frequency limitation in photonic EMF probes," 12th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC, Zurich, 114Q4, pp.603-606, Feb. 1997.
  - [13] 日本学術振興会弾性波素子技術第150委員会編, 弾性波素子技術ハンドブック, オーム社, pp.10-28, 1991.
  - [14] 小川智哉著, 結晶物理光学, pp.176-178, 裳華房, 1976.
  - [15] 池田拓郎, 圧電材料学の基礎, オーム社, 1984.
- (平成9年7月9日受付, 12月8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・電気工卒。平元同大大学院修士課程了。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3~5NTT技術協力センタにおいて、フィールドでの通信EMC障害に対する技術サポートに従事。保守支援ツール、電磁防護品を開発。現在、1GHz以上における通信EMC、光計測技術、光移動通信システムの研究に従事。NTTマルチメディアネットワーク研究所勤務。主任研究員。IEEE会員。



桑原 伸夫 (正員)

昭50静岡大・工・電気工卒。昭52同大大学院修士課程了。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。