

論 文

光による静電気測定法の研究

渡辺 栄*, 弘中 建**, 大野 豊**

(1990年5月14日受理)

Fundamental Studies of Electrostatics Measurement Using Opto-Electronics

S. WATANABE,* K. HIRONAKA** and Y. OHNO**

(Received May 14, 1990)

It has been well known as the Pockels effect that each directional index of electrooptic crystals is affected within the electric field. The methods measuring of electrostatics have been studied in application of the Pockels effect. But, in old systems, the polarization of the Pockels crystal which is brought by the applied DC electric field, changes the optical output power unproportionally, so that the DC electric field can not be always measured accurately. To solve this problem, we propose the new technique that converts the applied DC electric field to the AC one, by using "Amorphous Silicon hydride (a-Si : H)" material, as switches that operates by light. The advantages of the new method are as follows: 1. Need not to move mechanism makes "Solid-state Sensors." 2. There are less influence of polarization of electrooptic crystal. 3. Utilizing optical fibers that are consist of insulators, produce safety. The availability of this method has been verified experimentally.

1. まえがき

静電気は、ガス爆発や粉塵爆発、あるいは可燃性液体の噴出火災などにおける着火源として、古くから着目されている。爆発事故火災発生時の着火原因調査の際に、考えられる原因を列挙し、消去法で消していくと、最後まで可能性のある原因として残る要素として静電気が挙げられている¹⁾。そのため、静電気計測は早急の課題となっている。

静電気測定に関する報告は種々なされているが、その中でも光を用いた計測法は光ファイバなどを用いて遠隔計測を行うことができ、被測定物に着火源となるような電源を持ち込まないことや、被測定環境に与える影響を少なくできることなどの利点があり、有望視されている^{2,3)}。

キーワード: ポッケルス効果、分極現象、光ファイバセンサ、アモルファスシリコン、スイッチング

* 日本電波工業株式会社開発生産本部 (350-13 狹山市上広瀬 1275-2)

Product Development Department, Nihon Dempa Kogyo Co., Ltd., 1275-2 Kamihirose, Sayama, 350-13 Japan

** 日本大学理工学部電子工学科 (274 船橋市習志野台 7-24-1)

Department of Electronic Engineering, College of Science and Technology, Nihon University, 24-1, Narashinodai 7-chome, Funabashi, 274 Japan

電気光学結晶に電界を印加すると結晶の屈折率が変化することは、いわゆるポッケルス効果として古くからよく知られている⁴⁾。このようなポッケルス効果を利用すると、光が透過する結晶に電界を印加することにより、結晶を透過させた光の強度変化から、結晶に印加した電界の大きさを知ることができる。さらに、測定する信号は光強度であるから、光ファイバなどの信号伝送媒体を用いれば、交流型電圧・電界センサとしての利用が可能となる。

そこで、ポッケルス効果を利用した光ファイバ電圧センサを用いて直流電圧計測の可能性を調べた。実験の方法は図1のブロック図に示した装置を用いて、ポッケルス電圧センサに入射される光の強度と、ポッケルス電圧センサから出射した光強度を、光パワーメータのそれぞれ、CH1 および CH2 に入力する。光パワーメータの演算機能により CH1 と CH2 の差を求め(精度 0.001 dB), コンピュータに送り出し、連続的に記録することにより行った。その結果、図2(a)に示した直流電圧を光ファイバ電圧センサに印加したのに對し、図2(b)に示すような光応答特性が得られた。この図からもわかるように、一定電圧をポッケルス電圧センサに印加したにもかかわらず、光出力が変化してしまうため、光出力から電気光学結晶に印加した直流電圧を知ることはできない。

この原因としては、空間電荷がポッケルス結晶に蓄積

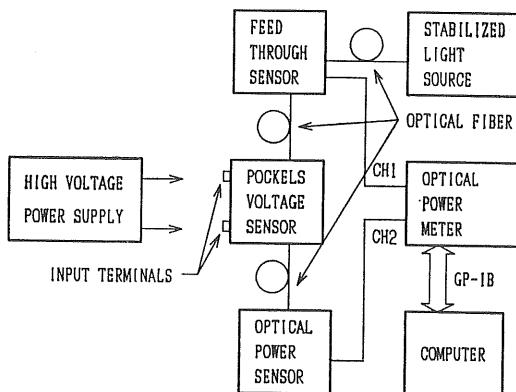


図 1 直流応答特性測定のブロック図

Fig. 1 Block diagram of DC response measurement.

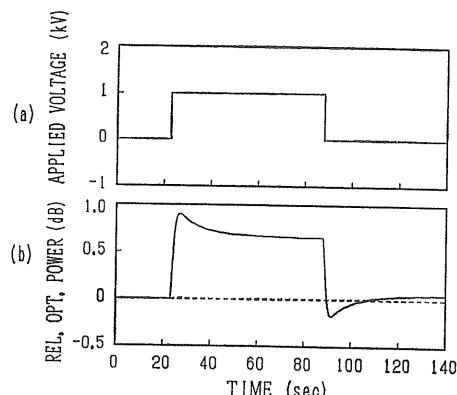


図 2(a) 直流印加電圧波形

(b) ポッケルス電圧センサに直流電圧を印加したときの光出力波形

Fig. 2(a) Applied DC voltage waveform.
(b) Optical power output waveform when apply DC high voltage to Pockels device.

することにより結晶が分極し、光出力を変化させるものと考えられる。したがって従来は、このような分極の影響を避けるため、回転機構などを用いて、直流-交流変換を行うなどの方法が必要であった⁵⁻⁸⁾。そのため、装置が大がかり、あるいは計測に際して回転機構の伝達方法などに制約があった。

本論文では、水素化アモルファスシリコンを光伝導素子として用い、光で抵抗値が変化することを利用して“スイッチ素子”を構成し、電気光学結晶の分極現象を回避する方法の検討を行った。その結果、回転機構などの可動部分を必要とせず、センサ部と計測部間を絶縁物で構成した、ソリッドステート化を図った直流電圧計測ができることを確認した。

2. 実験の原理

2.1 ポッケルス効果を利用した光ファイバ電圧センサ

ある種の結晶に電界を印加したとき、その結晶の屈折率が電界の大きさに比例して変化する。これをポッケルス効果という。図 3 に、ポッケルス効果により結晶中を光が透過するとき変調を受ける概念図を示す。

光源からでた無偏光状態の光は、まず偏光子で直線偏光される。また、電気光学結晶に印加する電圧と、光強度変化の関係の直線性がもともよい状態で変調を行うため、 $\lambda/4$ 波長板を通して円偏光として電気光学結晶に入射する。電気光学結晶を透過した光の偏光状態は、ポッケルス効果を受けて椭円偏光（結晶の屈折率が電界の影響を受けて変化するため、光の伝搬速度が異なり、光の直交 2 成分間に位相のずれが生じる状態）となる。この偏光状態の変化（位相の変化）を検光子を用いて光の強度変化に変換する。ポッケルス結晶の軸方向配置、ポッケルス定数などの物理定数についての詳細は、参考文献にある教科書等を参照されたい⁹⁻¹⁸⁾。

これらの光学素子を保持器に納め、光源から電気光学結晶までの光路（往路）および、電気光学結晶から受光器までの光路（復路）を光ファイバで接続することで光ファイバ電圧センサとして機能せるものである。ここまで組上げたものは、数社より光ファイバ電圧センサ（交流用）として市販されている。

2.2 光で動作するスイッチング素子

光で直流高電圧のスイッチングを行うため、光で抵抗値が変化する素子・材料の中で、われわれは高インピーダンスが達成できる水素化アモルファスシリコンに着目した。水素化アモルファスシリコンの電気物性は太陽電池材料や感光材料として開発研究されている¹⁴⁾。

ここでは、高抵抗基板材料であるバリウムホウケイ酸ガラス基板上に薄膜に形成されたものを用いた。水素化アモルファスシリコンは光を照射すると抵抗値が下がる

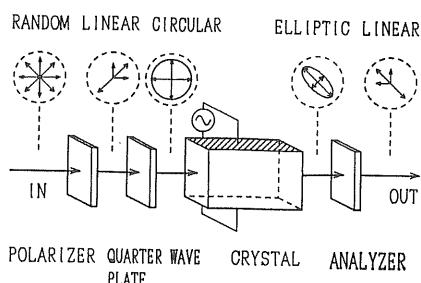


図 3 ポッケルス効果の概念図

Fig. 3 Conceptual figure of Pockels effect.

性質を有しているので、この材料を用いて薄膜抵抗ブリッジを形成し、それぞれ対辺のアームに同相の、隣り合わせのアームに逆相となるように強度変調を行った光を照射することで、スイッチング作用をさせる。水素化アモルファスシリコン薄膜抵抗ブリッジとポッケルス電圧センサが組み合わせることで、ポッケルス電圧センサが持つ高インピーダンスの特徴を生かし、かつ、ポッケルス結晶に分極が生ずることを防ぐ、直流高電圧センサを構成しようとするものである。

2.3 直流-交流変換の原理

水素化アモルファスシリコン抵抗ブリッジを図4に示すように、それぞれ R_1, R_2, R_3, R_4 とし、ブリッジの端子をそれぞれ a, b, c, d とする。また、それぞれの抵抗 R_1, R_2, R_3, R_4 は、 $LED_1, LED_2, LED_3, LED_4$ とプラスチック光ファイバで接続し、正弦波信号で変調した光を照射する。ここで、 R_1, R_4 には同相の、また、 R_2, R_3 には R_1, R_4 とは逆相の正弦波で変調した光とする。図5(a)および(b)に実験で用いた LED の駆動電流波形を示す。端子 c の電位は、端子 a-b 間の電位を抵抗 R_1 および R_3 で分圧した電位となり、端子 d の電位は、端子 a-b 間の電位差を抵抗 R_2 および R_4 で分圧した電位となる。

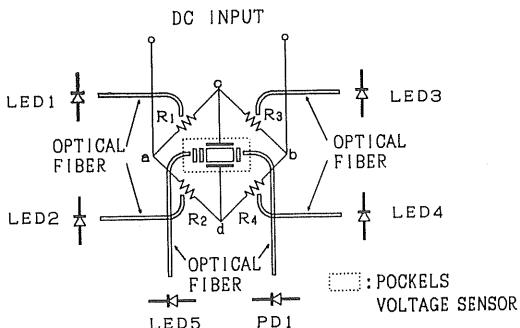


図4 静電気センサ原理図

Fig. 4 Principle of electrostatic sensing.

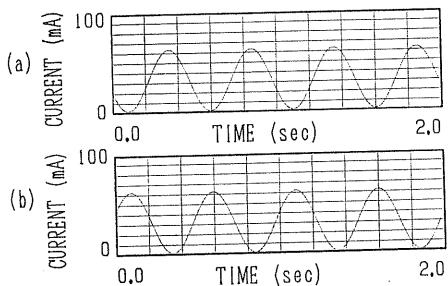


図5(a) LED 駆動電流波形 (同相)

(b) LED 駆動電流波形 (逆相)

Fig. 5(a) LED driving current waveform. (common)
(b) LED driving current waveform. (inverse)

そのため c-d 間の電位差は交番電位となる。

つぎに、図4に示すように、水素化アモルファスシリコン抵抗ブリッジの c-d 端子にポッケルス電圧センサを接続する。これにより水素化アモルファスシリコン抵抗ブリッジの c-d 間には、LED 光の変調周期と同じ周期をもつ交番電位が生ずる。したがって、直流電圧入力でもポッケルス電圧センサで交番電圧として測定できることになる。

2.4 光スイッチ素子の作成

光スイッチ素子は、バリウムホウケイ酸ガラス (コーニング社製、#7059)¹⁵⁾ 上に、プラズマ CVD 法により成膜した水素化アモルファスシリコン薄膜基板を用い、フォトリソグラフィ技術を利用して、フッ硝酸を用いたウエット・エッティングにより抵抗ブリッジを作成した。表1に使用した水素化アモルファスシリコン基板の諸元を示す。ここで、水素化アモルファスシリコン薄膜抵抗の抵抗値は式(1)で与えられる。

$$R = \sigma^{-1} \frac{l}{t \cdot w} \quad (1)$$

R : 薄膜の抵抗値

ρ : 電気伝導度

l : 薄膜の長さ

t : 薄膜の厚み

w : 薄膜の幅

薄膜の厚みは、成膜時の条件により決定されるので、抵抗値は式(1)より、図6に示す l/w の比を変えることにより行った。光ファイバで伝送した変調光が、水素化アモルファスシリコン抵抗体全面に効率よく照射されるように考慮した結果、パタンは図7に示すような形状とした。

マスクパタンの作成方法は、バーソナルコンピュータを用いて X-Y プロッタに拡大図を出力し、その拡大図をミニコピーフィルムで接写し、ネガフィルムをマスクとした。この方法によれば、接写の倍率の違いにより

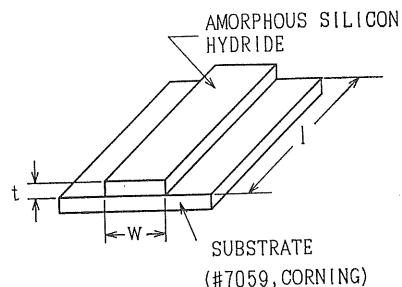


図6 水素化アモルファスシリコン薄膜抵抗

Fig. 6 Thin film resistance of amorphous silicon hydride.

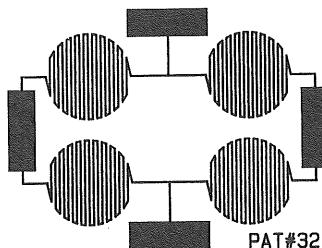


図 7 フォトマスクパターン
Fig. 7 Photomask pattern.

表 1 水素化アモルファスシリコン基板の物性定数¹⁵⁾

Table 1 Material constants of amorphous silicon hydride.

基板ガラス体積抵抗率	$10^{17} \Omega\text{cm}$ 以上
アモルファスシリコン膜厚	5000 Å
バンドギャップエネルギー	1.75 eV
暗導電率 σ_{dark}	$10^{12} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$
光導電率 σ_{photo} (AM-1) *1	$10^6 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$

*1 太陽光のスペクトルを持つ光, 100 mw/cm^2 のもと.

l/w の比が変化することを避けられる。

本論文では、 l/w の値を約 320 (パタンのみ) とした。すなわち、表 1 の物性定数および式(1)より暗抵抗値は $10^{14} \Omega$ 以上を目指とした。

図 8 に作成したガラス基板上に形成した水素化アモルファスシリコンブリッジ抵抗素子を、図 9 にその素子をアクリル製の保持器に取り付けて、コンタクト電極を接続した状態を示す。

2.5 抵抗値の評価

保持器に取り付けた抵抗ブリッジをシールドした暗箱に入れ、端子 c および d を短絡し、a-c 間の暗抵抗値を

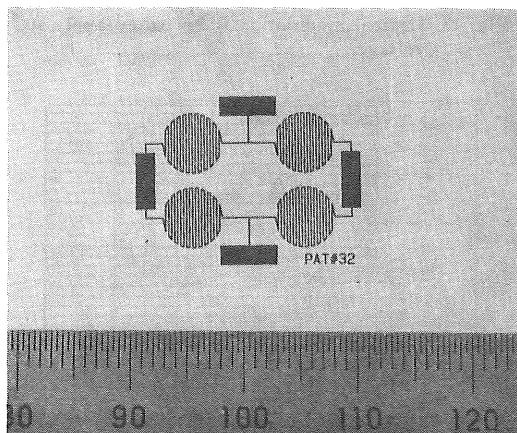


図 8 ガラス基板上に形成したブリッジ抵抗素子
Fig. 8 Bridge resistance elements on glass plate.

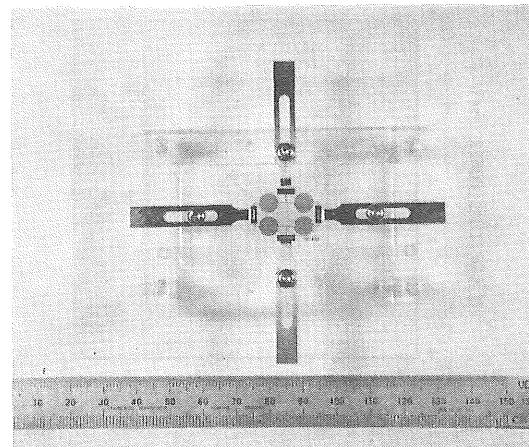


図 9 ブリッジ抵抗素子と保持装置

Fig. 9 Bridge resistance device and its holder.

測定し、 $27.6 \times 10^{12} \Omega$ を得た。ここで、a-b 間の抵抗は R_1, R_2 が並列に接続されているので、 R_1, R_2 の抵抗値が等しければ、 R_1, R_2 は、それぞれ $55.2 \times 10^{12} \Omega$ となる。

つぎに、光ファイバで送った LED 光が、 R_1 にのみ当たるようにして光を照射した。ここで、LED の電流を変化させ a-c 間の抵抗値の変化を測定した。 $R_2 = 55.2 \times 10^{12} \Omega$ として、a-c 間の抵抗値の測定結果から、計算により求めた R_1 の抵抗値変化のグラフを図 10 に示す。また、ここで用いた LED の駆動電流に対する光強度 (2 m の光ファイバ出射端の光強度) の関係を図 11 に示す。

2.6 スイッチング用光源装置

スイッチ材料である水素化アモルファスシリコンのバンドギャップエネルギーは約 1.75 eV であることから、光吸収端波長は約 0.71 μm となる。そのため現在多用

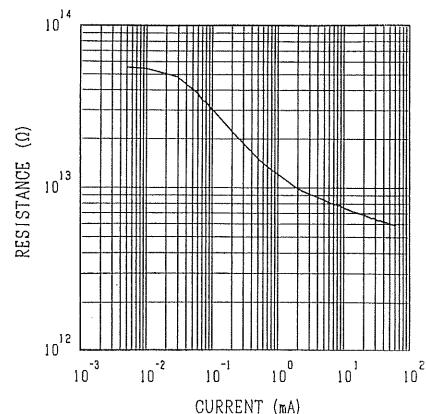


図 10 アモルファスシリコンの抵抗変化

Fig. 10 Resistance change by shining light.

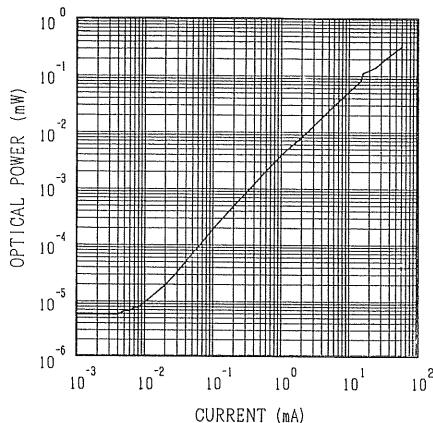


図 11 LED の駆動電流-光強度特性

Fig. 11 LED driving current-Light intensity characteristics.

されている波長 $\lambda=0.78 \mu\text{m}$ の赤外線のレーザダイオード (LD) では、スイッチングのためにアモルファスシリコンに照射する光のエネルギーを吸収せず、透過してしまう。したがって、変調光は可視光領域の波長の LD ないしは LED を使用することが必要である。

ここでは GaAlAs を半導体とした高輝度 LED (スタンレー電気製 FH-1011, 発光ピーク波長 $\lambda=0.66 \mu\text{m}$)¹⁶⁾ を用いた。また、その光を伝送する光ファイバは、LED との光の結合性もよく、石英系の光ファイバより安価であることからプラスチック製光ファイバ (三菱レーヨン製、エスカエクストラ EH4001)¹⁷⁾ を用いた。波長 $\lambda=0.66 \mu\text{m}$ での光ファイバの伝送損失は 0.2 dB/m である。

3. 実験の方法および結果

3.1 交流印加電圧-変調度特性

まず、市販の BSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) 光ファイバ電圧センサ (住友電工製、EOS-04) を準備し、交流印加電圧-変調度特性を確認した。実験系のブロック図を図 12 に示す。

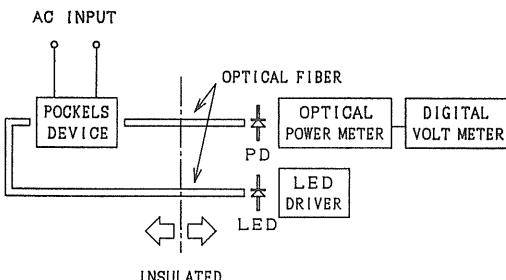


図 12 交流印加電圧-変調度特性測定系のブロック図

Fig. 12 The block diagram of experiment.

す。実験の方法は、電圧センサに 50 Hz の商用交流電圧をトランスで昇圧して印加する。ポッケルス結晶の表面に設けられた電極に電圧が印加されることで、結晶には電界が印加される。この電界で結晶を通過する光が変調を受けることになる。したがって、光ファイバを通過した光出力は光パワーメータで受光し電気信号に変換される。この電気信号の交流成分と直流成分をデジタルボルトメータにより測定し、その比を求め変調度とする。

ポッケルス電圧センサに 50 V ステップで 1000 V まで、交流電圧を印加し、それぞれの交流電圧値での変調度を求めた。その結果をプロットしたグラフを図 13 に示す。黒丸は測定値であり、実線は最小 2 乗法により求めた値を示すグラフである。ポッケルス電圧センサの交流印加電圧-変調度特性は良好な線形性を有しており、交流電圧センサとして利用できることがわかる。図 14(a) に印加電圧波形を、(b) に光出力波形を示す。

光出力波形と印加電圧波形を比較すると、図 2 に示したような著しい波形歪を生じていないことから、電気光学結晶の分極の遅れの影響は無いといえる。

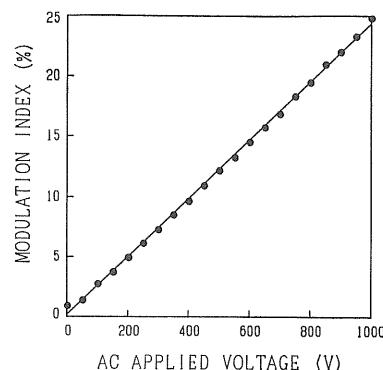


図 13 交流印加電圧-光変調度特性

Fig. 13 Optical modulation index when apply AC voltage.

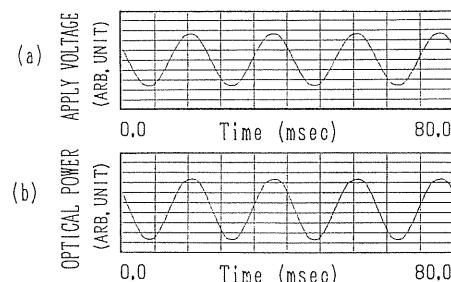


図 14(a) 印加交流電圧波形

(b) 光の変調波形

Fig. 14(a) Applied AC voltage waveform.

(b) Modulated optical signal.

3.2 直流印加電圧-変調度特性

前項のポッケルス電圧センサを水素化アモルファスシリコン抵抗ブリッジのc-d端子に接続し、抵抗ブリッジのa-b端子は直流高电压発生装置に接続し、直流高电压を印加した。水素化アモルファスシリコン抵抗ブリッジには光ファイバを通したLED光を照射した。LED光の変調周波数は約2Hzとした。実験装置・測定系のブロック図を図15に示す。

光パワーメータで電気信号に変換した光信号から、スペクトラムアナライザを用いて、LED光の変調周波数と同じ周波数の交流成分を測定した。図16に、光信号から変換した電気信号のパワースペクトル波形を示す。変調周波数成分は雑音信号に対して20dB以上もあり、十分識別することができる。

アモルファスシリコン抵抗ブリッジに、直流高电压発生装置により1kVステップで10kVまでの電圧を印加して、それぞれの電圧値において、光パワーメータの電気信号の直流成分と交流成分の比から変調度を求めた。図17に直流印加電圧-変調度特性の測定結果を示す。直流印加電圧と変調度との関係はほぼ線形であり、

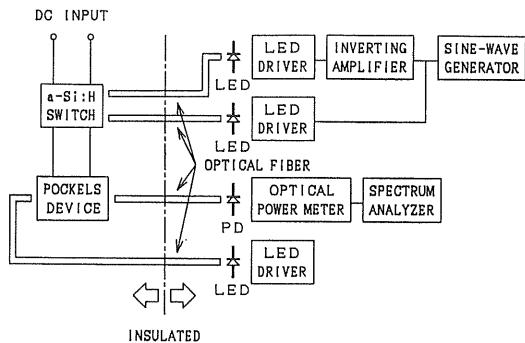


図15 直流印加電圧-変調度特性測定系のブロック図

Fig. 15 Block diagram of experiments.

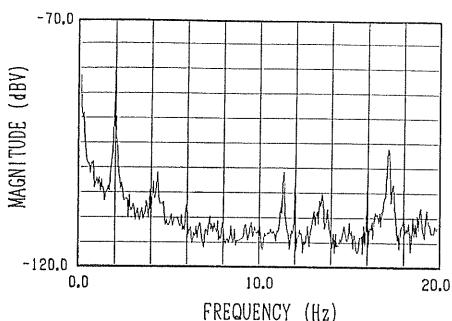


図16 光信号のスペクトラム

Fig. 16 Spectrum of modulated optical output signal.

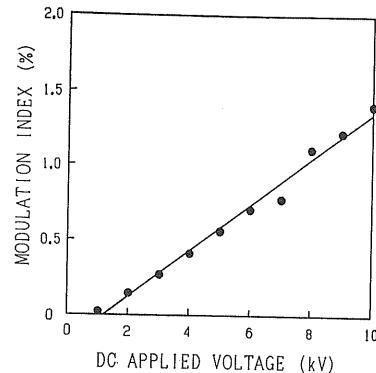


図17 直流印加電圧-光変調度特性

Fig. 17 Optical modulation index when apply DC voltage.

光信号の変調度の値から直流印加電圧を知ることができた。

4. 考察

図17の結果より、アモルファスシリコン抵抗ブリッジのc-d間には、10kVの直流電圧を印加したときの変調度の値と図13の結果から、見かけ上53Vの交流電圧しか発生していない。

この理由として、アモルファスシリコンの抵抗が計算値どおり機能していないことが考えられる。

アモルファスシリコン抵抗ブリッジの評価および測定は、特に湿度などの制御は行われていない環境で行った。そのため、湿度などの影響で、抵抗値は大きく変化してしまった。特に高抵抗領域でその傾向は大きい。これは高抵抗なので表面でのリークなどが考えられる。

また、アモルファスシリコンの抵抗値は、10nW以下の極めて弱い光でも、抵抗値に変化を生ずる。ブリッジのうちの1抵抗素子にのみ光照射を行っても、漏光により隣接する素子の抵抗が変化することが考えられる。したがって、分圧率にも影響があるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、オプトエレクトロニクスを利用して、新しい静電気測定のための直流高电压測定器の検討を行った。

その結果、水素化アモルファスシリコンを材料とした抵抗ブリッジが、センサの入力インピーダンスを下げるこなくスイッチとして機能することが確認できた。これによって、直流高电压をセンサに印加したとき、光ファイバを通して得られる出力光の変調度の値から、直流印加電圧の値を知ることができた。

また、ポッケルス効果を用いた静電気計測のための直

流高電圧計測において、従来では回転機構などの可動装置を必要としていたため測定に制約があったが、光で直流高電圧のスイッチングを行うことにより、センサのオールソリッドステート化実現の見通しが得られた。

参考文献

- 1) 西川康二：静電気学会誌，9 (1985) 51
- 2) 大野 豊：静電気学会誌，10 (1986) 487
- 3) 三井 勉，宮本俊治：静電気学会誌，9 (1985) 40
- 4) F. Pockels : *Lehrbuch der Klistalloptik*, p.493, Teubner, Leipzig (1906)
- 5) 太田知良，清水孝一，松本伍良：昭和 59 年電子通信学会光電波部門全国大会，S6-2 (1984)
- 6) 小山光敏，茂木 茂，大島 巍：昭和 59 年電気学会全国大会，1390 (1983)
- 7) 三橋 淳，大野 豊：昭和 61 年電気学会全国大会，429 (1986)
- 8) 渡辺 栄，吉川 浩，大野 豊：静電気学会講演論文集 '87, p.83, 静電気学会 (1987)
- 9) A. Yariv : *Optical Electronics* (3rd ed.), Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York (1985)
- 10) 小川智哉：結晶物理工学，裳華房 (1976)
- 11) 応用物理学会光学懇話会編：結晶光学，森北出版 (1975)
- 12) 青木昌治：オプトエレクトロニクスデバイス，昭晃堂 (1986)
- 13) 日高邦彦，河野照哉：静電気学会誌，7 (1983) 114
- 14) 斎垣和夫，丸山瑛一，清水立生，米沢富美子，広瀬全孝，田中一宜：アモルファス半導体の基礎，p.87, オーム社 (1982)
- 15) コーニング社カタログ
- 16) スタンレー電気社カタログ
- 17) 三菱レーションカタログ