

偏光シミュレータと周波数依存雑音モデルを用いたE0センサにおけるレーザ強度雑音の解析

山岸, 茉由子 / Yamagishi, Mayuko

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

64

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2023-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00026412>

偏光シミュレータと周波数依存雑音モデルを用いた EO センサにおけるレーザ強度雑音の解析

ANALYSIS OF LASER INTENSITY NOISE IN ELECTRO-OPTIC SENSOR SYSTEM USING POLARIZATION SIMULATOR AND FREQUENCY DEPENDENT NOISE MODEL

山岸 茉由子

Mayuko Yamagishi

指導教員 彌富 仁

法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻修士課程

The EO sensor system is a non-contact electric field measurement system using laser light and an EO crystal. The sensor can be used to measure voltage of the organic photovoltaics. The laser intensity noise is generated by laser diode. The laser intensity noise depends on frequency. The laser intensity noise is modulated by the signal. We analyze the effect of modulation of laser intensity noise on the EO sensor using a polarization simulator and a frequency-dependent noise model. The phase difference of modulated laser intensity noise component is π rad and amplified after differential detection. We confirm the reduction of the relative intensity noise is necessary to improve the signal-to-noise ratio of the EO sensor using differential detection.

Key Words : EO sensor system, Laser intensity noise, Relative intensity noise, Differential detection, EO modulation, Jones vector

1. 研究背景

持続可能な社会の実現には、太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーの普及が必要とされる。電気光学 (EO : Electro-Optic) センサシステム[1]-[3]は、太陽光発電に用いられる有機薄膜太陽電池 (OPV : Organic Photovoltaics) の電圧測定等に適用可能とされる[4]。EO センサによる有機薄膜太陽電池の測定を図 1 に示す。このセンサは、レーザ光と EO 結晶を用いており、非接触での電界計測が可能とされる。EO センサで用いられるレーザダイオード (LD : Laser-Diode) では、レーザ強度雑音が発生する。レーザ強度雑音を平均強度で正規化したレーザ強度雑音は、周波数依存性を持つことが知られている[5]。これまで、EO センサにおけるレーザ強度雑音は、差動検出により除去可能であると考えられていた。しかし、雑音が信号により変調を受けることで、特性が変化する可能性がある。

本研究では、EO センサにおけるレーザ強度雑音の変調による影響を解析した。

まず、EO センサの構成と測定原理について説明する。次に、EO センサの偏光シミュレータの設計と、レーザ強度雑音をあらわす周波数依存雑音モデルの生成方法について説明する。最後に、シミュレーションの結果から、

レーザ強度雑音の変調による EO センサの信号対雑音比 (SNR : Signal-to-Noise Ratio) への影響について考察する。

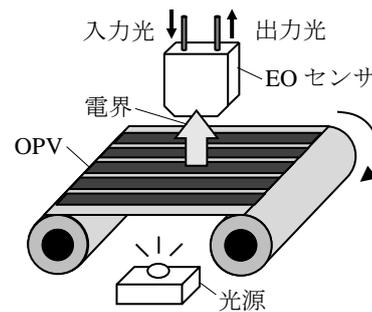


図 1 EO センサによる有機薄膜太陽電池の測定

2. EO センサシステム

(1) システム構成

図 2 に差動検出を用いた EO センサの構成を示す。

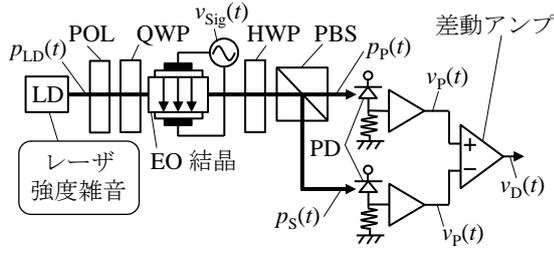


図2 差動検出を用いたEOセンサの構成

EOセンサにおいて、LDから出力されたレーザー光は、偏光子(POL: Polarizer)の通過により直線偏光となり、その後1/4波長板(QWP: Quarter Wave Plate)の通過により円偏光となる。EO結晶は、印加電圧に応じて複屈折が変化する。この特性により、円偏光はEO結晶の通過で楕円偏光となる。続いて1/2波長板(HWP: Half Wave Plate)の通過により分離後の光バイアスのバランス調整が行われ、偏光ビームスプリッタ(PBS: Polarization Beam Splitter)によりP波とS波に分離される。分離された光はそれぞれ受光回路を通して電圧変換される。この受光回路は、PD、負荷抵抗、オペアンプにより構成される。最後に差動アンプにより、P波とS波の間で同相の雑音成分を除去し、逆相の信号成分を増幅する。図2において、 $p_{LD}(t)$ 、 $p_P(t)$ 、 $p_S(t)$ はそれぞれ、LDからの出射光、P波、S波の光強度を表す。 $p_{LD}(t)$ には、LDから出射される平均光パワー p_0 とレーザー強度雑音 $p_N(t)$ が含まれる。また、 $v_{sig}(t)$ 、 $v_P(t)$ 、 $v_S(t)$ 、 $v_D(t)$ はそれぞれ、EO結晶への印加信号、P波、S波、差動検出後の電圧を表す。レーザー強度雑音は、LDにおいて発生し、EO結晶にて信号変調を受ける。EOセンサでは、P波もしくはS波の片方を検出するシングル系と、差動検出を用いる差動系の2種類の手法がある。

(2) 透過特性

図3に、(a)信号電圧印加時、(b)レーザー強度雑音付加次のEOセンサの透過光特性を示す。

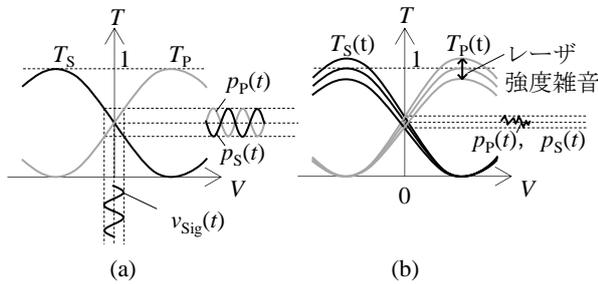


図3 EOセンサの透過光特性
(a) 信号電圧印加時、(b) レーザー強度雑音付加時

T_P と $T_P(t)$ 、 T_S と $T_S(t)$ はそれぞれ、P波、S波の透過率を示す。各透過率は、波長板の調整に応じてグラフの鉛直方向に遷移する。図3では、P波とS波の光バイアスがバランスされた場合を表す。図3(a)より、P波とS波の

透過率はEO結晶に印加された電圧に応じて時間変化する。図のように $v_{sig}(t)$ が印加されたとき、P波とS波は逆位相となり、差動検出により増幅される。図3(b)より、P波とS波の透過率はレーザー強度雑音によって時間変化する。図のようにレーザー強度雑音が付加されたとき、P波とS波は同位相となり、差動検出により除去される。

図3において、信号電圧、レーザー強度雑音がそれぞれEOセンサの透過光特性に与える影響について説明した。ここからは、信号電圧とレーザー強度雑音が同時に入力された場合について考える。このとき、P波、S波の平均光パワー p_{P0} 、 p_{S0} により正規化された $p_P(t)$ 、 $p_S(t)$ は次の式(1)、(2)で表される。

$$p_P(t)/p_{P0} = \{1 + p_N(t)/p_{P0}\} \{1 + \sin \Gamma_{EO}(t)\}, \quad (1)$$

$$p_S(t)/p_{S0} = \{1 + p_N(t)/p_{S0}\} \{1 - \sin \Gamma_{EO}(t)\}. \quad (2)$$

$\Gamma_{EO}(t)$ はEO結晶通過で発生する位相差である。式(1)、(2)における右辺第一項はそれぞれレーザーのP波、S波の光パワーを表す。式(1)、(2)における右辺第二項はそれぞれP波、S波の信号成分を表し、光バイアスオフセットを含む。 $\Gamma_{EO}(t)$ は下記の式(3)で表される。

$$\Gamma_{EO}(t) = \pi v_{sig}(t)/v_\pi. \quad (3)$$

v_π はEO結晶の半波長電圧である。本研究では、 $v_{sig}(t)$ を正弦波として定義した。 $v_{sig}(t)$ は、次の式(4)で表される。

$$v_{sig}(t) = v_{sig0} \sin 2\pi f_{sig} t. \quad (4)$$

v_{sig0} と f_{sig} はそれぞれ印加電圧の振幅と周波数、 t は時間である。

3. 方法

(1) 偏光シミュレータ設計

偏光シミュレータの計算には、ジョーンズ計算法[6]を用いた。ジョーンズ計算法においては、入射光の偏光状態を表すジョーンズベクトルと、光学素子の透過特性を表すジョーンズマトリクスとの積により、任意の光学素子通過後の出射光のジョーンズベクトルを計算する。部分直線偏光子、旋光子、直線位相子のジョーンズマトリクス $P_{p1,p2}$ 、 T_θ 、 R_Γ はそれぞれ下記の式(5)~(7)で表される。

$$P_{p1,p2} = \begin{bmatrix} p_1 & 0 \\ 0 & p_2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$T_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$R_\Gamma = \begin{bmatrix} \exp(j\Gamma/2) & 0 \\ 0 & \exp(-j\Gamma/2) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

p_1, p_2 はそれぞれ振幅透過率である。 θ, Γ はそれぞれ方位角, 位相差である。 レーザ強度雑音を含む入力光のジョーンズベクトル $\mathbf{J}_{in}(t)$ は, 次の式(8)で表される。

$$\mathbf{J}_{in}(t) = e_0 \begin{bmatrix} 1 + e_N(t)/e_0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

$e_0, e_N(t)$ はそれぞれ, $p_0, p_N(t)$ の電界振幅である。 EO センサ通過後の出力光のジョーンズベクトル $\mathbf{J}_{out}(t)$ は, 次の式(9)で定義する。

$$\mathbf{J}_{out}(t) = e_0 \begin{bmatrix} e_P(t) \\ e_S(t) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

$\mathbf{J}_{out}(t)$ は, 式(5)~(7)のジョーンズマトリクスを用いて次の式(10)で計算される。

$$\mathbf{J}_{out}(t) = P_{1,1} \cdot T_{\frac{\pi}{8}} R_{\pi} T_{-\frac{\pi}{8}} \cdot R_{\Gamma_{ro}(t)} \cdot T_{\frac{\pi}{4}} R_{\frac{\pi}{2}} T_{-\frac{\pi}{4}} \cdot P_{1,0} \cdot \mathbf{J}_{in}(t). \quad (10)$$

ジョーンズ計算法は電界振幅による計算法である。 したがって, P 波, S 波の電圧変換 $v_P(t), v_S(t)$ は, 次の式(11), (12)で求められる。

$$v_P(t) = e_0^2 \{e_P(t)\}^2 S_{\lambda} R_L, \quad (11)$$

$$v_S(t) = e_0^2 \{e_S(t)\}^2 S_{\lambda} R_L. \quad (12)$$

S_{λ} は PD の受光感度, R_L は負荷抵抗である。 ここで, オペアンプの倍率は 1 とする。 差動検出後の電圧 $v_D(t)$ は, 次の式(13)で求められる。

$$v_D(t) = v_P(t) - v_S(t). \quad (13)$$

本研究では, 出力電圧 $v_P(t), v_S(t), v_D(t)$ を e_0 の電圧変換 v_0 によって正規化する。 v_0 は次の式(14)で求められる。

$$v_0 = e_0^2 S_{\lambda} R_L. \quad (14)$$

各電圧は, 高速フーリエ変換(FFT : Fast Fourier Transform)によって時間領域から周波数領域へ変換される。 変換後の $v_0, v_P(t), v_S(t), v_D(t)$ を, それぞれ $V_0, V_P(f), V_S(f), V_D(f)$ として定義する。

(2) 周波数依存雑音モデル生成

EO センサのシミュレーションに用いる周波数依存雑音モデルは, ガウス雑音にフィルタを適用して生成した[7]。

ガウス雑音は, ボックスミュラー法[8]を用いて生成した。 ガウス雑音 $N_G(t)$ は次の式(15)で表される。

$$N_G(t) = \sqrt{-2 \log X(t)} \sin 2\pi Y(t). \quad (15)$$

$X(t)$ および $Y(t)$ は一様分布に従いランダムに時間変化する 0.0 以上 1.0 未満の浮動小数点数である。 式(15)に対し, 標準偏差を掛け合わせ, 平均値を足し合わせることで雑音量の調整が可能となる。

ガウス雑音に適用するフィルタは, イコライザを用いた。 イコライザの伝達関数 $H(s)$ は次の式(16)で表される。

$$H(s) = \frac{s^2 + \frac{1}{Q}s + 1}{s^2 + \frac{1}{GQ}s + 1}. \quad (16)$$

s は複素変数, G は利得係数, Q は Q 値である。 図 4 にイコライザの周波数特性を示す。

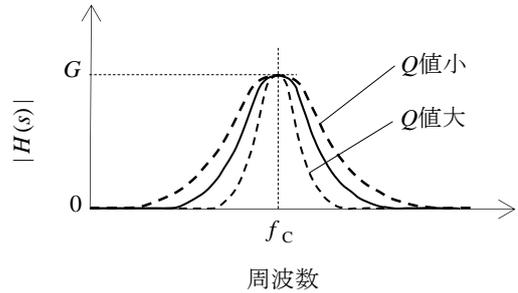


図4 イコライザの周波数特性

f_c はゲインの中心周波数を表す。 周波数依存雑音 $N_{FD}(t)$ は以下の式(17)で表される。

$$N_{FD}(t) = N_G(t) * h(t). \quad (17)$$

$h(t)$ は $H(s)$ の時間変換, * は畳み込み積分を表す。 尚, シミュレーションにおけるレーザ強度雑音としての周波数依存雑音モデルは, 実測によって得られたレーザ強度雑音のスペクトルに合わせ, 低周波側が盛り上がるように各パラメータを調整した。

4. 結果

(1) 正弦波雑音モデル

変調されたレーザ強度雑音の解析のため, はじめにレーザ強度雑音を正弦波として定義してシミュレーションを行った。 このときの式(8)におけるレーザ強度雑音の電界振幅 $e_N(t)$ は, 次の式(18)で表される。

$$e_N(t) = e_{N0} \sin 2\pi f_N t. \quad (18)$$

e_{N0}, f_N はそれぞれ正弦波の振幅と周波数である。

図 5 に, 正弦波雑音での (a)P 波, (b)S 波, (c)差動検出後のスペクトルを示す。 パラメータ設定は, e_{N0}/e_0 は 0.001, v_{Sig0}/v_{π} は 0.001, f_N は 100 Hz, f_{Sig} は 1 kHz とした。

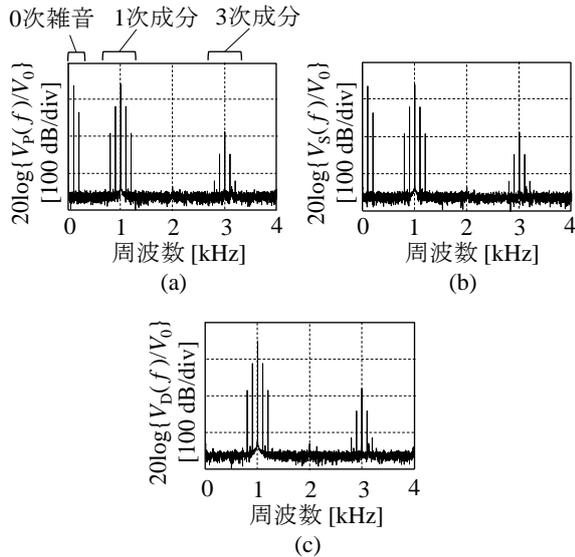


図5 正弦波雑音によるシミュレーション結果
(a)P波, (b)S波, (c)差動検出後のスペクトル

図5(a), (b)より, 100 Hzのレーザ強度雑音は, 電圧変換において二乗され, 200 Hzにスペクトルが現れる. 1 kHzの信号は, EO変調により奇数倍の高次高調波が現れる. 100 Hzおよび200 Hzのレーザ強度雑音は, EO変調を受けて1 kHzと3 kHzの信号の前後にスペクトルが現れている. 図5(c)より, 0次雑音はP波とS波の間で同相であり, 差動検出後に除去されている. 1次成分および3次成分はP波とS波の間で逆相であり, 差動検出後に増幅している. 3次成分は1次成分に比べて十分小さいため, 無視できるものとする.

変調されたレーザ強度雑音は, 差動検出後にP波とS波の間で逆相となり, 増幅されることを確認した.

(2) 周波数依存雑音モデル

正弦波雑音によるシミュレーション結果を踏まえ, 周波数依存雑音モデルを用いた相対強度雑音のEOセンサ感度への影響を考察する. 図6に, レーザ強度雑音のEO変調によるミキシングの模式図を示す.

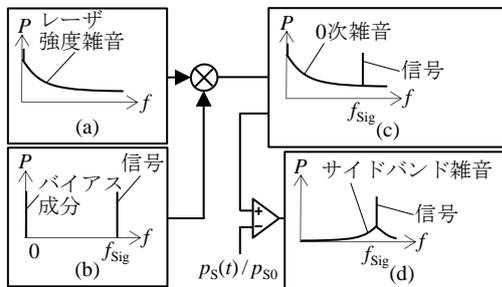


図6 レーザ強度雑音のEO変調によるミキシングの模式図

図6(a), (b)はそれぞれ, 式(1)における右辺第一項, 第二項のスペクトルを表す. 図(c), (d)はそれぞれP波, 差動検出後のスペクトルを表す. 尚, 式(2)における右辺第

一項, 第二項のミキシングの模式図は省略している. 図6(d)に示すように, 1次成分に含まれる変調されたレーザ強度雑音をサイドバンド雑音と定義する. 図6(d)に示すように, 差動検出後のEOセンサのSNRは, サイドバンド雑音によって制限されると考えられる.

式(1)において p_{P0} で正規化を行わない場合, $p_P(t)$ の式は次の式(19)で表される.

$$p_P(t) = p_{P0} + p_N(t) + p_{P0} \sin \Gamma_{EO}(t) + p_N(t) \sin \Gamma_{EO}(t). \quad (19)$$

図7に, 式(19)における各項のスペクトルを示す.

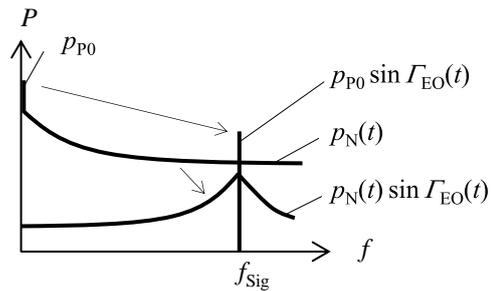


図7 各項のスペクトル

表1に, 式(19)における各項の特性を表す.

表1 各項の特性

	ϕ_{PS} [rad]	差動後
p_{P0}	0	除去
$p_N(t)$	0	除去
$p_{P0} \sin \Gamma_{EO}(t)$	π	増幅
$p_N(t) \sin \Gamma_{EO}(t)$	π	増幅

ϕ_{PS} はP波, S波間の位相差を表す. 図7および表1より, シングル系, 差動系における信号成分はいずれも $p_{P0} \sin \Gamma_{EO}(t)$ となることが確認できる. シングル系における雑音成分は $p_N(t)$ であるのに対し, 差動系では $p_N(t) \sin \Gamma_{EO}(t)$ となる. したがって, 差動系におけるSNRは p_{P0} と $p_N(t)$ の比である相対強度雑音に依存すると考えられる.

以上の予測の元, 周波数依存雑音モデルを用いたシミュレーションを行う. 式(17)によって生成された周波数依存雑音モデル $N_{FD}(t)$ を, 式(8)におけるレーザ強度雑音の電界振幅 $e_N(t)$ に入力した. パラメータ設定は, v_{Sig0} / v_{π} は0.001, f_{Sig} は1 kHzとした. 周波数依存雑音モデルについては, レーザ強度雑音の標準偏差が0.01となるように, フィルタ適用前のガウス雑音の標準偏差を調整している.

図 8 に、周波数依存雑音モデルによる相対強度雑音のスペクトルを示す。

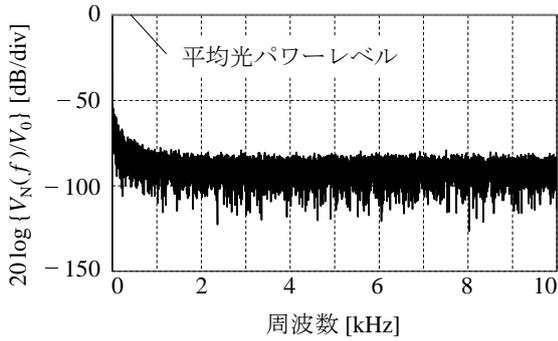


図 8 相対強度雑音のスペクトル

図 8 より、周波数依存のレーザ強度雑音が生じることが確認できる。相対強度雑音はレーザ強度雑音を平均光パワーによって正規化しているため、0 dB は平均光パワーのレベルを表す。図 9 に、P 波のスペクトルを示す。尚、今回は比較のために v_{p0} により正規化を行った。

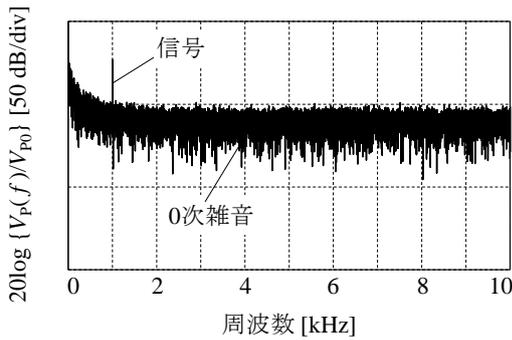


図 9 P 波のスペクトル

図 9 では、図 6(c)に示すように、信号と 0 次雑音を確認できる。図 10 に、差動検出後のスペクトルを示す。

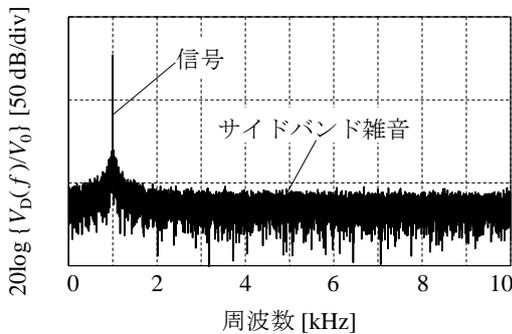


図 10 差動検出後のスペクトル

図 10 では、図 6(d)に示すように、信号とサイドバンド雑音を確認できる。また、図 9 と図 10 を比較すると、0 次雑音が差動検出により除去されている。図 11 に、図 10

を 1 kHz において周波数オフセットしたスペクトルを示す。

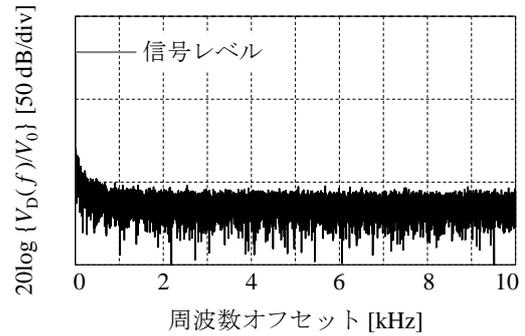


図 11 差動検出後のスペクトル(1 kHz オフセット)

信号レベルは、図 10 における 1 kHz の信号強度レベルを表す。図 8 と図 11 を比較すると、スペクトルが概ね一致する。また、図 8 における平均光パワー対雑音レベルと、図 11 における信号レベル対雑音レベルの比が一致し、差動検出後の SNR は相対強度雑音に依存することがわかる。したがって、差動系 EO センサにおける SNR の改善には、相対強度雑音の低減が必要となることを確認した。

5. 結論

EO センサにおけるレーザ強度雑音の変調による影響を、偏光シミュレータと周波数依存雑音モデルにより解析した。解析の結果、変調によりレーザ強度雑音成分は P 波と S 波の間で逆相となり、差動検出後に増幅された。差動検出を用いた EO センサの信号対雑音比の改善には、レーザの相対強度雑音の低減が必要となることを明らかにした。

参考文献

- 1) J. A. Valdmanis, G. A. Mourou, and C. W. Gabel, "Subpicosecond Electrical Sampling," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 19, no. 4, pp. 664–667, 1983.
- 2) M. Shinagawa, and T. Nagatsuma, "A Laser-Diode-Based Picosecond Electro-Optic Prober for High-Speed LSI's," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 41, no. 3, pp. 375–380, 1992.
- 3) M. Shinagawa, A. Sasaki, A. Furuya, H. Morimura, and K. Aihara, "Compact Electro-Optic Sensor Module for Intra-Body Communication Using Optical Pickup Technology," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 52, 2013.
- 4) J. Katsuyama, K. Matsumoto, R. Sugiyama, S. Hasegawa, M. Shinagawa, and Y. Yanagisawa, "Failure Diagnosis of Organic Photovoltaic Using Electro-Optic Probe," Optical Review, vol. 21, No. 5, pp. 621–627, 2014.

- 5) Kurt J. Weingarten, Mark J. W. Rodwell, and David M. Bloom, "Picosecond optical sampling of GaAs integrated circuits," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol.24, No.2, pp.198-220, 1988.
- 6) A. Sasaki and M. Shinagawa, "Polarization Analysis of Light Propagating in Electro-Optic Crystals with Static Birefringence and Its Application to Sensor Design," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 47, No. 2, pp. 918-924, 2008.
- 7) Zhang Xiuli, Zhang Ruihua, and Chen Weidong, "Design of digital parametric equalizer based on second-order function," *International Conference on Image Analysis and Signal Processing*, 2010.
- 8) G. E. P. Box and Mervin. E. Muller, "A Note on the Generation of Random Normal Deviates," *Annals of Mathematical Statistics*, vol.29, No.2, pp.610-611, 1958.