

超高精細画像形成・表示システム

滝沢 國治*

Laser-beam writing system, Ti-sapphire laser and Michelson interferometer for recording and display of ultra high-definition images

Kuniharu TAKIZAWA*

ABSTRACT: This paper presents an ultra high-definition image recording and display system which includes a laser-beam writing system, a Ti-sapphire laser and a Michelson interferometer. The laser-beam writing system, which records ultra high-definition images to a medium of oxide single crystals with a limiting resolution of 500 lines/mm, consists of a He-Cd laser, an Ar ion laser, light modulation units, a laser-beam microscope system and a computer control system. The Ti-sapphire laser is a vibronic CW solid-state laser with a tunable wavelength range of 690-1005 nm and a peak power of 1.05 W at 740 nm. The Michelson interferometer consists of a precision interferometer and a computer-controlled measurement system. The outlines of these devices are described with brief experimental results, such as a laser-beam defocusing phenomenon in a guest-host type liquid crystal cell and the precise measurement of an electrooptic coefficient r_{33} of LiNbO_3 crystal.

KEYWORDS: Laser-beam writing system, Ti-sapphire laser, Michelson interferometer, High-definition image, Electrooptic crystal, Liquid crystal

(Received May 31 2003)

1. まえがき

ヒトの感覚は、視覚、聴覚、嗅覚、味覚、平衡感覚の5感のほか、皮膚感覚、臓器感覚など、合わせて9種類あると言われている。これらの感覚の受容器（あるいは受容細胞）と脳を連絡する神経線維数を比較すると、視神経が他を圧倒しており、このことから、画像や映像の情報量がいかに膨大であるかを知ることができる。画像技術は、①この膨大な情報から情報の受け手が何を望んでいるのかを見抜く画像処理技術、②不要な情報を切り捨てる情報圧縮化技術、③画像情報を忠実に記録、伝送、表示する技術、などに分類される。

③の光画像記録や光画像表示用材料・デバイスとは筆者の守備範囲の1つであり、これまでに高分子/液晶複合材料と非晶質シリコン膜を積層した空間光変調素子^{1,2}や $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 単結晶を高絶縁膜で挟んだPROM (Pockels Readout Optical Modulator)³などを研究してきた。空間光変調素子は、半導体膜に2次元情報（画素数は 10^6 程度）を光で書き込み／読み出すことができるが、現在のハイビジョ

ン画像を上回る超高精細画像（画素数は 2×10^7 以上）や3次元画像（画素数は現行ハイビジョン画像の $2 \sim 10^4$ 倍）には適応できない。一方、PROMは、短波長レーザー光で結晶に高精細画像を記録し、長波長光でこれを読み出すことができるが、読み出すたびに画質が劣化してしまう。また、情報を長期間記録する機能も持ち合わせていない。

これらの課題を克服するため、平成13年度私立大学等研究設備費等補助金により、超高精細画像形成・表示システムを導入した。このシステムは超高精細画像を酸化物単結晶などの媒体に記録するレーザー描画装置、電気光学効果など媒体の光学特性を測定するマイケルソン干渉計および記録情報の読み出しや評価のための波長可変レーザーから構成される。本文では、これらの概要と研究成果について報告する。

2. レーザ描画装置

レーザー描画装置（ネオアーク社 DDB-500-SKU）は、描画機構部（図1）と制御部（図3）から構成されている。描画機構部は、He-Cdレーザー光源（波長441.6 nm、出力24 mW、金門電気製 図1の①）、Arイオンレーザー光源（波長454.5、457.9、465.8、

*物理情報工学科教授(takizawa@apm. seikei.ac.jp)
Professor, Department of Applied Physics)

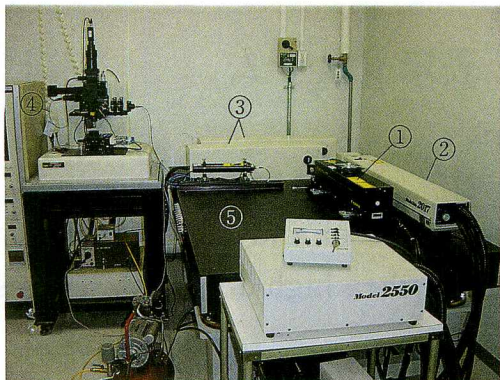


図1 レーザ描画装置の描画機構部

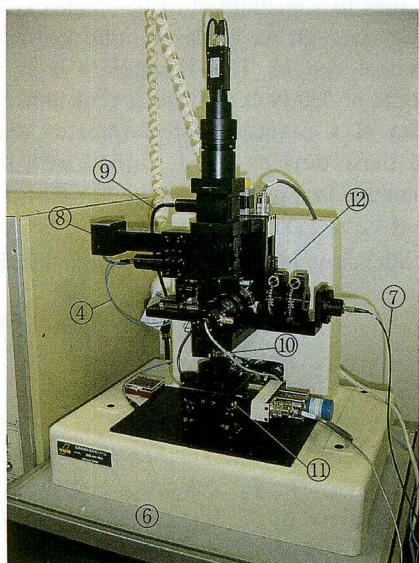


図2 描画用顕微鏡ユニット

472.7、476.5、488.0、496.5、501.7、514.5、(単位nm)、出力 6.0W スペクトラフィジックス社②)、光量制御ユニット③)、単一モード光ファイバ④)および描画用顕微鏡ユニット(図2)で構成される。レーザ光は、光量制御ユニットで輝度および描画タイミングをコントロールされた後、光ファイバを経由して、顕微鏡ユニットに導かれる。He-Cdレーザ光とArイオンレーザ光の波長が大きく異なるため、2つの光ファイバのコア径は異なる。レーザ光を単一モード光ファイバに通す理由は、集光スポットの位置を安定させるためである。レーザ光を空中伝播させて1m先に集光すると、そのスポットは25℃のとき100 μ mほど揺らいでしまう。単一モード光ファイバを通

すと、この揺らぎを0.1 μ m以下に抑えることができ、高精度の描画が可能になる。

光量制御ユニットとArレーザ光源の間には、グランレーザプリズム型偏光子と1/2波長板からなる光減衰器が設けられている。これは、不用意にハイパワー光(数100mW以上)を光ファイバに通したとき、光ファイバが回復困難な損傷を受けるのを避けるためである。

レーザ光源および光量制御ユニットは大型空気式アルミハニカム製防振台(2000mm $\times$ 1200mm $\times$ 800mm 総重量 約350kg⑤)の上に設置されている。レーザ光はスライド式のミラーで光路を切り替えることができ、多目的に利用できるようにしてある。

顕微鏡ユニットは図2に示すように独立した防振台⑥)の上に設置され、総重量200kgである。このユニットでは、描画光(前記2種類のレーザ光④)、記録媒体の位相変化を読むHe-Neレーザ光(波長632.8nm 3mW⑦)、オートフォーカス用の半導体レーザ光(波長690nm⑧)および落射照明用ハロゲンランプ光(白色 100W⑨)など様々な光が対物レンズを通して記録媒体を照射する。対物レンズなど描画に直接関係する光学系は、He-Cdレーザ光に合わせて設計されているため、青緑色のArレーザ光で描画する場合には、分解能が低下する。しかし、Arレーザ光はHe-Cdレーザ光に比べて数10倍も高い輝度をもつため、電子回路の簡単なトリミングなどに用いることができる。

対物レンズ⑩)はCF IC LCD Plan CRx50(ニコン製)である。倍率は50倍、作動距離は8mmで1.2mmのガラス基板を通して、集光できるよう屈折率補正が施されている。

記録媒体はXYステージ⑪)上に置かれる。ステージは超音波モータで25mm $\times$ 25mmの範囲を移動する。移動分解能は1 μ m、位置精度は $\pm$ 3 μ mである。この値が保障されているワークエリアは、10mm $\times$ 10mmである。ステージの位置はパーソナルコンピュータで制御される。このステージ上に小型の温度セルを設置し、温度制御をしながら媒体に光記録することも可能である。セルの温度範囲は、室温から150℃までで、 $\pm$ 0.1℃の精度でPID制御される。セルに入れられる記録媒体のサイズは、50mm $\times$ 50mm $\times$ 3mmである。

媒体の記録状態を評価するため、He-Neレーザ、偏光子、検光子からなるクロスニコル光学系⑫)も備えている。これは一種のKerr効果測定装置で



図3 レーザ描画装置の制御部

あり、He-Cdレーザ光やArレーザ光の照射で生じた媒体の微弱な屈折率変化を読み取ることができる。

ステージ移動、レーザ光のオートフォーカス、レーザ光の輝度などは、制御装置とパーソナルコンピュータから構成される制御部(図3)を通して制御される。CADデータフォーマットの1つであるDXFファイルで記述されたデータをモーションコントロール用コマンド群に変換し、各機器を制御する仕組みである。OSはMS-WINDOWS 98でプログラミング言語はVisual Basic Ver6.0である。ソフトウェアは、①実行ファイル、②システムパラメータファイル、③テンポラリーファイルなどで構成されている。操作等のプログラムの詳細はここでは省略する。

3. 波長可変レーザ

波長可変レーザは図4に示すように、レーザヘッド(515 mm×330 mm×148 mm 20 kg ⑬)、電

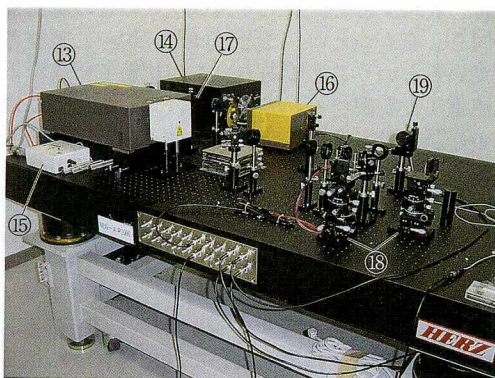


図4 チタンサファイアレーザとマイケルソン干渉計

源(320 mm×370 mm×180 mm 14.5 kg ⑭)、冷却用チラー(203 mm×350 mm×385 mm 14 kg)および制御ユニット(シグマ光機製 ⑮)で構成される。このレーザ装置は、レーザ媒質にチタンドープサファイア($\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$)を用いたチタンサファイアレーザ(波長690~1005 nm 最大出力1.05 W 昭和オプトロニクス社製 LUDORA)である。余談であるが、サファイアはルビーと同じ結晶構造をもつ。色の濃い結晶をルビー、それ以外をサファイアと呼んでいる。ルビーは1960年にMaimanによって、初めてのレーザ発振が確認された結晶として名高い。多くのチタンサファイアレーザはパルス発振であるが、本装置はCW発振(Continuous Wave 連続光)することが大きな特徴である。色素レーザのように色素交換を行わずに波長を可変できる固体レーザであり、安全のための管理基準を守れば、誰でも簡単に利用することができる。

チタンサファイアレーザの光学系を図5に示す。

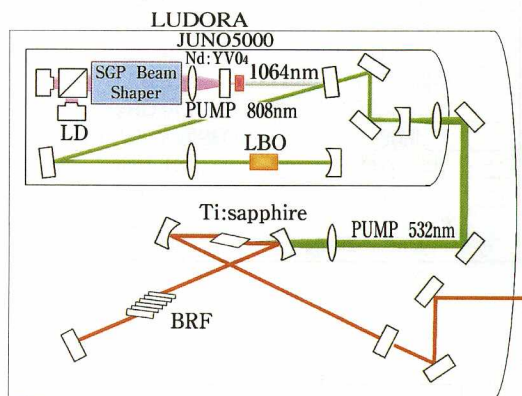


図5 チタンサファイアレーザの光学系

$\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 結晶の吸収ピークは500 nm付近にあるため、励起光源として緑色発光(波長532nm 5 W)の固体レーザ(昭和オプトロニクス社製 JUNO 5000)が用いられる。この励起光を吸収した $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 結晶は2 E励起状態に遷移し、そこから蛍光を発しながら基底状態である2 T状態に戻る。2 T状態は連続的なエネルギーレベルを有するため、蛍光の波長は660 nm~1180 nmとブロードである。これらの光から回折格子(図5のBRF)を用いて狭帯域の光を選択し、光共振器で帰還を掛けてやると、波長可変レーザ光が得られる。

JUNO 5000は、半導体レーザ(波長808 nm 出力30 W)、Nd:YVO₄結晶およびリチウム・トリボ

レート (LiB_3O_5 一般には LBO と略記される) 結晶から構成される。半導体レーザー光で Nd:YVO_4 結晶を励起し、まず 1064nm の赤外レーザー光を発振させる。この赤外レーザー光は LBO 結晶に入射し、 532nm の緑色レーザー光 (5W) に変換される。この波長変換現象は第2高調波発生 (Second Harmonic Generation SHG と略記される) と呼ばれ、もっともファミリアな非線形光学現象の1つである。SHG を効率よく行うためには、基本波 (この場合波長 1064nm の赤外レーザー光) と SHG 光 (波長 532nm) が LBO 結晶中で同じ伝播ベクトルを持たなければならない。このためには、結晶温度を精密に制御する必要がある。本装置ではヒーターを利用して結晶温度を $148\pm0.1^\circ\text{C}$ に設定している。チタンサファイアレーザ (LUDORA) の仕様を表1に、またその発振特性を図6に示す。

表1 チタンサファイアレーザ (LUDORA) の仕様

パラメータ	性能
可変波長域	690—1005 nm
ピーク波長出力	740 nm
空間モード	TEM_{00}
ライン幅	$<10\text{ GHz}$
偏光	直線偏光 (水平)
ビーム径	約1 mm
ビーム広がり角	$<1\text{ mrad}$
出力安定度	$\pm 3\%$
ウォームアップ時間	$<30\text{ min.}$

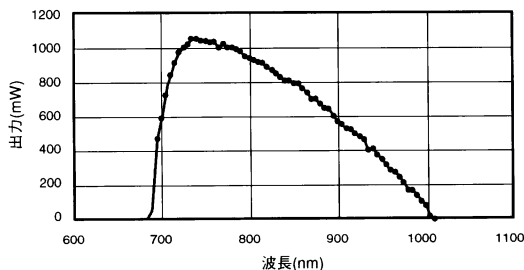


図6 チタンサファイアレーザ (LUDORA) の発振特性

4. マイクelson干渉計

3次元の光記録に有望な物理現象の1つにフォトリフラクティブ (PR) 効果がある。PR効果は、励起光によって生じた正負のキャリアが結晶中で拡散し、キャリアが作り出す電界で結晶の屈折率が変化する現象である。このように、PR効

果は光キャリアの生成と電気光学効果の相乗作用から生じる。

PR効果の大きな材料としては、 LiNbO_3 (LN) や BaTiO_3 などの強誘電性結晶および GaAs や InP などの化合物半導体である。これらの結晶の光学的性質はほぼ解明されたと思われるがちであるが、そうではない。例えば、LN結晶のPR効果は、この現象が明らかになった当初は、光損傷 (optical damage) として、嫌われていた。⁴ その後、FeやRhなどの不純物を積極的にドーピングして、PR効果を強調するようになってきた。⁵ また最近では、Nbリッチのコングルエント組成のLN結晶だけでなく、化学量論的 (ストイキオメトリック) 組成のLN結晶も育成されるなど、多様化している。⁶ さらに、殆どの結晶で電気光学効果と圧電効果の分離計測がなされていないため、PR効果による超高密度光記録研究に先立ち、結晶の電気光学的特性を精密に評価することが望ましい。^{7,8}

マイケルソン干渉計は、光学システムと制御装置から構成される。光学システムを図4に示す。このシステムは、常設光源としての安定化電源⑩を備えたHe-Neレーザ (波長 632.8 nm 5 mW ネオアーク社製⑪) のほか、前述のチタンサファイアレーザ光も利用できるように設計されている。2つのサンプルステージ (⑫) の調整は、6軸 (前後、左右、上下、パン、チルト、水平回転) の精密マイクロメータで行われる。

このシステムの測定方法を簡単に述べる。結晶を6軸ステージに乗せ、干渉縞の数がゼロになるまで2つのステージを微調整する。縞の本数がゼロになるということは、干渉しないということではなく、2つの光路を伝播するレーザー光の位相が2次元空間で一致する (正確には、位相を $2m\pi + \phi$ と表現すると、レーザースポットのどの場所でも同じ ϕ をもつということ) ほど、均一に調整されているということである。この状態で結晶を正弦波電圧で変調する。光検出器 (⑬) の出力には、この変調信号のほか、空気の振動、床の振動、温度揺らぎによる結晶の屈折率変化、レーザ電源雑音、レーザ光のモード雑音など、さまざまな雑音が混入する。また、光検出器や増幅器の非線形特性も考慮に入れなければならない。この清濁入り混じった干渉信号を制御部 (図7) のプログラマブルバンドパスフィルター (48 dB/oct. ⑭) に導き、基本波成分と第3高調波成分だけをそれぞれ抜き取り、両者の比から電気光学効果の大きさを評価する。光学調整を除いた作業はコンピュータで自

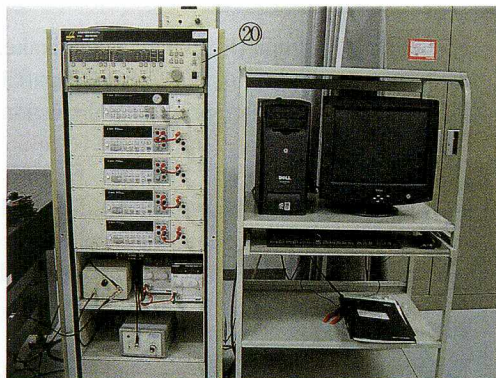


図7 マイケルソン干渉計の制御部

動的に行われるため、外乱の影響がきわめて少ない測定が可能である。

5. 研究成果

設備を導入して日が浅いためまだ目見程度の段階であるが、興味深い実験結果が得られ始めているので紹介する。

図8は、シアノビフェニール系ネマティック液

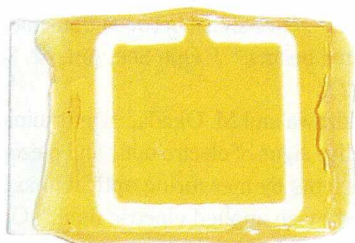


図8 ゲストホスト型液晶セル

晶（チッソ社GR_63 ネマティック相—液晶相転移温度 63℃）をホスト材料、2色性比6.8のアゾ系色素（分子の方向によって、吸収する光の波長が異なるという性質を2色性と呼ぶ）をゲスト材料とするゲストホスト型液晶素子（サイズ15 mm×16 mm 厚さ25 μ m）である。ゲスト材料は2.8 w %混合されている。この色素は青色光をよく吸収するため、黄褐色に見える。この素子を顕微鏡ユニットのXYステージ上に設置し、Arレーザ光（波長488.0nm）を集光したところ、図9のような出力光が観測された。アゾ系色素はArレーザ

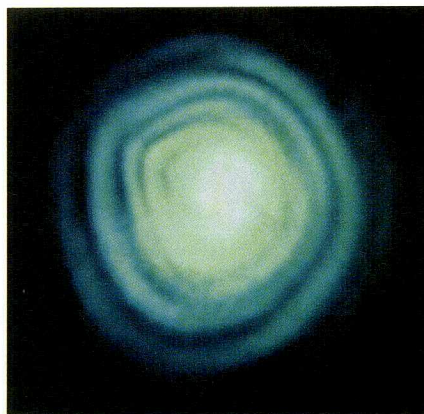


図9 ゲストホスト型液晶のセルフデフォーカス現象

光をよく吸収するため、レーザ光の照射されている中心部ほど温度が高くなる。このため、中心から周辺に向かって屈折率勾配を示す干渉縞が生じる。レーザ光は集光されているはずであるが、図9に示されるように広がって見える。これは、屈折率勾配が引き起こすセルフデフォーカス現象（自分の光の一部が物質に吸収され、その屈折率が低下するため、集光ビームが発散してしまう現象）である。

また、この出力光を実時間で観測すると、やや歪んだ同心円状の縞模様は、中心部分を軸として数回/秒の速度で右に左に回転し続ける。右回り、左回りの回転時間を測定するとその時間はランダムである。この回転の原因には、ネマティック液晶の相転移が関係していると思われる。ネマティック相から液相への相転移が始まる状態では、液相の核がランダムにネマティック相の中に形成され、その2つの相の屈折率差でArレーザ光が散乱されることが原因であろうと考えている。静止画像では面白くないが、これを動画で観察するとなかなか神秘的であり、非線形光学現象に関わっている筆者には、見飽きない映像である。

図10は、マイケルソン干渉計を用いて、LN結晶の電気光学係数 r_{33} を測定した一例である。LN結晶に加える電圧が数Vを越すと、測定値がほとんど一定になり、この方法で電気光学係数を高精度に測定できることがわかる。測定値が一定な値を示す最小電圧に相当する位相変化を距離に換算すると、その距離は0.01 λ （ λ は観測光の波長）であった。およそ6nmの長さの変化を検出していることになる。この測定方法の特徴は従来方法よりも高感度で結晶の位相変化を評価できることであり、その測定原理については2003年の応用物理

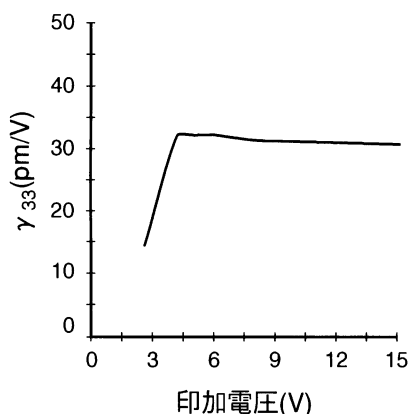


図10 LN結晶の電気光学係数 r_{33} と印加電圧の関係

学関係連合季講演会で発表した。⁹ 現在、論文投稿の準備を進めている。この方法は多くの改善の余地が残されており、サブナノメートルからサブÅ程度の距離の変化を検出することも可能ではないかと考えている。今後は、測定方法の感度向上を図りながら、電気光学効果の精密測定を行う。具体的には、これまでスタンダードになっている各種結晶の電気光学効果の中に、わずかであるが逆圧電効果が混入していることを明らかにし、電気光学係数と圧電定数の分離測定を進める予定である。^{10,11} また本誌掲載の「高速空間光変調素子用電気光学ファブリ・ペロー共振器の解析」はこれらの研究と深い関わりがある。

6. まとめ

平成13年度私立大学等研究設備費等補助金を得て導入した超高精細画像形成・表示システムの概要と研究成果を紹介した。各装置の基本的機能については詳しく書いたが、システム全体の機能に関しては説明不足だったかもしれない。システム構想にはこれからの研究に直接関係する部分が多く含まれているため、詳しい説明は差し控えさせていただきます。

本システムの導入は工学部リニューアル工事と同時進行であったため、ようやく研究の緒に就いたばかりである。今後は、学内および学外研究機関と協力しつつ教育・研究両面で成果を挙げて行きたいと考えている。

最後に、本システムの導入にあたり、ご支援を賜りました工学部ならびに学園の関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

1. K. Takizawa, T. Fujii, H. Kikuchi, H. Fujikake, M. Kawakita, Y. Hirano, and F. Sato, "Spatial light modulators for high-brightness projection displays," *Appl. Opt.* Vol. **38**, 5646-5655 (1999).
2. H. Kikuchi and K. Takizawa, "Liquid crystal light valve technologies for display applications," in "Spatial Light Modulators: Technology and Applications, U. Efron, ed., *Proc. SPIE* **4457**, 122-136 (2001).
3. K. Takizawa, H. Kikuchi, T. Aida, and M. Okada, "Optical parallel logic gate using a Pockels readout optical modulator and twisted nematic liquid-crystal cells," *Opt. Lett.* **14**, 208-210 (1989).
4. F. Chen, "Optically induced change of refractive indices in LiNbO_3 , and LiTaO_3 ," *J. Appl. Phys.* **40**, 3389-3396 (1969).
5. P. Gunter and J. Huignard ed., "Photorefractive materials and their applications," (Springer-Verlag, Berlin, 1988) Vol.1,2.
6. 宮澤；「光学結晶」(培風館 1995.7).
7. K. Takizawa and M. Okada, "Simple method for measuring electro-optic coefficients by detecting the interference signal between transmitted and reflected beams," *J. Opt. Soc. Am.* **72**, 809-811 (1982).
8. K. Takizawa and M. Okada, "Determination of refractive signs of electro-optic and piezoelectric coefficients by measuring optical phase shifts caused by an applied electric field," *Opt. Soc. Am. B* **2**, 289-293 (1985).
9. 滝沢, 横田； "電気光学係数の測定精度・感度の改善" 第50回応答物理学関係連合講演会 29p-YS-9 (2003).
10. K. Takizawa, "Analysis of electro-optic crystal-based Fabry-Perot etalons for high-speed spatial light modulators," *Appl. Opt.* **42**, 1052-1067 (2003).
11. 小林, 菊池, 滝沢； "ポッケルス効果と逆圧電効果を利用した縦型光変調素子の設計" 信学誌C **J86-C**, 83-85 (2003).