

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06355

研究課題名(和文) レーザディスプレイ・描画装置への応用を目指した高性能一次元空間光変調器の開発

研究課題名(英文) Development of high performance one dimensional spatial light modulator for laser displays and lithography systems

研究代表者

井上 敏之 (Inoue, Toshiyuki)

大阪大学・基礎工学研究科・特任助教(常勤)

研究者番号：90757709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：レーザディスプレイやレーザ描画装置等への応用を目指し、新たな電気光学変調器を用いた二次元空間光変調器を実現のための理論検討およびデバイス試作・評価を行った。レーザディスプレイを構成する三原色光源を同一基板上で変調するための周期分極反転構造を設計した。各波長に対して適切に分極反転周期を決定することにより、クロストークレベルは0.34%以下の高コントラストの空間変調動作が期待できる。高パワー変調に適した5 mol%酸化マグネシウム添加ニオブ酸リチウム結晶に周期分極反転構造を形成した。画素電極に変調信号を与えたところ、変調信号の変化に応じた所望の光変調動作が確認でき、高速動作の予備的知見も得られた。

研究成果の概要(英文)：For application to laser displays and lithography systems, newly developed electro-optic modulator using spatial light modulators were considered and the prototype was demonstrated. Periodically poled structures for modulation of visible (red, green and blue) lights on a single substrate were designed. By setting the periods of the structures appropriately, the cross-talk level of less than 0.34% was achieved in the calculation. Periodically poled structures were formed in MgO (5 mol%) doped lithium niobate which is suitable for modulation involving high power light. After depositing pixel electrodes for modulation, the modulation signal was applied to the electrodes. The optical intensity modulation corresponding to modulation signals was verified. In addition, preliminary experimental results for high speed modulation with a few GHz were obtained.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：電気光学効果 周期分極反転構造 空間光変調 ディスプレイ レーザ

1. 研究開始当初の背景

強誘電体結晶である LiNbO_3 や LiTaO_3 は、優れた電気光学・非線形光学特性を有している。これらの強誘電体結晶では抗電界を上回る電界を印加することにより自発分極が反転（分極反転）し、分極反転領域では非線形光学・電気光学定数の符号が非反転領域に対して反転するという性質がある。これまでに、周期分極反転構造を用いた擬位相整合非線形光学波長変換デバイスが、ディスプレイ用高出力緑色光源をはじめとして、高密度波長多重光通信や量子情報通信等への応用を目指して幅広く研究されてきた。また、周期分極反転構造に一樣電界を印加すると電気光学効果により分極反転領域と非反転領域との間に屈折率差が生じ、グレーティング（周期的屈折率分布）を形成できるため、電気光学デバイスへの応用も検討されてきた。応用例の1つに、図1に示すような電気光学ブラッグ回折型デバイスがある。比較的短周期の分極反転構造に一樣電界を印加しブラッグ条件を満たすようにレーザ光を入射すると回折光が生じる。回折効率が印加電界に依存するため、印加電界を変化させることにより回折光（透過光）強度を変調できる。櫛型電極を結晶表面に装荷して電極近傍のみにグレーティングを形成する従来の電気光学デバイスと比較して、より短周期のグレーティングを結晶の厚さ方向に全体にわたって形成できるため、大口径のビームを用いた高出力の光変調器を実現できる。また変調電極形状も櫛型電極と比較して単純（一樣電極）であるため、容易に変調電極が形成できる。

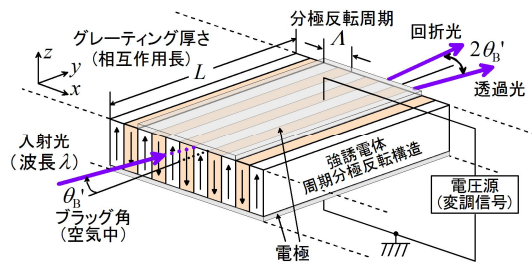


図1 電気光学ブラッグ回折型光変調器
(空間光変調器の1画素分)

近年、従来のディスプレイと比較して広い色再現範囲を有し、低消費電力化が期待できるレーザディスプレイが注目されている。また、スマートフォンやタブレット PC などの小型情報端末の急激な普及や端末の小型化に伴い、精細なパターン形成が可能で、高スループットを実現できるプリント基板製造用のレーザ描画装置の実現が期待されている。ディスプレイや描画装置を構成する上で重要な技術となるのは、空間光変調技術である。特に、ディスプレイにおいては高強度可視光の高速・高効率空間変調技術、描画装置においては高強度短波長光（紫外領域を含む）の高速・高効率空間変調技術が必要とな

る。従来、光空間変調には MEMS ミラーや音響光学材料、液晶材料等が用いられてきたが、これらの方式では高速描画装置に求められる MHz 以上の変調は困難であった。一方で、電気光学デバイスは光通信で用いられる LiNbO_3 光変調器に代表されるように、GHz 以上の変調も可能であるため高速空間変調に有利な方式であると言える。しかし、電気光学デバイスを用いた空間光変調器はこれまでに国内・国外ともにほとんど実証例がなかった。

そこで研究代表者らは、新たに示すような周期分極反転構造を用いた電気光学ブラッグ回折型デバイスによる空間光変調器の提案および実証を行ってきた。提案デバイスはこれまで主に光導波路デバイスにおける光スイッチなどの用途で用いられてきた電気光学ブラッグ回折型デバイスを画素の基本単位とし、光波進行方向 (y 方向) と直交する方向 (x 方向) に画素数分だけ配列し、空間光学系を用いることにより透過光と回折光を分離して空間光変調を実現しようとするものであり、これまでに報告例がなかった。無添加 LiNbO_3 用いた電気光学ブラッグ回折型デバイスでは、通信波長帯光 (波長 $1.55\mu\text{m}$) から赤色光で多くの実証例があったが、ディスプレイや描画装置用途で必要となる高強度の紫外～可視光変調時に光誘起屈折率変化 (光損傷) が生じることが知られており、形成したグレーティングの擾乱、ビーム形状の変形などの変調特性の劣化の問題があった。そこで、光損傷耐性の高い MgO 添加 LiNbO_3 を採用した電気光学ブラッグ回折型デバイスを新たに作製・評価を行い、世界に先駆けて空間変調動作を実証した。電気光学ブラッグ回折型デバイスによる空間光変調器の報告は、他には国内では当時研究代表者らの共同研究先であった SCREEN ホールディングス (株) だけであり、国外では報告例はなかった。ブラッグ回折型一次元空間光変調器の理論解析および作製・評価をまとめた研究代表者らの論文が平成 25 年度電子情報通信学会論文賞を受賞するなど高い評価を得ており、このことは本研究が産業分野での応用が期待される次世代レーザディスプレイ・描画装置の実現に貢献できる可能性を秘めた研究であることを示唆しているといえる。

2. 研究の目的

レーザディスプレイ・描画装置等への応用展開をさらに推進するにあたって、以下の課題を克服する必要があると考えられる。

- (1) 高画素密度化および画素数増大
- (2) 三原色光空間変調
- (3) 高速変調動作

(1) に関しては、応募者が作製した空間

光変調器は、作製の都合により画素密度 100 dpi 程度であったが、周期分極反転構造を最適化することにより、さらに画素密度を向上できることが研究代表者の以前の理論解析によって明らかになっており、さらなる高画素密度化が見込める。また、これまでに研究代表者が提案してきた空間光変調器は、電気光学ブラッグ回折型デバイスを一次元方向に多数配列して構成したものであったため、生成される光強度パターンは一次元であり、二次元画像を生成するためには空間変調器そのものを一次元方向に走査する、あるいは一次元光パターンをミラー等により走査しなければ二次元画像を得られない。この場合、空間変調器の動作速度は走査するミラー等の駆動速度により制限され、電気光学効果を利用した本デバイス的高速性が利用できない。

(2) に関しては、特にレーザディスプレイ応用においては、三原色(赤・緑・青)の空間変調が不可欠であるが、通常三原色を個別変調する際にはプリズム等での合波する機構が必要であり、光学系が複雑化するという問題があった。三原色変調機能を同一基板に集積できれば、デバイスを小型化でき光学系も単純かつコンパクトにできる。

(3) に関しては、電気光学変調器は本来 GHz 程度の動作周波数に対して十分に動作するものであるが、研究代表者の先行研究では測定装置の都合により、数 kHz 程度の動作しか確認できていなかった。

以上のような課題を解決するために、以下に示す方法で研究開発を行った。

3. 研究の方法

(1) 高画素密度化および画素数増大

高画素密度化および画素数増大を実現するにあたって、モード結合方程式を用いた理論解析およびラプラス方程式の数値解析等により、ディスプレイへの応用を見据えて赤・緑・青色光に対してそれぞれ高画素密度となるような分極反転周期、グレーティング厚さ(相互作用長)、結晶厚さ等の設計条件を明らかにする。

(2) 三原色空間光変調

三原色空間光変調器集積デバイスの構成例を図2に示す。出力透過光あるいは回折光が3色とも同じ角度で進行するコリニア構成となるように設計すれば、同じ光学系で3色全ての透過光および回折光の分離が可能となり、光学系の単純化が図れる。モード結合理論に基づき、上記の構成が実現できるような分極反転周期を設計し、クロストークを低減できる構成を検討した。

(3) 高速変調動作

電気光学ブラッグ回折型空間光変調器の高速応答性を実験的に明らかにするために、

光損傷耐性に優れた 5 mol% MgO 添加 LiNbO₃ 結晶に周期分極反転構造を形成し、画素電極を装荷して変調器の基本特性を評価したのち、高周波信号を変調器に入力した際の光強度変化を測定することにより、作成した変調器の高速応答性を評価した。

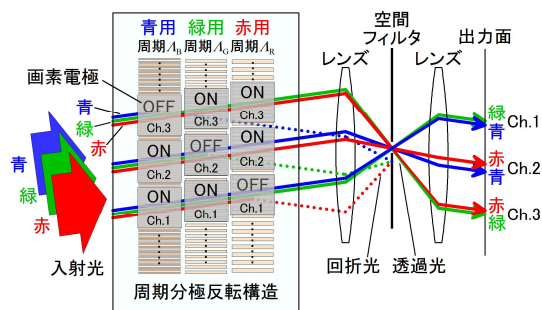


図2 三原色空間光変調動作のための構成例

4. 研究成果

(1) 高画素密度化および画素数増大

電気光学ブラッグ回折型空間光変調器の画素数増大のために新たに考案した構成を図3に示す。これまで単一基板上に画素電極を一次元方向(y方向)に多数配列し、一次元空間光変調動作を行っていたが、同様の基板構造をz方向に積層することによりもう一次元方向に拡張する。±z面に装荷された画素電極間で挟まれた領域を画素の基本単位とし、両電極間に電位差を設けることで結晶内に電界を印加し回折動作を行う。各画素に対して所望の光強度となるように画素電極に電圧を印加した状態で、レーザ光をブラッグ条件を満たすように入射し、図4に示すような光学系で透過光あるいは回折光(図4では回折光強度パターンを生成する場合)を空間フィルタで選択的に通過させると、二次元空間光強度パターンの生成が可能となる。

例えばフルハイビジョン動画(1920×1080 pixels)の生成の場合、画素電極ピッチを 20 μm とすれば 40 mm (x方向)×50 mm (y方向)×20 mm (z方向)程度でデバイスを実現できる。

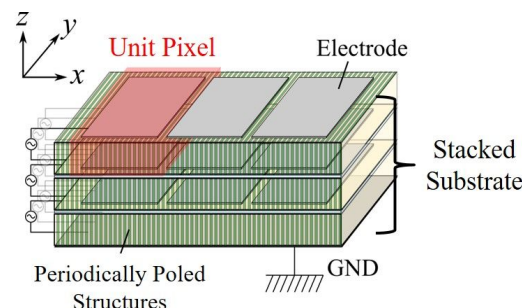


図3 電気光学ブラッグ回折型デバイスを用いた二次元空間光変調器の構成

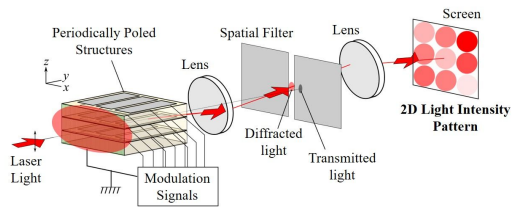


図4 二次元空間光変調のための光学系

(2) 三原色空間光変調

モード結合理論に基づき、赤・緑・青の三色が同じ角度で進行するコリニア構成となるような分極反転周期の設計を行った。ブラッグ条件式から空気中におけるブラッグ角は $\theta_B = \lambda/2\Lambda$ (λ : 入射光波長, Λ : 分極反転周期) と求められるので、 $\lambda_R/2\Lambda_R = \lambda_G/2\Lambda_G = \lambda_B/2\Lambda_B$ (R, G, B はそれぞれ赤, 緑, 青を表す) となるように各波長に対する分極反転周期 $\Lambda_R, \Lambda_G, \Lambda_B$ を決定したところ、 $\Lambda_R = 7.5 \mu\text{m}$, $\Lambda_G = 6.4 \mu\text{m}$, $\Lambda_B = 5.0 \mu\text{m}$ と求められた。図5に各分極反転周期に対する回折効率の入射光波長依存性を示す。各波長に対して回折効率 100% となる高効率動作が可能である。

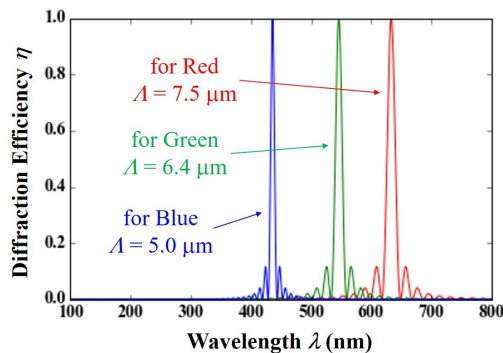


図5 各分極反転周期に対する回折効率の入射光波長依存性

つぎに、クロストークレベルを見積もった。表1に周期 Λ の領域に波長 λ の光波が入力された場合の回折効率(%)の関係を示す。クロストークレベルは0.34%以下(青色用の周期分極反転領域に赤色光が入力された場合)とすることが可能で、これにより高コントラストの空間変調動作が期待できる。

表1 周期 Λ の領域に波長 λ の光波が入力された場合の回折効率(%)

	Λ_R	Λ_G	Λ_B
λ_R	100	0.048	0.339
λ_G	0.196	100	0.280
λ_B	0.004	0.157	100

(3) 高速変調動作

電気光学ブラッグ回折型空間光変調器の

作製・評価を行った。光損傷耐性に優れた 5 mol% MgO 添加 LiNbO₃ 結晶に対して、周期分極反転構造 ($\Lambda = 20 \mu\text{m}$, $L = 5 \text{mm}$) を液体電極を用いた高電圧パルス印加法により形成した。つづいて図6, 7に示すような画素電極 (10画素分, 画素幅 $160 \mu\text{m}$, 画素ピッチ $200 \mu\text{m}$) を装荷した。

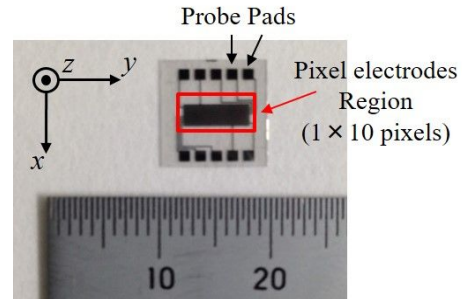


図6 空間光変調デバイスの全体写真

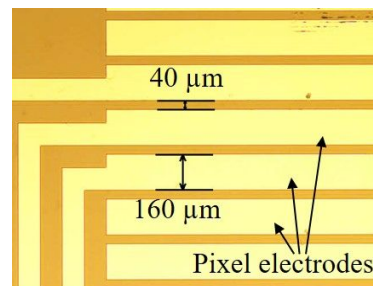


図7 画素電極の拡大写真

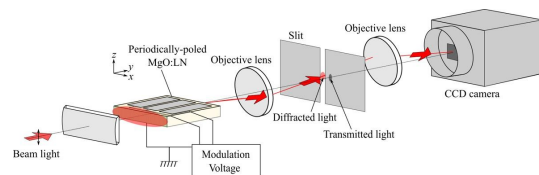


図8 空間光変調実験光学系

空間変調実験のための光学系を波長 633 nm の He-Ne レーザ光を異常光としてブラッグ条件を満たすように結晶に入力した状態で各画素電極に変調信号を入力し、回折光パワーを測定した。回折光パワーのレーザ光入射角依存性を図8に示す。角度受容幅(半値全幅)の測定値 0.5° は計算値とよく一致し、作製した周期分極反転構造の均一性が良好であることが確認できた。つぎに作製した変調器の高周波特性を明らかにするために、数 Hz から 10 MHz 程度(使用した信号源や増幅器等の帯域上限)の変調信号を入力し、光強度変化を測定した。変調深さの変調信号周波数依存性を調べたところ、 -3dB 帯域は 10 MHz 程度が確保できていることが確認できた。ただし、得られた帯域は測定系の帯域によって制限されていたものであるため、測定系の最適化により計算から見積もられる変調器の帯域である数 GHz が実現可能であるといえる。

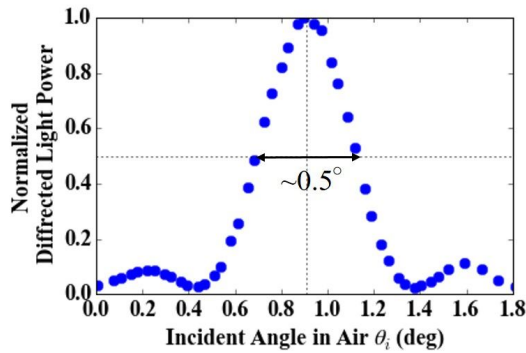


図9 回折光パワーのレーザー光入射角依存性

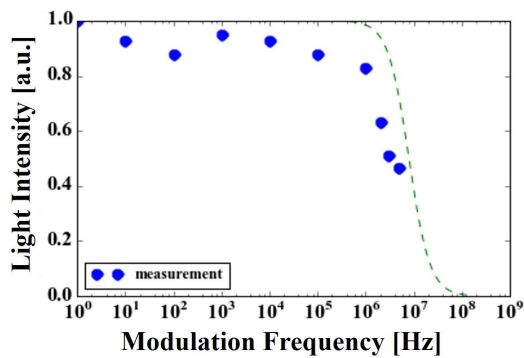


図10 ブラッグ条件下における回折光強度の動作周波数依存性

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

[1] T. Inoue, D. Kuwamura and T. Suhara, "Electro-optic polarization conversion type modulator using periodically poled 8 mol% MgO doped congruent LiTaO₃," Applied Physics Express, vol. 8, no. 6, 062601, May 21, 2015.

〔学会発表〕(計1件)

[1] 林勇太, 井上敏之, 村田博司, 真田篤志, "レーザーディスプレイ応用のための周期分極反転電気光学ブラッグ回折型空間光変調器," レーザー学会学術講演会第37回年次大会, 07p -5, 徳島大学 常三島キャンパス(徳島県徳島市), 2017年1月7日~1月9日(査読無)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ec.ee.es.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

井上 敏之 (INOUE TOSHIYUKI)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・特任助教

研究者番号: 90757709