The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	強誘電体周期分極反転構造を用いた高速レーザリソグラフィ装置用空間光変調器に関する研究
Author(s)	岡﨑, 雅英
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/55944
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

強誘電体周期分極反転構造を用いた
高速レーザリソグラフィ装置用
空間光変調器に関する研究

岡　﨑　雅　英

２０１５年１２月

大阪大学大学院工学研究科

内容梗概

本論文は，筆者が株式会社 SCREEN ホールディングス第二技術開発室と大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻集積光電子デバイス領域（栖原研究室）との共同研究において行った“強誘電体周期分極反転構造を用いた高速レーザリソグラフィ装置用空間光変調器に関する研究”をまとめたもので，全 7 章から構成されている．まず，ここで各章の内容の梗概を述べる．

第 1 章　序論

基幹産業である半導体製造・フラットパネル製造・プリント基板製造と印刷製版において，高出力レーザを用いた精密画像の描画が重要な工程として行われている．従来より石英基板のフォトマスクを用いた転写により大量生産を行うフォトリソグラフィ工程が主流の工程として実施されてきた．しかし，製品製造期間の短縮とフォトマスク製造工程で排出される廃液の環境への負担軽減の対応などの理由から，フォトマスクによる転写工程を無くし，画像データから直接対象物のシリコンウエハや高精細プリント配線板等へ描画を行う直接描画へ変わりつつある．ところが現状はなかなか進まない．その原因を考察し従来のフォトマスク転写方式から新たな直接描画方式へ革新するための課題とその課題解決のために行った強誘電体周期分極反転構造を用いた空間光変調器の技術提案を述べる．直接描画装置では紫外光固体レーザ及び赤外光マルチエミッター半導体レーザを光源に用いるそれぞれの用途がある．それぞれの光源に適する光変調器を実現するために取り組んだ本研究の目標及びその課題を明らかにする．

第 2 章　基本理論

本章では，第 1 章で提案した強誘電体周期分極反転構造を用いた空間光変調器の技術提案を具体化するために，まず一次元空間光変調器の基本単位となる電気光学変調器の基本原理について述べる．モード結合理論を用いた解析を利用してブラッグ回折及びラマン・ナス回折となるための要件を整理する．次にブラッグ回折及びラマン・ナス回折それぞれの特徴から，光源の紫外光固体レーザ及び赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザのそれぞれに対してブラッグ回折型及びラマン・ナス回折型変調器が適することを示す．そして，次にブラッグ回折型とラマン・ナス回折型光変調器のそれぞれの基本構成を述べて，回折効率などの変調特性の理論予測から光変調器の具体的な設計に必要な特性を整理する．そして，直接描画において高消光比を得るのに必要な回折効率などの変調特性の理論予測を行う．最後にブラッグ回折型とラマン・ナス回折型空間光変調器の動作を出力光の空間周波数スペクトルを用いて説明する．

第 3 章　紫外光用電気光学ブラッグ回折型光変調器

本章では，レジストが塗布されたシリコンウエハなどへ描画を行う為の光変調器の設計・試作・評価について述べる．使用する感光材料は i 線レジストなので，光源に YAG（Yttrium Aluminum Garnet）レーザ 3 倍高調波紫外光固体レーザ(波長 355nm)を用いる．紫外光を利用する際は電気光学結晶の光損傷対策が最大の課題である．そこで，紫外波長域の光透過率が高い 4 種類の電気光学結晶を選択し，レーザ光強度に対する光損傷の程度を実験で確認した．最も光損傷耐性のある結晶が化学量論組成結晶の MgO:s-$LiTaO_3$ である事がわかったので，この結晶を用いる事にした．次に実用となる光変調器の検討をおこなった．高速変調を行うために駆動電圧を低く抑えると光学結晶を挟む 2 つの電極間距離が短くなったので，薄板結晶を利用する事になった．ところが機械的強度不足が想定されたので，新たに保持結晶を用いて金属を介し薄板結晶と接合する構造を発案した．次に，具体的な電気光学ブラッグ回折型光変調器を設計し試作した．試作した変調器の変調特性を計測し，紫外光(波長 355nm)で実用上十分な回折効率 97.8%と消光比 87.6 を 8.9 V の低い印加電圧で得た．その結果，紫外光用空間光変調器の基本ユニット構成を確定できた．

第 4 章　紫外光用導波路型電気光学ブラッグ回折型空間光変調器

本章では，第 3 章の紫外光用空間光変調器の基本ユニットの構成を 1 次元空間光変調器に展開した設計・試作・評価について述べる．まず，低損失光伝搬と変調器の出射端で良好な光強度分布を得たいのでプロトン交換スラブ導波路を導入する事とした．ところが従来から作製されてきた導波路は薄いので光強度密度が高くなり光損傷が発生しやすい．また出射光が描画に適さない平板状の光強度分布になるという問題があった．そこで, 大モードサイズを有するスラブ導波路を MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶に作りこむ事とした．入射光が結晶の厚さ方向に単一モードとなるようプロトン交換とアニールそれぞれの作製条件の最適化を行い，低損失(0.7 dB/cm)で大モードサイズ(~ 20 μm)を有する導波路を得た．加えて長時間評価を行ってモードサイズの変化がない事を確認した．次に，MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶を用いた周期 7.5 μm の周期分極反転構造の設計を具体的に進めた．また透過光と 1 次回折光それぞれを利用する場合において，空間光変調が行えるようにするための周期分極反転構造と画素電極との位置合わせを検討した．空間光変調器による再回折結像光学系の出力面での出力パターンをシミュレーションにより予測した．試作では，結晶表面にフォトレジストをパターニングし金属材料を蒸着して作った波板電極を用いて電圧パルス印加法により良質な周期 7.5 μm の周期分極反転構造を得た．これを保持結晶を用いて金属を介し接合した．また画素電極を石英基板上に形成して，周期分極反転結晶と組み合わせ 10 画素 1 次元空間光変調器を作製した．最後にその空間光変調器の基本動作を確認した．10 V の低電圧駆動で良好な光強度分布(画素配列方向に少し長い楕円)と高い消光比(50 ～ 100)を得た．また光強度変調速度の実験では駆動周波数 3 MHz の時に十分な変調度が得られた．

第 5 章　赤外光用電気光学ラマン・ナス回折型光変調器

本章では, マルチエミッター高出力半導体レーザを光源として CTP(Computer To Plate) 印刷版の熱記録材料へ描画を行うための光変調器の設計・試作・評価について述べる. マルチエミッター高出力半導体レーザからの光は平行光ではないので，レンズを用いて平行光となるようにしても発散角（半角）0.35°程度のビームになってしまう．そこで回折効率に対する入射角の依存性が小さいラマン・ナス回折型光変調器を検討した．そして基本構造のラマン・ナス回折型光変調器の試作実験を行なった．しかし，良好な消光比が得られないことがわかったので，その解決のために新たに整数比の周期を持つ格子を複数段カスケードに接続したカスケード型調和周期格子を用いたラマン・ナス回折型光変調器の提案を行なった．そしてシミュレーションで性能を予測し，デバイスの試作検証により高消光比が実現できる事を実証した．その結果，電気光学ラマン・ナス回折型光変調器設計の基本的な構造を確定した.

第 6 章　赤外光用高性能電気光学ラマン・ナス回折型空間光変調器

本章では，第 5 章で確定した電気光学ラマン・ナス回折型光変調器の基本構造を具体的な製品仕様に展開した設計・試作・評価について述べる．はじめに，2 段構成タイプのカスケード型調和周期格子の設計を行ったが要求性能を満足できなかった．そこで，3 段構成タイプの設計を行った．シミュレーションによる性能予測をおこない要求性能を満足していることがわかったので試作へ進めた．レーザリソグラフィ装置に求められる高い生産性を達成するため，1024 画素に決めた．周期分極反転構造には優れた電気光学特性を有する $MgO:LiNbO_3$ 結晶を用いた．薄板結晶なので保持結晶を接合した構造とした．また，画素電極は各画素の電極に電圧を供給できるよう内部配線したセラミック多層基板の表面にフォトリソグラフィと金属蒸着により形成した．そして，この画素電極を周期分極反転構造を作製した結晶と組み合わせ空間光変調実験を行った．実用上十分な消光比約 20 が得られることがわかったので，この変調器を露光光学系に組み込み市販の CTP 印刷版作製装置の露光光学系と置き換えた．そして，CTP 印刷版へ露光評価を行ったところ画素数 1024，分解能 2400dpi で良好な露光結果が得られた．最後に製品化に向けた今後の課題について述べる.

第 7 章　結論

本研究で得られた成果を総括し，実用化に向けた考察をおこなう.

強誘電体周期分極反転構造を用いた高速レーザリソグラフィ装置用

空間光変調器に関する研究

目　　次

第 1 章　序論……1
1.1　研究の背景……1
1.2　本研究の目的と課題……3
1.3　本論文の構成……8
参考文献……9

第 2 章　基本理論……11
2.1　緒言……11
2.2　強誘電体周期分極反転構造における電気光学回折のモード結合理論による解析……11
2.2.1　結合係数と位相整合条件……11
2.2.2　ブラッグ回折型光変調器の理論予測……13
2.2.3　ラマン・ナス回折型光変調器の理論予測……16
2.3　強誘電体周期分極反転構造を用いた一次元空間光変調器の構成と動作説明……19
2.3.1　空間光変調器の動作……19
2.3.2　ブラッグ回折型空間光変調器の構成……19
2.3.3　ラマン・ナス回折型空間光変調器の構成……22
2.4　結言……24
参考文献……24

第 3 章　紫外光用電気光学ブラッグ回折型光変調器……25
3.1　緒言……25
3.2　紫外光利用における電気光学結晶の適性……26
3.2.1　透過波長領域……26
3.2.2　一致溶融組成結晶と化学量論組成結晶の比較検討……26
3.3　電気光学ブラッグ回折型光変調器の設計……28
3.4　薄板結晶周期分極反転構造の提案……29
3.5　MgO:s-$LiTaO_3$ 電気光学ブラッグ回折型光変調器の試作・評価……29
3.6　結言……32
参考文献……33

第 4 章　紫外光用導波路型電気光学ブラッグ回折型空間光変調器……35

4.1　緒言……35
4.2　アニールプロトン交換光導波路……36
4.2.1　基本的な光導波路の問題点……36
4.2.2　大きなモードサイズを有する光導波路の提案……36
4.2.3　試作と評価……37
4.3　電気光学ブラッグ回折型空間光変調器の設計とシミュレーション特性予測……41
4.4　波板電極を用いた周期分極反転構造の試作……43
4.5　電気光学ブラッグ回折型空間光変調器の試作……45
4.6　性能評価と空間光変調実証……46
4.7　結言……48
参考文献……49

第 5 章　赤外光用電気光学ラマン・ナス回折型光変調器……51
5.1　緒言……51
5.2　基本構造の電気光学ラマン・ナス回折型光変調器……51
5.2.1　基本構造光変調器の試作と動作検証……51
5.2.2　基本構造光変調器の問題点……54
5.3　カスケード型周期分極反転構造を用いたラマン・ナス回折型光変調器の提案…55
5.3.1　新構造の提案と消光比改善の原理……55
5.3.2　シミュレーションによる特性予測と設計……56
5.3.3　試作と性能評価……56
5.4　結言……58
参考文献……58

第 6 章　赤外光用高性能電気光学ラマン・ナス回折型空間光変調器……61
6.1　緒言……61
6.2　カスケード型周期分極反転構造の設計……62
6.2.1　2 段構成タイプの設計と問題点……62
6.2.2　3 段構成タイプの設計と性能予測……65
6.3　電気光学ラマン･ナス回折型 1024 画素空間光変調器の設計と試作……67
6.3.1　MgO:$LiNbO_3$ 薄板結晶周期分極反転構造部の試作……67
6.3.2　試作と性能評価……69
6.4　空間光変調器を用いた高速レーザリソグラフィ装置の光学系設計と露光評価…71
6.4.1　露光光学系設計と試作……71
6.4.2　空間光変調の実証……72
6.4.3　CTP(Computer To Plate)版露光評価……73
6.5　結言……73
参考文献……74

第 7 章　結論……75

謝辞……78

著者発表論文……79

付録

A1　レーザリソグラフィ装置におけるビーム走査画像形成方式（平面走査，回転ドラム）……83

A2　BPM(Beam Propagation Method)シミュレーションの手法……87

第 1 章　序論

1.1　研究の背景

基幹産業である半導体製造，フラットパネル製造，プリント基板製造と印刷製版において，高出力レーザを用いた精密画像の描画が重要な工程として行われている．従来から石英基板のフォトマスクを用いた転写により大量生産を行うフォトリソグラフィ工程が主流の工程として実施されてきた．フォトマスクは石英基板に金属クロムなどのパターンが形成されている．その製造は，石英基板の製造（インゴット製造，切断研磨など），クロムなどの金属の蒸着，レジストの塗布，電子線描画装置などでの描画，レジストの現像，クロムエッチング，検査修正など多くの工程で構成される．更に多くのエネルギーや薬液を使用するので環境負荷が高い．従来の大量生産から将来の多品種少量生産への移行が電子機器産業発展の大きな課題となっている．そこで，多品種少量生産に向けた製品製造期間の短縮とフォトマスク製造工程で排出される廃液の環境への負担軽減の対応などの理由から，フォトマスク製造工程を省きコンピュータ上で作られたパターンデータを基板上に直接描画するレーザ直接描画装置が展開されるようになった．図1.1にフォトマスクを用いるリソグラフィ工程と新たな直接描画工程を示す．

これまで直接描画装置には主に MEMS(微小電気機械素子)技術で作られた微小ミ

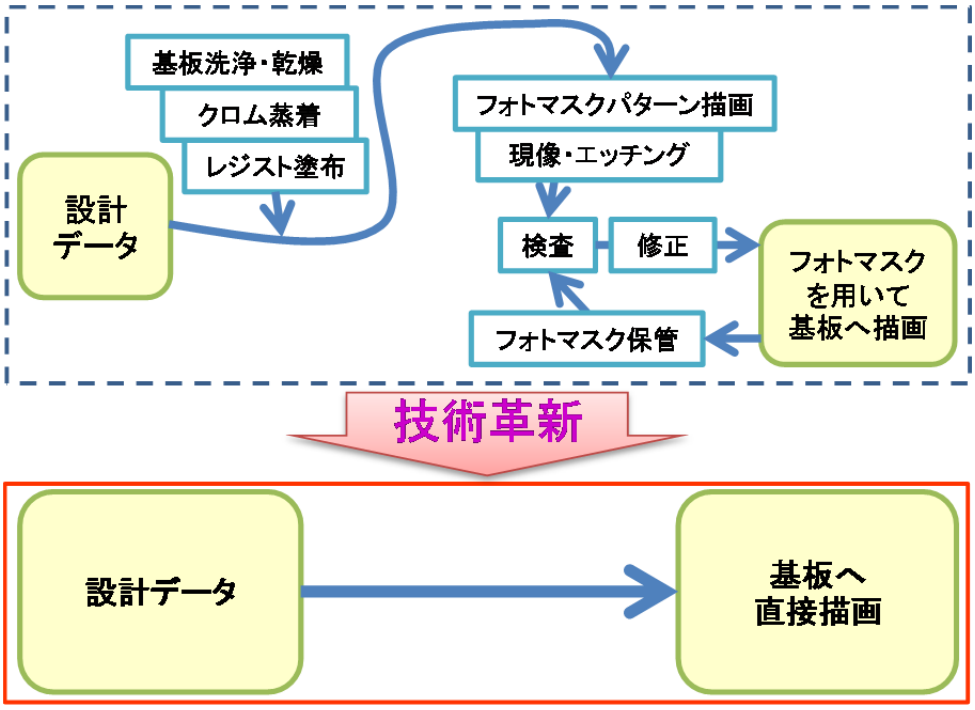


図1.1　フォトマスクを用いるリソグラフィ工程と直接描画工程

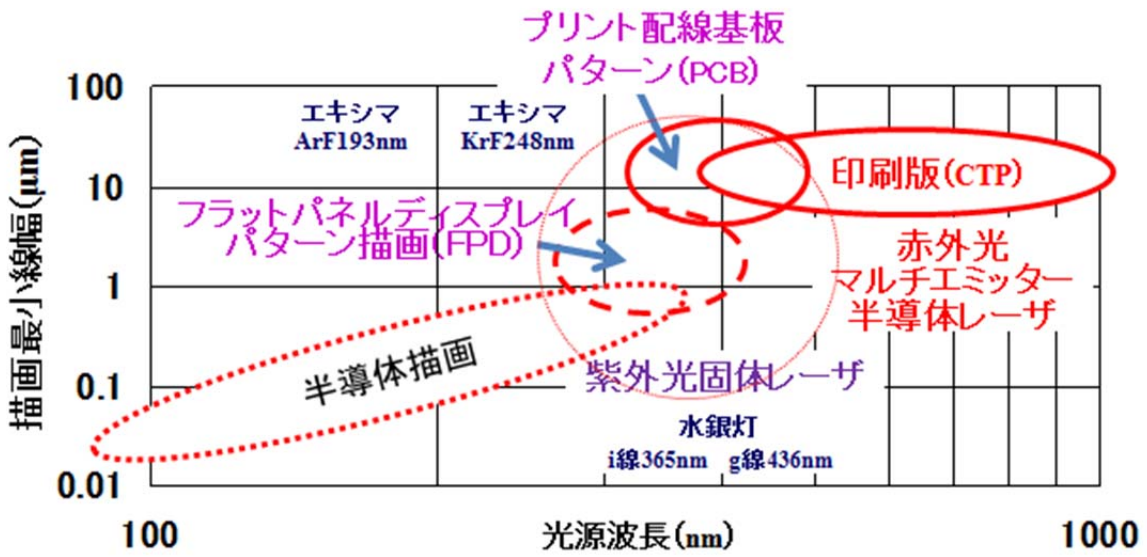


図1.2　画像データからレーザ直接描画を行うリソグラフィ装置の
光源波長と描画最小線幅の分類

ラーを機械的に振動させて光変調を行う空間光変調器が基幹部品として用いられている．しかし機械的な応答速度の限界から描画速度を高めることができず，これまで産業界で利用されているレーザ直接描画装置は解像度が低く配線幅の広いプリント配線板[1.1, 1.2]や印刷版[1.3, 1.4]向けなどの用途に限られている．高い解像度を必要とする半導体製造・フラットパネル製造用のレーザ直接描画装置は漸く製品[1.5]が投入され始めたところである．図 1.2 に画像データからレーザ直接描画を行うリソグラフィ装置の光源波長と描画最小線幅（配線等のパターンを描画する際に描画可能な最小の線幅を示す．半導体集積回路では概ねハーフピッチのことで微細化の指標を示す.）の分類を示す．半導体回路パターン描画は半導体回路の層（レイヤー）によって描画最小線幅が異なる．トランジスタ層では数 10 nm の高精細な描画線幅であるのに対して配線層では 1 μm 程度でよい．また，フラットパネルディスプレイパターン描画では数 μm 程度の描画最小線幅，プリント配線基板パターンでは 5 - 10 μm 程度である．約 1 μm から数 μm の描画最小線幅が要求される用途の半導体回路パターンの配線層，フラットパネルディスプレイとプリント配線基板のレーザ直接描画装置では紫外光固体レーザと i 線レジストによる描画が行われている．一方，通常の印刷版の描画最小線幅は約 10 μm 程度（印刷版では dpi(dot per inch)で表わされる．この場合約 2400 dpi となる.）である．印刷版は感熱記録材料なので，光源には小型で高出力が得られる赤外光マルチエミッター半導体レーザが用いられている．

表 1.1 にレーザリソグラフィ装置に従来から用いられている主な空間光変調器を示す．プリント配線基板パターン描画用には DMD(Digital Mirror Device) [1.6]や One-Dimensional Light Modulator [1.7, 1.8]，そして印刷版描画用には GLV(Grating Light

表1.1　レーザリソグラフィ用空間光変調器

空間光変調器 （Spatial Light Modulator）	方式	画素サイズ	画素数	変調速度	用途
GLV(G1088) (Silicon Light Machines)	MEMS リボン	25.5μm	1088	500kHz (Column Rate)	印刷版直接描画
GLV(G8192) (Silicon Light Machines)	MEMS リボン	5μm	8192	250kHz (Column Rate)	
DMD (Texas Instruments Incorporated)	MEMS ミラー	5.4×5.4μm	1920 × 1080		プリント基板直接描画
One-Dimensional Light Modulator (Fraunhofer Institute)	MEMS ミラー		8192	>1.3MHz (Pixel resonance frequency)	プリント基板直接描画
TIR (Eastman Kodak Company)	EO	(120μm)	(256)		印刷版直接描画

Valve) [1.9, 1.10]や TIR(Total Internal Reflection)素子 [1.11]が用いられている．これらの変調速度は高いもので 1 MHz 程度にとどまっている．

これらの現状を踏まえ，従来のフォトマスクを用いるリソグラフィ工程による大量生産から将来の多品種少量生産へ革新するためには高解像度な高速レーザリソグラフィ装置を実現しなければならない．そして高速レーザリソグラフィ装置の実現には従来の空間光変調器よりもはるかに高速な空間光変調器が必要である．

1.2　本研究の目的と課題

将来の高速レーザリソグラフィ装置実現のために必要な空間光変調器を，紫外光固体レーザを用いる空間光変調器と赤外光マルチエミッター半導体レーザを用いる空間光変調器の 2 つに分ける．前者は半導体回路パターンの配線層，フラットパネルディスプレイとプリント配線基板のレーザリソグラフィ装置用である．また，用途は半導体回路パターンの配線層に留まらず更に描画最小線幅の狭い半導体レイヤーの描画ができるようにする．i 線レジストへの描画を行うので光源には波長 λ = 355 nm の Nd:YAG レーザ 3 倍高調波紫外光固体レーザを用いる．後者は印刷版のレーザリソグラフィ装置用である．感熱記録材料の印刷版への描画を行うので小型で高出力が得やすい赤外光（波長 λ = 808 nm）マルチエミッター半導体レーザを光源に用いる．

レーザリソグラフィ装置の描画速度を決める主要な要素は光変調器の画素数と変調速度であるが，レーザリソグラフィ装置の生産性（一定時間あたりに描画完了できるシリコンウエハやプリント配線版そして印刷版の枚数）は光変調器の性能だけではなくその制御方法や光走査方式などの装置の要素に加え，レジストや印刷版の感度及びガンマ特性等の非常に多くの要素によって決まる．そこで，具体的な目標仕様を決

めることにした．紫外光固体レーザを用いる空間光変調器の目標に従来装置よりはるかに高い生産性（描画最小線幅 1 μm でφ300 mm ウエハ全面を 1 分以内に描画できる生産性）の実現を可能とする仕様を設定した．目標の生産性から画素数 1200 と変調速度を 3 - 10 MHz とした．消光比｛(信号 on 時の光量）/（信号 off 時の光量)｝は既存の変調器を用いた予備実験とレジストのガンマ特性から 50 とした．一方印刷版のレーザリソグラフィ装置用の赤外光マルチエミッター半導体レーザを用いる空間光変調器の目標は，現存の製品と同等の生産性（解像度 2400 dpi で 939 mm×636 mm サイズの印刷版全面を 1 分以内に描画できる生産性）を実現できる仕様とした．現時点では将来の半導体レーザの進展を見据え光源の出力光パワーの増大に対応できる光変調器の構成を採用する方針とした．上記の目標の生産性から画素数 1024 と変調速度 200 kHz とした．消光比は既存の変調器を用いた予備実験と感熱記録材料の印刷版のガンマ特性から 20 とした．消光比の目標値が紫外光固体レーザを用いる空間光変調器の目標値よりも低い値になっているのは，印刷版のガンマ値は i 線レジストの値より高いので，その非線形性を利用して熱反応が起きる閾値の光量と熱反応を起さない光量の比を小さくできるからである．

＜紫外光固体レーザを用いる空間光変調器＞

H. Gnewuch らが周期分極反転構造を用いたブラッグ回折型の光変調器を発表している[1.12]. これは $LiNbO_3$ 結晶を用いて赤色(λ = 633 nm)レーザ光の高速光強度変調器を実現している．分極反転構造の周期は 40 μm，最大の回折効率を得る為に必要な印加電圧は約 23 V であった．また，この変調器は個別に変調が可能な複数画素を有する空間光変調器ではなく，光通信を主な用途とする光強度変調器であった．

そこで，この研究を出発点として紫外光固体レーザを用いる空間光変調器の研究を始める事にした．その基本構造を図 1.3 に示す．また図 1.4 に紫外光固体レーザを用いる空間光変調器と描画光学系の概要図を示す．

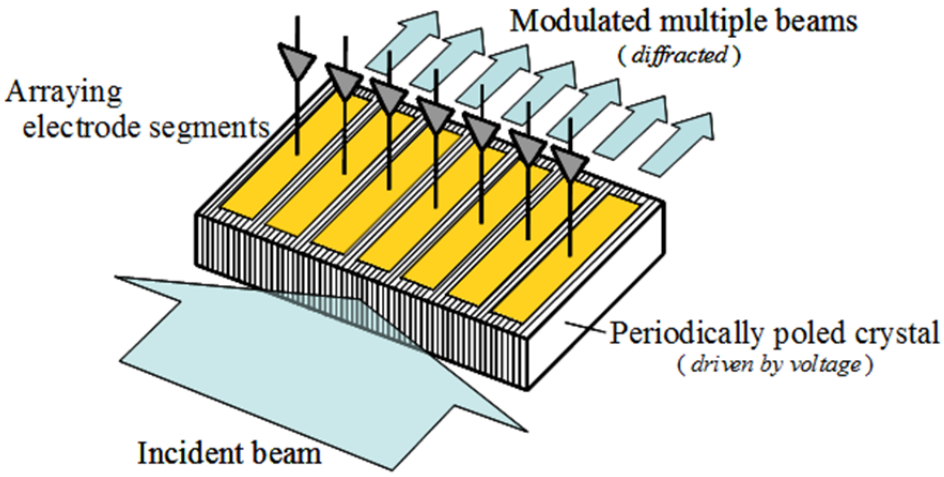


図1.3　周期分極反転構造を用いた 1 次元空間光変調器の基本構造

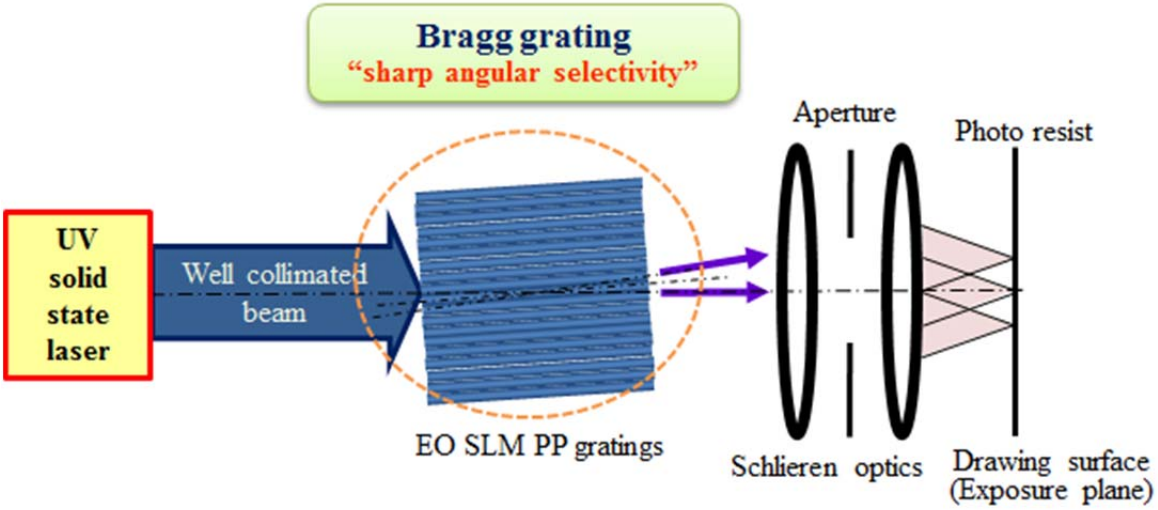


図1.4　紫外光固体レーザを用いる空間光変調器と描画光学系

図 1.3 において，周期分極反転構造を形成した電気光学結晶の上面に複数の画素電極を装荷する．裏面は全面に一様な電極を装荷する．周期分極反転構造の格子に対してほぼ平行な向きに進む平板状の光を結晶に入射させて，裏面の電極と画素に相当する画素電極の間に画像データに応じた電圧を与える．電圧を印加した画素電極と裏面の電極との間の結晶には周期分極反転構造によって屈折率分布の回折格子が形成される．平板状の入射光のうち，この領域を通る入射光は回折格子によって回折される．また，画素電極からの電圧を印加しない領域には回折格子は形成されないので，透過光として変調器から出力される．次に図 1.4 において，変調器の出力光は再回折結像光学系のフーリエ変換面に置いたアパーチャによって回折光（もしくは透過光）が遮断され透過光（もしくは回折光）が通過して描画面上に空間変調された複数画素の光強度分布が得られる．この空間光変調器の基本構造は電気光学効果による高速変調と微細な周期分極反転構造による小さな画素サイズの実現を期待できる．研究を進めるにあたっての課題を

①光損傷耐性の高い結晶の選定
②印加電圧の低電圧化
③空間光変調の実証

の 3 項目に設定した．其々の課題について説明する．

①光損傷耐性の高い結晶の選定

強誘電体光学結晶は高強度の光により光損傷が発生する[1.13, 1.14]，特に紫外光では顕著である．強誘電体光学結晶を用いた変調器の光損傷の問題が報告されている[1.13]．しかし近年，結晶に MgO などの添加物を加えた $MgO:LiNbO_3$, $MgO:LiTaO_3$（㈱山寿セラミックス）[1.15]や化学量論組成の s-$LiNbO_3$，s-$LiTaO_3$（㈱オキサイド，物質材料研究所）[1.16, 1.17]の紫外光に対する光損傷耐性が高い結晶[1.18, 1.19]

が市販されるようになってきた. しかしレーザリソグラフィ装置に用いる予定の高強度紫外光固体レーザ（波長 λ = 355 nm）に対して良好な光損傷耐性を示すのか, 他に優れた結晶があるのか不明であった. そこで, 最も光損傷耐性の高い結晶を選ぶ必要があった.

②印加電圧の低電圧化

駆動回路は画素個別に 3-10 MHz の変調速度で電圧を印加させる. ゆえに駆動回路は画素個別に必要となるので画素数と同じ数の 1200 個の駆動回路が必要となる. 通常多くの電子回路で用いられている一般的なトランジスタを用いることができれば大規模な回路になることを避けられる. そのためには凡そ 15 V 以下の電圧で駆動させる必要がある. また, 駆動電圧が低いと電圧の立ち上がりにかかる時間も少なくなるので変調器を高速駆動しやすい. 消費電力は電圧の 2 乗に比例するので駆動電圧を 1/2 にすれば消費電力は 1/4 となって駆動回路からの発熱も減り実用的な規模の駆動回路が実現できる. また, 紫外光固体レーザは平行光を出射するので回折効率に対する角度選択性の高いブラッグ回折型光変調器を採用することができる. ブラッグ回折の特徴の厚い回折格子を利用すると印加電圧を下げられる可能性がある. 以上より目標の駆動電圧を 10 V 以下に設定した.

③空間光変調の実証

研究の出発点となる H. Gnewuch らの光強度変調器を一次元に単純に並べると隣り合う画素の間に隙間が空いてしまう. 隣り合う画素の間に隙間が生じずに複数画素が個別に空間光変調できる工夫が必要である.

＜赤外光マルチエミッター半導体レーザを用いる空間光変調器＞

一方, 赤外光マルチエミッター半導体レーザを用いる空間光変調器は紫外光固体レーザを用いる空間光変調器を出発点として研究を進める事にした. 図 1.5 に赤外光マルチエミッター半導体レーザを用いる空間光変調器と描画光学系の概要図を示す. 研究課題は紫外光固体レーザを用いる空間光変調器で設定した課題に次の 2 項目を追加した.

①角度選択性の低減

②空間光変調の実証

其々の課題について説明する.

①角度選択性の低減

感熱記録材料の印刷版への描画には高出力の赤外光マルチエミッター半導体レーザが用いられる. このレーザの標準的な仕様は 500 μm 間隔で波長 808 nm のレーザ光が出射される 19 個のエミッターが一列に配列されている. 各エミッターの光出力は 2-3 W 程度であるので, 全エミッターからの光出力は 40-60 W もの高出力になる. 光源は 19 個のエミッターが配列されている約 10 mm 幅の大きさになる. 点光源の場合と異なり光源が 10 mm 幅の大きさを持つので光学系を用いてコリメートしても光変調器への入射光を平行光にできない. そこで, 回折効率に対する角度

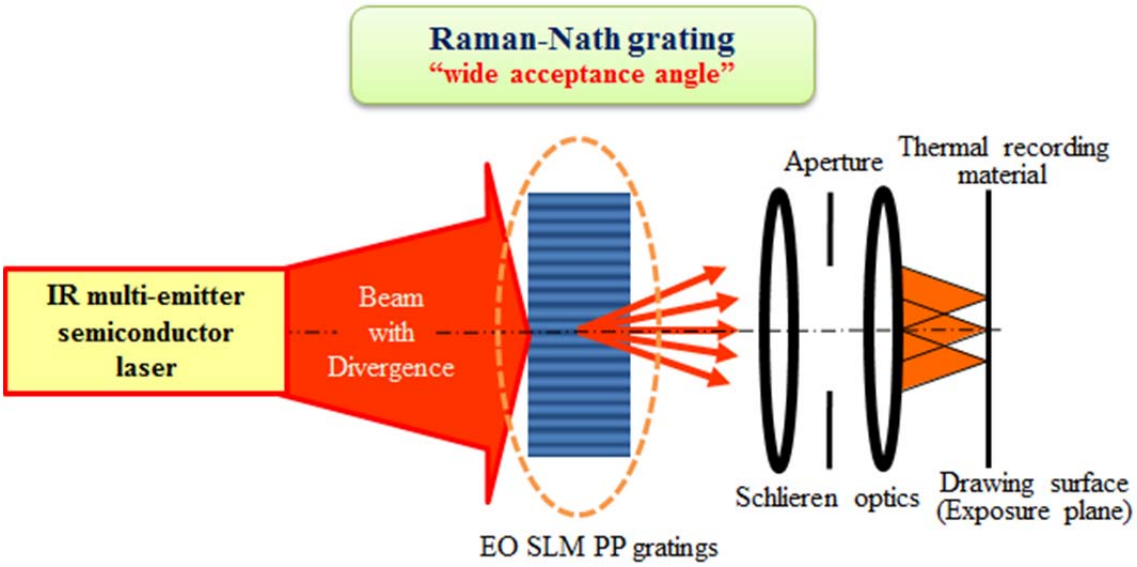


図1.5　赤外光マルチエミッター半導体レーザを用いる空間光変調器と描画光学系

選択性の低いラマン・ナス回折型光変調器を採用しなければならない．ラマン・ナス回折型光変調器は薄い回折格子を用いることになるので最大回折効率を得るための印加電界はブラッグ回折型光変調器と比べて高くなる．低い角度選択性を維持したまま結晶の抗電界を超えない印加電界で駆動させる工夫が必要である．

②空間光変調の実証

H. Gnewuch らの光強度変調器を一次元に単純に並べると隣り合う画素の間に隙間が空いてしまう．ラマン・ナス回折型で隣り合う画素の間に隙間が生じずに複数画素が個別に空間光変調できる工夫が必要である．

紫外光固体レーザを用いる空間光変調器と赤外光マルチエミッター半導体レーザ

表1.2　目標の高速レーザリソグラフィ用空間光変調器

空間光変調器	波長	回折型	画素数	変調速度	消光比
紫外光固体レーザを用いる空間光変調器（半導体，フラットパネル，プリント基板用）	355nm	ブラッグ回折型	1200	3-10MHz 駆動電圧 10V以下	50以上
赤外光マルチエミッター半導体レーザを用いる空間光変調器（印刷版用）	808nm	ラマン・ナス回折型	1024	200kHz	20以上

を用いる空間光変調器の目標を表 1.2 にまとめる．

1.3　本論文の構成

図 1.6 に本論文の構成を示す．第 2 章では第 1 章で述べた周期分極反転構造を用いた一次元空間光変調器の基本構造の具体化に必要な基本原理，変調特性，設計条件を整理する．第 3 章ではまず電気光学結晶の光損傷について調べ光損傷耐性の高い結晶の評価と選択について述べる．次に紫外光用電気光学ブラッグ回折型空間光変調器の原型となる光強度変調器の試作と性能検証について説明する．第 4 章ではまず大きなモードサイズを有する平板導波路の作製をおこない結果を考察する．次に第 3 章で述べたブラッグ回折型光強度変調器を一次元に 10 画素を配列した空間光変調器の設計と試作そして空間光変調動作を示す．第 5 章では基本構造の電気光学ラマン・ナス回折型光強度変調器の問題点を明らかにする．次にその解決のために提案したカスケード型調和格子（整数比の周期を持つ格子を複数段カスケードに接続）を用いたラマン・ナス回折型光変調器の原理及び試作評価結果を述べる．第 6 章では第 5 章のカスケード型調和格子を用いた空間光変調器を 1024 画素の実用仕様に展開した空間光変調器の設計，試作について述べて，空間光変調器を印刷版直接描画装置に搭載し印刷版へ描画したパターンを表示する．第 7 章では本研究の総括と今後の課題について述べる．

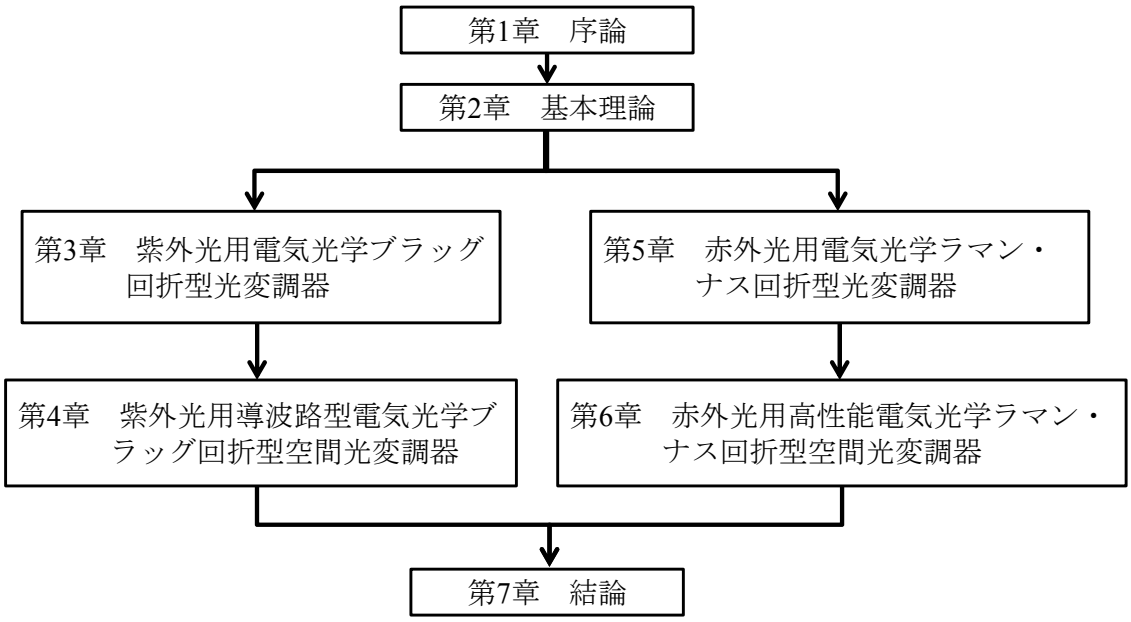


図1.6　本論文の構成

参考文献

[1.1] http://www.screen.co.jp/eng/pcb/products/ledia/index.html.

[1.2] http://www.orbotech.com/solutions/jpn/2057/.

[1.3] http://www.screen.co.jp/ga_dtp/product/#CTP.

[1.4] E. Tamaki, Y. Hashimoto, O. S. Leung, "Computer-to-plate printing using the grating light valve device," *Proc. SPIE* 5348, *MOEMS Display and Imaging Systems II*, vol. 89, 2004.

[1.5] http://www.screen.co.jp/spe/products/dw-3000/index.html.

[1.6] http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dlp4710.pdf.

[1.7] http://www.ipms.fraunhofer.de/content/dam/ipms/common/products/SLM/cbm-e.pdf.

[1.8] J.-U. Schmidt *et al.*, "High-speed one-dimensional spatial light modulator for laser direct imaging and other patterning applications," *Proc. SPIE*, vol. 8977, p. 89770O, Mar. 2014.

[1.9] http://www.siliconlight.com/en/technology/glv.html.

[1.10] http://www.siliconlight.com/en/products/module.html.

[1.11] R. V. Johnson, D. L. Hecht, R. A. Sprague, L. N. Flores, D. L. Steinmetz, and W. D. Turner, "Characteristics of the linear array total internal reflection (TIR) electrooptic spatial light modulator for optical information processing," *Opt. Eng.*, vol. 22, no. 6, pp. 665-674, Dec. 1983.

[1.12] H. Gnewuch, C. N. Pannell, G. W. Ross, P. G. R. Smith, and H. Geiger, "Nanosecond response of Bragg deflectors in periodically poled $LiNbO_3$," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 12, pp. 1730-1732, Dec.1998.

[1.13] M. Yamada, "Electrically induced Bragg-diffraction grating composed of periodically inverted domains in lithium niobate crystals and its application devices," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, no. 11, pp. 4010-4016, 2000.

[1.14] T. Suhara and M. Fujimura, *Waveguide Nonlinear-Optic Devices*, Berlin, Springer, 2003, pp. 141-158.

[1.15] http://www.yamajuceramics.co.jp/seihin/ycc_j.pdf.

[1.16] F. Juvalta, M. Jazbinsek, P. Günter, and K. Kitamura, " Electro-optical properties of near-stoichiometric and congruent lithium tantalate at ultraviolet wavelengths," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 23, no. 2, pp. 276-281, 2006.

[1.17] Y. Furukawa, M. Nakamura, S. Takekawa, K. Kitamura, T. Hatanaka, K. Nakamura, H. Ito, A. Alexandrovski, and M. M. Fejer, "Nearly stoichiometric $LiTaO_3$ for bulk quasi-phase matched devices," *in Advanced Solid-State Lasers*, C. Marshall, Ed. Washington, DC: Optical Society of America, 2001, vol. 15, OSA Trends Optics and Photonics, paper PD5.

[1.18] http://www.opt-oxide.com/wp-content/uploads/2013/03/SLT.pdf.

[1.19] http://www.opt-oxide.com/wp-content/uploads/2013/03/SLN.pdf.

第 2 章　基本理論

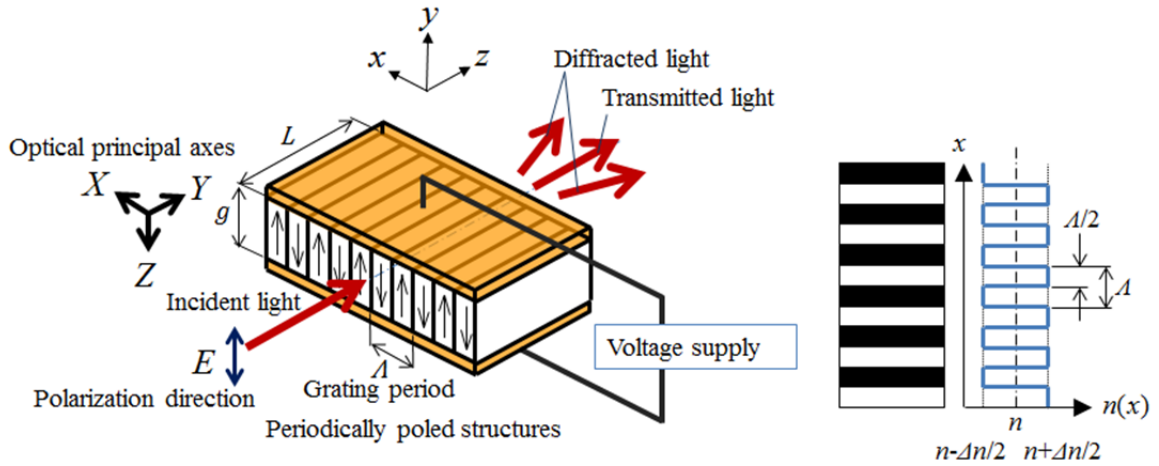
2.1　　緒言

本章では，第 3 章以降の前準備として，第 1 章で述べた周期分極反転構造を用いた一次元空間光変調器の基本構造の具体化に必要な基本原理，変調特性，設計方針を整理する．まず一次元空間光変調器の基本単位となる電気光学強度変調器の基本原理についてまとめる．モード結合理論[2.1 - 2.7]を用いてブラッグ回折及びラマン・ナス回折となるための解析を述べる．次にブラッグ回折型とラマン・ナス回折型光変調器のそれぞれの基本構成を述べて，回折効率などの変調特性の理論予測から光変調器の具体的な設計に必要な特性を整理し説明する．紫外光固体レーザ及び赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザの特性をブラッグ回折及びラマン・ナス回折の変調特性と対比させ，それぞれの光源に適する変調器の構成を示す．最後にブラッグ回折型とラマン・ナス回折型空間光変調器の構成を述べて，空間光変調動作を空間光変調器からの出力光の空間周波数スペクトルを用いて説明する．そして空間光変調器を設計する際の方針を述べる．

2.2 強誘電体周期分極反転構造における電気光学回折のモード結合理論による解析

2.2.1　結合係数と位相整合条件

図 2.1(a)に強誘電体周期分極反転構造を用いた電気光学回折型変調器の構造を示す．ここで，座標軸x, y, zとは別に結晶の光学軸を表すX, Y, Zをとる．周期Λの周期分極反転構造を挟む 2 つの電極（結晶のZ軸に垂直）に電圧Vをかけ電気光学結晶に一様な電



(a)　　(b)

図2.1　強誘電体周期分極反転構造を用いた(a)電気光学回折型変調器の構造と(b)周期分極反転構造の屈折率分布

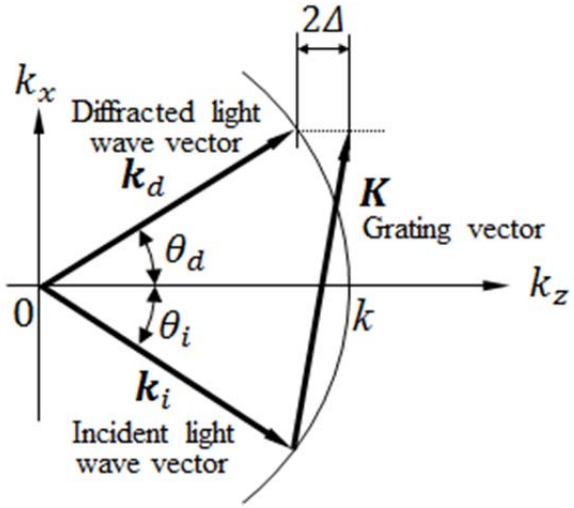


図2.2　光波回折の波動ベクトルダイヤグラム

界を印加すると，電気光学効果によって結晶の異常屈折率nが僅かに変化する．結晶は周期的に分極が反転しているので，図 2.1(b)に示すように，結晶内に周期Λ（分極反転幅:$\Lambda/2$），異常屈折率の振幅Δnの矩形的屈折率分布の回折格子ができる[2.1, 2.2]．異常屈折率の振幅Δnは

$$\Delta n = -r_{33} n^3 (V/g) \tag{2.1}$$

と表される[2.1, 2.2]．ここでr_{33}はポッケルス定数，gは電極間の距離である．また，回折格子の周期的な屈折率分布を表すq次のフーリエ振幅Δn_qは

$$\Delta n_q = \frac{\Delta\varepsilon_q}{2n} = |\Delta n| \frac{\sin(q\pi/2)}{q\pi} \tag{2.2}$$

と求められる．ここで，$n \gg |\Delta n|$とした．$\Delta\varepsilon_q$は周期的な比誘電率分布を表すq次のフーリエ振幅である．

結晶のZ軸に電界が平行に偏光した光を入射させると，入射光は回折格子との間で光波結合が生じる．そこで，モード結合理論[2.1, 2.2]を用いて変調特性を調べた．

入射面をxz面として屈折率nの一様な媒質中に周期Λの矩形的屈折率分布の回折格子$(0 < \mathrm{z} < L)$がおかれているものとする．また，格子ベクトル$\boldsymbol{K}$のy方向の大きさを$K_y = 0$としxy面において十分な広がりを持つものとする．

波長λの平面波が$+z$方向に対してθ_iの角度で回折格子に入射するものとする．入射光の電界$\boldsymbol{E_i}$及びq次の回折光の電界$\boldsymbol{E}_{dq}$をそれぞれ

$$\boldsymbol{E_i}(x,y,z) = C_i \boldsymbol{e}_y \exp[-j(k\sin\theta_i)x]\exp[-j(k\cos\theta_i)z]$$
$$C_i = (2/n\cos\theta_i)^{1/2}(\mu_0/\varepsilon_0)^{1/4} \tag{2.3a}$$

$$\boldsymbol{E}_{dq}(x,y,z) = C_{dq}\, \boldsymbol{e}_y \exp\left[-j\left(k\sin\theta_{dq}\right)x\right]\exp\left[-j\left(k\cos\theta_{dq}\right)z\right]$$
$$C_{dq} = \left(2/n\cos\theta_{dq}\right)^{1/2}(\mu_0/\varepsilon_0)^{1/4} \tag{2.3b}$$

と表す. ここで, z軸に対する入射角をθ_i , q次の回折角をθ_{dq}, 光の波数を$k = 2\pi n/\lambda$, y方向の偏光を表す単位ベクトルを$\boldsymbol{e}_y$とおいた．また，係数C_i及びC_{dq}はそれぞれのz方向のパワーフロー密度の大きさ$(n\cos\theta_i/2)(\varepsilon_0/\mu_0)^{1/2}{C_i}^2$，$\left(n\cos\theta_{dq}/2\right)(\varepsilon_0/\mu_0)^{1/2}{C_{dq}}^2$がそれぞれ 1 となるように決めた.

q次結合係数は，格子ベクトル$\boldsymbol{K}$のx方向の大きさを$K_x(= 2\pi/\Lambda)$とおくと

$$\kappa_q = \left(2\pi/\lambda\sqrt{\cos\theta_{dq}\cos\theta_i}\right)\Delta n_q \times \int \exp\left[-j\left(k\sin\theta_i + qK_x - k\sin\theta_{dq}\right)x\right]dx \qquad (2.4)$$

で与えられる.また積分はxの単位長さでの積分である[2.1]. 式(2.4)からx方向の位相整合条件は

$$k\sin\theta_i + qK_x = k\sin\theta_{dq} \qquad (q = \pm1, \pm2, \pm3, \cdots) \qquad (2.5)$$

で与えられる．x方向の位相整合条件が満たされており，θ_i ，θ_{dq}が十分に小さく$\cos\theta_i \cong 1$, $\cos\theta_{dq} \cong 1$とおけるときの基本次$(q = \pm1)$の結合係数$\kappa_{\pm1}$は, 式(2.1),(2.2),(2.4)を用いて

$$\kappa_{\pm1} = \frac{2r_{33}n^3}{\lambda}\frac{V}{g} \qquad (2.6)$$

と求められる.

図 2.2 に基本次$(q = 1)$の光波回折の波動ベクトルダイヤグラムを示す. 図では添え字qを省略した．z方向位相不整合量$2\Delta_q$を

$$2\Delta_q = k\cos\theta_{dq} - (k\cos\theta_i + qK_z) \qquad (2.7)$$

と表す．ここでK_zは格子ベクトル$\boldsymbol{K}$のz方向の大きさを表す.

回折格子にブラッグ角$\theta_B\{= \sin^{-1}(K_x/2k)\}$で平面波が入射し，基本次回折におけるブラッグ条件$(2\Delta_1 = 0)$を満たすときの 2 次回折の$z$方向位相不整合量 $2\Delta_2$ は

$$\begin{aligned} 2\Delta_2 &= k\cos\theta_{d2} - k\cos\theta_{iB} \\ &= k\left\{\sqrt{1-(3K_x/2k)^2} - \sqrt{1-(K_x/2k)^2}\right\} \cong -{K_x}^2/k \end{aligned} \qquad (2.8)$$

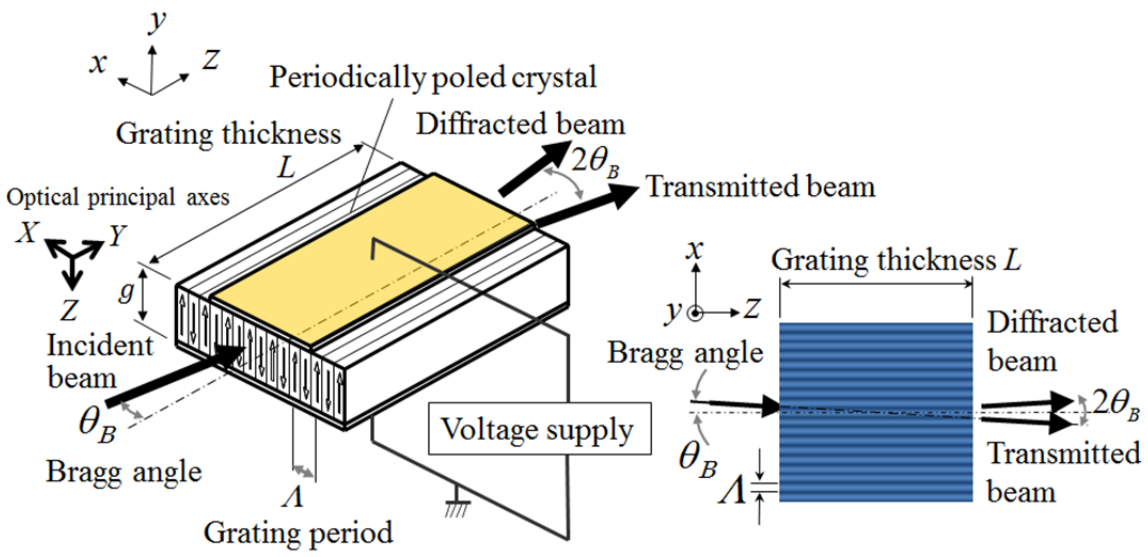
である．$|2\Delta_2|$とLの積でパラメーターQを次のように定義する.

$$Q = \frac{{K_x}^2 L}{k} = \frac{2\pi\lambda L}{n\Lambda^2} \qquad (2.9)$$

Qは回折格子の周期Λに対する厚さLを相対的に表したパラメーターで Klein-Cook パラメーター[2.8]とも呼ばれる．$Q < 1$の場合は複数の次数qの回折波が同時に生じるラマン・ナス回折となる．$Q > 10$の場合は高次回折に対する位相不整合量が大きいので，ブラッグ条件を満たす基本次回折のみが生じるブラッグ回折となる.

2.2.2　ブラッグ回折型光変調器の理論予測

ブラッグ回折型光変調器の構成を図 2.3 に示す．図 2.1 と同様に周期Λの周期分極反転構造を挟む 2 つの電極に電圧Vをかけると, 結晶内に周期Λ, 異常屈折率の振幅Δn



(a) (b)

図2.3　ブラッグ回折型光変調器の構成(a)斜視図(b)上面図

の矩形的屈折率分布の回折格子ができる[2.1, 2.2]. 結晶のZ軸に平行に偏光した入射光をブラッグ角で結晶に入射させると基本次のブラッグ回折光が生じる．モード結合方程式[2.1, 2.2]の解を用いてブラッグ回折($Q > 10$)の特性を調べる．

図 2.4 にブラッグ回折の波動ベクトルダイヤグラムを示す．回折格子及び入射光の条件は前節 2.2.1 で述べたとおりとする．

モード結合方程式は

$$\frac{d}{dz}a(z) = -j\kappa_q b(z)\exp\left(-j2\Delta_q z\right) \tag{2.10a}$$

$$\frac{d}{dz}b(z) = -j\kappa_q a(z)\exp(+j2\Delta_q z) \tag{2.10b}$$

と表せる．$a(z)$は入射光の振幅，$b(z)$はq次回折光の振幅である．$2\Delta_q$はq次回折に対するz方向の位相不整合量で$K_z = 0$とした式(2.7)で表す．

次に基本次($q = 1$)の回折のみ考えることにし，Δ_1をΔと書く．x方向の位相整合条件が満たされており，θ_i，θ_dが十分に小さく$\cos\theta_i \cong 1$，$\cos\theta_d \cong 1$とおけるときの基本次の結合係数κは，式(2.6)で示される．

初期条件を$a(0) = 1$，$b(0) = 0$とした式(2.10)の解は

$$a(z) = \left(\cos\sqrt{\kappa^2 + \Delta^2}z + \frac{j\Delta}{\sqrt{\kappa^2+\Delta^2}}\sin\sqrt{\kappa^2 + \Delta^2}z\right)\exp(-j\Delta z) \tag{2.11a}$$

$$b(z) = \frac{-j\kappa}{\sqrt{\kappa^2+\Delta^2}}\sin\sqrt{\kappa^2 + \Delta^2}z\exp(+j\Delta z) \tag{2.11b}$$

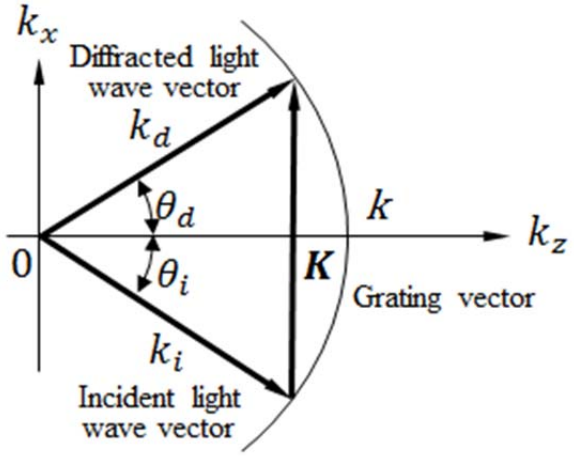


図2.4　ブラッグ回折の波動ベクトルダイヤグラム

である[2.1, 2.2]．回折効率ηは

$$\eta = \frac{|b(L)|^2}{|a(0)|^2} = \frac{\sin^2\left(\sqrt{\kappa^2+\Delta^2}L\right)}{1+(\Delta/\kappa)^2} \tag{2.12}$$

と求められる．特にブラッグ条件($2\Delta = 0$)が満たされるときは,

$$\eta = \sin^2\kappa L = \sin^2\left(\frac{2Lr_{33}n^3}{\lambda}\frac{V}{g}\right) \tag{2.13}$$

と求められる．図 2.5 にブラッグ回折の回折効率の回折格子厚さ依存性を示す．$\kappa L = \pi/2$の時に回折効率が最大の 100 %となる．回折効率を 100 %とする為に必要な電圧$V_{\eta_{max}}$は

$$V_{\eta_{max}} = \frac{\pi\lambda g}{4Lr_{33}n^3} \tag{2.14}$$

で求められる．
基本次ブラッグ条件が満たされているときの結晶中のブラッグ角θ_Bは

$$\theta_\mathrm{B} = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2n\Lambda}\right) \tag{2.15}$$

で与えられる．光が空気中から回折格子へ入射する場合のブラッグ角θ_B'は，スネルの法則を用いて

$$\theta_\mathrm{B}' = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2\Lambda}\right) \tag{2.16}$$

と求められる．
　このようにブラッグ回折の特徴は回折効率が 100 %となることである．この特徴を利用すると高い消光比｛(電圧非印加時の透過光の光量）/（電圧印加時の透過光の光量)｝の光変調ができる．透過光又は回折光は光変調器の出力光として利用できる．

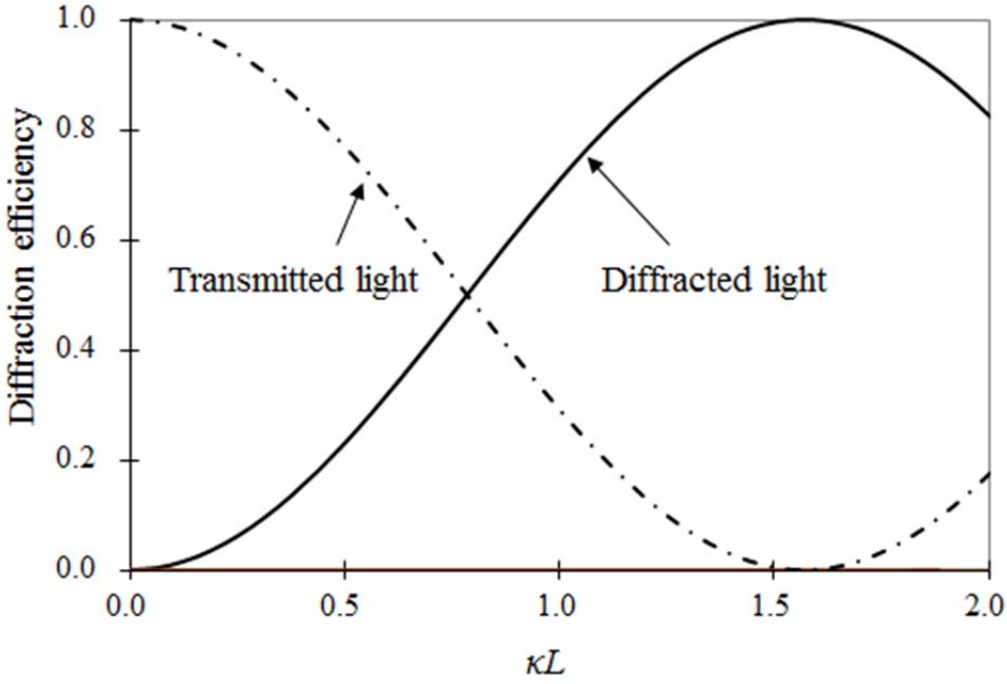


図2.5　ブラッグ回折の回折効率の回折格子厚さ依存性

また高い角度選択性があり分極反転周期Λを小さくし結晶厚さLを大きくすると角度選択性が高まる．入射角θ_iがブラッグ角θ_Bからずれて，回折効率が 50 %となる角度受容幅$2\Delta\theta_i$(半値全幅)は次式で表される[2.1, 2.2].

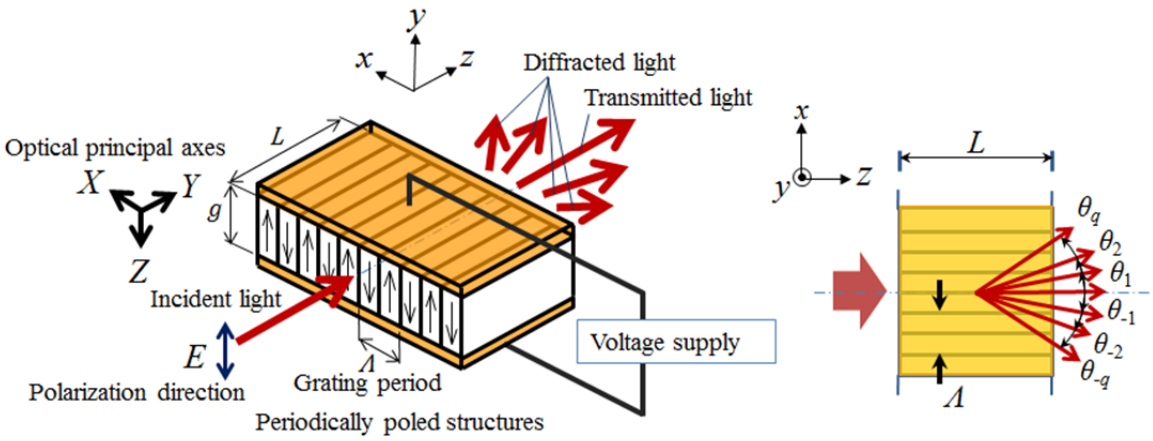
$$2\Delta\theta_i \cong \frac{5}{K_x L} \cong \frac{\Lambda}{L} \tag{2.17}$$

ブラッグ条件を満たすにはブラッグ角で光を入射させる必要があるので, 入射光は平行光としなければならない．平行光を出射する紫外光固体レーザはブラッグ回折型光変調器の光源に用いることができる．

2.2.3　ラマン・ナス回折型光変調器の理論予測

ラマン・ナス回折型光変調器の構成を図 2.6 に示す．図 2.1 と同様に周期Λの周期分極反転構造を挟む 2 つの電極に電圧Vをかけると，結晶内に周期Λ，異常屈折率の振幅Δnの矩形的屈折率分布の回折格子ができる[2.1, 2.2]．結晶のZ軸に平行に偏光した入射光を回折格子に対しほぼ垂直（小さな入射角θ_i）に結晶へ入射させる．モード結合方程式[2.1, 2.2]の解を用いてラマン・ナス回折($Q < 1$)の特性を調べる．

図 2.7 にラマン・ナス回折の波動ベクトルダイヤグラムを示す．回折格子及び入射光の条件は前節 2.2.1 で述べたとおりとする．x方向の位相整合条件が満たされ，θ_i，



(a) (b)

図2.6　ラマン・ナス回折型光変調器(a)斜視図(b)上面図

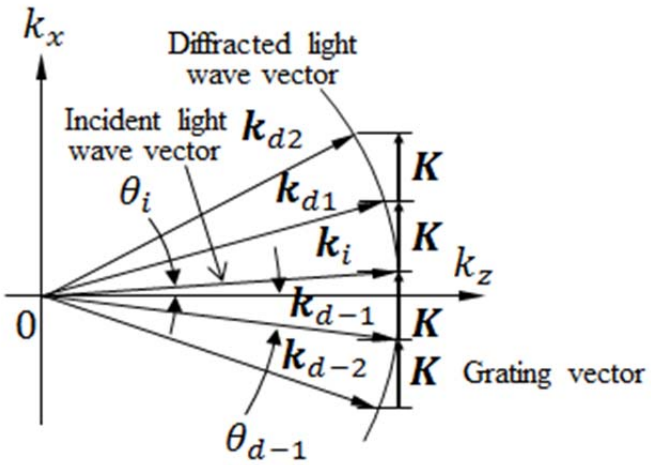


図2.7　ラマン・ナス回折の波動ベクトルダイヤグラム

θ_{dq}が十分に小さく$\cos\theta_i \cong 1$，$\cos\theta_{dq} \cong 1$とおけるとき，厳密には結合係数κ_qはqに依存するがκ_qを基本次$(q = \pm 1)$の結合係数$\kappa_{\pm 1}$で近似する．このとき $\kappa(\kappa_{+1} = \kappa_{-1})$は式(2.6)で示される．

モード結合方程式は

$$\frac{d}{dz}C_q(z) = -j\kappa\left[C_{q-1}(z) + C_{q+1}(z)\right] \qquad (q = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \cdots) \tag{2.18}$$

と表せる．初期条件を$C_0(0) = 1, C_q(0) = 0\ (q \neq 0)$とした式(2.18)の解は

$$C_q(z) = \exp(j3q\pi/2)J_q(2\kappa z) \tag{2.19}$$

である[2.1, 2.2]．J_qは第 1 種ベッセル関数である．

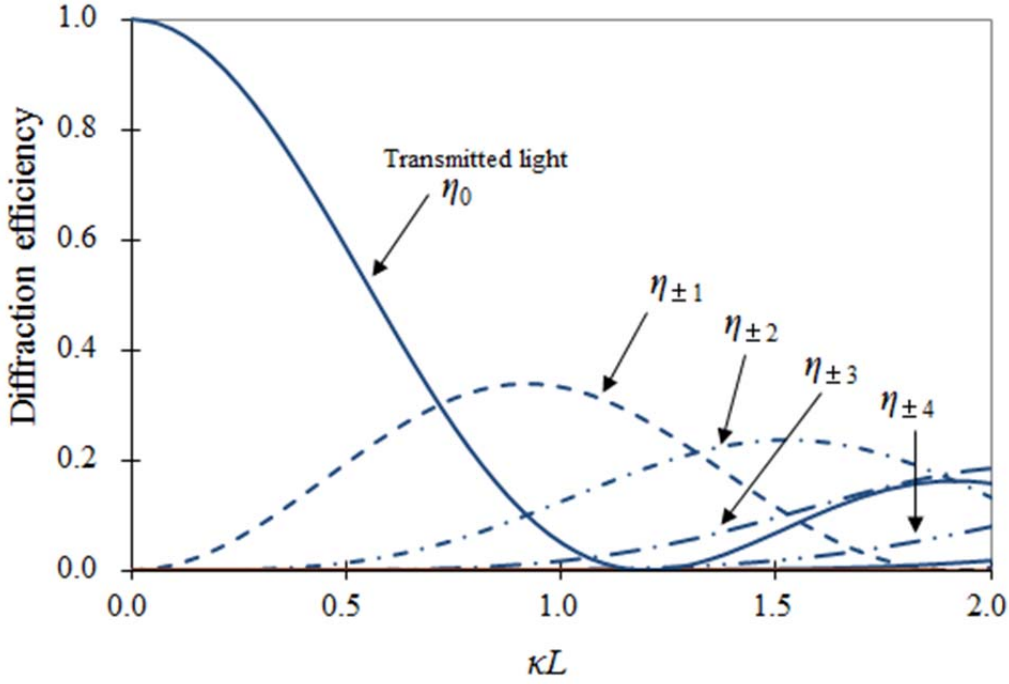


図2.8　ラマン・ナス回折の回折効率の回折格子厚さ依存性

回折効率は

$$\eta_q = \frac{|C_q(L)|^2}{|C_q(0)|^2} = {J_q}^2(2\kappa L) \tag{2.20}$$

と求められる．複数の次数の回折光が同時に現れる．

図 2.8 にラマン･ナス回折の回折効率の回折格子厚さ依存性を示す. 基本次($q = \pm 1$)回折光の回折効率は$\kappa L = 0.92$の時に最大値 33.9 %をとる．一方で透過光はκL~1.2の時に最小値をとる．また，入射角$\theta_i = 0$の時の結晶中の回折角θ_qは

$$\theta_q = \sin^{-1}(\frac{q\lambda}{n\Lambda}) \tag{2.21}$$

で与えられる．光が空気中から回折格子へ入射する場合の回折角$\theta_q{}'$ は，スネルの法則を用いて

$$\theta_q{}' = \sin^{-1}(\frac{q\lambda}{\Lambda}) \tag{2.22}$$

と求められる．

ラマン・ナス回折は，入射角を回折角程度変化させても回折効率はほとんど変化しない．この事から赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザのように大きいサイズの光源から出射される光をコリメートしたあとの広がり角のあるビームを変調器の入射光として用いる場合は，光変調器はラマン・ナス回折型にすると良いと考えられ

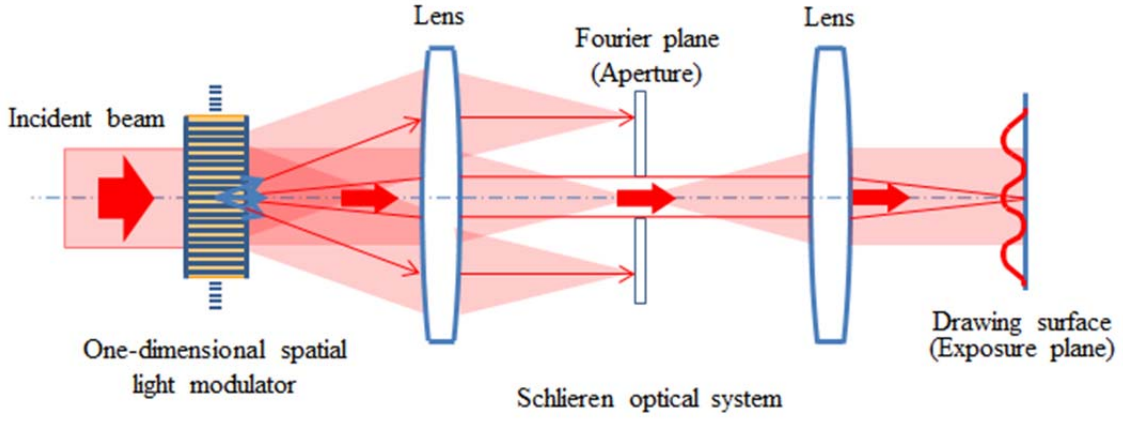


図2.9　空間光変調器の動作概念図

る．回折光の最大回折効率は 33.9 %にしかならないので，回折光を光変調器の出力光として利用すると光利用効率が低い．しかし，透過光を光変調器の出力光として利用すると，高い光利用効率が得られる．また，κL~1.2の条件が満たされると 0 次光透過率はほぼ 0 になる．この特性を利用し透過光を出力光として使えば高い消光比の光変調が可能となる．

2.3　強誘電体周期分極反転構造を用いた一次元空間光変調器の構成と動作説明

2.3.1　空間光変調器の動作

ここでは，まず 2.2 節で述べたブラッグ回折型光変調器もしくはラマン・ナス回折型光変調器を一次元方向に多数配列した一次元空間光変調器の構成について述べる．第 1 章図 1.3 に示す一次元に配列された画素電極はそれぞれ個別の電圧源に接続されている．個別の電圧がそれぞれの画素電極に与えられる．図 2.9 に空間光変調器の動作概念図を示す．画素配列方向に扁平な平板状の光を結晶に入射させると，画素個別に光が変調される．変調器からの出力光は再回折結像光学系のフーリエ変換面に置かれた空間周波数フィルター（アパーチャまたはスリット）により透過光もしくは回折光の一方が遮断され，他方が透過して描画面で一次元光強度パターンを生成する．次にブラッグ回折型とラマン・ナス回折型空間光変調器の空間光変調動作を説明する．また空間光変調器の設計を進める方針を説明する．

2.3.2　ブラッグ回折型空間光変調器の構成

図 2.10 に周期分極反転構造に画素電極を装荷したブラッグ回折型空間光変調器の構造を示す．空間光変調動作を空間光変調器からの出力光の空間周波数スペクトルを用いて説明する．ブラッグ回折は回折効率に対する入射光の角度選択性が高いので，

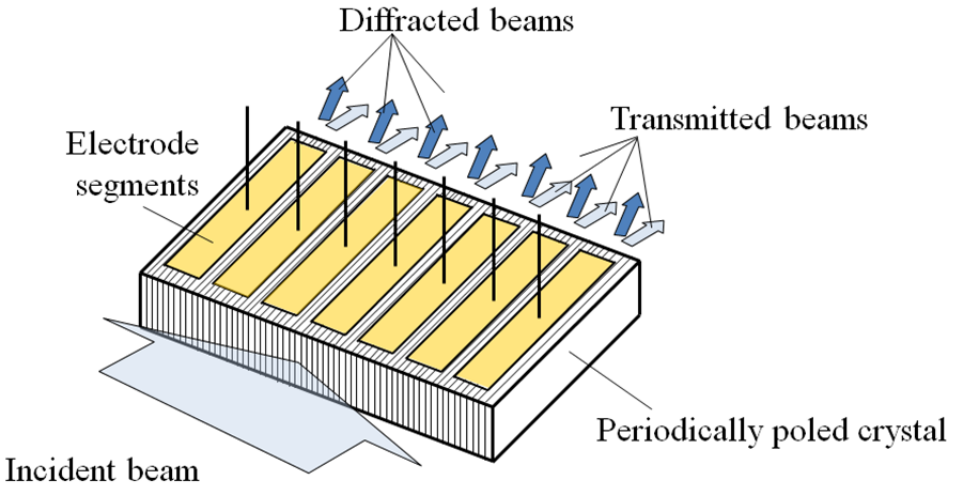


図2.10　ブラッグ回折型空間光変調器の構造

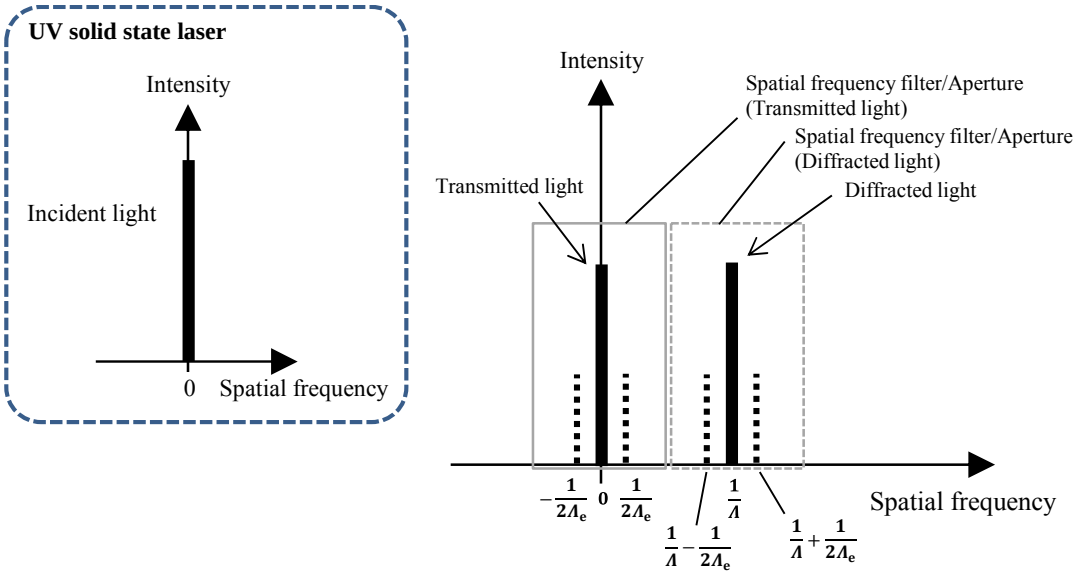


図2.11　ブラッグ回折型空間光変調器の出力光の空間周波数スペクトル

平行性の良い光を入射光に用いる．この時，入射光の空間周波数スペクトルは広がりが少なくピークの立ったスペクトルとなる．また，再回折結像光学系の光軸に平行な向きで光を空間光変調器に入射させるとき，周期分極反転構造（周期 Λ）による回折光の空間周波数は $1/\Lambda$ である．ここで画素電極のピッチを Λ_e とおく．1 画素毎に on/off を繰り返すパターンの空間周波数は変調可能なパターンの中で最も高い空間周波数 $1/2\Lambda_e$ となる．図 2.11 にブラッグ回折型空間光変調器の出力光の空間周波数スペクトルを示す．任意の一次元パターンが空間光変調された場合を考える．任意パターンによる空間周波数は，透過光及び回折光の空間周波数ピークを中心にして，$-1/2\Lambda_e \sim 1/2\Lambda_e$

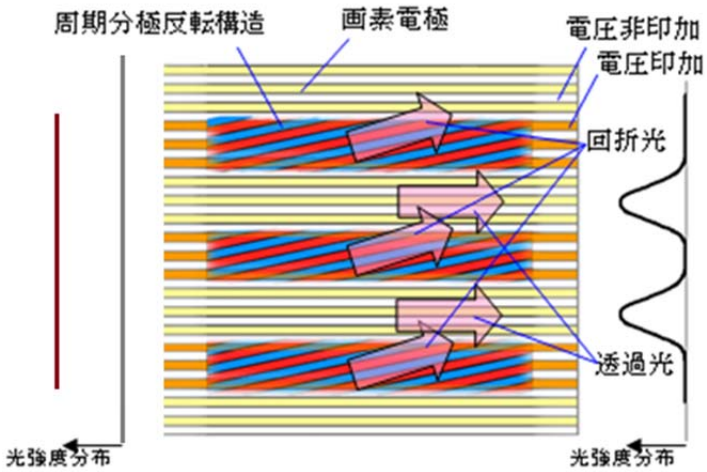
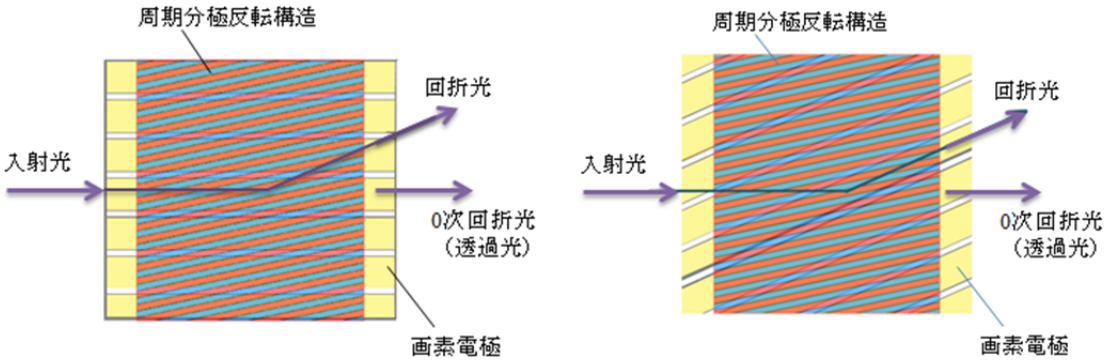


図2.12　透過光を利用する場合のon/off繰返しパターンの動作



(a)透過光を利用する場合　(b)回折光を利用する場合

図2.13　入射光の伝搬方向に対する周期分極反転構造と画素電極の方位，回折光の伝搬方向の関係

の広がりを持つ．従って，空間周波数$-1/2\Lambda_e \sim 1/2\Lambda_e$と$(1/\Lambda)-(1/2\Lambda_e) \sim (1/\Lambda)+(1/2\Lambda_e)$の 2 つの領域に空間周波数成分が現れる．再回折結像光学系のフーリエ変換面に空間周波数フィルターを入れて一方の領域を遮断し他方を透過させる事で光強度変調ができる．加えて複数電極により空間光変調が実現できる．透過光と回折光を確実に分離する事によって高い消光比が得られ，描画面で高コントラストな一次元光強度パターンが得られる．

次に入射光の伝搬方向に対する周期分極反転構造と画素電極の方位そして回折光の伝搬方向の関係を述べる．図 2.12 に空間光変調器の透過光を利用する場合の on/off 繰返しパターンの動作を示す．周期分極反転構造の回折格子は入射光の伝搬方向に対してブラッグ角 θ_B となる方位に設定される．画素電極に電圧が印加されると画素電

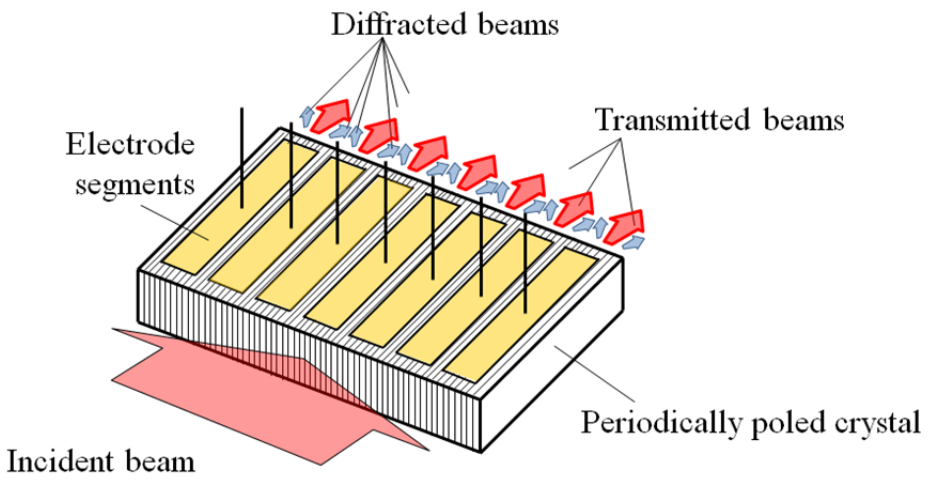


図2.14　ラマン・ナス回折型空間光変調器の構造

極とその対向する電極との間の結晶内に周期分極反転構造による回折格子が形成される．この回折格子を通る入射光の一部はブラッグ回折される．一方，電圧が印加されないと結晶内に回折格子ができないので入射光は透過光となって光変調器から出力される．このようにして on/off 繰返しパターンを形成する．図 2.13 に入射光の伝搬方向に対する周期分極反転構造と画素電極の方位そして回折光の伝搬方向を示す．(a)の透過光を利用する場合と(b)の回折光を利用する場合の違いを述べる．入射光に対する周期分極反転構造の方位は(a)(b)ともに同じである．出力光として利用する透過光又は回折光が結晶内を通る過程で隣の画素の画素電極が作る結晶の回折格子に入らないようにするために，画素電極の方位は出力光の伝搬方向と一致させる．従って，入射光の伝搬方向に対する画素電極の方位は，(a)は平行とし(b)は $2\theta_B$ の角度を持たせる．

2.3.3　ラマン・ナス回折型空間光変調器の構成

図 2.14 に周期分極反転構造に画素電極を装荷したラマン・ナス回折型空間光変調器の構造を示す．2.2.3 節で述べたようにラマン・ナス回折型空間光変調器では透過光のみが利用できる．空間光変調動作を空間光変調器からの出力光の空間周波数スペクトルを用いて説明する．ラマン・ナス回折は回折効率に対する入射光の角度選択性が低いので，赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザのように大きいサイズの光源から出射される光をコリメートしたあとの広がり角のあるビームを変調器の入射光として用いる事が可能となる．ビーム広がり角を持つ入射光の空間周波数スペクトルは光源の配光分布を反映して台形状のやや広がった分布を持つ．また再回折結像光学系の光軸に平行な向きで光を空間光変調器に入射させるとき，周期分極反転構造（周期 Λ）の回折光の空間周波数は $\pm q/\Lambda (q=1, 2, 3, \cdots)$ である．

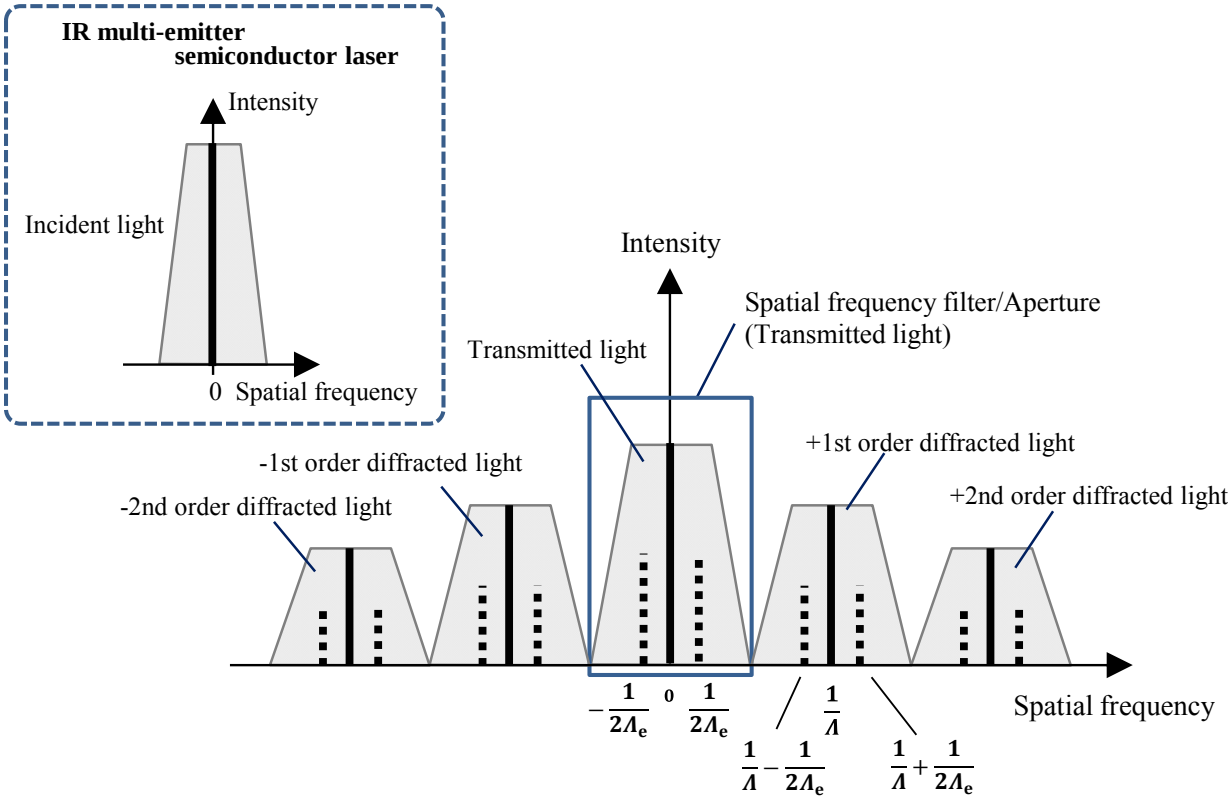


図2.15　ラマン・ナス回折型空間光変調器の出射光の空間周波数スペクトル

図 2.15 にラマン・ナス回折型空間光変調器の出力光の空間周波数スペクトルを示す．透過光及び回折光の空間周波数は，それぞれ 0，$\pm q/\Lambda$(q=1, 2, 3,…)の位置に入射光の空間周波数分布を伴って現れる．ブラッグ回折の場合と同様に，任意パターンによる空間周波数スペクトルは，透過光及び回折光の空間周波数を中心にして，$-1/2\Lambda_e \sim 1/2\Lambda_e$ の広がりを持つ．さらに入射光の空間周波数分布が加わる．従って，空間光変調器の動作時には空間周波数$-1/2\Lambda_e \sim 1/2\Lambda_e$，$\pm(q/\Lambda)-(1/2\Lambda_e) \sim \pm(q/\Lambda)+(1/2\Lambda_e)$,($q$=1, 2, 3, …)の領域に入射光の空間周波数分布を加えた空間周波数スペクトルが現れる．空間周波数フィルターにより回折光を遮断し透過光だけを通過させる事で光強度変調ができる．加えて複数電極により空間光変調が実現できる．描画面で高コントラストな一次元光強度パターンとするには，ブラッグ回折の場合と同様に透過光と回折光を分離し確実に回折光を遮断できるよう設計しなければならない．しかし，入射光の空間周波数分布があるので，ブラッグ回折型空間光変調器の設計よりラマン・ナス回折型空間光変調器の設計は考慮すべき設計条件が多い．しかし，設計条件をバランスよく変調器のパラメーターに振り当てることで変調器への入射光がビーム広がり角を持つ赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザを使用する場合にも高解像度で高い消光比の空間光変調器が実現できる．具体的な設計と評価については第6章で述べる．

2.4　結言

本章では，第 3 章以降の前準備として，第 1 章で述べた周期分極反転構造を用いた一次元空間光変調器の基本構造の具体化に必要な基本原理，変調特性，設計条件を整理した．まず一次元空間光変調器の基本単位となる電気光学変調器の基本原理について述べた．モード結合理論を用いてブラッグ回折及びラマン・ナス回折となるための条件を述べた．次にブラッグ回折型とラマン・ナス回折型光変調器のそれぞれの基本構成を述べて，回折効率などの変調特性の理論予測から光変調器の具体的な設計に必要な特性を整理した．また回折効率に対する角度選択性の特性から，光変調器への入射光を平行光にできる紫外光固体レーザを光源に用いる場合は，透過光，回折光とも原理的に 100 %の回折効率が得られるブラッグ回折型光変調器が利用できる事を示した．一方，出射光がビーム広がり角を持つ赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザを利用する場合は，ラマン・ナス回折型光変調器が適する事を示した．この場合に透過光を光変調器の出力光として利用すれば，適切な電圧印加により透過光強度をほぼ 0 にできるので，高い消光比の光変調器が実現できることを示した．最後にブラッグ回折型とラマン・ナス回折型空間光変調器の空間光変調動作を空間光変調器からの出力光の空間周波数スペクトルを用いて説明した．ブラッグ回折型空間光変調器において，透過光又は回折光を利用する場合では最適な画素電極の方位が異なることを示した．また赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザを光源に用いたラマン・ナス回折型空間光変調器の設計において，入射光のビーム広がり角が設計上の大きな制約になっているが，その対策の方針を示し高解像度で高い消光比の空間光変調器が実現できる可能性を述べた．具体的な設計とその評価については第 6 章で述べる．

参考文献

[2.1] 栖原敏明，光波光学，東京，コロナ社，1998.

[2.2] 西原浩，春名正光，栖原敏明，光集積回路(改訂増補版)，東京，オーム社，1993.

[2.3] 岡本勝就，光導波路の基礎，東京，コロナ社，1992.

[2.4] A. Yariv，多田 邦雄，神谷 武志，光エレクトロニクスの基礎，東京，丸善，1974.

[2.5] P. Yeh, *Optical Waves in Layered Media*, New York, Wiley, 1988.

[2.6] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1983.

[2.7] G. Lifante, *Integrated Photonics: Fundamentals*, Chichester, Wiley, 2003.

[2.8] W. R. Klein and B. D. Cook, “Unified approach to ultrasonic light diffraction,” *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics*, vol. SU-14, no. 3, pp. 123–134, Jul. 1967.

第 3 章　紫外光用電気光学ブラッグ回折型光変調器

3.1　緒言

本章では，レジストが塗布されたガラス基板やシリコンウエハなどへ高速に描画を行うレーザリソグラフィ装置用の空間光変調器を実現する前段階として，原型となる高強度紫外レーザ光を光源に用いる電気光学ブラッグ回折型光強度変調器の設計・試作・評価について述べる．

強誘電体非線形光学（電気光学）結晶の周期分極反転構造は主に高効率な波長変換デバイスとして実用化されてきた．少ない実例ではあるが周期分極反転構造を用いたレーザ光用のブラッグ回折型電気光学強度変調器に関する研究もなされてきた[3.1 - 3.4].

レーザリソグラフィ装置に用いる感光材料は主に i 線レジストなので，紫外光の高強度光パワーでの高速光変調が基本的な要求事項となる．そこで高強度光パワーを出力する紫外（UV）レーザとして Nd:YAG（Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet）レーザ 3 倍高調波紫外光固体レーザ(波長 λ ＝ 355 nm)が光源に用いられる．電気光学結晶に紫外レーザ光を利用する際は光損傷対策が最大の課題である．今まで報告された変調器は光損傷の課題に悩まされてきた[3.3]．一致溶融組成（コングルエント）の $MgO:LiNbO_3$ 結晶や近年市販されるようになった化学量論組成（ストイキオメトリ）の $MgO:s\text{-}LiTaO_3$ 結晶は可視及び UV 光に対して高い光損傷耐性[3.5]を持っているといわれている．しかしレーザリソグラフィ装置への応用を可能とする高強度光パワーに対して良好な光損傷耐性を示すのか，他に優れた結晶があるのか不明であった．そこで，市販されている電気光学結晶から紫外波長域の光透過率が高い結晶を選択し，レーザ光強度に対する光損傷の程度を実験で確認して優劣を明らかにして，最も光損傷耐性の高い結晶を選び出すことにした．実用に際しもう一つの重要な要求事項は光変調動作を駆動する電圧の低電圧化である．以前の研究は 20 V 以上の電圧を要求した[3.2]．選び出した結晶を用いた変調器の設計見積りを行い，薄板結晶を利用し電極間の距離（結晶の厚さ）を短くして電圧を下げる事にした．ところが薄板結晶の強度不足が想定されたので，保持結晶を用いて金属を介し薄板結晶と接合する新たな構造を発案した．同時に今回の試作に留まらず実用的な生産につながる作製工程を考案する必要があった．次に，具体的な電気光学ブラッグ回折型光変調器を設計し，性能実証を目的とする試作を行なった．試作には薄板結晶の利用を可能とする上記の新たな構造の作製工程が実現できるのかを検証する必要があった．最後に Nd:YAG レーザ 3 倍高調波紫外光固体レーザ（波長 $\lambda = 355$ nm）を用いて試作した変調器の変調特性を測定し，レーザリソグラフィ装置用の光変調器として十分な回折効率と消光比が得られているかを確認した．

表3.1　電気光学結晶の紫外光吸収端波長

	一致溶融組成			化学量論組成	
結晶	$LiNbO_3$	$LiTaO_3$	$MgO:LiNbO_3$	$s\text{-}LiNbO_3$	$MgO:s\text{-}LiTaO_3$
吸収端波長	310nm	270nm	300nm	305nm	270nm

3.2　紫外光利用における電気光学結晶の適性

3.2.1　透過波長領域

表 3.1 に入手が容易な一致溶融組成結晶の $LiNbO_3$，$LiTaO_3$，5 mol % MgO 添加 $MgO:LiNbO_3$，化学量論組成結晶の $s\text{-}LiNbO_3$，1 mol % MgO 添加 $MgO:s\text{-}LiTaO_3$ の紫外光吸収端波長を示す．これらは結晶製造会社の製品カタログ及び公開されているデータ[3.6 - 3.8]から引用したものである．これら 5 種類の結晶の吸収端波長は光源波長 λ = 355 nm よりも短波長であることがわかる．また最も短波長の吸収端波長（λ = 270 nm）をもつ結晶は $LiTaO_3$ と $MgO:s\text{-}LiTaO_3$ であることが分った．

3.2.2　一致溶融組成結晶と化学量論組成結晶の比較検討

強誘電体電気光学結晶に強い光を当てると光吸収によって結晶内部に電界が発生し，この電界で電気光学効果が生じて屈折率が変化する現象，即ちフォトリフラクティブ効果（あるいは光損傷）が発生する[3.9 - 3.13]．特に偏光方向を結晶の Z 軸と一致させ結晶にレーザ照射を行うと，結晶内では結晶の不純物準位から電子が伝導帯へ励起される．光パワー密度が高いほど又波長が短い紫外光ほど多く励起される．電子は結晶軸の＋Z 方向にドリフトする．ドリフト途中で励起電子はトラップ準位に落ち込む．すると結晶中に正と負に帯電した部分が生じることになって結晶内で電界の不均一が発生する．この電界は電気光学効果による不均一な屈折率変化を生じさせる．結晶の外部から駆動電圧をかけて電気光学効果を利用して屈折率変化の回折格子を生じさせるとき，結晶内部の屈折率変化を安定に制御できない．このように光損傷は電気光学変調器の動作の妨げになるので，光損傷の発生しないまたは発生が少ない結晶材料を選ばなければならない．近年，光損傷の発生が少ない結晶材料として 5 mol % MgO 添加 $MgO:LiNbO_3$ 結晶，白金るつぼなど特殊な製造装置を用いて作製した化学量論組成となる $s\text{-}LiTaO_3$ 結晶が開発されてきた．しかし，レーザリソグラフィ装置で用いる高強度光パワーに対してこれらの結晶が良好な光損傷耐性を示すのか不明であったので，本研究で対象としている紫外レーザ光（λ = 355 nm）の光強度に対する光損傷の程度を実験で確認して比較して，最も光損傷耐性の高い結晶を選び出すことにした．

レーザに Nd:YAG レーザ 3 倍高調波紫外光固体レーザ(λ = 355 nm，疑似 CW 100 MHz)を用いた．レーザ光は石英レンズにより結晶の中央で焦点を結ばせた．結晶透

過後のビーム形状を CCD カメラで測定した．光損傷が発生しない場合は結晶内の屈折率変化（実際はレーザ光照射による結晶の温度上昇により屈折率が変化する）がないので円形ビームとして測定されるが，光損傷が発生すると結晶の Z 軸方向のビーム断面形状の長さが変化する．測定されたビーム形状から楕円比を計算して光損傷の評価尺度とした．評価に用いた結晶は前節で選択した結晶のうち一致溶融組成結晶の $LiNbO_3$ を除き一致溶融組成結晶の $MgO:LiNbO_3$，一致溶融組成結晶の $LiTaO_3$，化学量論組成結晶の $MgO:s\text{-}LiTaO_3$，化学量論組成結晶の $MgO:s\text{-}LiNbO_3$ の 4 種類とした．すべての結晶のレーザ光の伝搬方向（結晶 Y 軸）の長さを 5 mm にそろえ評価を行った．測定結果を図 3.2 に示す．光パワー密度に対する楕円比が 1 付近の変化の最も少ない結晶は $MgO:s\text{-}LiTaO_3$ である．光パワー密度が 10 kW/cm^2 近くまで楕円比は 1 に近い値を示すことが分った．そこで，$MgO:s\text{-}LiTaO_3$ を紫外光固体レーザを用いる空間光変調器の結晶材料に用いる事とした．

光パワー密度が 1 kW/cm^2 までの領域においては $MgO:s\text{-}LiTaO_3$ と $MgO:LiNbO_3$，の違いはほとんど見られない．しかし 1 kW/cm^2 以上の光パワー密度では $MgO:s\text{-}LiTaO_3$ は楕円比が少しだけ増減するのに対して，$MgO:LiNbO_3$ は増加し続ける．また，$LiTaO_3$

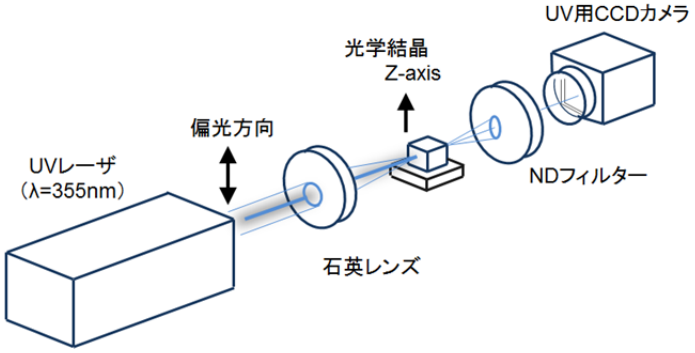


図3.1　光損傷計測セットアップ

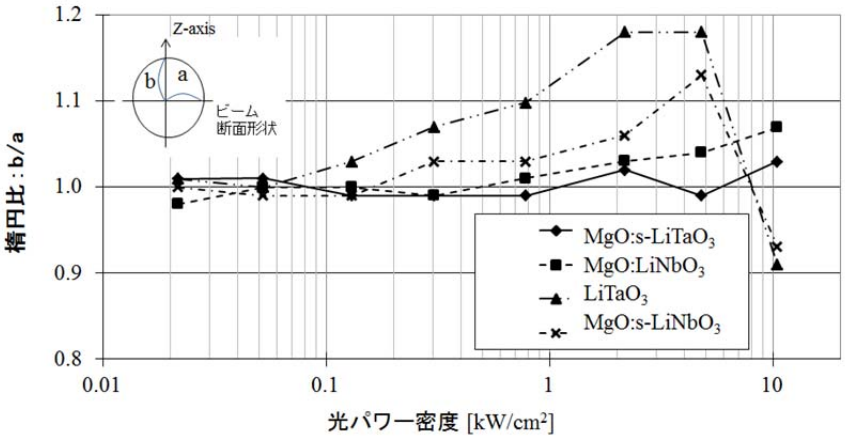


図3.2　楕円比の光パワー密度依存性

と MgO:s-$LiNbO_3$ においては光パワー密度が上昇すると楕円比も増加し続けるが，10 kW/cm^2 の光パワー密度で急激に減少し約 0.9 となった. 楕円比に影響を与える要因は光損傷以外にも存在する．結晶内に熱が留まり温度が上昇して結晶内の屈折率が変化するとレーザ光が曲げられる（熱レンズ効果）ので楕円比が変化する．また，一般に結晶を加熱すると光損傷は減少する[3.14]. $LiTaO_3$ と MgO:s-$LiNbO_3$ の楕円率の急激な変化の理由は結晶の温度上昇による熱レンズ効果と温度上昇による光損傷減少が考えられる.

3.3 電気光学ブラッグ回折型光変調器の設計

高解像度（小さな画素サイズ）を得る為には，電極幅すなわち隣り合う画素電極間の距離と周期分極反転構造の周期 Λ を短くしなければならない．Λ に対する製作の困難さなどを考慮し Λ = 7.5 μm とした．また，高速変調を実現するための低電圧駆動 10 V 以下の要求に対して，設計駆動電圧は 6 V にした．デバイス製作上の加工誤差を考慮して要求よりやや低い駆動電圧とした. 回折効率 100 %となる条件の式(2.14)を用いて，電極間距離（結晶厚さ）$g \fallingdotseq 50$ μm を得た．Λ = 7.5 μm，MgO:s-$LiNbO_3$ 結晶の異常屈折率 n_e = 2.34(λ = 355 nm)，V = 6 V とした．ここで周期分極反転構造による回折格子の厚さ L を 5 mm とおいた．実用化に際しても結晶厚さ 50 μm の薄板結晶を用いる必要がある. 式(2.13)を用いた印加電圧に対する回折効率の理論予測を図 3.3 に実線で示す．ここで r_{33} = 36.0 pm/V[3.15]を用いた．式(2.9)を用いると Q = 85 となる．角度選択性について考察する．式(2.17)より結晶中における角度受容幅$2\Delta\theta_i$は0.09°と求められる．光が空気中から変調器へ入射する場合の角度受容幅$2\Delta\theta_i{}'$は，スネルの法則を用いて0.2°($2\Delta\theta_i{}' = 2\Delta\theta_i \times n_e$)となる.

ブラッグ回折では透過光及び回折光のどちらも利用する事が可能である. 透過光を利用する場合は，結晶を挟む電極に電圧をかけることにより透過光強度が低下していき，0 次光透過率が 0 %（回折光の回折効率が 100 %）となる電圧で消光が最大とな

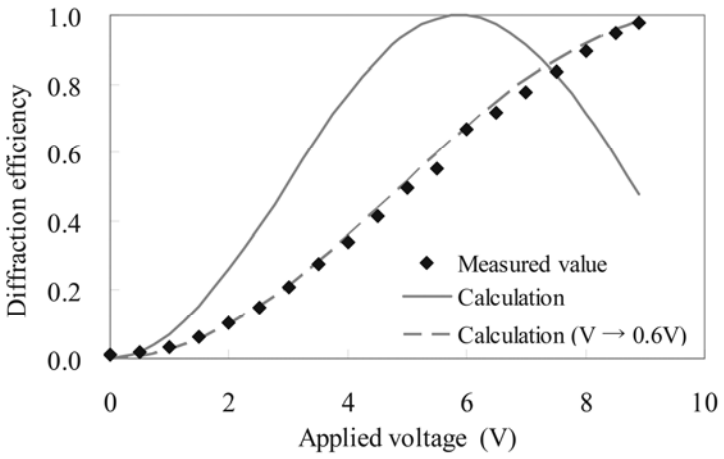
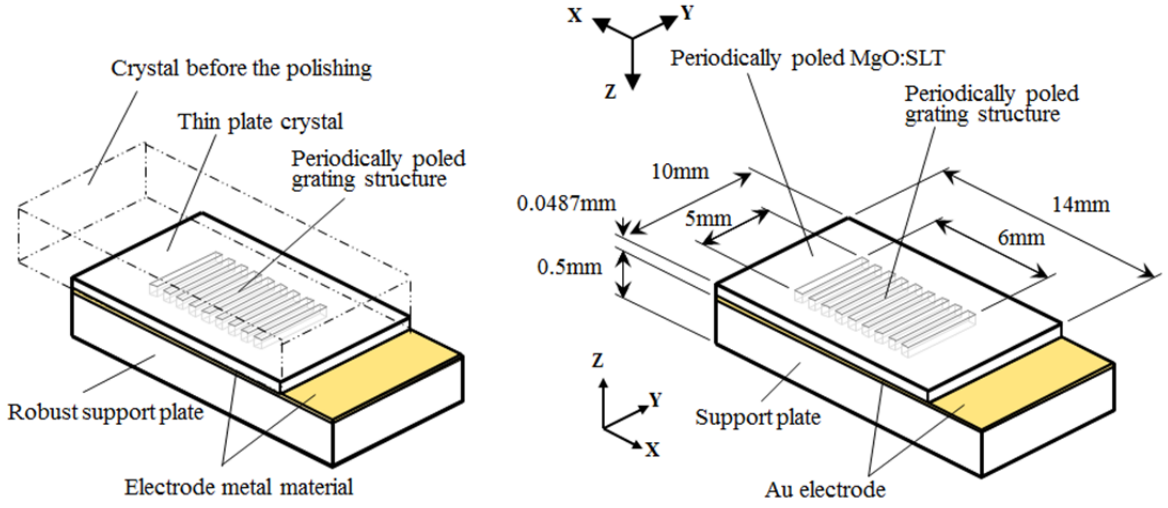


図3.3　回折効率の理論予測と測定結果



(a) (b)

図3.4　保持結晶を用いて金属を介し薄板結晶と接合するデバイス構造
(a)基本構造(b)作製したデバイス仕様

る．周期分極反転構造の製作などで欠陥があると，欠陥の種類にもよるが入射光の幅の位置（領域）により回折効率を 100 %にする電圧が異なる．したがって一様に電圧を印加するデバイス構造では完全に消光できない領域ができるので，高い消光比を得るには欠陥のないデバイスを作製しなければならない．一方，回折光を利用する場合は製造上の欠陥があると回折される光強度は少し減少する影響はあるが，透過光を利用する場合はよりも高い消光比を得やすい．

3.4　薄板結晶周期分極反転構造の提案

厚いバルク結晶と違って結晶厚さ 50 μm は機械強度が不足する厚さであり実用的なデバイスを実現する為の新たな構造の提案が必要となった．そこで，保持結晶を用いて金属を介し薄板結晶と接合する構造を発案した．図 3.4(a)に保持結晶を用いて金属を介し薄板結晶と接合するデバイス構造の基本構造を示す．周期分極反転構造が形成された薄板結晶とデバイス全体を支える強度を持つ保持基板を変調器の片側電極として機能する金属を挟んで接合した構造である．接合後に周期分極反転構造の形成された結晶を研磨して薄板化する．

3.5　MgO:s-$LiTaO_3$ 電気光学ブラッグ回折型光変調器の試作・評価

作製したデバイスの仕様を図 3.4(b)に示す．このデバイスは 2 つの部品で構成している．その 1 つは幅 14 mm で長さ 10 mm の MgO (1 mol %):s-$LiTaO_3$ 結晶である．周期が 7.5 μm で幅が 6 mm で長さが 5 mm の周期分極反転構造を中央に形成している．もう 1 つの保持基板はデバイス全体を支える強度を持つ板として 15 mm 幅で長さ 10 mm そして厚さが 500 μm の MgO (1 mol%):s-$LiTaO_3$ 結晶とした．

図 3.5 にデバイス（保持結晶を用いて金属を介し薄板結晶と接合するデバイス構造）の作製手順を示す．結晶の厚さ 500 μm の MgO (1 mol%):s-$LiTaO_3$ 結晶の周期分極反転構造は，蒸着により結晶表面に形成した周期 7.5 μm のラダー型電極にパルス電圧を印加する方法[3.16]を用いて社外の委託先で製作した．周期分極反転構造が形成された MgO (1 mol %):s-$LiTaO_3$ 結晶ともう一つの保持基板となる MgO (1 mol %):s-$LiTaO_3$ 結晶の表面に Cr と Au の薄膜をこの順番で蒸着により堆積させた．次に，表面活性化接合を行った．2 つの結晶とも同時に真空チャンバーに入れて加速電圧 2 kV，ビーム電流 100 mA の Ar 高速電子ビームを 1 min 間照射して Au 表面を活性化させた[3.17, 3.18]．その後，真空チャンバーから取り出さずに，治具を用いて 2 つの結晶の Au 表面を向い合せて加圧した．加圧したまま加熱を開始して約 2 hours 間後に（230 ℃まで過熱された）真空チャンバーから取り出した．熱膨張率の異なる結晶を加熱工程のある接合方法で接合すると加熱接合後に常温へ温度が下がるとき，それぞれ異なる寸法収縮による応力を受けて結晶が割れる可能性がある．そこで保持結晶は薄板結晶と同じ結晶材料を使用して，結晶方位もそろえて接合した．次に，保持基板の裏面を基準にしてワックスを用いて平面研磨治具へ接着セットし，約 50 μm の厚さまで平面研磨を行った．最後に光の入射面と出射面の両面を端面研磨した．

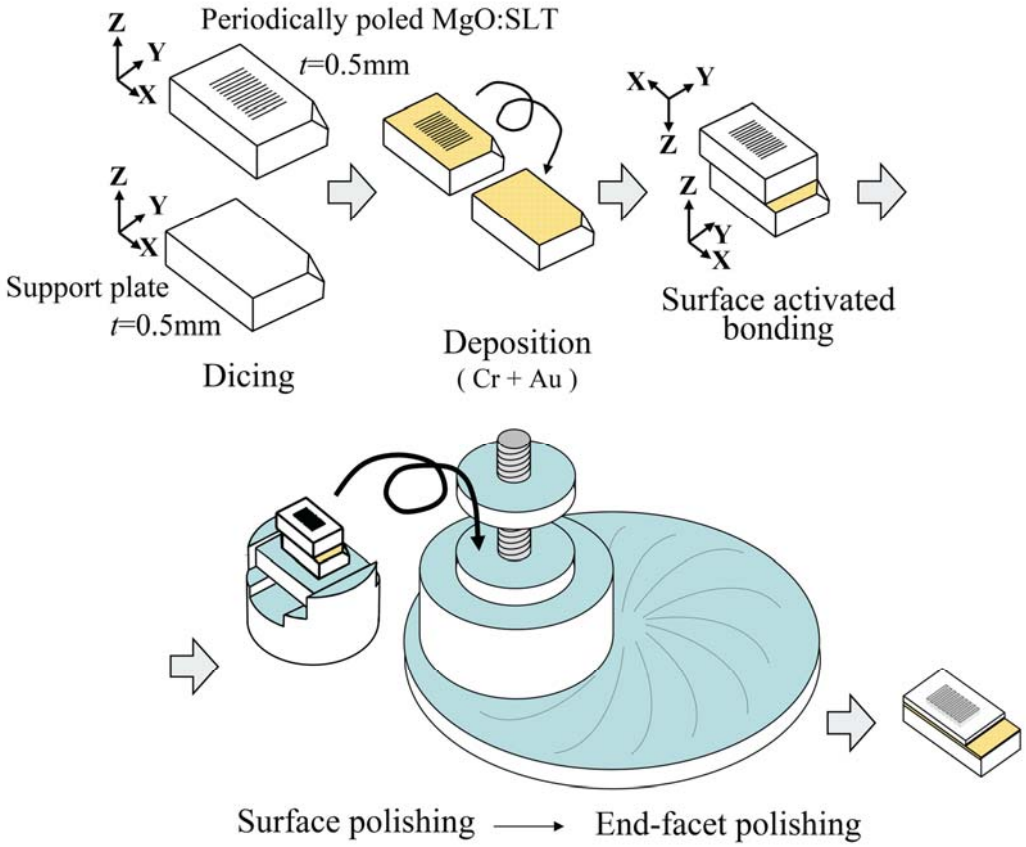


図3.5　デバイスの作製手順

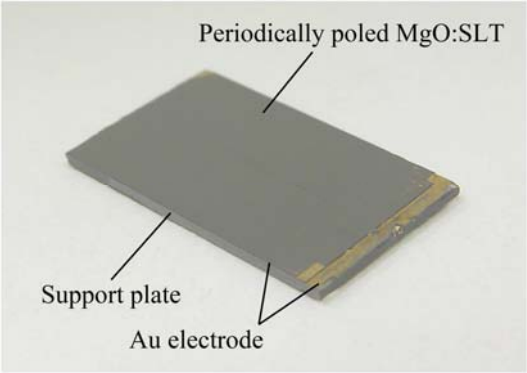


図3.6　作製したデバイス

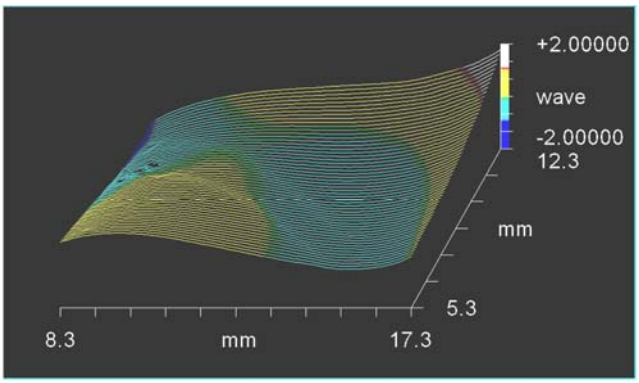


図3.7　作製したデバイスの干渉計による表面形状測定結果

図 3.6 に作製を完了したデバイスの写真を示す．研磨した周期分極反転構造の結晶の厚さは 48.7 μm であった．また，図 3.7 に作製したデバイスの Zygo 干渉計による周期分極反転構造を形成した薄板結晶の表面形状測定結果を示す．面精度は 2.9 λ（P-V 値，λ = 633 nm）であった．これは結晶の厚さ 48.7 μm に対して 1/25 の面精度であり実用に際して十分に小さな値である．

製作したデバイスの性能を測定するセットアップを図 3.8 に示す．光源に波長 λ = 355 nm の YAG3 倍高調波（100 MHz，疑似 CW）発生レーザを用いた．結晶への入射光量を 40 mW とした．測定セットアップには，保持基板を透過した光を遮り周期分極反転構造の結晶を透過した光を光センサーへ入射させるためのスリットを入れた．そして，変調器からの出力光で透過光もしくは回折光を分離するためのアパーチャを入れた．図 3.3 に回折光の回折効率の測定結果を黒点で示す．印加電圧が V = 8.9 V の時に回折効率は 97.8 %が得られた．ここで，回折効率 η を η =（回折したレーザ光強度）/（電圧を印加しないときの回折光強度と 0 次回折光強度を合わせた光強度）として計算した．また，消光比は 87.6 が得られた．ここで消光比を，（電圧を印加した時

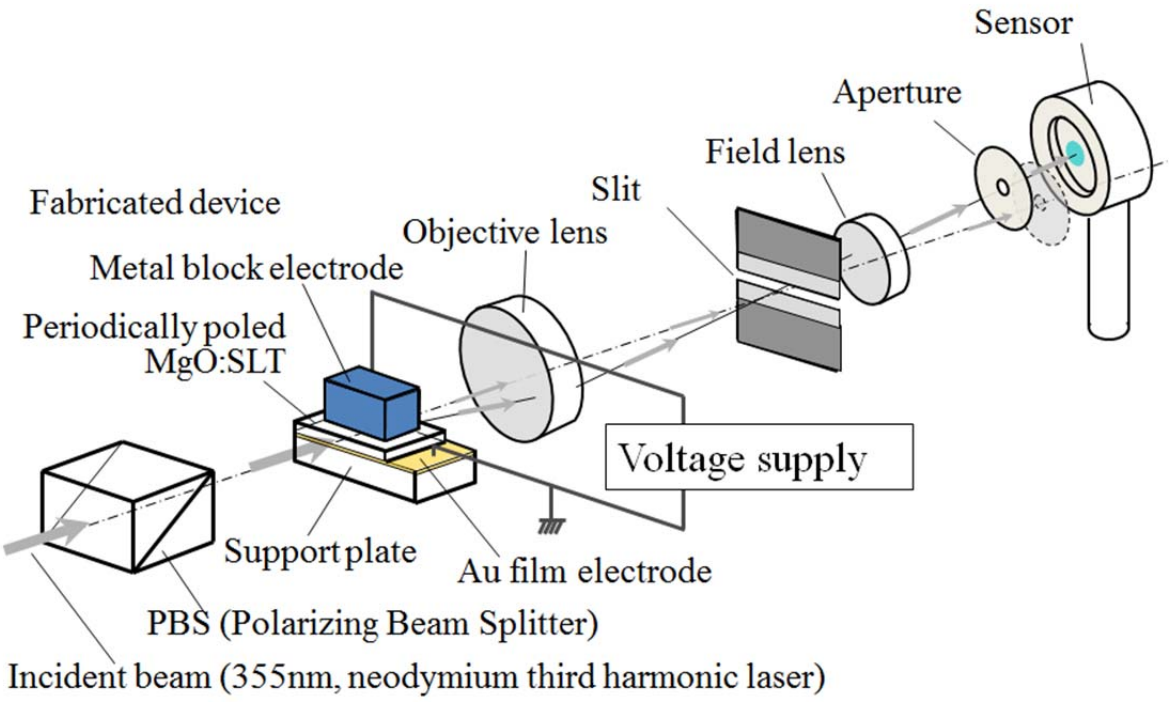


図3.8　デバイス性能測定セットアップ

の光強度）/（電圧を印加しないときの光強度）として計算した．印加電圧 V を 0.6V で置き換えた理論カーブ（図 3.3 破線）は測定結果とよく一致した．測定結果が初期の理論予測と違った理由を考察する．+側電極に用いた金属ブロック電極は単に結晶の上に載せているだけなので，結晶との間に薄い空気層ができて電圧降下を生じさせたものと思われる．最大 97.8 %もの高い回折効率と非常に高い消光比が 10 V 以下の電圧で得られた．

3.6　結言

本章では，レーザリソグラフィ装置用の空間光変調器を実現する為の原型となる紫外光用の電気光学ブラッグ回折型光変調器の設計・試作・評価について述べた．市販されてる 4 種類の電気光学結晶の高出力紫外（UV）レーザ光（波長 λ = 355 nm）に対する光損傷耐性を実験により評価し，化学量論組成の MgO (1 mol %):s-$LiTaO_3$ 結晶が最も優れていることを示した．また低い光強度では MgO (5 mol %):$LiNbO_3$ 結晶も MgO (1 mol %):s-$LiTaO_3$ と同等の光損傷耐性性能を持っていることが分った．高解像度（小さな画素サイズ）と高速変調の要求に対してブラッグ回折タイプ変調器を採用した．デバイス仕様の検討によって，低電圧駆動の為に必要となった薄板結晶の利用を実現させるデバイス構造を発案し作製工程を検討した．MgO (1 mol %):s-$LiTaO_3$ 結晶を用いた具体的な電気光学ブラッグ回折型光変調器を設計し性能実証を目的とする試作を行なった．試作では薄板結晶の利用を可能とする新たな構造の作製工程を実

証した．最後に Nd:YAG レーザ 3 倍高調波紫外光固体レーザ（波長 $\lambda = 355$ nm）を用いて試作した変調器の変調特性を測定した．その結果，レーザリソグラフィ装置用の光変調器として十分な回折効率 97.8 %と消光比 87.6 が 8.9 V の低い駆動電圧で得られた．紫外光用空間光変調器の基本ユニット構成を実証できた．

参考文献

[3.1] M. Yamada, M. Saitoh, and H. Ooki, “Electric-field induced cylindrical lens, switching and deflection devices composed of the inverted domains in $LiNbO_3$ crystals,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 69, no. 24, pp. 3659-3661, 1996.

[3.2] H. Gnewuch, C. N. Pannell, G. W. Ross, P. G. R. Smith, and H. Geiger, “Nanosecond response of Bragg deflectors in periodically poled $LiNbO_3$,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 12, pp. 1730-1732, Dec 1998.

[3.3] M. Yamada, “Electrically induced Bragg-diffraction grating composed of periodically inverted domains in lithium niobate crystals and its application devices,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, no. 11, pp. 4010-4016, 2000.

[3.4] H. Murata, Y. Okamura, “Electrooptic single-sideband modulator with resonant electrodes and polarization-reversed structures,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 8B, pp. 6643-6647, 2006.

[3.5] Y. Furukawa, M. Nakamura, S. Takekawa, K. Kitamura, T. Hatanaka, K. Nakamura, H. Ito, A. Alexandrovski, and M. M. Fejer, “Nearly stoichiometric $LiTaO_3$ for bulk quasi-phase matched devices,” *in Advanced Solid-State Lasers*, C. Marshall, ed. Washington DC: Optical Society of America, 2001, vol. 15 OSA Trends Optics and Photonics, paper PD5.

[3.6] http://www.yamajuceramics.co.jp/seihin/ycc_j.pdf.

[3.7] http://www.opt-oxide.com/wp-content/uploads/2013/03/SLT.pdf.

[3.8] http://www.opt-oxide.com/wp-content/uploads/2013/03/SLN.pdf.

[3.9] A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic, R. G. Smith, A. A. Ballman, J. J. Levinstein, and K. Nassau, “Optically - induced refractive index inhomogeneities in $LiNbO_3$ and $LiTaO_3$,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 9, no. 1, pp. 72 -74, 1966.

[3.10] F. S. Chen, “Optically induced change of refractive indices in $LiNbO_3$ and $LiTaO_3$,” *J. Appl. Phys.* vol. 40, no. 8, pp. 3389-3396, July 1969.

[3.11] A. M. Glass, D. von der Linde, and T. J. Negran, “High-voltage bulk photovoltaic effect and the photorefractive process in $LiNbO_3$,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 25, no. 4, pp. 233-235, 1974.

[3.12] A. M. Glass , “The photorefractive effect,” *Optical Engr.*, vol. 17, pp. 470 -479, Oct. 1978

[3.13] T. Suhara and M. Fujimura, *Waveguide Nonlinear-Optic Devices*, Berlin, Springer, 2003, pp. 141-158.

[3.14] M. H. Chou, J. Hauden, M. A. Arbore, and M. M. Fejer, "1.5-μm-band wavelength conversion based on difference-frequency generation in $LiNbO_3$ waveguides with integrated coupling structures", *Opt. Lett.*, vol. 23, no. 13, pp. 1004-1006, July 1998.

[3.15] F. Juvalta, M. Jazbinsek, P. Günter, and K. Kitamura, "Electro-optical properties of near-stoichiometric and congruent lithium tantalate at ultraviolet wavelengths," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 23, no. 2, pp. 276-281, 2006.

[3.16] T. Suhara and M. Fujimura, *Waveguide Nonlinear-Optic Devices*, Berlin, Springer, 2003, pp. 179-187.

[3.17] H. Takagi, K. Kikuchi, R. Maeda, T. R. Chung and T. Suga, "Surface activated bonding of silicon wafers at room temperature," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 16, pp. 2222-2224, 1996.

[3.18] H. Takagi1, R. Maeda, N. Hosoda and T. Suga, "Room-temperature bonding of lithium niobate and silicon wafers by argon-beam surface activation," *Appl. Phys. Lett.*, vol.74, no. 16, pp. 2387-2389, 1999.

第 4 章　紫外光用導波路型電気光学ブラッグ回折型空間光変調器

4.1　　緒言

本章では，シリコンウエハや高精細プリント配線板等へ高速に描画を行うレーザリソグラフィ装置用の周期分極反転構造を用いた紫外光用導波路型電気光学ブラッグ回折型空間光変調器の設計・試作・評価について述べる．この空間光変調器は第 3 章の紫外光用光変調器に導波路を作製した基本構成ユニット（図 4.1）を一次元に配列して空間光変調器に展開したものである．

低損失光伝搬と変調器の出射端で良好なビーム形状が得られるよう空間光変調器にアニールプロトン交換平板導波路を採用する事を考えた．しかし，これまで作製されてきた基本的な光導波路は深さの浅い薄い導波路なので，これに高出力紫外レーザ光を伝搬させると光強度密度が高くなり光損傷が発生しやすい．さらに，導波路の厚さ方向のモードサイズは画素幅に対して極端に小さいので画素配列方向に長軸を持つ楕円率の大きな光強度分布の画素になる．そこで，紫外光に対する光損傷耐性が高い 1 mol % MgO 添加 MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶に大きなモードサイズを有する光導波路を形成することにした．本章ではまず低損失で大きなモードサイズであり厚さ方向に単一モードとなるよう最適化したプロトン交換プロセスとアニールプロセスについて述べる．続いて長時間のレーザ光照射でもモード深さとモードサイズの変化がない事を確認した光導波路の寿命評価について述べる．次に，MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶を用いた周期分極反転構造を有する空間光変調器の設計について述べる．また透過光を利用した空間光変調器による再回折結像光学系の出力（描画）面での出力パターン（光強度分布）

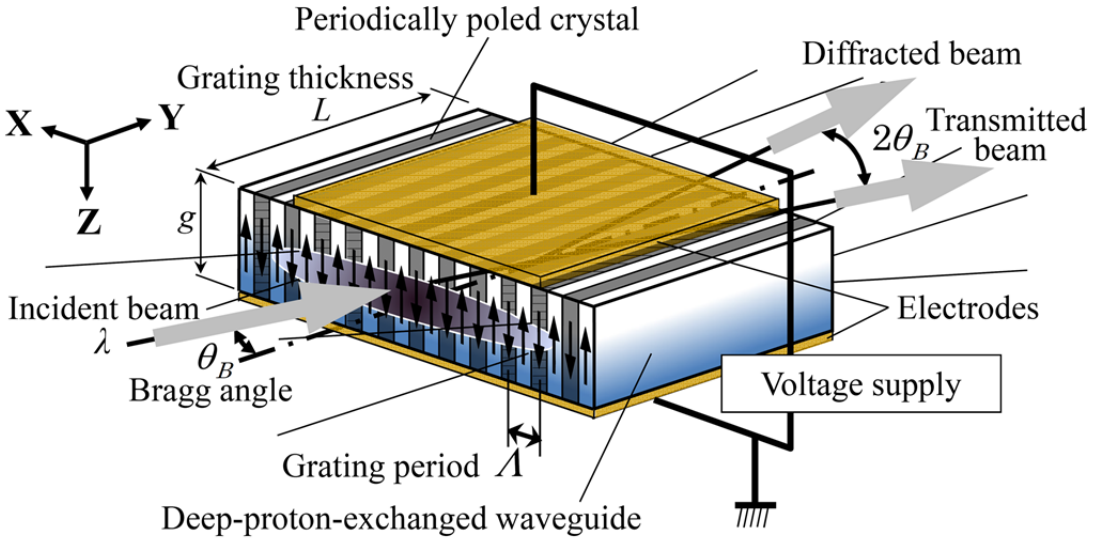


図4.1　光導波路型電気光学ブラッグ回折型光変調器の基本構成

の予測をおこなうためのシミュレーションについて述べる．その後，設計に基づき空間光変調器の試作を行なった．結晶表面にフォトレジストをパターニングして，その表面に金属材料を蒸着堆積させて波板電極を作り電圧パルス印加法により周期分極反転構造を作製した．そして，この周期分極反転構造が形成された結晶を保持結晶に金属を介し接合した．一方，画素電極はフォトリソグラフィにより石英基板上に電極パターンを形成した. 周期分極反転構造の形成された結晶と画素電極を組み合わせ 10 画素 1 次元空間光変調器を作製した．最後に空間光変調器の基本動作を示す.

4.2 アニールプロトン交換光導波路

4.2.1 基本的な光導波路の問題点

図 4.2(a)に従来の基本的な薄いプロトン交換導波路を示す[4.1 - 4.5]．導波路を伝搬する光のモード深さは約 5 μm 以下であり，深さ方向のモードサイズは更に小さな値になる．モードサイズが小さいので高出力レーザ光を伝搬させると光強度密度が高いため，特に紫外光では光損傷や散乱が発生しやすくなる．レーザリソグラフィ装置への応用において，精密で高解像度の描画を実現する為には付録 A1 で詳述するように描画面での画素の光強度分布を画素配列方向に少し長い楕円形状とする光強度分布が有利である．しかし，従来の導波路の厚さ方向のモードサイズが画素幅に対して極端に小さいので画素の光強度分布は長軸が画素配列方向で楕円率の大きな光強度分布になるという問題があった.

4.2.2 大きなモードサイズを有する光導波路の提案

図 4.2(b)に本研究で開発した大きなモードサイズのプロトン交換導波路(deep-proton-exchanged waveguide)を示す．導波路を伝搬する光のモード深さは概ね 20

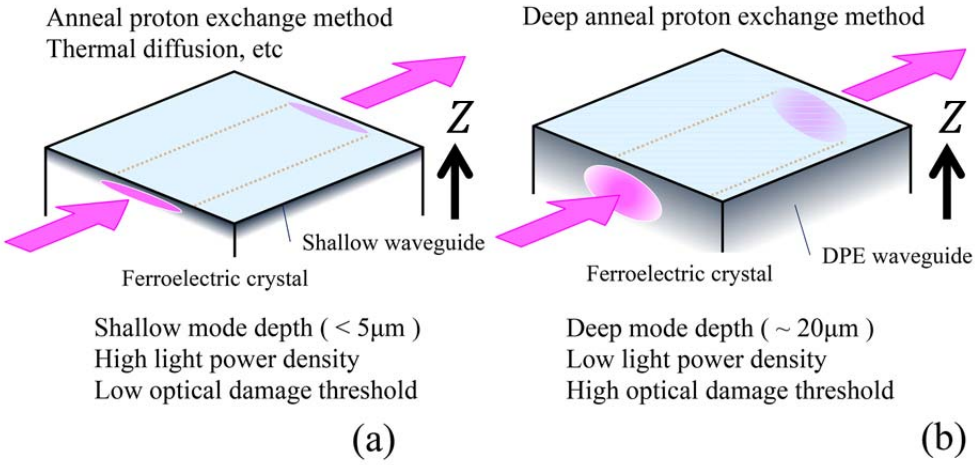


図4.2 (a)従来の基本的な薄いプロトン交換導波路と(b)大きなモードサイズのプロトン交換導波路の比較

μm 以上あり，深さ方向のモードサイズも従来の基本的な薄いプロトン交換導波路よりも大きい．大きなモードサイズの光導波路は高出力レーザ光を伝搬させると光強度密度が低くなる．特に紫外光では従来の薄いプロトン交換導波路と比べて光損傷や散乱が発生しにくくなる．レーザリソグラフィ装置への応用において，精密で高解像度の描画を実現できる．

光損傷耐性に優れた電気光学結晶に大きなモードサイズの光導波路を作製することができれば，低損失伝搬が可能で出射光が描画に適する光強度分布となる光導波路となる．特に光損傷耐性に優れた MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶にプロトン交換導波路を作製した研究は非常に少ない．報告されているのは従来の基本的な薄いプロトン交換導波路の研究であった[4.6 - 4.9]．そこで，MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶に大きなモードサイズの光導波路を作製する技術を確立する事を目標に研究を行った．

4.2.3　試作と評価

図 4.3 に大きなモードサイズの光導波路の作製工程とモードサイズとモード深さの測定セットアップを示す．幅 15 mm（*X* 軸方向），長さ 10 mm（*Y* 軸方向）で厚さ 0.5 mm の *Z* 板 MgO(1 mol %):s-$LiTaO_3$ 結晶（オキサイド社製）[4.10, 4.11]を 4 枚準備した．最初に，これらの結晶を石英ビーカーに入れ 230 ℃に加熱したピロリン酸[4.14]の中に 20 分間浸した．結晶 Li^+とピロリン酸の H^+との交換が起こり $H_xLi_{1-X}TaO_3$ となり異常屈折率が僅かに高くなる．次に光の入射・出射面に相当する *Y* 軸と垂直な結晶の両端面を研磨した．その後，プロトン交換された 4 枚の結晶をともに石英管の中に入れて同時に乾燥酸素を流しチューブ炉で 400 ℃の一定温度で時間を変化させてアニールを

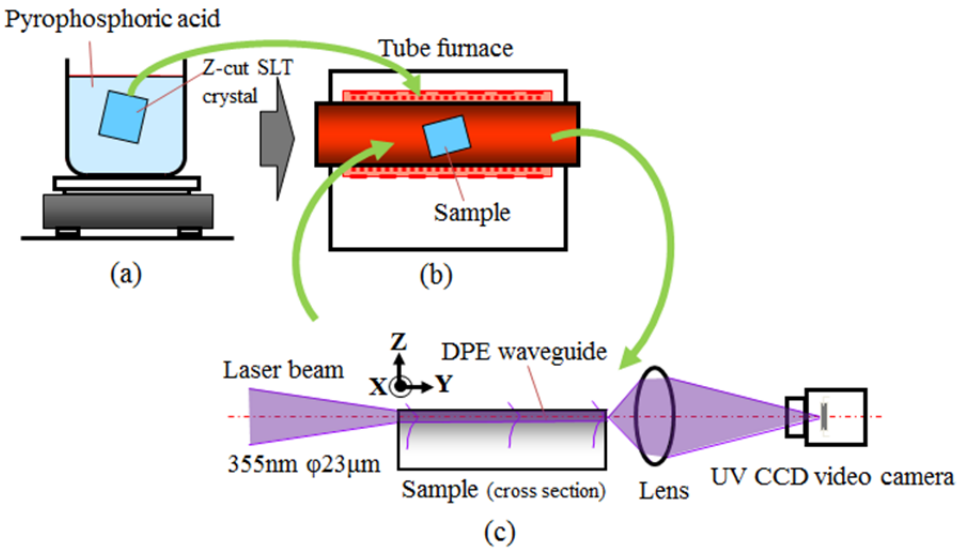


図4.3　大きなモードサイズの光導波路作製工程の(a)プロトン交換(b)アニールと(c)モードサイズとモード深さの測定セットアップ

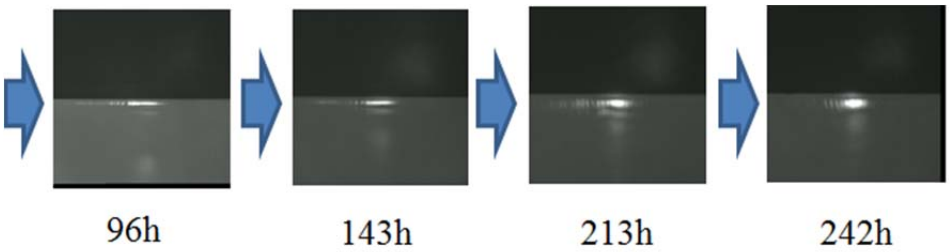


図4.4　アニール時間に対する出射端でのモード形状の変化

おこなった．モードサイズとモード深さのアニール時間依存性を測定する為に，石英管をチューブ炉から取り出し，その中の結晶を1つずつ測定セットアップに設置した．波長 λ = 355 nm で 23 μm（1/e^2）のレーザ光（集光 F 値:~ 50）を結晶の Z 軸方向に偏光面が向くようにして結晶の+Z 面の平板導波路の中央に入れた．そして，CCD ビデオカメラと画像処理システムを用いて導波路の出射端で TM 導波モードの形状を測定した．測定の後に再びチューブ炉へ戻しアニールを継続した．これらの作業を何度か繰り返しモード深さとモードサイズのアニール時間依存性を求めた．

図 4.4 にアニール 96，143，213，242 時間に対する出射端でのモード形状の変化を示す．モード形状は深さ（垂直）方向にピークは 1 つしかみられず，深さ（垂直）方向に単一モードとなる導波路ができた．アニール時間が増加するに従いモードサイズとモード深さは増加した．

図 4.5 にアニール時間に対してのモードサイズとモード深さの測定結果を示す．モ

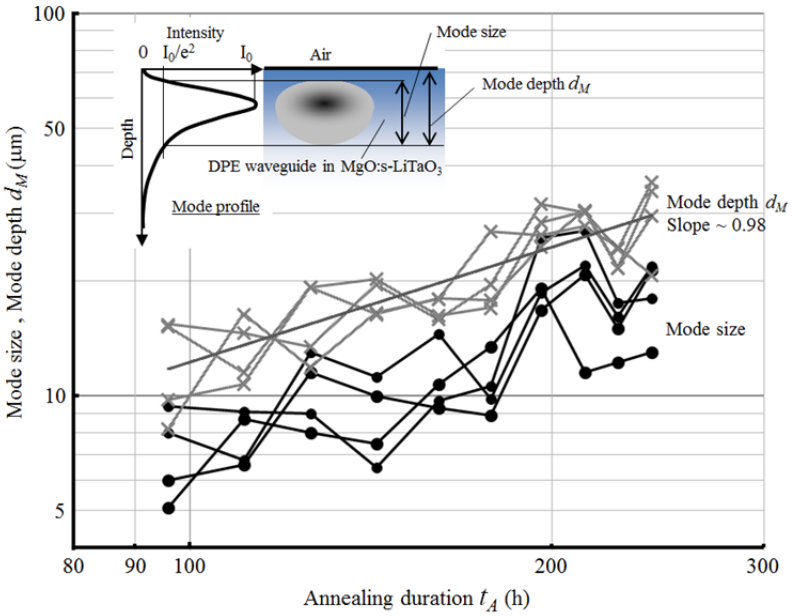


図4.5　モードサイズとモード深さのアニール時間依存性

ードサイズとモード深さを図 4.5 に挿入した図に示すように, それぞれ, 光強度が I_0/e^2 となる上端と下端の距離, 結晶表面から光強度が I_0/e^2 となる下端までの距離と定義した．プロットは 1 つの試料のアニール時間追加による変遷を表すために線分で連結した．40 分以上の時間でプロトン交換を行うとマルチモードの導波路の性質を示す 2 カ所以上のピークが出てきた．プロトン交換では異常屈折率のみが増加するので，X 軸方向に偏光した常光線の導波は観察されなかった．モード深さ d_M はアニール時間 t_A にほぼ比例する結果が得られた．通常の拡散プロセスにおいて，拡散長は拡散時間の平方根に比例する事は良く知られている[4.12]．測定結果と通常の拡散プロセスの違いが発生した要因を考察した. アニール時間が増加すると拡散深さ d_{DPE} が増加するだけではなく，プロトン交換で増加した Δn_e の減少がモード深さ d_M を増加させるので，モード深さ d_M がアニール時間 t_A にほぼ比例する測定結果になったと思われる．

200-260 ℃のピロリン酸で Z 板 c-$LiTaO_3$ の拡散係数 $D_{PE0} = 9.1\times10^8$ μm^2/h, 活性化エネルギー$E_{PE} = 1.02$ eV[4.13]を用いて, プロトン交換プロセスの拡散係数を, D_{PE}(230℃) ~ 0.055 μm^2/h と推定した．そして 20 分間のプロトン交換プロセスに対する拡散深さは，$d_{PE} = 2(D_{PE}t_{PE})^{1/2} \sim 0.27$ μm と推定した．更に $\Delta n_e = 0.012$-0.014 ($\lambda = 663$ nm), 0.021-0.023 ($\lambda = 442$ nm)[4.13]より，プロトン交換層において波長 $\lambda = 355$ nm に対する異常屈折率の増加を $\Delta n_e \sim 0.03$ と推定した．$d_{PE} << d_{DPE}$ であるのでプロトン交換とアニールプロセス後の拡散深さはアニールプロセスによる拡散深さ d_A ($d_{DPE} \cong d_A$)で近似される．図 4.5 のアニール時間 $t_A = 242$ h での測定したモード深さ $d_M = 30$ μm ($\cong d_{DPE}$)より, アニール時の拡散係数を計算すると D_A (400℃) ~ 0.9 μm^2/h であった. 一方, Z 板 c-$LiTaO_3$ を 300-530 ℃で 16-30 秒アニールしたラピッドアニーリングの結果の $D_{A0} = 2.9\times10^9$ μm^2/h, $E_A = 1.18$ eV[4.14]を用いると，アニール時間 $t_A = 242$ h に対する D_A (400℃) ~ 4.3 μm^2/h, $d_{DPE} \cong d_A = 2(D_A t_A)^{1/2} \sim 65$ μm が得られた．従来の基本的な導波路での報告値と相違は，アニール時間が大きく異なる事や MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶中でのプロトンの拡散速度が遅かった事などが考えられる．

作製した大きなモードサイズを有する光導波路の伝搬損失を評価した．図 4.3(c)と同じようなセットアップを準備して光導波路の透過率を測定した．MgO(1 mol %):s-$LiTaO_3$ 結晶を用いてモードサイズが 22 μm で Y 軸方向の長さが 1 cm の大きなモードサイズを有する平板光導波路を作製した．作製条件をプロトン交換が 230 ℃で 20 分間とし，アニールプロセスが 400 ℃の 231 時間とした．波長 $\lambda = 355$ nm の紫外レーザ光をシリンドリカルレンズで垂直方向 15 μm（1/e^2）に F 値 ~33 で絞り込んで光導波路が形成された結晶の端面に入れた．端面反射・モード不整合や光伝搬損失などを含んだ光透過率（出射光強度/入射光強度）は 0.60 であった．端面の反射率は，セルマイヤーの式[4.11]によって計算した波長 $\lambda = 355$ nm に対する異常屈折率 $n_e = 2.32$ を用いフレネル反射の式$(n_e-1)^2/(n_e+1)^2 = 0.16$ で近似する事ができる．結晶端面での入射と出射の反射損失を考慮しモード不整合損失を無視することにより，光導波路の伝搬損失を $10\log_{10}\{(1-0.16)^2/0.60\}/1$ cm = 0.7 dB/cm と見積ることができた．

次に大きなモードサイズを有する平板導波路の安定性を確認する為に寿命試験を

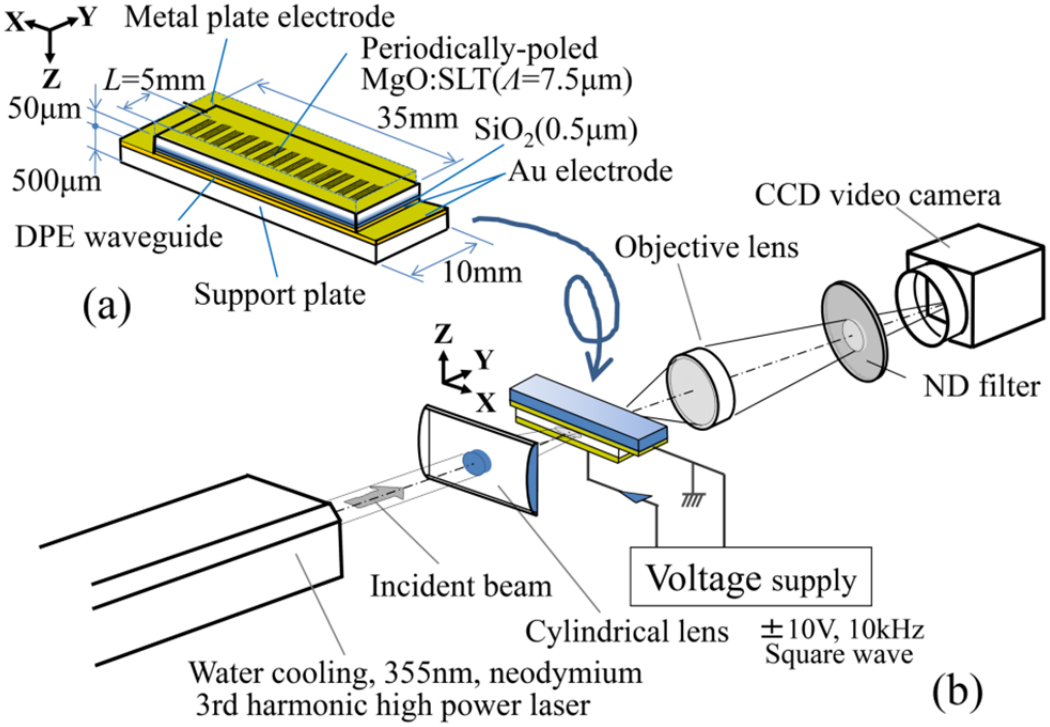


図4.6　(a)試作した変調器の構成と仕様および(b)寿命試験のセットアップ

実施した．*Z* 板 MgO(1 mol %):s-$LiTaO_3$ 結晶を用いて光導波路型電気光学変調器を試作した．試作した変調器の構成と仕様を図 4.6(a)に示す．この変調器は 2 つの部品で構成されている．その 1 つは周期分極反転構造が形成された大きなモードサイズを有する平板導波路である．幅 35 mm で長さ 10 mm の MgO (1 mol %):s-$LiTaO_3$ 結晶の中央の周期が Λ = 7.5 μm で長さが L = 5 mm の周期分極反転構造は，蒸着により結晶表面に形成した周期 7.5 μm のラダー型電極にパルス電圧を印加する方法[4.15]を用いて社外の委託先で製作した．結晶の+*Z* 面にピロリン酸を用いて 230 ºC で 20 分間プロトン交換を行った後に 400 ºC で 231 時間のアニールを行って大きなモードサイズを有する平板導波路を形成した．図 4.3(c)のセットアップで測定すると約 22 μm のモードサイズが得られた．この光導波路の上に厚さ 500 nm の SiO_2 を蒸着で堆積させてバッファー層とした．もう 1 つの結晶は保持基板になる厚さが 500 μm の s-$LiTaO_3$ 結晶である．次に，Cr/Au の薄膜をこの順番でそれぞれの結晶に蒸着で堆積させた．周期分極反転構造が形成された大きなモードサイズを有する平板導波路の結晶を保持基板とはんだで接合した．その後，駆動電圧を下げる為に平板導波路の結晶を厚さ約 50 μm まで平面研磨した．

図 4.6(b)に寿命試験のセットアップを示す．光源に Nd:YAG（Yttrium Aluminum Garnet）レーザ 3 倍高調波紫外光固体レーザ（波長 355 nm）を用いた．このレーザは疑似 CW 発振で繰返し周波数 80 MHz・パルス長 15 ps である．レーザ光をシリンドリカルレンズで縦方向に 15 μm（$1/e^2$）に絞り，結晶の端面から平板導波路に入射し

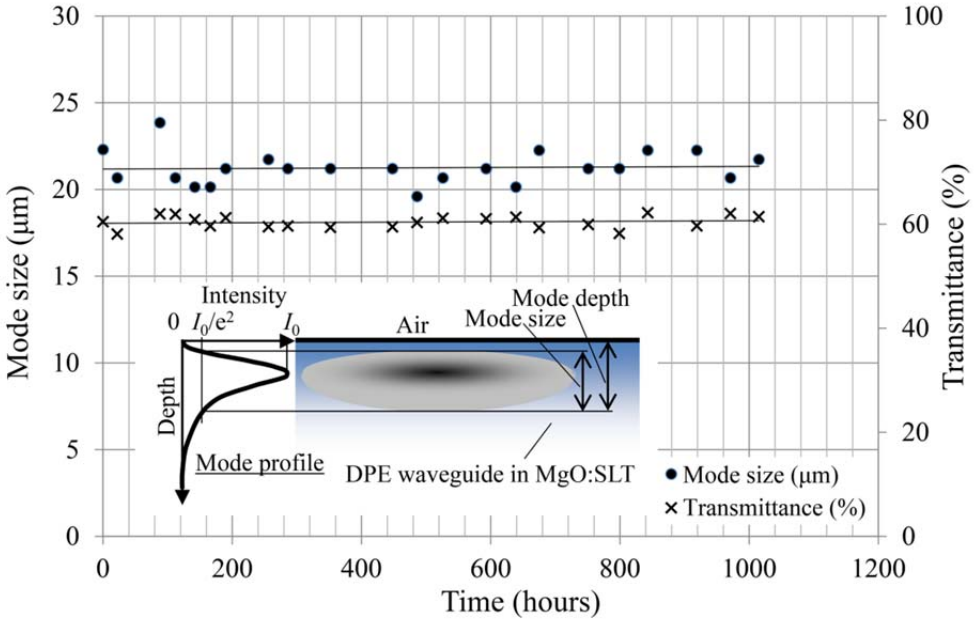


図4.7　作製したデバイスのモードサイズと透過率の寿命試験結果

た．導波路の中での平均光強度密度は 2.7 kW/cm^2 であった．レーザ光変調を行う為に試作した光変調器に 10 kHz（デューティ 50%）の±10 V の矩形波電圧を印加した．実際の使用に近づけるためにデバイスに光照射と電圧印加し続けて，測定の時だけ電圧印加を止めてモードサイズと結晶端面の反射を含んだ透過率を長時間にわたって測定した．

図 4.7 に測定したモードサイズと透過率の寿命試験結果を示す．モードサイズの定義は図 4.7 に挿入した図に示すように，光強度が I_0/e^2 となる上端と下端の距離と定義した．光強度密度 2.7 kW/cm^2 の紫外光の寿命試験において MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶に形成した大きなモードサイズを有する光導波路のモードサイズと透過率は 1000 時間にわたって測定精度の範囲内で一定であり安定した性能を示した．

4.3　電気光学ブラッグ回折型空間光変調器の設計とシミュレーション特性予測

第 3 章の紫外光用空間光変調器に 4.2 節の導波路を組み合わせ一次元導波路型空間光変調器を設計した．低電圧駆動を実現させるには，電圧印加電極間距離と結晶厚さを小さくしなければならない．高精細（小型の画素）とするには，画素配列方向（図 4.1，X 軸方向）の画素電極の幅すなわち隣り合う画素電極の距離と周期分極反転構造の周期を短くしなければならない．加えて画素間のクロストークを最小にしなければならない．これらの要求を満足させるための仕様を第 3 章の結果を利用して，周期分極反転構造の周期 Λ = 7.5 μm，結晶厚さ g = 50 μm，周期分極反転構造厚さ L = 5 mm とした．結晶厚さ方向のモードサイズは 4.2 節で述べた描画面での画素の光強度分布を考慮して ~20 μm とした．波長 λ = 355 nm，ポッケルス定数 r_{33} = 36.0 pm/V そして

$n_e = 2.32$ (1 mol%MgO 添加 MgO:s-$LiTaO_3$)に対して回折効率を 100 %とするために必要な電圧は式(2.14)から約 6 V と計算された．第 3 章 3.3 節で述べたように $Q = 85$，角度選択性に関する結晶中の角度受容幅$2\Delta\theta_i = 0.09$ °，光が空気中から変調器へ入射する場合の角度受容幅$2\Delta\theta_i' = 0.2$ °となった．1 次元の空間光変調器とするための画素電極の周期を $\Lambda_e = 7.5$ μm（1 画素幅は $3\Lambda_e$ 又は $5\Lambda_e$ で 3 又は 5 画素電極分をまとめて制御する）とした．

周期分極反転構造を用いた電気光学ブラッグ偏向型一次元空間光変調器の従来の研究[4.16, 4.17]に解析結果が示されているが，描画面でのより精度の高い特性予測が必要なためにシミュレーションをおこなった．図 4.8 にシミュレーションモデルを示す．光軸に平行に進む平面波を周期分極反転構造の回折格子に入射させる．回折格子はブラッグ角θ_B傾けて設置した．回折格子を伝搬する光は 2 次元の BPM シミュレーションを行い出射端での光の複素振幅分布を計算した．周期分極反転構造は矩形的屈折率分布としてモデル化した．導波路は簡易的にステップ状に屈折率を高くした．次に変調器の出力面に第 1 レンズの前側焦点面を合わせると後側焦点面がフーリエ変換面になるので，変調器からの出射光の離散的フーリエ変換(DFT)を行った．フーリエ変換面での 2 次元フーリエ像と回折光を遮るために挿入したアパーチャのフィルター関数を掛け合わせた．第 1 レンズの後側焦点面（アパーチャ位置）に第 2 レンズの前側焦点面を合わせると後側焦点面が逆フーリエ変換面になるので，離散的逆フーリエ変換(IDFT)して露光面での複素振幅分布を計算した．最後に描画面での透過光の光強度分布を計算した．ここで，BPM シミュレーションの計算には市販のソフトウエア（RSoft BeamPROP）を使用した．BPM の手法は付録 A2 に述べる．フーリエ変換，

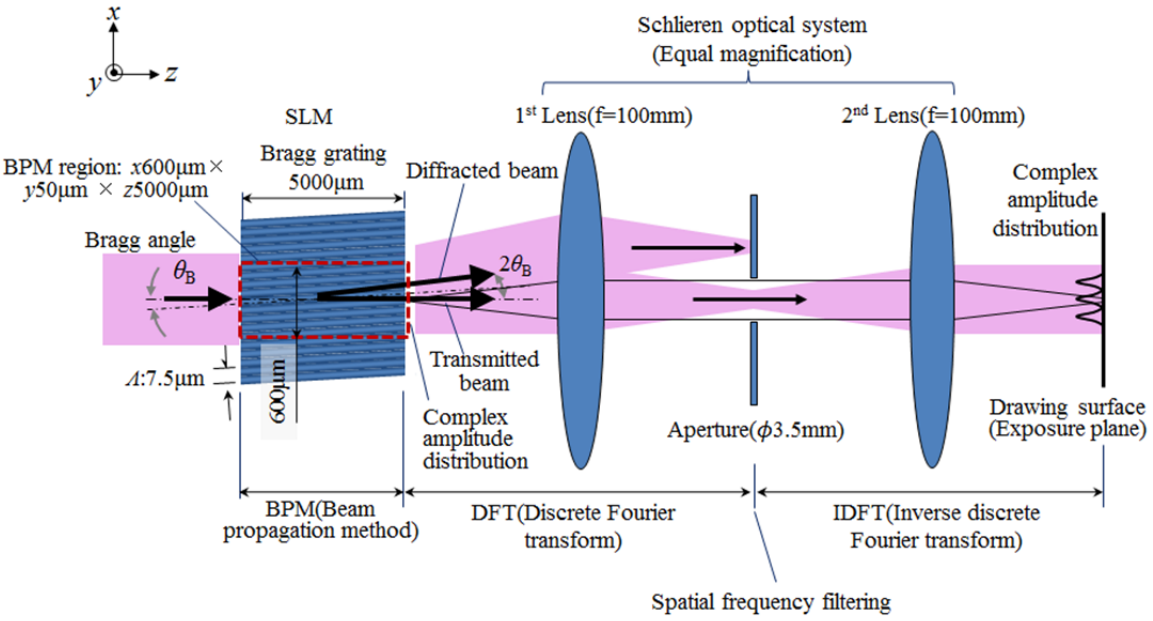


図4.8　シミュレーションモデル

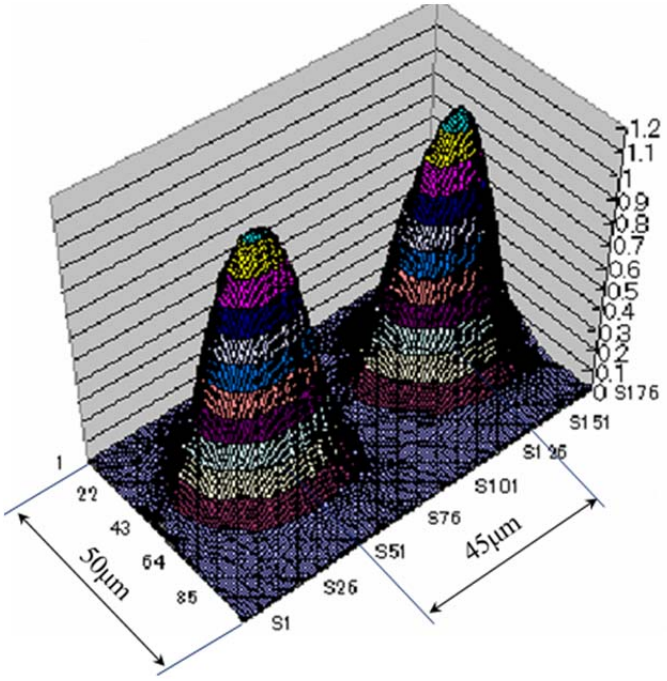


図4.9　シミュレーションで得られた露光面での光強度分布

フィルタリング，逆フーリエ変換の計算は Visual Basic のプログラムを自作した．光強度分布の表示は表計算ソフト Excel を利用した．また，簡単の為に再回折光学系（Schlieren optical system）の倍率を等倍として計算した．実際のレーザリソグラフィ装置の再回折結像光学系の倍率は，変調器の 1 画素の大きさが描画面で要求される描画最小線幅を描画できる 1 画素の大きさ（簡単には描画最小線幅と同じ値）となる比率に決める. 具体的には空間光変調器の 1 画素幅 22.5 μm ($3\Lambda_e = 3\times7.5$ μm)の大きさが描画面で 1 画素幅 1 μm となる再回折結像光学系の倍率は, 1/22.5 = (2nd レンズの焦点距離)/(1st レンズの焦点距離)と決める．BPM シミュレーションにおいては，空間光変調器の出射光の透過光を利用するものとして，1 画素幅を $3\Lambda_e$，画素パターンを“0-1-0-1-0”（6V を印加した画素を“0”，電圧を印加しない画素を“1”とおく）とした．シミュレーションで得られた露光面での光強度分布を図 4.9 に示す．円錐形の光強度分布を持つ“1”画素が得られた. ピーク間隔 45 μm は画素幅 22.5 μm の 2 倍となっている．実際の露光パターンは図 4.9 の結果を 1/22.5 に縮小したものとなる．また“1”の画素で挟まれた“0”画素の光強度分布はほぼ 0 となっており, 画素パターンの“0-1-0-1-0”が再現された.

4.4　波板電極を用いた周期分極反転構造の試作

厚さ t = 0.2 mm，幅 15 mm，長さ 10 mm の Z 板 MgO(1 mol %):s-$LiTaO_3$ 結晶の＋Z 面に周期 Λ = 7.5 μm（分極反転幅:非反転幅=1:1），幅 6 mm，長さ 5 mm の周期分極反転構造をパルス電圧印加法[4.15]により作製した．作業の効率化のため，幅 30 mm，長さ 20 mm の結晶を幅 15 mm，長さ 10 mm の 4 領域に分割し作製した．分極反転構

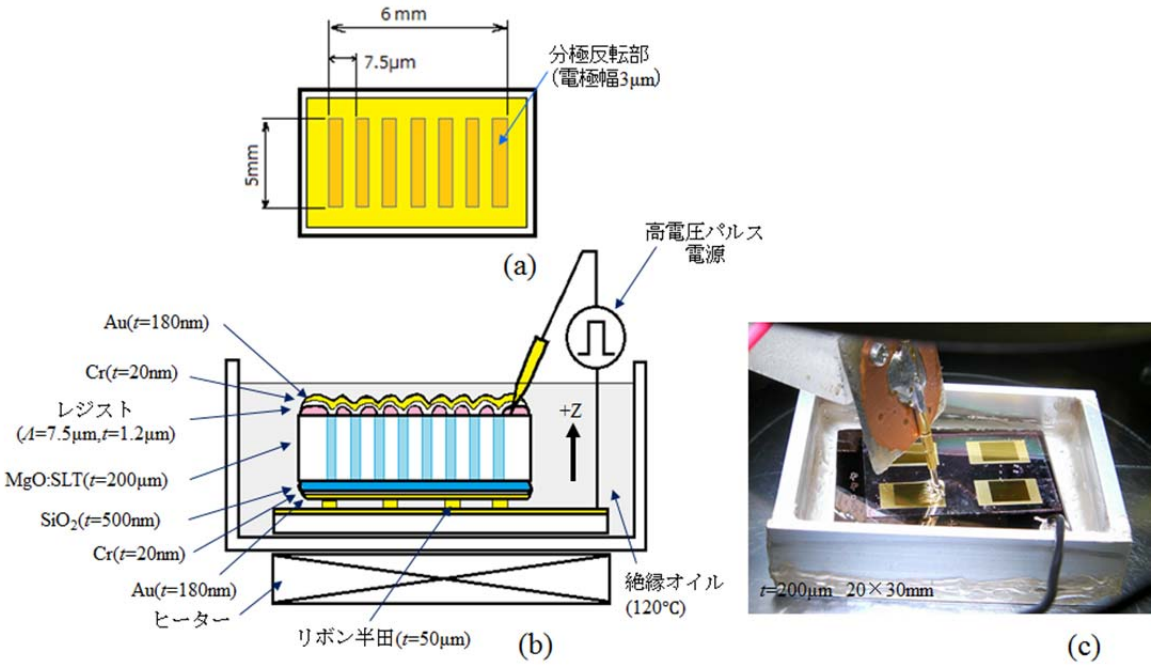
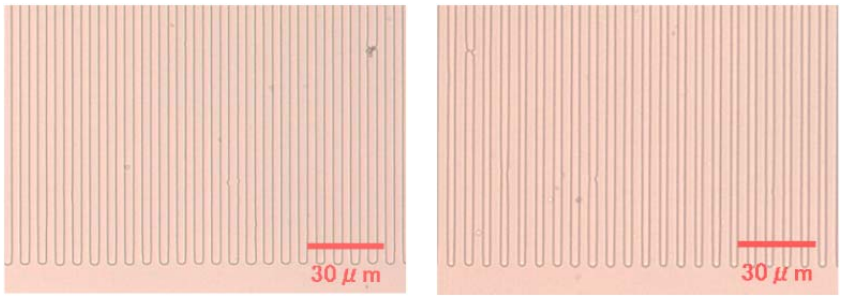


図4.10　周期分極反転構造作製のブロック図(a)結晶上面(b)側面と(c)実験セットアップ



(a)　　(b)

図4.11　作製した周期分極反転構造（フッ硝酸エッチング後）(a)＋*Z*面(b) －*Z*面

造作製の電圧印加までの工程を 4 領域同時に行い，それぞれの領域に対して電圧印加をおこなった. 分極反転構造作製後に 4 個の結晶に切り出し, その後の工程に進めた.

図 4.10 に周期分極反転構造作製のブロック図(a)結晶上面(b)側面と(c)実験セットアップを示す．電圧印加時のリーク電流を避けるために結晶の－*Z* 面にスパッタにより SiO_2 膜を約 0.5 μm 堆積[4.18]させたのちに，真空蒸着により Cr/Au の薄膜を堆積させ一様電極を形成した．その後，フォトレジストとフォトマスクを用いて周期分極反転構造のパターンを結晶の＋*Z* 面に形成し Cr/Au の薄膜を真空蒸着により堆積させて波板電極を作った．電圧印加による分極反転の横（*X* 軸）方向の広がりを考慮して，結晶面と Cr/Au 薄膜の接するレジストの開口幅を目標の分極反転幅 3.75 μm（分極反転

周期の 1/2）より減らして 3 μm とした．＋Z 面の波板電極と－Z 面の一様電極との間にパルス電圧を印加して分極反転構造を作製した．図 4.11 に作製した周期分極反転構造のフッ硝酸エッチング後の光学顕微鏡写真を示す．(a)は＋Z 面，(b)は－Z 面の分極反転の状況である．＋Z 面は分極反転幅と非反転幅がほぼ同じ幅（分極反転幅:非反転幅 ≒ 1:1）となっており理想的な周期分極反転構造ができている．一方，－Z 面は分極反転幅は非反転幅より狭く 3 μm 程度であった．またその変動も大きかった．分極反転の横（X 軸）方向の広がりの程度は＋Z 面と－Z 面で異なることが分った．変調器の作製では－Z 面を平面研磨して＋Z 面近くに光導波路を有する約 50 μm の薄板とする．良好な分極反転比率の部分だけを利用することができるので，良好な周期分極反転構造ができたと判断した．

4.5　電気光学ブラッグ回折型空間光変調器の試作

この変調器は 2 つの部品で構成されている．その 1 つは図 4.12(a)(b)に示すように

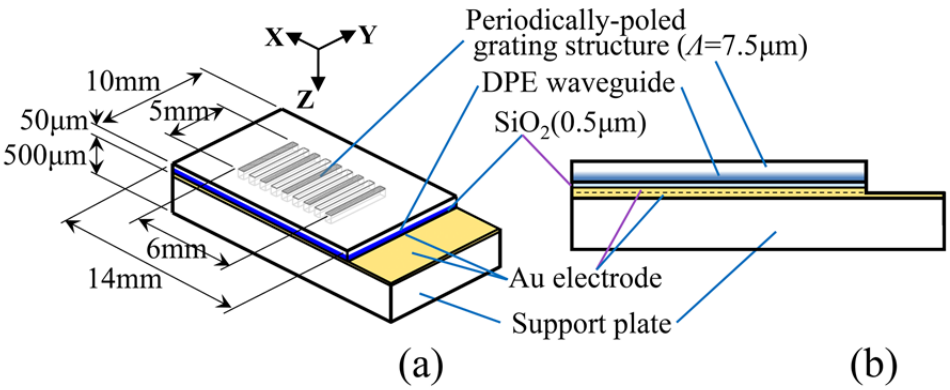


図4.12　試作した空間光変調器の主要部位の結晶部(a)斜視図(b)断面図

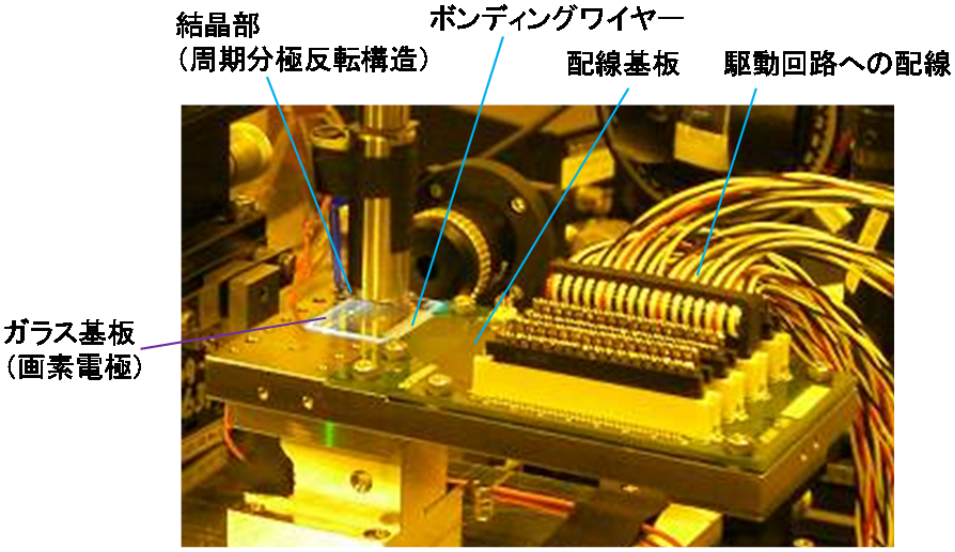


図4.13　試作した空間光変調器及び駆動回路へ繋がる配線

幅 15 mm，長さ 10 mm の Z 板 MgO(1 mol %):s-$LiTaO_3$ である．MgO (1 mol %):s-$LiTaO_3$ 結晶の中央に周期が Λ = 7.5 μm，幅 6 mm，長さ L = 5 mm の周期分極反転構造を 4.4 節で述べた方法により製作した．結晶の＋Z 面にピロリン酸を用いて 230 ºC で 20 分間プロトン交換を行った後に 400 ºC で 231 時間のアニールを行って大きなモードサイズを有する平板導波路を形成した．もう一つは画素電極を形成したガラス基板である．ガラス基板の上にレジストを用いたフォトリソグラフィにより電極パターンを形成した後に Cr/Au を蒸着で堆積させて 50 本の周期 Λ_e = 7.5 μm の画素電極を形成した．図 4.13 に試作した空間光変調器及び駆動回路への配線を示す. この画素電極格子の上に図 4.12 に示した結晶部を押し当てて空間光変調器とした. それぞれの画素電極格子は駆動回路に接続した.

4.6　性能評価と空間光変調実証

4.14(a)に空間光変調の実験セットアップを示す. 光源に Nd:YAG（Yttrium Aluminum Garnet）レーザ 3 倍高調波紫外光固体レーザ（波長 λ = 355 nm）を用いた．この実験では空間光変調器からの回折光を利用した. 図 4.14(b)に入射光に対する周期分極反転構造と画素電極格子，そして回折光の方位関係を示す．第 2 章で述べたように入射光に対し周期分極反転構造はブラッグ角で設定されるが，画素電極は出射光の方向と同一（入射光に対して $2\theta_B$ の角度を持つ）に設定した．次に，空間光変調器は並列のパターン信号により制御され変調された出射光は再回折結像光学系のアパーチャにより透過光が遮断され回折光のみが透過する．透過した光はレンズを通り出力面（描画面）で回折光強度パターンをつくる．そのパターンを紫外用の CCD カメラで撮像し

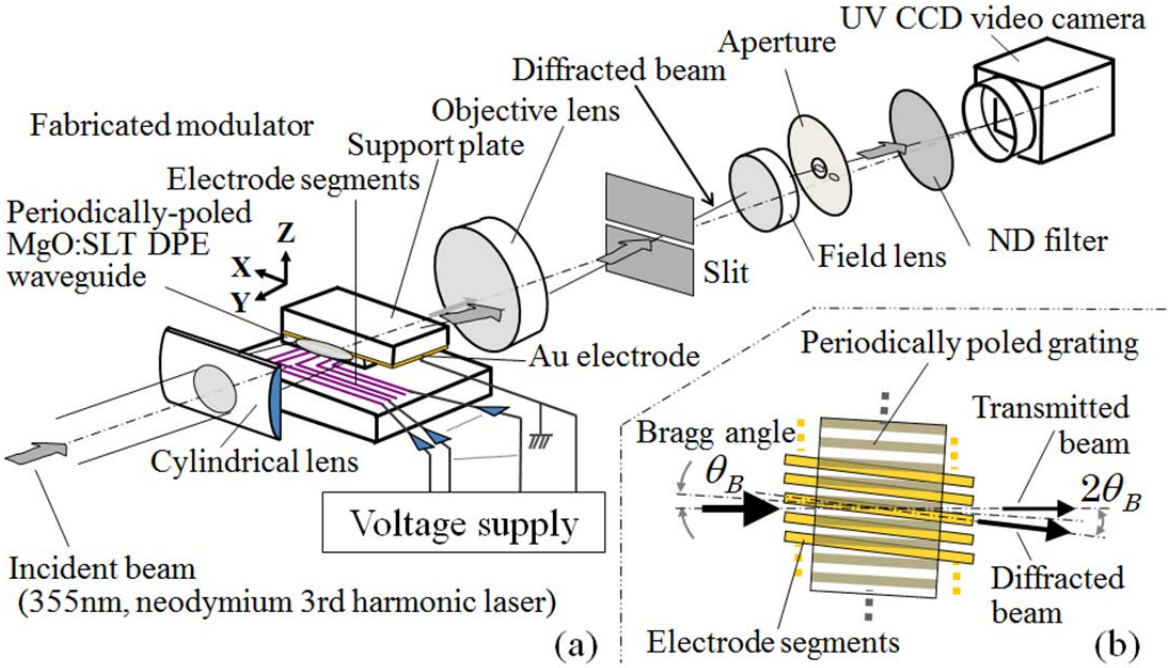


図4.14　(a)空間光変調の実験セットアップ，(b)入射光に対する周期分極反転構造，画素電極，回折光の方位

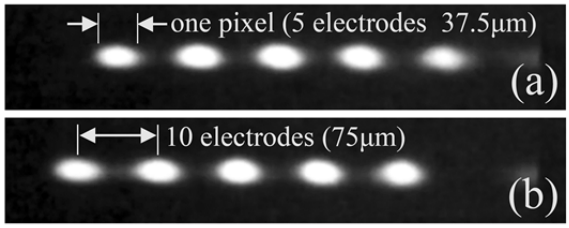


図4.15　空間光変調パターン

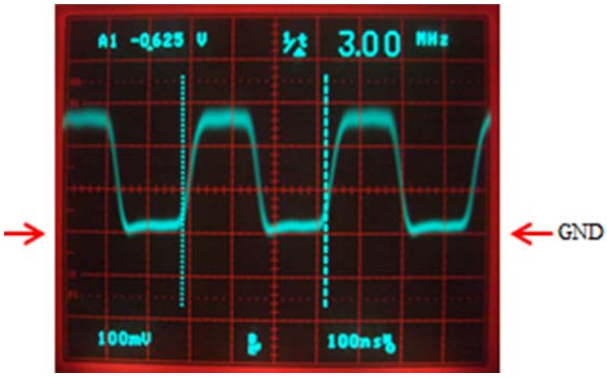


図4.16　矩形信号による回折光光強度変調波形

た．図 4.15 に駆動電圧 10 V で得た空間光変調パターンの 2 例を示す．回折光の光強度が最大となる電圧は設計で得られた回折効率を 100 %とする電圧の 6 V よりも高い 10 V が必要であった．この実験では 50 本の画素電極を隣り合う画素電極 5 本を 1 つにまとめて 1 画素として制御した．ゆえに制御した画素は 10 画素であり，1 画素の幅は 37.5 μm である．10 画素を奇数番目と偶数番目に分けて制御した．図 4.15(a)は奇数番目の画素のみ 10 V の電圧を印加し偶数番目の画素には電圧を印加しなかった時に得られた空間光変調パターンである．同様に図 4.15(b)は偶数番目の画素のみ 10 V の電圧を印加し奇数番目の画素には電圧を印加しなかった時に得られた空間光変調パターンを示す．レーザリソグラフィ装置に適した画素配列方向にやや長い楕円の光強度分布を持つ画素と良好なコントラストが得られた．最大の回折効率約 90 %と最大の消光比 50 ~ 100（画素毎に異なる）が得られた．

次に変調速度の計測を行った．図 4.14(a)のセットアップで用いている UV CCD ビデオカメラの代わりにフォトディテクターをおいた．振幅 10 V の周波数 3 MHz の矩形波電圧を変調器の全 10 画素に印加しフォトディテクターから出力される波形を確認した．図 4.16 に矩形信号による回折光光強度変調波形を示す．駆動周波数 3 MHz の時にフォトディテクター出力信号の立上がり，立下り時間はともに約 25 nsec が得られ十分な変調度が得られた．10 MHz の時は回折光強度の低下が認められ十分な変調度が得られなかった．駆動回路を高速化すれば 10 MHz は達成できる．

4.7　結言

本章では，レーザリソグラフィ装置用の周期分極反転構造を用いた紫外光用光導波路型電気光学ブラッグ回折型空間光変調器の設計・試作・評価について述べた．まずレーザリソグラフィ装置用の空間光変調器に有用な光導波路構造を検討した．深さの浅いこれまでの基本的な光導波路の利用は，高出力紫外レーザ光による光損傷の発生があることと，描画面での画素がレーザ描画には適さない光強度分布（長軸が画素配列方向で楕円率の大きな光強度分布）になるという問題がある．そこで，低損失光伝搬が可能で描画面での画素がレーザ描画には適する光強度分布（画素配列方向にやや長い楕円）となる大きなモードサイズを有するアニールプロトン交換光導波路を提案した．紫外光の光損傷耐性が高い 1 mol % MgO 添加の MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶にアニールプロトン交換光導波路を作製して，低損失な単一モードの大きなモードサイズ導波路を実証した．また基本的な光導波路と作製した大きなモードサイズを有する光導波路のプロトン交換とアニールプロセスの拡散係数を比較する事で互いのプロセスの違いを考察した. 光源に Nd:YAG レーザ 3 倍高調波紫外光固体レーザ（波長 $\lambda = 355$ nm）を用いて光強度密度 2.7 kW/cm^2 の寿命試験をおこない 1000 時間にわたって安定した性能が測定され，大きなモードサイズを有する光導波路は十分に実用になることを示した．

次に, 第 3 章の紫外光用空間光変調器の基本ユニットの構成に大きなモードサイズを有する光導波路を作製して，一次元に配列した空間光変調器の設計について述べた. レーザリソグラフィ装置の要求仕様を実現するために，周期分極反転構造の周期 Λ = 7.5 μm, 結晶厚さ g = 50 μm, 格子長さ L = 5 mm, 結晶厚さ方向のモードサイズ ~20 μm を採用した．空間光変調器としての特性を明らかにし設計パラメーターを最適化するためシミュレーションをおこなって描画面での精度の高い特性予測をおこなった．次に，1 mol % MgO 添加の MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶の＋Z 面に形成した波板電極と－Z 面の一様電極との間にパルス電圧を印加して良質な周期 7.5 μm 分極反転構造を得た．

最後に周期分極反転構造を中央に作製した MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶を保持結晶と金属を介し接合して空間光変調器の結晶部を作製した．また石英基板上にフォトリソグラフィにより画素電極を形成した．上記結晶部と画素電極の作製された石英基板を組み合わせ 10 画素一次元空間光変調器を作製した．光源に Nd:YAG レーザ 3 倍高調波紫外光固体レーザ（波長 $\lambda = 355$ nm）を用い，作製した空間光変調器の基本動作を確認した．その結果，10 V の低電圧駆動で良好な画素の光強度分布（画素配列方向にやや長い楕円）と高消光比（50 - 100）を得た．また変調器に矩形波電圧 10 V を印加し変調速度を確認した．駆動周波数 3 MHz の時に立上がり，立下り時間はともに約 25 nsec が得られ十分な変調度が得られた．10 MHz の時は回折光強度の低下が認められ十分な変調度が得られなかった．駆動回路を高速化すれば 10 MHz は達成できる．

以上の実験では 10 画素（50 指対数 : 5 指対数/画素構成）での実証となっているが，実用に際しては 1200 画素（3600 指対数 : 3 指対数/画素構成）が要求される．しかし，

性能面では実用上十分な画素形状と消光比が得られている．また，実施した寿命試験では 1200 画素（3600 指対数：3 指対数/画素構成）を十分に実現可能な結晶幅 35 mm のデバイス作製を実証している．一方，画素電極部は 50 指対数分が漸く実証できたところである．第 6 章で述べるセラミック多層基板を用いた方法を採用すれば目標の 1200 画素（3600 指対数：3 指対数/画素構成）の画素電極は実現可能となり，実用規模の空間光変調器は実現できると考えている．

参考文献

[4.1] P. G. Suchoski, T. K. Findakly, and F. J. Leonberger, “Stable low-loss proton-exchanged $LiNbO_3$ waveguide devices with no electro-optic degradation,” *Opt. Lett.*, vol. 13, no. 11, pp. 1050-1052, Nov. 1988.

[4.2] A. Loni, R. W. Keys, and R. M. De La Rue,”Characterization of waveguides formed by proton-exchange in MgO-doped and Nd:MgO-doped $LiNbO_3$: A comparison with congruent material,” *J. Appl. Phys.*, vol. 67, no. 9. pp. 3964-3967, May 1990.

[4.3] M. L. Bortz and M. M. Fejer, “Annealed proton-exchanged $LiNbO_3$ waveguides,” *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 23, pp. 1844-1846, Dec. 1991.

[4.4] K. Yamamoto, K. Mizuuchi, and T. Taniuchi, “Quasi-phase-matched second harmonic generation in a $LiTaO_3$ waveguide,” *IEEE J.Quantum Electron.*, vol. 28, no. 9, pp. 1909-1914, Sep. 1992.

[4.5] Yu. N. Korkishko, and V. A. Fedorov, *Ion Exchange in Single Crystals for Integrated Optics and Optoelectronics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999.

[4.6] M. Marangoni, R. Osellame, R. Ramponi, S. Takekawa, M. Nakamura, and K. Kitamura, “Reverse-proton-exchange in stoichiometric lithium tantalite,” *Opt. Express*, vol. 12, no. 12, pp. 2754-2761, Jun 2004.

[4.7] M. Lobino, M. Marangoni, R. Ramponi, E. Cianci, V. Foglietti, S. Takekawa, M. Nakamura, K. Kitamura, “Optical-damage-free guided second-harmonic generation in 1% MgO-doped stoichiometric lithium tantalite,” *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 1, pp. 83-85, Jan. 2006.

[4.8] M. Marangoni, M. Lobino, R. Ramponi, E. Cianci, and V. Foglietti, “High quality buried waveguides in stoichiometric $LiTaO_3$ for nonlinear frequency conversion,” *Opt. Express*, vol. 14, no. 1, pp. 248-253, Jan. 2006.

[4.9] M. Lobino, G. D. Marshall, C. Xiong, A. S. Clark, D. Bonneau, C. M. Natarajan, M. G. Tanner, R. H. Hadfield, S. N. Dorenbos, T. Zijlstra, V. Zwiller, M. Marangoni, R. Ramponi, M. G. Thompson, B. J. Eggleton, and J. L. O’Brien, “Correlated photon-pair generation in a periodically poled MgO doped stoichiometric lithium tantalate reverse proton exchanged waveguide,” *Appl. Phys. Lett.*, 99, 081110, Aug. 2011.

[4.10] Y. Furukawa, M. Nakamura, S. Takekawa, K. Kitamura, T. Hatanaka, K. Nakamura, H. Ito, A. Alexandrovski, and M. M. Fejer, “Nearly stoichiometric $LiTaO_3$ for bulk quasi-phase

matched devices," *in Advanced Solid-State Lasers*, C. Marshall, ed. Washington DC: Optical Society of America, 2001, vol. 15 OSA Trends Optics and Photonics, paper PD5.

[4.11] F. Juvalta, M. Jazbinsek, P. Günter, and K. Kitamura, "Electro-optical properties of near-stoichiometric and congruent lithium tantalite at ultraviolet wavelengths," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 23, no. 2, pp. 276-281, Feb. 2006.

[4.12] T. Suhara and M. Fujimura, *Waveguide Nonlinear-Optic Devices*, Berlin, Springer, 2003, pp. 141-147.

[4.13] H. Åhlfeldt, J. Webjörn, F. Laurell, and G. Arvidsson, "Postfabrication changes and dependence on hydrogen concentration of the refractive index of proton-exchanged lithium tantalate waveguides," *J. Appl. Phys.*, vol. 75, no. 2, pp. 717-727, Jan. 1994.

[4.14] G. M. Davis and N. A. Lindop, "Fabrication and characterization of pyrophosphoric acid proton exchanged lithium tantalate waveguides," *J. Appl. Phys.*, vol. 77, no. 12, pp. 6121-6127, Jun. 1995.

[4.15] T. Suhara and M. Fujimura, *Waveguide Nonlinear-Optic Devices*, Berlin, Springer, 2003, pp. 179-187.

[4.16] 井上敏之, 栖原敏明, "MgO:$LiNbO_3$ 周期分極反転構造電気光学ブラッグ偏向型一次元空間光変調器," 電子情報通信学会論文誌 C, vol. J96-C, no. 4, pp. 47-54, Apr. 2013.

[4.17] 井上敏之, "強誘電体周期分極反転構造を用いた電気光学変調器に関する研究," 博士学位論文, 大阪大学大学院工学研究科, Jan. 2015.

[4.18] N. Horikawa, T. Tsubouchi, M. Fujimura and T. Suhara, "Formation of domain-inverted grating in MgO:$LiNbO_3$ by voltage application with insulation layer cladding," *Jpn. J. Appl. Phys*, vol. 46, no. 8A, pp. 5178-5180, Aug. 2007.

第 5 章　赤外光用電気光学ラマン・ナス回折型光変調器

5.1　緒言

本章では，赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザを光源にしたCTP(Computer To Plate)印刷版の熱記録材料へ描画を行う画像記録装置の空間光変調器を設計する前段階として，原型となる赤外光用電気光学ラマン・ナス回折型光強度変調器の設計・試作・評価について述べる．電気光学光変調器は第 3 章と第 4 章で述べてきたように強誘電体光学結晶の周期分極反転構造を用いたブラッグ回折型光変調器によって実現されてきた[5.1 - 5.3][2]. ブラッグ回折は回折効率に対する角度選択性が高いので高い回折効率と良好な消光比を得るには入射光に平行光が要求される．CTP 印刷版の熱記録材料へ描画を行う画像記録装置への応用においては, 使用する光源は赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザである．このレーザの標準的な仕様は 500 μm 間隔で波長 808 nm のレーザ光が出射される 19 個のエミッターが一列に配列されている[5.4]．各エミッターの光出力は 2 - 3W 程度であるので，全エミッターからの光出力は 40 - 60W もの高出力になる．配列方向に垂直な方向のエミッターの厚さは数 μm なので，そこから出射されるビームの広がりはシリンドリカルレンズ（Fast axis collimation lens）により平行光とすることができる．しかしエミッターの配列方向の幅は 150 μm もありレンズを用いても平行光とすることができない．加えて 19 個あるエミッターの配列幅は約 10 mm の大きさになりレンズを用いて平行光となるようにしても発散角（半角）0.35°程度のビームになってしまう．このビームを光変調器への入射光としなければならない．第 2 章で述べたようにこのレーザ光源を用いる場合は, 角度選択性の低いラマン・ナス回折型光変調器($Q < 1$)とする必要がある．そこで，多くの画素を並べる為に周期分極反転構造の周期を短くしてラマン・ナス型の光変調器を設計した．しかし消光比が良くなかった．次に $1 < Q < 10$ すなわちブラック回折型とラマン・ナス回折型の中間の Q 値を持つ光変調器の設計をした．しかし試作して実験を行ったが消光比は不十分であった. そこで, 消光比を改善するために, 整数比の周期を持つ格子を複数段カスケードに接続したカスケード型調和格子を用いたラマン・ナス回折型光変調器を新たに提案して実証を試みた．その結果，消光比性能は改善し空間光変調器を設計するための光強度変調器の原型ができた[3].

本章では，光変調器の設計・試作・評価に加え，消光比の理論予測とシミュレーション結果を比較することにより実験結果の考察をおこなう.

5.2　基本構造の電気光学ラマン・ナス回折型光変調器

5.2.1　基本構造光変調器の試作と動作検証

まず多くの画素を並べる為に周期分極反転構造の周期を短くしてラマン・ナス型($Q < 1$)の光変調器を設計した．しかし高電圧駆動を必要とする上に消光比が良くなかっ

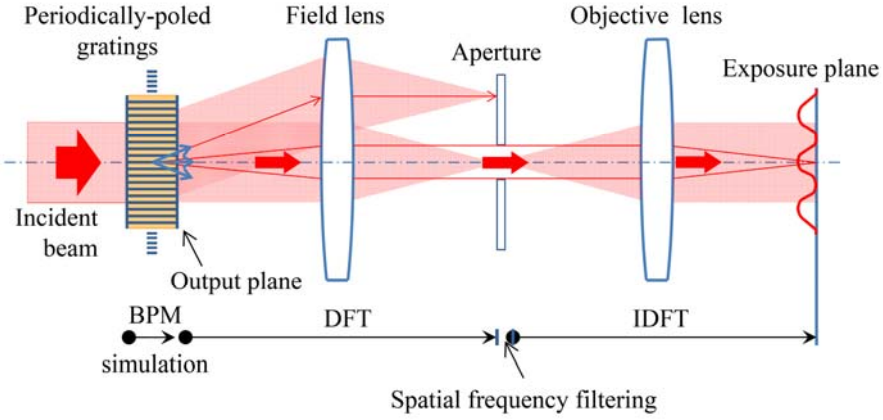


図5.1　基本構造光変調器のシミュレーションモデル

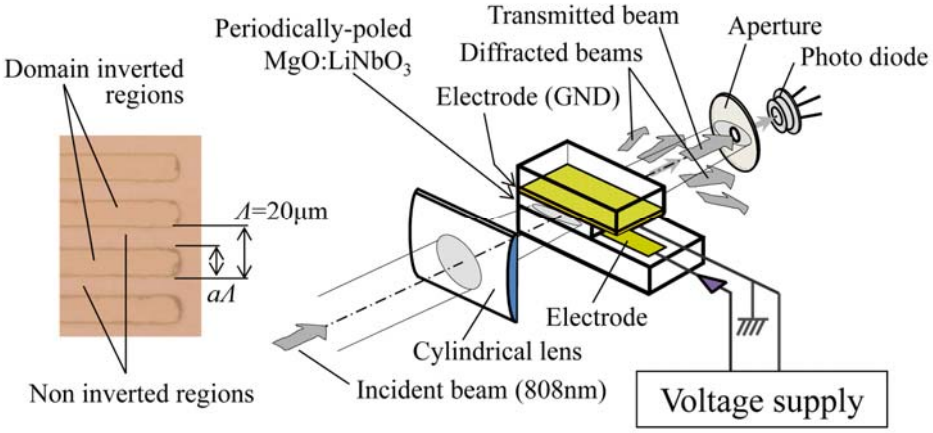


図5.2　作製した基本構造光変調器の分極反転構造と性能評価セットアップ

たので，格子厚さを増やせないか検討をおこなった．予備調査実験として，MgO (5 mol %):$LiNbO_3$ 結晶に周期が $\Lambda = 20$ μm で厚さが $L = 500$ μm の周期分極反転構造を有する回折格子($1 < Q < 10$)を基本デバイスとして評価した．高い光損傷耐性を持つ MgO:$LiNbO_3$ 結晶は高出力赤外光レーザを使う用途に適している．$\lambda = 808$ nm と $n_e = 2.18$ から，$Q = 2\pi\lambda L/n_e\Lambda^2 = 2.9$ である．

$Q < 1$ のラマン・ナス回折型回折格子の回折効率は式(2.20)で見積もりできる．しかし，$Q = 2.9$ の回折格子に対しては正しくない可能性があったので BPM シミュレーションをおこなうことにした．ここで計算には $r_{33} = 36$ pm/V[5.5]と結晶の厚さを $g = 40$ μm を用いた．

BPM シミュレーションモデルを図 5.1 に示す．シミュレーションの手順は次のとおりである．平面波を周期分極反転構造の回折格子に入射角 0° で入射させる．回折

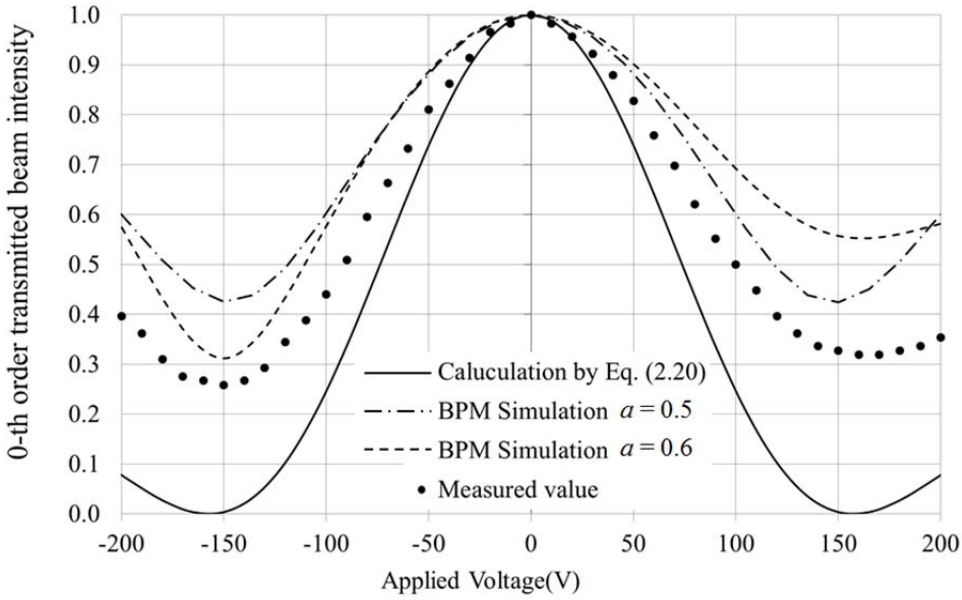


図5.3　基本構造光変調器の透過光の光強度の印加電圧依存性の計算結果，BPMシミュレーション結果及び実験計測結果

格子内の光伝搬は BPM シミュレーションによって計算して，出射端の光の複素振幅分布を求めた．BPM の手法は付録 A2 に述べる．そして，出射光の離散的フーリエ変換(DFT)を行った．フーリエ変換面での 1 次元フーリエ像と回折光を遮断するために挿入したアパーチャのフィルター関数を掛け合わせた．離散的逆フーリエ変換(IDFT)して描画面での複素振幅分布を計算した．最後に駆動電圧を印加した時の透過光の光強度の印加電圧依存性を計算した．シミュレーションの手順の詳細は図 4.8 の説明とおなじである．計算時間を短縮する為に，結晶の厚さ方向は一様な分布をするものとして幅方向に 1 次元のシミュレーションを行った．

次に回折格子周期 $\Lambda = 20$ μm，長さ $L = 500$ μm で厚さ(電極間距離と同一の) $g = 40$ μm の基本形の光変調器を作製し，図 5.2 に示すような実験系を作って評価実験を行った．製作した $MgO:LiNbO_3$ 結晶の周期分極反転構造のデュ―ティ比は $a \cong 0.6$ であった．また，光源として波長 $\lambda = 808$ nm のシングルモード半導体レーザを評価実験に使用した．回折光を遮るアパーチャを入れて，印加電圧に対する透過光の光強度の印加電圧依存性を計測した．

図 5.3 に計算結果，BPM シミュレーションの結果及び実験の計測結果を示す．式(2.20)から求められる 0 次光透過率 η_0, 周期分極反転構造のデューティ比 $a = 0.5$ と 0.6 に対する BPM シミュレーションから計算される印加電圧に対する透過光強度をそれぞれ実線，1 点破線そして破線で表す．また，実験計測結果を黒丸で表した．結晶へ電圧を印加するプラス電極が結晶と完全に密着しておらず電圧降下が発生している可能性があったので，実験結果に計算結果およびシミュレーション結果を合わせる為に電圧を 0.67 倍した．実験結果（$a \cong 0.6$）の電圧の正負に対する非対称性はシミュレ

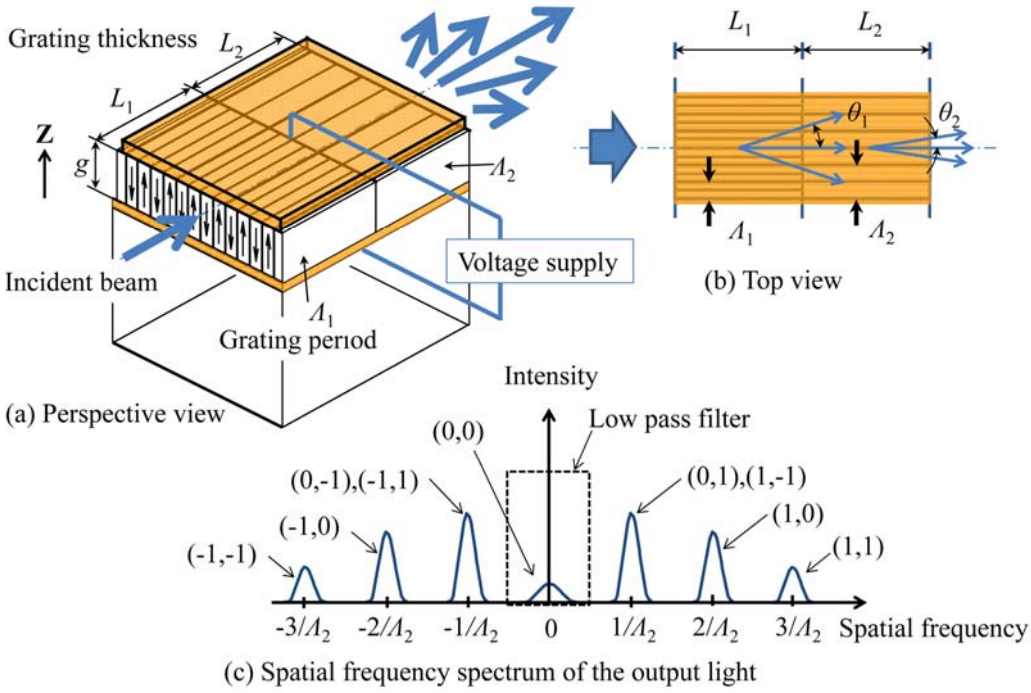


図5.4　提案したカスケード型周期分極反転構造と出射光のフーリエ変換面での空間周波数スペクトル

ーション結果（$a = 0.6$）が示す非対称性と対応していて，$a \neq 0.5$ の場合には結晶内平均屈折率が電圧の正負により増減する事による屈折の効果があらわれたものと思われる．

5.2.2　基本構造光変調器の問題点

式(2.20)から計算した結果は, 印加電圧が約 ±150 V の時に 0 次光透過率がほぼ 0 となり高い消光比となることを示しているが，実験結果は約 0.3 となり消光比に換算すると 3.3 の低い値を示した. 式(2.20)から計算した結果が実験結果と違った理由を考察する．性能評価実験で光源にシングルモードレーザを用いて平行光を入射角 0° でも入射させた．この点は式(2.20)の適用できる条件と一致している．しかし実験条件と式(2.20)の適用できる条件が違うのは Q パラメーターである．作製し計測に用いた周期分極反転構造の回折格子の Q パラメーターは $Q = 2.9$ でありラマン・ナス回折とブラッグ回折の中間の Q 値を持つ回折格子である．一方，式(2.20)は本来 $Q < 1$ の範囲で適用できる式である．従って式(2.20)から計算した結果と実験結果は良い一致を示さない．適用範囲外の Q パラメーターを持つ回折格子に対し式(2.20)を用いた点が計算結果と実験結果の相違を生じさせた原因と考えている．一方，$Q < 1$ の仮定を用いていないので BPM シミュレーションは実験結果に近い値を示しており，光変調器を設計する際の性能予測に利用できる事がわかった．小さな画素サイズ，低電圧駆動そして高消光比を同時に得る事は，基本構造の光変調器では困難な事が分った．

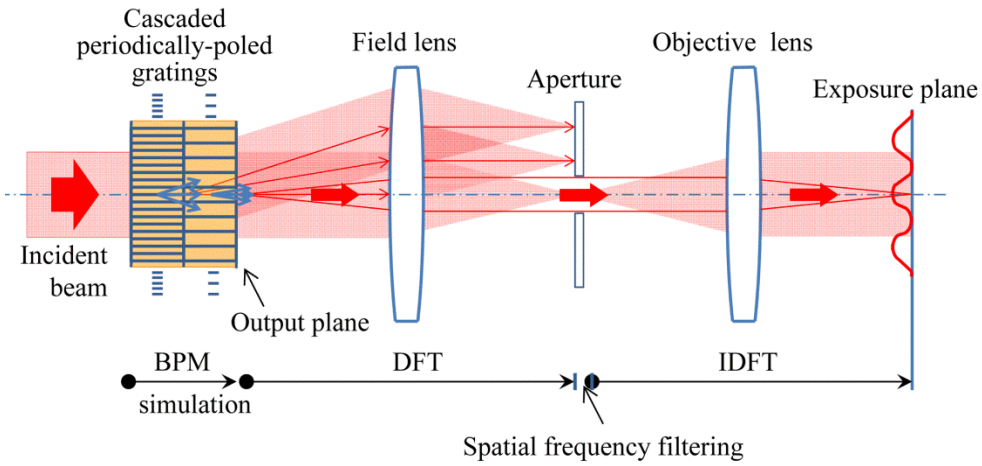


図5.5　提案したカスケード型周期分極反転構造のシミュレーションモデル

5.3　カスケード型周期分極反転構造を用いたラマン・ナス回折型光変調器の提案

5.3.1　新構造の提案と消光比改善の原理

ラマン・ナス回折型光変調器の消光比性能を改善するために，図 5.4 に示すようなカスケード型周期分極反転構造のラマン・ナス回折格子で構成されている新しいタイプの EO 変調器を提案した．この変調器は 2 段の回折格子で構成される．1 段目には 5.2 節で示した基本構造光変調器の回折格子構造をそのまま用いた. 2 段目の回折格子の周期 Λ_2 は 1 段目 Λ_1 の 2 倍($\Lambda_2 = 2\Lambda_1$)にした．1 段目と 2 段目の回折格子の長さは同一($L_1 = L_2 = L$)にした. また, 電圧印加用の電極は 1 段目と 2 段目を共通の電極にした.

次に動作原理について述べる．光が入射角 0°　で変調器の回折格子に入射する．電極に電圧が印加されると 1 段目の回折格子によって光が回折される．その後，1 段目の回折格子で回折されなかった透過光は 2 段目の回折格子によって回折される．この 2 段のカスケード型回折格子は整数比の周期を持つ格子が複数段カスケードに接続されたカスケード型調和周期格子となっているので，カスケード型回折格子の出射光の基本空間周波数は図 5.4(c)に示すように 2 段目の回折格子の空間周波数 $1/\Lambda_2$ と同じ空間周波数となる.

ここで 1 段目の q 次回折光が 2 段目の p 次回折となったのちの出射光要素を(q, p)で表すことにする．出射光要素(q, p)は，$q/\Lambda_1+p/\Lambda_2=(2q+p)/\Lambda_2$ の空間周波数にピーク強度を持つ．$\Lambda_2 = 2\Lambda_1$ であるから(0, ±1)と(±1, ∓1)は互いに重なり合う．それゆえに，回折光はカットオフ周波数 $1/2\Lambda_2$ の空間周波数ローパスフィルターとなる幅のアパーチャによって完全に遮られる．ところが(1, -1)と(-1, 1)の光はアパーチャを通過して出力光として利用する(0, 0)の光と重なり合わない. 即ち 1 段目で回折した光は 2 段目で空間周波数 0 に戻らないので，1 段目の透過光の光強度が最小になる電圧をかけると，

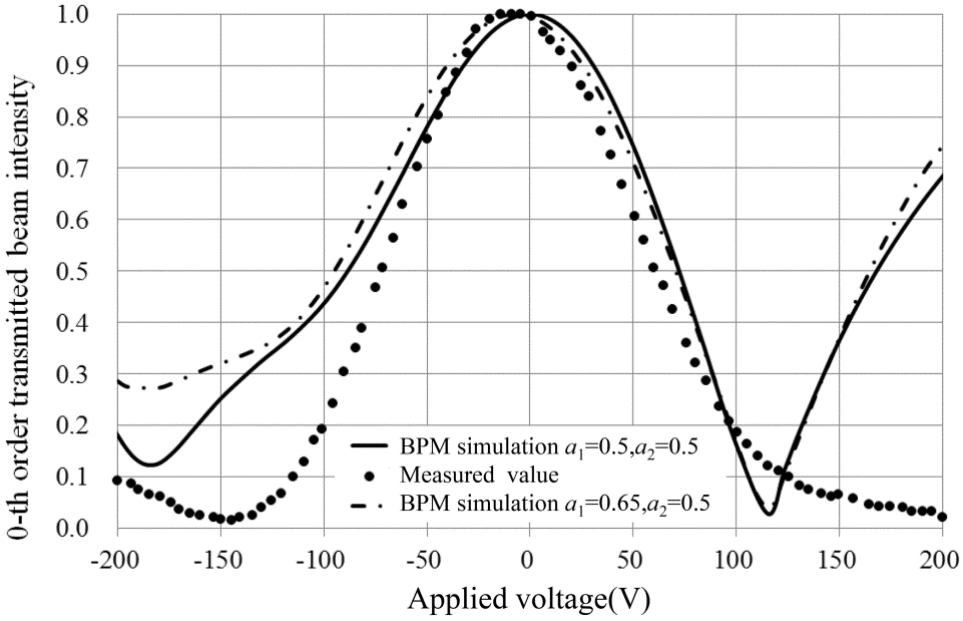


図5.6　提案したカスケード型周期分極反転構造を用いたラマン・ナス回折型光変調器の透過光の光強度の印加電圧依存性の計算結果，BPMシミュレーション結果及び実験計測結果

透過光の光強度が 2 段目の回折によって更に減少される．このように調和周期（整数比の周期）を持つ格子を複数段カスケードに接続したカスケード型調和周期格子によって，基本構造のラマン･ナス回折型光変調器の消光比よりも高い消光比が得られる．

5.3.2　シミュレーションによる特性予測と設計

BPM シミュレーションは前節で性能予測に利用できる事が分ったので，このカスケード型調和周期格子の性能予測に用いた. 図 5.5 にシミュレーションモデルを示す. 要素(0, 0)の透過光の光強度の印加電圧依存性を計算した．図 5.6 にカスケード型調和周期格子のパラメーターΛ_1 = 20 μm, Λ_2 = 40 μm, L_1 = L_2 = 500 μm, Q_1 = 2.9, Q_2 = 0.79, g = 52 μm での計算結果を示す．1 段目と 2 段目の回折格子のデューティ比をそれぞれ a_1, a_2 とおく. a_1 = 0.5，a_2 = 0.5 に対して行った BPM シミュレーションの結果を実線で示す. 図 5.3 と同様に BPM シミュレーション結果に対して横軸の印加電圧 V を 0.67V で置き換えた．約 120 V で約 50 の高い消光比が期待される結果となった.

5.3.3　試作と性能評価

設計したカスケード型調和周期格子のデバイスを作製した後に図 5.7 に示すセットアップを用いて実験を行った．厚さ 0.5 mm の MgO (5 mol %):$LiNbO_3$ 結晶を用いて，1 段目 Λ_1 = 20 μm, L_1 = 500 μm, 2 段目 Λ_2 =40 μm, L_2 =500 μm の周期分極反転構造をコルゲーション電極を用いたパルス電圧印加法[5.6]にて 1 段目と 2 段目の回折格子を同時に作った．電圧印加時のリーク電流を避けるために結晶の－Z 面にスパッタにより

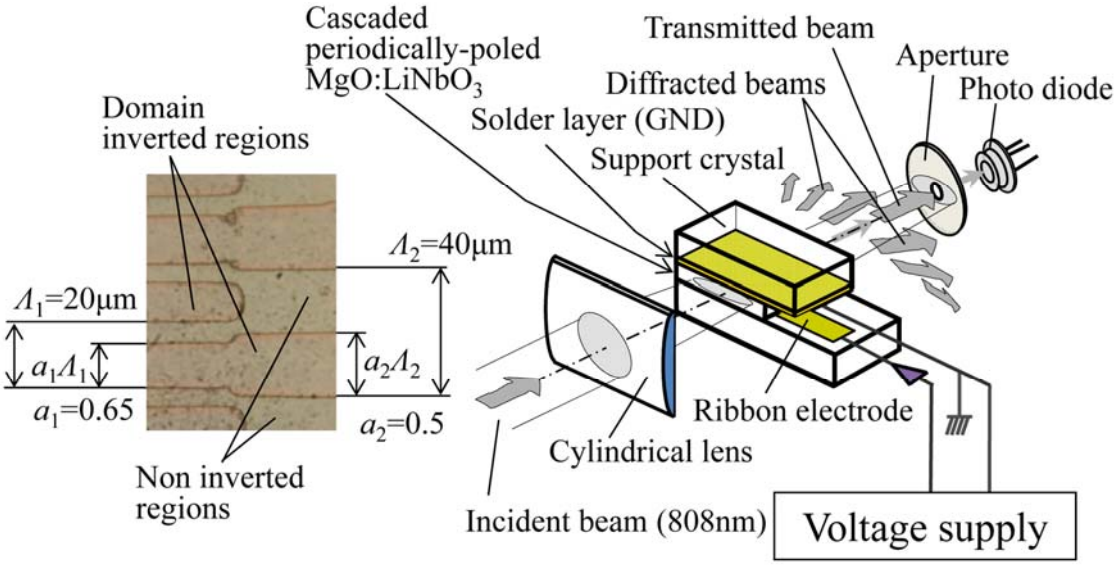


図5.7　作製したカスケード型周期分極反転構造を用いたラマン・ナス回折型光変調器の分極反転構造と性能評価セットアップ

SiO_2 膜を堆積[5.7]させた．周期分極反転構造を作製した結晶とサポート板（$MgO:LiNbO_3$，厚さ 0.5 mm）の接合面となる面に Cr/Ni/Au をこの順番で成膜し，はんだを用いて接合した．接合面のはんだ層は結晶に電圧をかける際の接地側の電極として用いる．その後，結晶を切削研磨して約 52 μm の厚さとした[2]．1 段目と 2 段目の周期分極反転構造のデューティ比はそれぞれ $a_1 = 0.65$ と $a_2 = 0.5$ であった．

次に波長 808 nm のマルチエミッター半導体レーザを用いて作製した変調器の性能を調べた．ここで用いた半導体レーザとその照明光学系は後述する第 6 章で用いたものと同じである．ゆえに変調器への入射光は発散角（半角）0.35°のビームである．リボン形状の電極を周期分極反転結晶に押し当てて，結晶の接合面のはんだ層との間に電圧をかけた．回折光を遮るためにアパーチャを挿入して，透過光の光強度の印加電圧依存性を計測した．$MgO:LiNbO_3$ 結晶の抗電界 $E_c \sim 4.45$ kV/mm [5.8]よりも低い印加電界 3.8 kV/mm（結晶厚さ 52 μm の時の印加電圧$|V| \leq 200$ V）をかけた．

図 5.6 に透過光の光強度の実験結果を黒点によって示す．印加電圧が大凡－145 V の時に透過光の光強度は 1.4 %の最小値となった．消光比では約 70 となって実用上十分な値が得られた．製作したデバイスのデューティ比 $a_1 = 0.65$，$a_2 = 0.5$ の BPM シミュレーションの結果を図 5.6 に一点鎖線で示す．横軸の電圧 V を実験で発生した電圧降下 0.67 倍とオフセット電圧 7 V を引いて補正し $0.67V$-7 で置き換えた．

透過光の光強度を最小にする印加電圧の値と計測結果はシミュレーションによって予測された値から幾分かずれた結果となったが，計測した最小の透過光の光強度はシミュレーション結果に近い値を示した．

5.4 結言

本章では，赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザを光源にしたCTP(Computer To Plate)印刷版の熱記録材料へ描画を行う画像記録装置の空間光変調器を設計する前段階として，原型となる赤外光用電気光学ラマン・ナス回折型光強度変調器の設計・試作・評価について述べた．赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザを用いる場合は，角度選択性の低いラマン・ナス回折型光変調器($Q < 1$)とする必要がある．まず多くの画素を高密度に並べる為に周期分極反転構造の周期を短くしてラマン・ナス型の光変調器を設計した．その結果は消光比が良くなかったので，次にブラック回折型とラマン・ナス回折型の中間の $Q = 2.9$ を持つ基本構造のラマン・ナス型光変調器の設計をおこなった．試作して実験を行ったところ，やはり回折効率も消光比も実用には不十分であった．小さな画素サイズと低電圧駆動そして高消光比を同時に得る事は基本構造のラマン・ナス型光変調器では困難であるということが分った．次に，消光比性能を改善するために，整数比の周期を持つ格子を複数段カスケードに接続したカスケード型調和格子を用いたラマン・ナス回折型光変調器を新たに提案して設計とシミュレーションをおこない作製した．また BPM シミュレーションは性能予測に有用である事がわかった．発散角（半角）~ 0.35°のビームを入射角 0°で変調器へ入射させた検証にて実用上十分な約 70 の高い消光比が得られることを実証した．消光比は改善しラマン・ナス回折型空間光変調器を実現するための光強度変調器の原型ができた．

参考文献

[5.1] H. Gnewuch, C. N. Pannell, G. W. Ross, P. G. R. Smith, and H. Geiger, “Nanosecond response of Bragg deflectors in periodically poled $LiNbO_3$,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 12, pp. 1730-1732, Dec. 1998.

[5.2] M. Yamada, “Electrically induced Bragg-diffraction grating composed of periodically inverted domains in lithium niobate crystals and its application devices,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, no. 11, pp. 4010-4016, 2000.

[5.3] T. Inoue, and T. Suhara, “Electrooptic Bragg deflection modulator using periodically poled MgO:$LiNbO_3$,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 23, no. 17, pp. 1252-1254, Sep. 2011.

[5.4] http://www.laserenterprise.com/high-power-laser-diodes/BLM40-60W.html.

[5.5] R. J. Holmes, Y. S. Kim, C. D. Brandle, and D. M. Smyth, “Evaluation of crystals of $LiNbO_3$ doped with MgO or TiO_2 for electrooptic devices,” *Ferroelectrics*, vol. 51, no. 1, pp. 41-45, 1983.

[5.6] T. Suhara and M. Fujimura, *Waveguide Nonlinear-Optic Devices*, Berlin, Springer, 2003, pp. 179-187.

[5.7] N. Horikawa, T. Tsubouchi, M. Fujimura and T. Suhara, “Formation of domain-inverted grating in MgO:$LiNbO_3$ by voltage application with insulation layer cladding,” *Jpn. J. Appl. Phys*, vol. 46, no. 8A, pp. 5178-5180, Aug. 2007.
[5.8] A. Kuroda, S. Kurimura, and Y. Uesu, “Domain inversion in ferroelectric MgO:$LiNbO_3$ by applying electric fields,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 69, no. 11, pp. 1565-1567, Sep. 1996.

第 6 章　赤外光用高性能電気光学ラマン・ナス回折型空間光変調器

6.1　緒言

本章では, 第 5 章で新たに提案し実証したカスケード型調和周期格子を用いた赤外光用電気光学ラマン・ナス回折型空間光変調器の設計・試作・評価について述べる.

CTP(Computer To Plate)印刷版の熱記録材料へ描画を行う画像記録装置において, 製品と同等の生産性（解像度 2400 dpi で 939 mm×636 mm サイズの印刷版全面を 1 分以内に描画できる生産性）を実現できる仕様の空間光変調器の実証を研究目標とした. 図 6.1 にカスケード型周期分極反転構造を用いた一次元ラマン・ナス回折型空間光変調器の基本構造を示す. 印刷製版工程に求められる上記生産性に対して印刷版の感度, 光源のレーザ出力パワー等を考慮して, 赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザを光源にした空間光変調器の仕様を画素数 1024, 変調速度 200 kHz, 消光比 20 とした（第 1 章参照）.

空間光変調器の回折格子の設計に際して, 第 5 章で提案した整数比の周期を持つ格子を複数段カスケードに接続したカスケード型調和格子の 2 段構成タイプを検討した. しかし, 目標性能に至らなかった. そこで, 1 段目と同じ周期の回折格子を 3 段目に加えた 3 段構成タイプを検討した. 設計段階での性能評価には第 5 章で性能予測に有効と判断した BPM シミュレーションを用いた. 赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザを光源に用いるので変調器への入射光を平行光に出来ない. 入射角を 0 ° と 0.35 °の平面波を変調器へ入射させた場合についてシミュレーションを行い変調特性

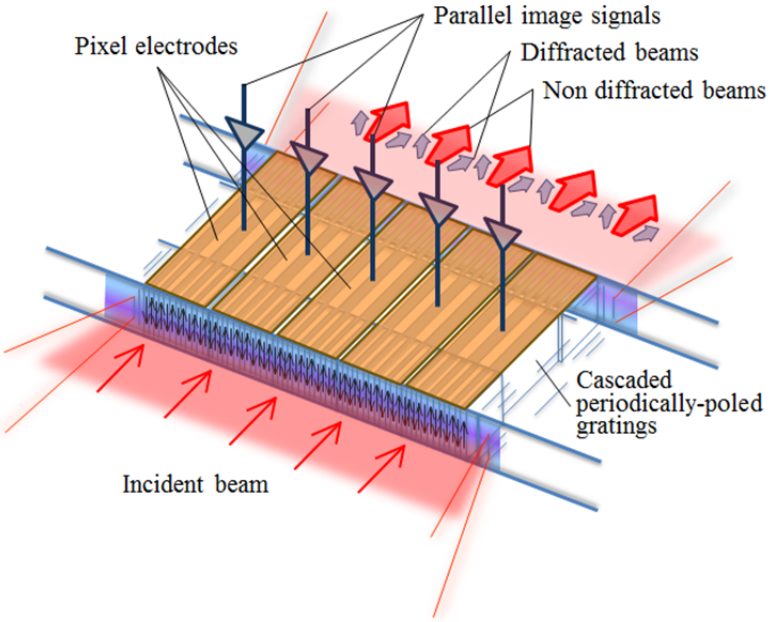


図6.1　カスケード型周期分極反転構造を用いた一次元ラマン・ナス回折型空間光変調器の基本構造

を評価した．試作では第 3 章で述べた保持結晶を用いて金属を介し薄板結晶と接合する構造に改良を加えた．1024 本の画素電極は駆動回路との接続に課題が見つかり，セラミック多層基板を用いる事でようやく実現できた．試作した空間光変調器を新たに設計した照明系及び再回折結像光学系と組み合わせて光学ヘッドを作り，露光面に相当する光学ヘッドの出力面でのビーム形状の性能評価を行って空間光変調動作を実証した．光学ヘッドを市販の CTP 印刷版作製装置に搭載して CTP 印刷版にテストパターンを描画しパターンの品質を確認した．本章では，空間光変調器の設計・試作・評価に加え，消光比の理論予測とシミュレーション結果を比較することにより実験結果の考察をおこなう．また，シミュレーションから計算された出力パターンと実験で得られた出力パターン及び CTP 版面の露光パターンを比較する事により考察をおこなう．最後に実用化に向けた課題などについて考察する．

6.2 カスケード型周期分極反転構造の設計

6.2.1 2 段構成タイプの設計と問題点

最初に実用レベルの空間光変調器の仕様を検討した. 印刷製版工程に求められる生産性（解像度 2400 dpi で 939 mm×636 mm サイズの印刷版を 1 分以内に描画できる生産性）に対して印刷版の感度，光源のレーザ出力パワー等を考慮して，空間光変調器の画素数を 1024，変調速度を 200 kHz とした．次のように考えた．ビーム走査画像形成方式を回転ドラム方式（付録 A1 参照）とした．印刷版 939 mm×636 mm の長辺側を回転ドラムに巻着させる．変調速度 200 kHz であるから 2400 dpi の解像度で描画するときの回転ドラムの周速（ドラム表面の速度）は，2100 mm/s(= 25.4 mm / 2400 dpi ×200 kHz)である．このとき回転ドラムの直径を 335 mm（周長約 1050 mm）とすると，回転ドラムの回転数は 2rps(= 2100 mm/s / 1050 mm)となる．同時に副走査軸方向（図 A1.2 参照）の光学ヘッド移動速度は，22 mm/s(= 1024 pixel×25.4 mm / 2400 dpi ×2 rps)と求まる．印刷版の短辺は 636 mm であるから，印刷版の全面描画にかかる時間は，29 s(= 636 mm / 22 mm/s)となる．自動巻着装置による回転ドラムへの印刷版の巻着と取出し時間を考慮すれば, 解像度 2400 dpi で 939 mm×636 mm サイズの印刷版を連続的に 1 分以内に描画完了できる生産性を達成できる．描画面で 1024 画素の総光量が 30 W となるレーザを使用した場合の印刷版の感度は 130 mJ/cm^2(= 30 W / (210 cm/s×1.1 cm))となる．これは現在の印刷版の標準的な感度である．

結晶メーカーにて安定的に多く生産されている 5 mol % MgO 添加 $LiNbO_3$ 結晶は 3 インチのウエハである．この 3 インチウエハから余裕を見て約 67 mm×10 mm の結晶を切り出す事にした．有効幅約 65 mm として 1024 画素が収まるよう 1 画素サイズを 60 μm に決めた．次に，第 5 章で提案した 2 段構成タイプを基本に回折格子の設計を行った．第 2 章で説明したラマン・ナス回折型空間光変調器の空間周波数スペクトルを用いた検討をこの設計に適用して，1 画素サイズ 60 μm を 3 周期分の周期分極反転構造で構成することにした．従って，カスケード型回折格子の最大の周期は 20 μm と

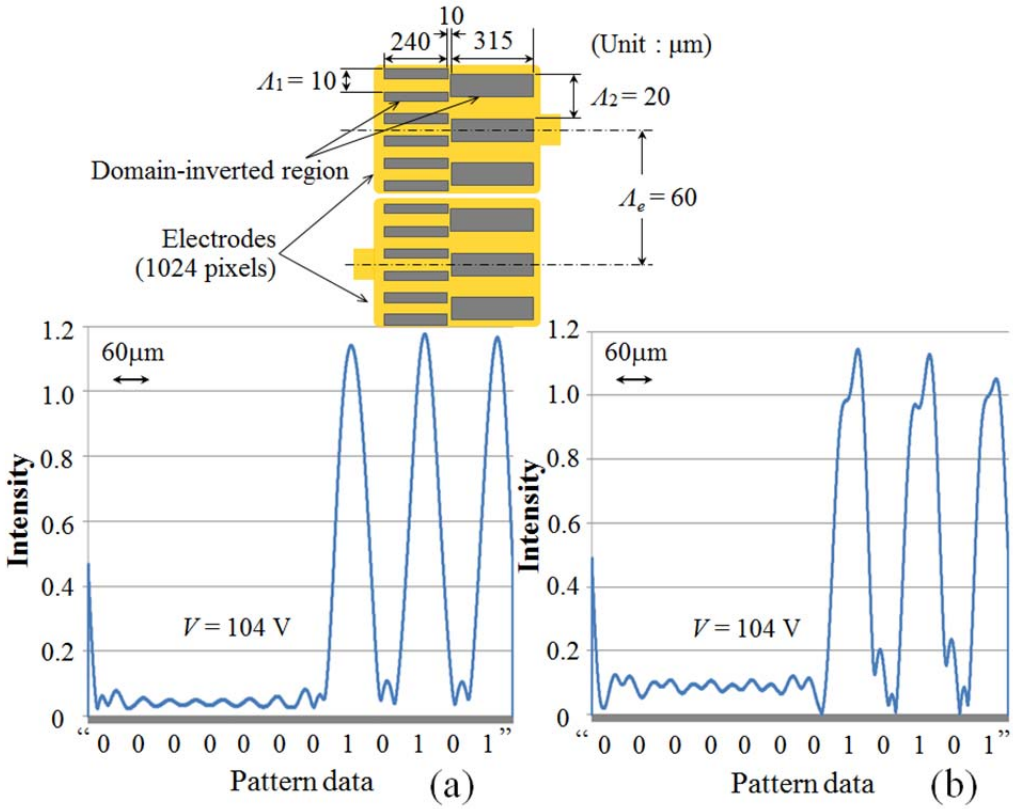


図6.2　2段構成タイプのカスケード型回折格子の構造と露光面の12画素パターンの光強度分布(a)入射角0°　(b)入射角0.35°

なる．作りやすさを考慮し調和格子の周期を 20 μm とその 1/2 の 10 μm とした．ここで，BPM シミュレーションを用いてカスケード型調和周期回折格子の最適化を行った．変調器に電圧を印加した時の 0 次光透過率が低くなるよう周期 10 μm と 20 μm の格子其々の長さを決めた．その結果，第 1 段目及び第 2 段目の回折格子の周期と厚さはそれぞれ Λ_1 = 10 μm，L_1 = 240 μm，Λ_2 = 20 μm，L_2 = 315 μm であった．また，結晶厚さをg = 35 μm としたときの 0 次光透過率を最小とするための電圧は 104 V であった．

CTP 印刷版の熱記録材料へ描画を行う画像記録装置への応用においては，使用する光源は赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザである（第 5 章参照）．照明光学系を用いて~ 10 mm 幅のエミッター配列から出射される光を結晶の有効幅 65 mm の大きさに広げて，平行光が出射するようコリメートする．コリメートしても発散角（半角）0.35°のビームになる．そこで簡単のために入射光を平面波におきかえて入射角が 0°と 0.35°のそれぞれの場合に変調器へ入射させ再回折結像光学系の出力面（描画面）での 12 画素パターンの光強度分布をシミュレーションにより求めた．図 6.2 に 12 画素パターンの光強度分布を示す．ここで画素電極へ 104 V を印加した画素を“0”，電圧を印加しない画素を“1”と表示する．入射角 0.35°において，“010101”

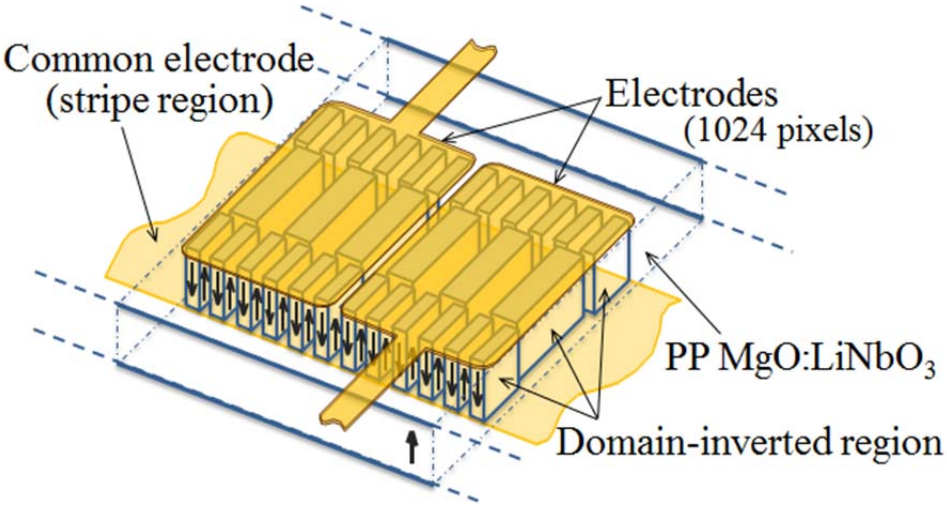


図6.3　3段構成タイプのカスケード型回折格子の構造（2画素のみ表示）

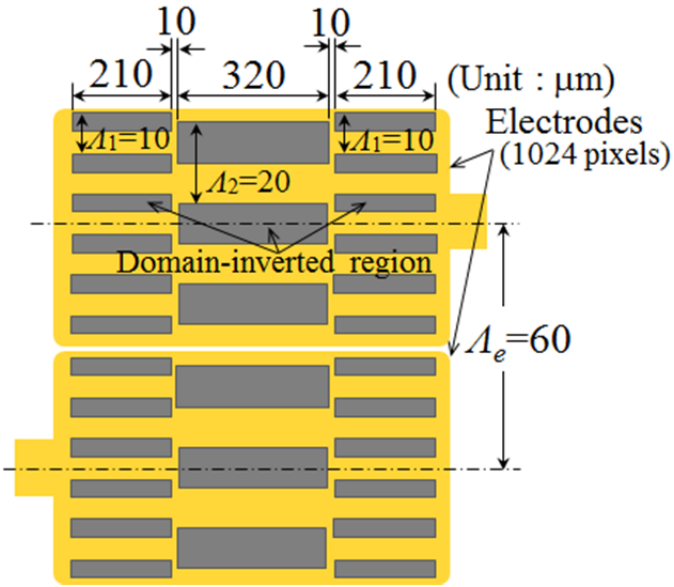


図6.4　設計した3段構成タイプのカスケード型回折格子の仕様（2画素のみ表示）

パターンの“1”にサイドローブが発生することがわかった．サイドローブは描画の際の不要光なので描画パターンの形状を崩す原因になる．そこで 2 段構成タイプの採用は望ましくないと判断した. ここで得られた消光比は, 入射角 0 ° でも約 26 であり, 第 5 章で述べた変調器で得られたほどの高い値は得られなかった．第 5 章では格子周期が $\Lambda_1 = 20$ μm, $\Lambda_2 = 40$ μm であったのに対して，ここでは半分の周期（$\Lambda_1 = 10$ μm, $\Lambda_2 = 20$ μm）の回折格子を用いている事が消光比を劣化させていると思われる．しかし, 1 画素の大きさは 60 μm なので周期を広げる事は出来ない. $\Lambda_1 = 10$ μm, $\Lambda_2 = 20$ μm の 2 つの周期を使ってサイドローブの発生を抑える必要がある.

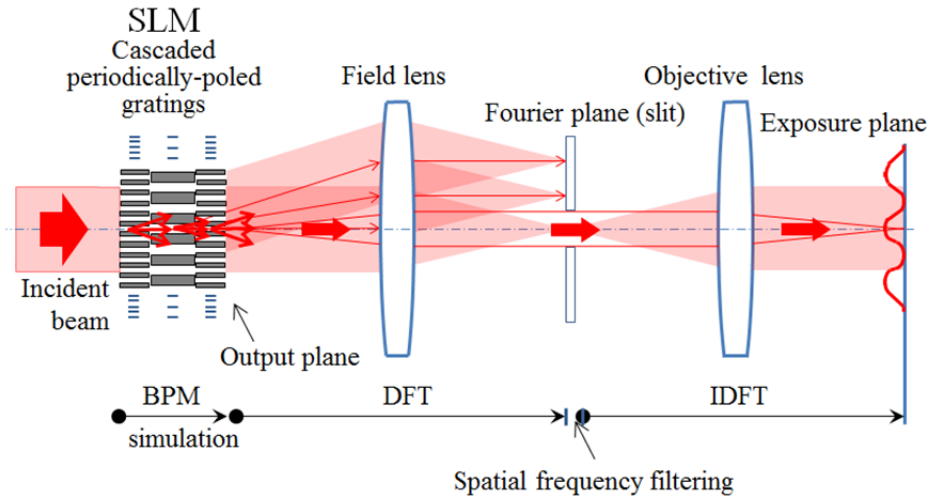


図6.5　3段構成タイプのカスケード型周期分極反転構造のシミュレーションモデル

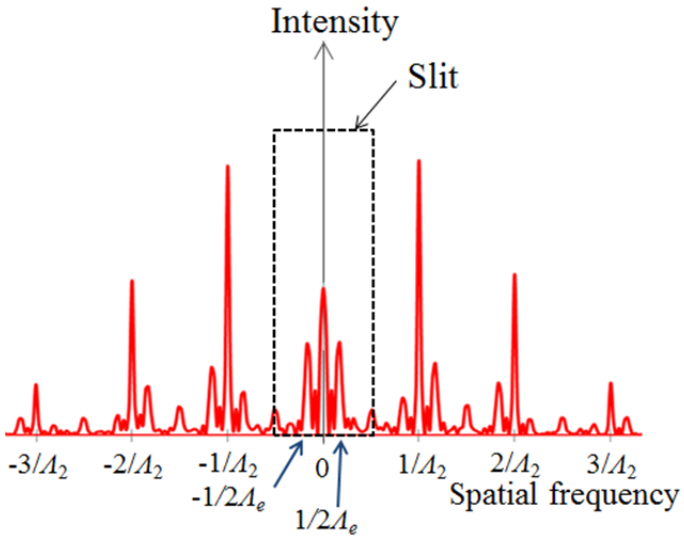


図6.6　3段構成タイプのカスケード型周期分極反転構造の出射光のフーリエ変換面での空間周波数スペクトル（入射角0°）

6.2.2　3 段構成タイプの設計と性能予測

上記の 2 段構成タイプの問題解決にむけて，3 段構成タイプを提案し設計をおこなった．まず BPM シミュレーションを用いてカスケード型調和周期回折格子の最適化を行った．シミュレーションモデルを図 6.5 に示す．最適化方法は 0 次光透過率が最小となるように 1，2，3 段それぞれの回折格子の長さを調整した．最適化した回折格

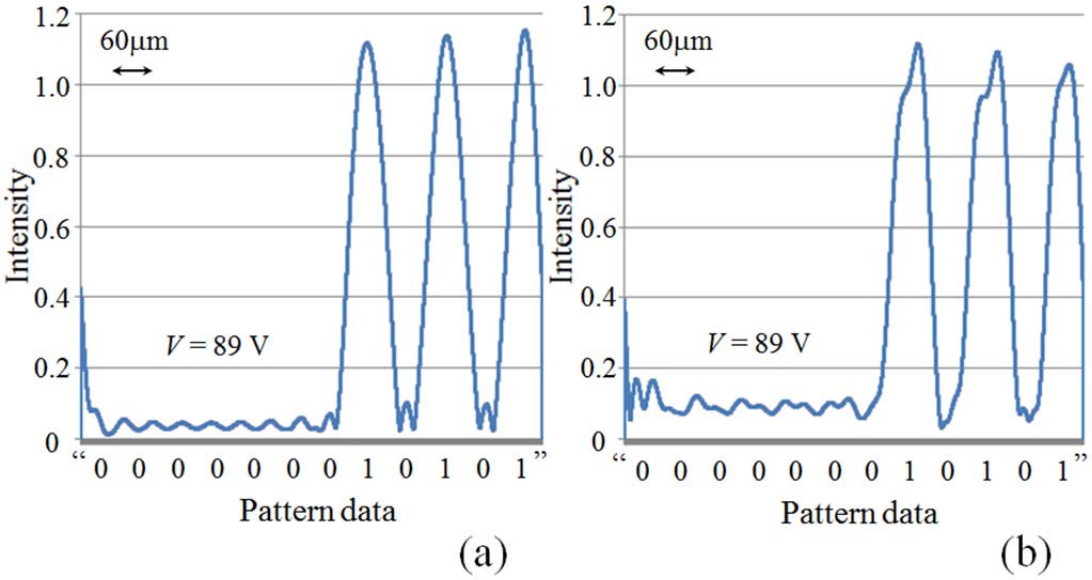


図6.7　3段構成タイプのカスケード型回折格子の出力面（露光面）の12画素パターンの光強度分布(a)入射角0 °　(b)入射角0.35 °

子の構成は第 1 段と第 3 段が同じ回折格子を持つ Λ_1-Λ_2-Λ_1 構成である．そのパラメーターは Λ_1 = 10 μm，Λ_2 = 20 μm，L_1 = 210 μm，L_2 = 320 μm である．また，画素電極の周期すなわち画素サイズは Λ_e = 60 μm である．そして結晶厚さ g = 35 μm の時に 0 次光透過率を最小とするための電圧は 89 V であることがわかった. この時の電界は 2.54 kV/mm で MgO:$LiNbO_3$ 結晶の抗電界~ 4.45 kV/mm[6.1]より小さい．空間光変調器の出射光のフーリエ変換面で計算した空間周波数スペクトルを図 6.6 に示す．破線で示すようにフーリエ変換面にローパスフィルター（スリット）を入れる事で周期分極反転構造による回折光が遮断され透過光のみが出力されるので高い消光比が得られると予測される．

図 6.7 は設計した空間光変調器の出射光の再回折結像光学系の出力面のシミュレーションの結果を示す．平面波を入射させて空間光変調器の隣接 12 画素でのパターンデータ“000000010101”に対する露光面での光強度分布を計算した．図 6.7 (a)は空間光変調器への入射角 0 °の結果で，(b)は入射角 0.35 °の結果を示す．ここで消光比を“0”画素の平均光強度に対する“1”画素の平均光強度の比で表す事とする．得られた結果は，空間光変調器への光の入射角 0 °の時に，“000000”の位置で 26，そして，“010101”の位置で約 15 であった．また，“010101”の位置でサイドローブの発生はない．

赤外光マルチエミッター半導体レーザを用いた用途に十分に使える回折効率に対する低い角度選択性を持ち，高解像度で高消光比の性能を持つ空間光変調器の実現が期待できる結果が得られた．

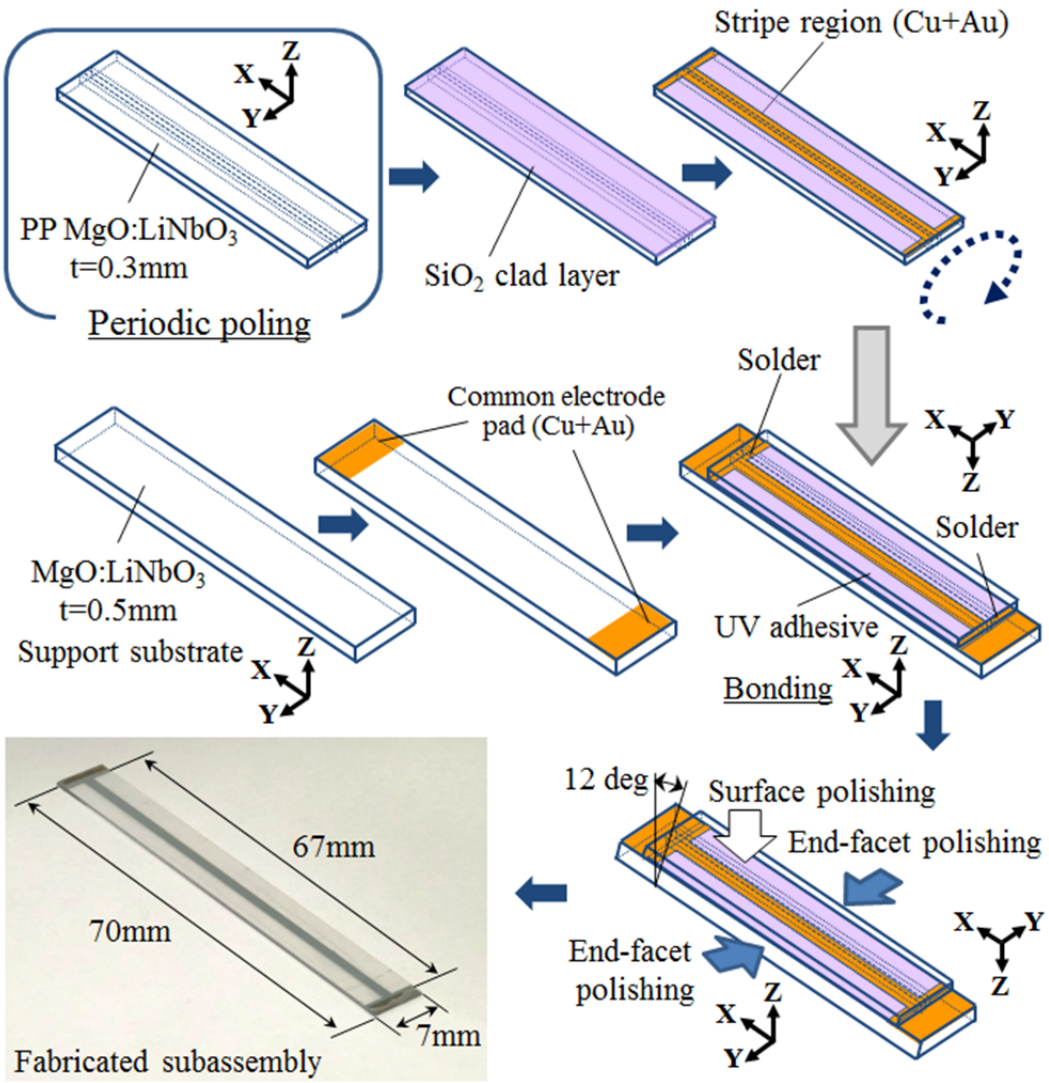


図6.8　1024画素のカスケード型調和周期格子の薄板結晶周期分極反転構造部の作製手順

6.3　電気光学ラマン・ナス回折型 1024 画素空間光変調器の設計と試作

6.3.1　$MgO:LiNbO_3$ 薄板結晶周期分極反転構造部の試作

図 6.8 は保持結晶部と接合面に共通電極を備えたカスケード型調和周期格子を構成する薄板結晶周期分極反転構造部の作製手順を示す．最初に厚さ 0.3 mm の MgO (5 mol %):$LiNbO_3$ 結晶の＋Z 面に波板電極[6.2]を形成し，また－Z 面に電圧印加時のリーク電流を避けるための SiO_2 膜[6.3]を製膜した．120 ℃に加熱した絶縁オイル中でパルス電圧印加法を用いて，Λ_1-Λ_2-Λ_1 のカスケード型周期分極反転構造（10 μm の間隔をあけた Λ_1 = 10 μm, L_1 = 210 μm と Λ_2 = 20 μm, L_2 = 320 μm で構成）を同時に作製した．作製した分極反転部全体のデューティ比は分極反転幅の変動を含めて概ね $a_{1,3}$ = 0.5

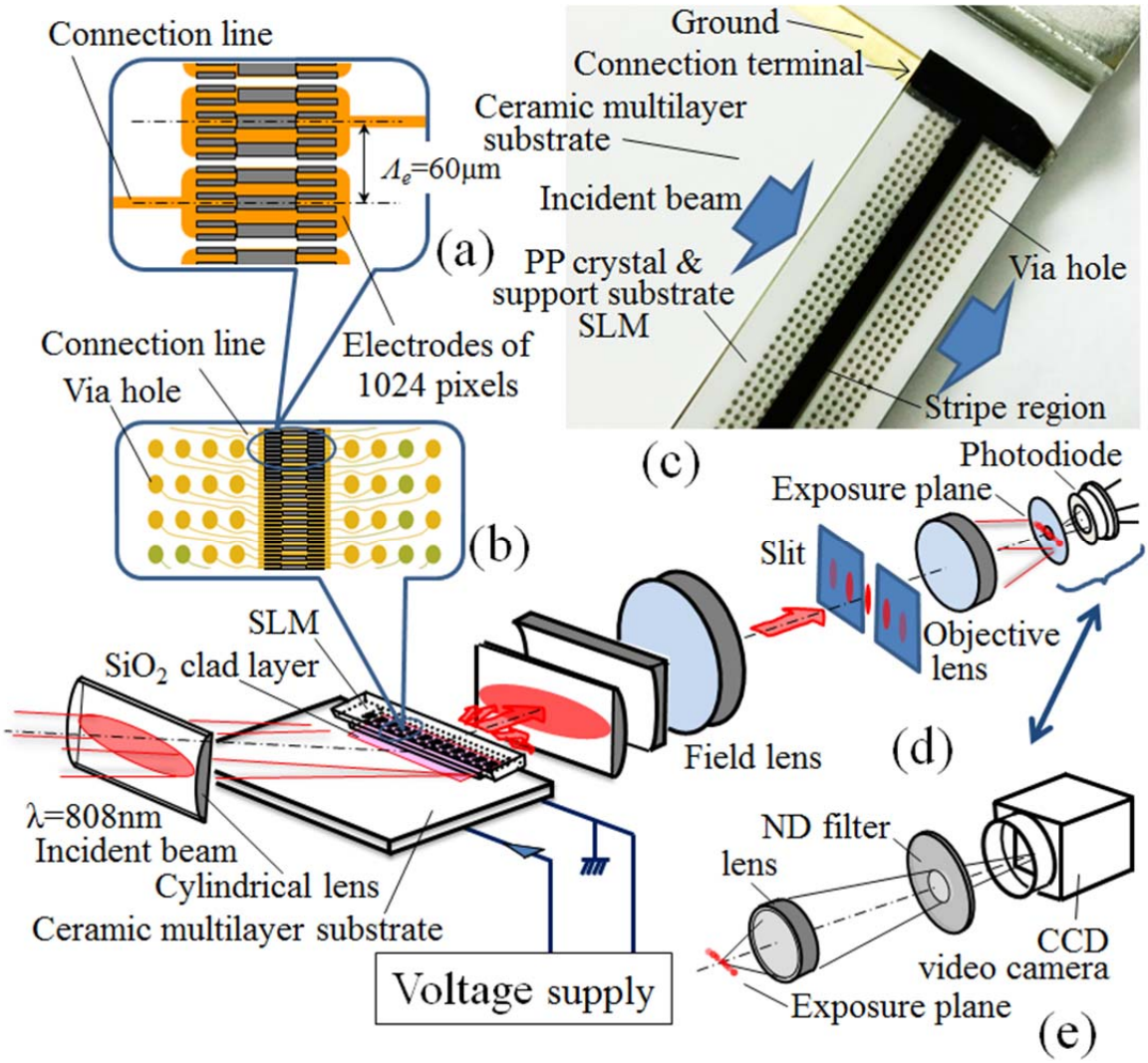


図6.9　3段構成タイプのカスケード型調和周期格子を用いたラマン・ナス空間光変調器の0次光透過率の印加電圧依存性の計測と空間光変調器の基本特性の評価セットアップ(a)カスケード型周期分極反転構造を用いた回折格子と画素電極の構成　(b)セラミック多層配線基板上の配線とビアホールの配置(c)セラミック多層配線基板に載せた薄板結晶周期分極反転構造部の写真(d)実験セットアップ(e)空間光変調器の基本特性の評価システム

± 0.1, a_2 = 0.5 ± 0.05 であった．次に RF スパッタ装置を用いて結晶の+Z 面に SiO_2 のクラッド層を成膜した．その後，その SiO_2 膜上に Cr と Au の帯状の薄膜をこの順番で蒸着した．また，Cr と Au を厚さ 0.5mm の $MgO:LiNbO_3$ 結晶の保持基板に蒸着した．そして結晶の両端に共通電極のパッドを蒸着で形成した．次に，周期分極反転構造を作製した結晶を保持基板へ Au が蒸着された薄膜の面を合わせてはんだを介して接合した．これらの 2 つの結晶の隙間に UV 硬化樹脂を流し込んで UV 光を照射し硬

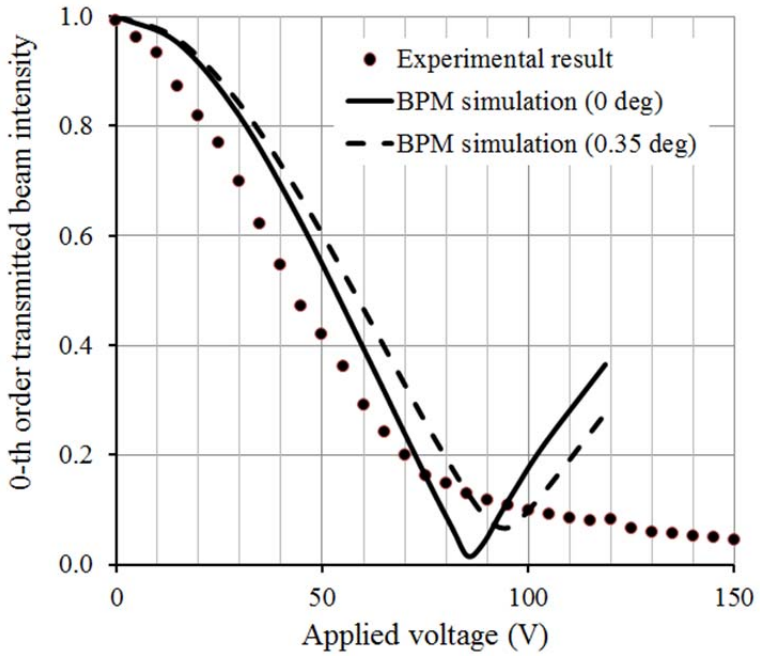


図6.10　3段構成タイプの0次光透過率の印加電圧依存性のシミュレーション結果（入射角0°と0.35°）と実験計測結果

化させた．そして駆動電圧を下げるために回折格子側の結晶表面を約 35 μm まで研磨した．最後にレーザ光の入射面と出射面を共に研磨した．入射面は後に述べるセラミック電気配線基板によって入射ビームが遮られるのを避けるために約 12 °傾けて研磨した．図中に出来上がった薄板結晶周期分極反転構造部の写真を示す．

6.3.2　試作と性能評価

図 6.9 に 3 段構成タイプのカスケード型調和周期格子を用いたラマン・ナス空間光変調器の 0 次光透過率の印加電圧依存性の計測と空間光変調器の基本特性の評価セットアップを示す．60 μm 周期 1024 画素の電極は薄板結晶周期分極反転構造部とは別のセラミック多層配線基板の上に形成した．この多層基板には画素電極と対応する電圧電源との接続配線とビアホール及び内部配線がある．画素電極の上に SiO_2 膜を堆積させた．薄板結晶周期分極反転構造部をこの画素電極（これらの間に SiO_2 膜がある）と向い合せにして押し付け接触させた．この SiO_2 膜は光が導波する結晶の上面と接触しておりクラッド層として機能させる事と隣り合う画素電極間のリークを防止する絶縁層の機能を持たせるために堆積させた．共通電極パッドは接続端子を介してセラミック基板の接地側配線と接続している．

波長 808 nm のマルチエミッター高出力半導体レーザを用いて，空間光変調器の基本特性を評価した．Z 軸方向に偏光面を持つ光を変調器に入射させた．つぎに電圧を画素電極と共通電極の間の周期分極反転構造にかけた．空間光変調器からの出力光はスリットによって回折光が遮断され，透過光だけがスリットを透過してシュリーレン

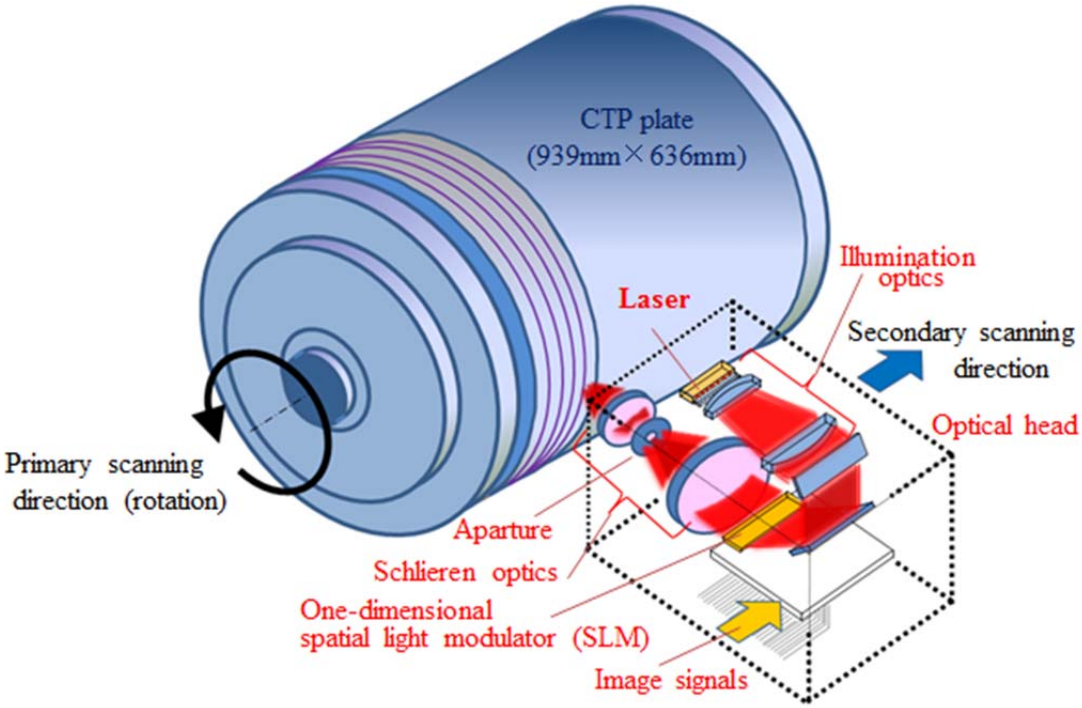


図6.11　CTP印刷版が巻着された回転ドラムと実証した空間光変調器を組み込んだ光学ヘッド

光学系（再回折結像光学系）により出力（描画）面にパターンを形成する．

そして透過光の印加電圧依存性を計測した．電圧が 150 V 以下の場合は MgO (5 mol %):$LiNbO_3$ 結晶の抗電界（~ 4.45 kV/mm[6.1]）よりも低い電界がかかる．0 次光透過率の印加電圧依存性の測定結果と平面波を入射角 0 °と 0.35 °で入射させた場合のシミュレーション結果を図 6.10 に示す．この実験では全画素に電圧を印加し約 30 画素をまとめて計測した．透過光の光強度が最小になるのは，入射角 0 °と 0.35 °それぞれ 85 V と 93 V である．入射光は発散角 2×0.35°があり完全な平行光ではないので，実験結果は入射角に対する光強度をビーム発散角までの範囲で加重平均したものとなる．それゆえ 89 V が最適値と予測した．しかし，実験結果は透過光の光強度は $V \leq$ 150 V の領域で減少し続ける．印加電圧が 150 V に増加した時に，透過光の光強度は電圧をかけないときの約 4.5 %に減少した．消光比に換算すると約 22 となる．これは実用的な用途では十分な値である．

ここでシミュレーション結果と実験結果の間の相違について考察する．印加電圧 $V <$ 約 80 V の範囲では実験結果はシミュレーション結果に近い結果となっている．ところが $V >$ 約 80 V では違った結果となった．変調器への入射光にシミュレーションでは平面波のモデルを用い，実際の実験では広がり角を持ったビームを用いた点が一致していない．したがって半定量的な比較しかできない．シミュレーションにおいて入射角 0 °と 0.35 °それぞれの 0 次光透過率は電圧を増加させると 85 V と 93 V で最小

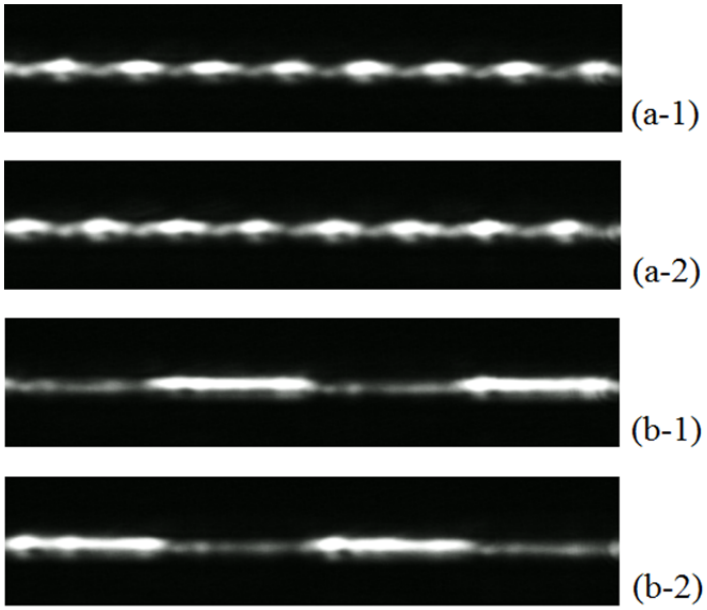


図6.12　16画素による空間光変調
(a-1)“0101010101010101”，(a-2)“1010101010101010”
(b-1)“0000111100001111”，(b-2)“1111000011110000”

値をとり，更に電圧を増加させると再び増加する．90 V 以上の電圧で実験結果がシミュレーション結果からの違いが顕著になるのは高次回折成分の干渉のためシミュレーション精度が劣化するためと思われる．一方，実験による 0 次光透過率は印加した最大電圧の 150 V まで減少し続ける．シミュレーション結果と実験結果の間に相違が生じたのは，薄板結晶周期分極反転構造部の結晶表面とセラミック多層配線基板上の画素電極の接触が不完全（単に押し付けているだけ）であり電圧降下をもたらした事と，周期分極反転構造の回折格子に対して光の入射角が 0 °となっていなかったので 0 次光透過率を最小にするために必要な電圧が高くなったことが原因ではないかと思われる．入射光は僅かではあるが 0.35 ° の発散角を持つのでスリット位置で幅が広がった透過光と回折光になっている．入射角の僅かなずれにより回折光がシフトして回折光の一部がスリットを通過したのが原因ではないかと思われる．

6.4　空間光変調器を用いた高速レーザリソグラフィ装置の光学系設計と露光評価

6.4.1　露光光学系設計と試作

使用したマルチエミッター高出力半導体レーザのエミッター配列サイズは約 10 mm であるので，作製した 1024 画素の空間光変調器の有効幅約 65 mm を照明できるよう光源の幅方向だけを拡大する照明光学系を設計した．そして，印刷製版工程で要求される 2400 dpi の解像度を得る為に再回折結像光学系の倍率は，空間光変調器の 60 μm の画素サイズを光学系の出力（描画）面で 10.6 μm（ = 25.4 mm / 2400 dpi）に縮小する 1/5.7（ = 10.6 μm / 60 μm）倍とした．

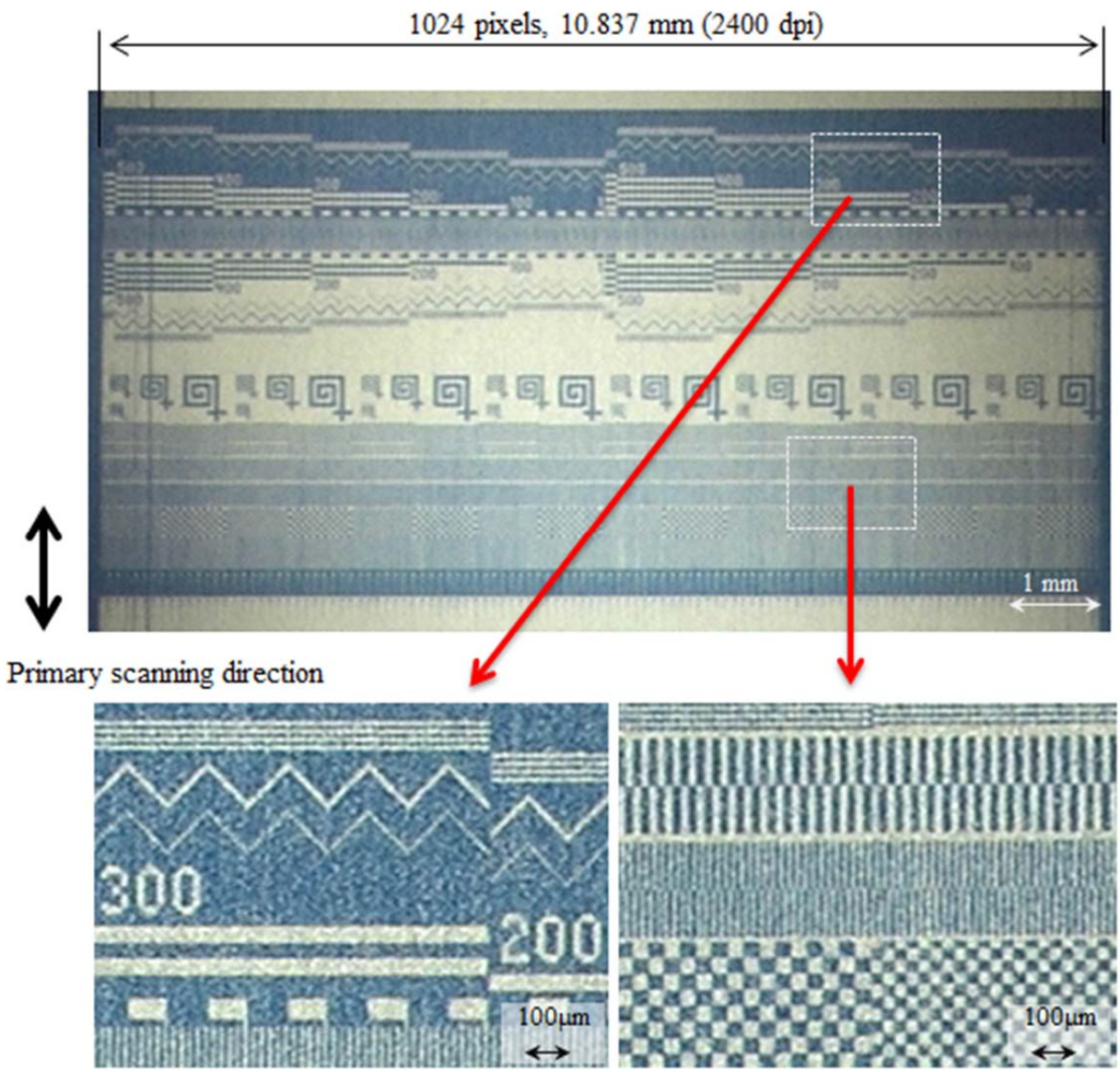


図6.13　露光したCTP印刷版

光源から照明光学系，3 段構成タイプ空間光変調器そして再回折結像光学系を一体化して図 6.11 に示すような光学ヘッドを作製した．

6.4.2　空間光変調の実証

レーザ出力を 2 W にし CCD ビデオカメラを使用して光学系の出力（描画）面でパターンを観察し空間光変調動作を確認した．図 6.12 は 1024 画素の変調実験用電源の最大出力電圧である 140 V（図 6.10 より消光比約 20）で駆動した時の 4 種類のパターンを示す．明暗は必ずしも強度分布を定量的に線形に正確に表すものではない．(a-1)は“0101010101010101”，(a-2)は“1010101010101010”，(b-1) は“0000111100001111”，そ

して(b-2)は“1111000011110000”の状況を示す．CTP システムに適するパターン分布とほぼ十分なコントラストが得られた.

6.4.3　CTP(Computer To Plate)版露光評価

作製した光学ヘッドを市販の CTP 印刷版作製装置(SCREEN PlateRite シリーズ)の露光光学系と置き換えた．そして，CTP 印刷版への露光実験をおこなった．空間光変調器へ入射させるレーザ光パワーを 30 W とした．また，それぞれの画素は 140 V（図 6.10 より消光比約 20）の電圧を印加し周波数 100 kHz で駆動した．図 6.13 に露光した CTP 印刷版を示す．良好な品質の CTP 印刷版が得られた.

この露光評価で空間光変調器を駆動させたときの変調速度は要求仕様 200 kHz の 1/2 の 100 kHz で行った．空間光変調器単体評価では目標の 200 kHz 駆動が確認できていたが，露光実験は評価実験との位置づけから回転ドラムの回転数を下げた評価をおこなったために 100 kHz となった．また，誘電体光学結晶を用いた電気光学変調器（EO）の基本特性から更なる高速化は十分に可能である．更なる高速化には高電圧を高速に変調駆動する駆動回路の小型化が最大の課題である事が分った．今回の目標は 200 kHz 程度であるのでフラットケーブルの使用が可能であったが，より高速化するには同軸ケーブル等の利用が必要であろう.

6.5　結言

考案したカスケード型調和周期格子を用いて，実用となる画素数 1024，駆動電圧 140 V，変調速度 100 kHz 以上，消光比 20 以上の性能を持つ周期分極反転構造を用いた赤外光用電気光学ラマン・ナス回折型空間光変調器を実証した．初めに赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザが用いられた CTP 印刷版描画装置に使用可能な実用性能を備えた空間光変調器に求められる仕様をまとめた．設計段階での性能評価に BPM シミュレーションが有用であることを改めて示した．設計に際しては周期分極反転構造の周期が減少すると 2 段構成タイプでは性能を達成できず，1 段目と同じ周期の回折格子を 3 段目に加えた 3 段構成タイプで目標性能を得た．有効幅 65 mm を超える結晶になったが薄い結晶を保持結晶と電極を介し接合して支える構造としたことで試作を可能とした. 1024 画素の電極を駆動回路から配線するためにセラミック多層基板を用いる事で実現できた．試作した空間光変調器を新たに設計した照明光学系及び再回折結像光学系と組み合わせた光学ヘッドを作り，出力面でのビーム形状の性能評価を行って空間光変調動作を実証した．実用上十分な消光比 20 が得られたので，光学ヘッドを市販の CTP 印刷版描画装置に搭載して CTP 印刷版にパターンを描画し，高品質な描画結果が得られる事を実証した.

本研究を通して, 画素数を増加させると駆動回路と画素電極との配線が大規模になるという課題に直面した. 1024 画素より多くの画素数の空間光変調器を実現するには, 実装方法の改善や ASIC(Application Specific Integrated Circuit)等を利用する必要がある.

参考文献

[6.1] A. Kuroda, S. Kurimura, and Y. Uesu, “Domain inversion in ferroelectric MgO:$LiNbO_3$ by applying electric fields,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 69, no. 11, pp. 1565-1567, Sep. 1996.

[6.2] K. Kintaka, M. Fujimura, T. Suhara, and H. Nishihara, “High-efficiency $LiNbO_3$ waveguide second-harmonic generation devices with ferroelectric-domain-inverted gratings fabricated by applying voltage,” *J. Lightwave Tech.*, vol. 14, no. 3, pp. 462-468, Mar. 1996.

[6.3] N. Horikawa, T. Tsubouchi, M. Fujimura, and T. Suhara, “Formation of domain-inverted grating in MgO:$LiNbO_3$ by voltage application with insulation layer cladding,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 8A, pp. 5178-5180, Aug. 2007.

第 7 章　結論

基幹産業である半導体製造・フラットパネル製造・プリント基板製造と印刷製版において，従来のフォトマスク転写方式から新たな直接描画方式へ革新するため，将来の高速レーザリソグラフィ装置の実現を可能とする強誘電体周期分極反転構造を用いた空間光変調器の研究を行った．具体的には紫外固体レーザを用いる空間光変調器と赤外光マルチエミッター半導体レーザを用いる空間光変調器に分けて研究を行った．

第 2 章では，前準備として，周期分極反転構造を用いた一次元空間光変調器の基本構造の具体化に必要な基本原理，変調特性，設計方針を整理した．まず一次元空間光変調器の基本単位となる電気光学変調器の基本原理について述べた．モード結合理論を用いた解析を利用してブラッグ回折及びラマン・ナス回折となるための要件を整理した．次にブラッグ回折型とラマン・ナス回折型光変調器のそれぞれの基本構成を述べて，回折効率などの変調特性の理論予測から光変調器の具体的な設計に必要な特性を整理した．また回折効率に対する角度選択性から，光変調器への入射光を平行光にできる紫外光固体レーザを光源に用いる場合は，原理的に 100 %の回折効率と高い消光比が得られるブラッグ回折型光変調器が利用できる事を示した．一方，赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザのように大きいサイズの光源から出射される光をコリメートしたあとの広がり角のあるビームを変調器の入射光として用いる場合は，ラマン・ナス回折型光変調器が適する事を示した．この場合に透過光を光変調器の出力光として利用すれば，適切な電圧印加により透過光強度をほぼ 0 にできる．最後にブラッグ回折型とラマン・ナス回折型空間光変調器の動作を出力光の空間周波数スペクトルを用いて説明した．ブラッグ回折型空間光変調器において，透過光または回折光を利用する場合では最適な画素電極の方位が異なることを示した．赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザを光源に用いたラマン・ナス回折型空間光変調器において，入射光の空間周波数分布が消光比特性に与える影響を説明した．加えて，空間周波数スペクトルを用いた最適な設計を行なえば高性能なラマン・ナス回折型空間光変調器を実現できる可能性を示した．

第 3 章では，紫外光用の電気光学ブラッグ回折型光強度変調器の設計・試作・評価について述べた．まず MgO 添加一致溶融組成と MgO 添加化学量論組成の結晶の中から紫外レーザ光（波長 355 nm）に対する光損傷耐性の高い MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶を選び出した．高速変調の低電圧駆動デバイスに必要な薄板結晶を用いるデバイス構造を発案し，作製工程を開発した．MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶を用いた具体的な電気光学ブラッグ回折型光変調器を設計し試作を行った．試作では薄板結晶を利用する新構造の作製工程を実証した．最後に Nd:YAG レーザ 3 倍高調波紫外光固体レーザを用いて変調器の変調特性を測定した．その結果，レーザリソグラフィ装置用の光変調器として十分な回折効率 97.8 %と消光比 87.6 を 8.9 V の低い印加電圧で得られ基本ユニット構成を実証できた．

第 4 章では，周期分極反転構造を用いた紫外光用導波路型電気光学ブラッグ回折型空間光変調器の設計・試作・評価について述べた．まずレーザリソグラフィ装置用の空間光変調器に有用な光導波路構造を検討した．これまでの基本的な光導波路は，薄いので光強度密度が上がり高出力紫外レーザ光による光損傷が発生しやすかった．また，出射光が描画に適さない平板状の光強度分布であった．そこで光損傷耐性が高く低損失光伝搬が可能で出射光が描画に適する光強度分布となる大きなモードサイズを有するアニールプロトン交換光導波路を提案した．MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶にアニールプロトン交換光導波路を作製する条件を確立し，低損失で単一モードを有する大きなモードサイズ導波路を実証した．また高強度の紫外光固体レーザを用いた寿命試験を実施した．長時間に渡り透過率の低下やモードサイズの変化がなく安定した性能を得た．

次に，基本ユニットの構成を一次元の空間光変調器に展開した周期分極反転構造を有する空間光変調器の設計について述べた．空間光変調器による再回折結像光学系の出力面での出力パターンをシミュレーションにより予測し基本動作を確認した．次に，波板電極を用いて MgO:s-$LiTaO_3$ 結晶にパルス電圧を印加して周期 7.5 μm の良質な分極反転構造を得た．

最後に 10 画素一次元空間光変調器を作製し，Nd:YAG レーザ 3 倍高調波紫外光固体レーザを光源に用いた空間光変調の実証実験を行なった．10 V の低電圧駆動で良好な画素の光強度分布(画素配列方向に少し長い楕円)と高消光比(50-100)を得た．また変調器に矩形波電圧 10 V を印加し変調速度を確認した．駆動周波数 3 MHz の時に立上がり，立下り時間はともに約 25 nsec が得られ十分な変調度が得られた．10 MHz の時は回折光強度の低下が認められ十分な変調度が得られなかった．駆動回路を高速化すれば 10 MHz は達成できる．

第 5 章では，赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザを光源にした CTP(Computer To Plate)印刷版の熱記録材料へ描画を行う画像記録装置の空間光変調器を実証する前段階として，基本型となる赤外光用電気光学ラマン・ナス回折型光強度変調器の設計・試作・評価について述べた．ラマン・ナス回折型光変調器の設計を行ったが消光比が良くなかったので，次にブラック回折型とラマン・ナス回折型の中間の $1 < Q < 10$ となる光変調器を設計し試作して実験を行った．しかし回折効率と消光比は不十分であった．そこで，性能を改善するために，整数比の周期を持つ格子を 2 段カスケードに接続したカスケード型調和格子を用いたラマン・ナス回折型光変調器を新たに提案して実証した．試作し検証した結果，実用上十分な約 70 の高い消光比性能が得られた．消光比性能は改善し基本ユニット構成を実証できた．

第 6 章では，考案したカスケード型調和周期格子を用いた実用仕様の空間光変調器の実証について述べた．設計と性能評価に BPM シミュレーションを用いた．設計に際し周期分極反転構造の周期は第 5 章で述べた基本ユニット構成のものより狭いものが必要となった．2 段構成タイプで設計したが目標性能を達成できなかったので，1 段目と同

じ周期の分極反転構造を 3 段目に加えた 3 段構成タイプとすることで目標性能を得た．試作では $MgO:LiNbO_3$ 結晶を用いて薄い結晶を保持結晶と電極を介し接合して支える構造とした．駆動回路と画素電極間の結線は，セラミック多層基板の表面に画素電極を形成し裏面に駆動回路と結線されるコネクターを実装する事で実現できた．試作した空間光変調器を赤外光マルチエミッター高出力半導体レーザと新たに設計した照明系及び再回折結像光学系と組み合わせた光学ヘッドを作り，出力面でのビーム形状の性能評価を行って空間光変調動作を実証した．低い角度選択性を有する構成で画素数 1024，分解能 2400 dpi，駆動電圧 140 V，変調速度 100 kHz，30 W 高出力レーザ，消光比約 20 の実用上十分な性能が得られたので, 光学ヘッドを最新の商用 CTP 印刷版描画装置に搭載して印刷版にパターンを描画し，高品質な描画結果を得た．

本研究により，高出力紫外レーザ光を MHz 以上の高速度で変調できる一次元空間光変調器の開発，実証，実現する事に成功した．特にさらに高速変調が可能な電気光学結晶を用いた意義は大きく，電子機器の主要産業である半導体製造分野のパターン作成工程に貢献できる可能性が開けた．今回の実証は 10 画素であったが赤外光マルチエミッター半導体レーザを用いる空間光変調器の研究で実用画素数を実現したセラミック多層基板を用いれば画素数を増やせるとの知見も得られた．特許は既に変調器の基本構造に関しては登録済みである．また，赤外光マルチエミッター半導体レーザを光源とする空間光変調器は 1024 画素の実用仕様による実証実験で実用レベルの描画品質を得ることに成功した．印刷版描画装置の製品化を計画できる段階に至った．高出力半導体レーザ光を高速に空間変調できる特徴を生かせばレーザ加工分野への波及効果が期待される．

謝辞

本研究を行うに際し，終始懇切な御指導，御鞭撻を賜りました大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻 栖原敏明教授に深甚なる感謝の意を表します.論文作成にあたり，懇篤なる御指導を頂くとともに種々の御高配を賜りました電気電子情報工学専攻 尾﨑雅則教授，宮永憲明教授に深謝の意を表します.

本研究を行う機会を与えてくださり，また大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻集積光電子デバイス領域（栖原研究室）との共同研究を推進してくださいました株式会社 SCREEN ホールディングスの灘原壮一常務取締役，有田正司技術顧問，桐栄敬二氏（現株式会社サーク代表取締役社長），小林正嘉氏に感謝の意を表します.

本研究を行うに際し，有益なる御指導，御討論を頂きました電気電子情報工学専攻 故藤村昌寿准教授に感謝の意を表します.

また，論文審査にあたり，御助言，御指導を頂きました大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻 伊藤利道教授，森勇介教授，片山光浩教授，近藤正彦教授，森伸也教授，八木哲也教授に深謝の意を表します.

本研究を行うに際し，研究活動を共に行い，各過程において協力いただいた株式会社 SCREEN ホールディングスの茶谷博美氏，岡淳一氏，秩父孝夫氏，上山憲司氏，吉本周平氏，溝端一国雄氏，馬越昌一氏，水野博文氏に深謝の意を表します.

本研究に関連する共同研究において，研究活動を共におこない有意義な議論を頂きました栖原研究室 井上敏之氏に感謝の意を表します.デバイス作製に際して御協力頂きました栖原研究室 林由樹雄技術専門職員に感謝の意を表します.また，共同研究に御協力頂きました栖原研究室諸氏に感謝いたします.

本研究は，国立研究開発法人 新エネルギー 産業技術総合開発機構（NEDO）平成 21 年イノベーション実用化開発助成事業（産業技術実用化開発費補助事業）21 度新エネ研第 0427003 号「描画用高速空間光変調デバイスの実用化開発」の助成を受けた.

著者発表論文

1. 原著論文

[1] **Masahide Okazaki**, Takahisa Hayashi, and Zenji Wakimoto, “80-channel optical recording unit for laser plotter,” in Proc. SPIE, vol. 1780, pp. 539-550, Lens and Optical Systems Design, Hannfried Zuegge; Ed., Apr. 1993.

[2] **Masahide Okazaki**, Takao Chichibu, Syuhei Yoshimoto, Toshiyuki Inoue, and Toshiaki Suhara, “Electrooptic Bragg deflection modulator for UV laser light using periodically poled MgO:s-$LiTaO_3$,” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 23, no. 22, pp. 1709-1711, Nov. 2011.

[3] **Masahide Okazaki** and Toshiaki Suhara, “Electro-optic Raman-Nath modulator using cascaded periodically poled gratings,” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 26, no. 23, pp. 2334-2336, Dec. 2014.

[4] **Masahide Okazaki**, Takao Chichibu, Syuhei Yoshimoto, Hirofumi Mizuno, and Toshiaki Suhara, “Fabrication and evaluation of deep-proton-exchanged and annealed waveguides in MgO:stoichiometric-$LiTaO_3$,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 54, 070301, Jun 2015.

[5] **Masahide Okazaki**, Syuhei Yoshimoto, Takao Chichibu, and Toshiaki Suhara, “Electro-optic spatial light modulator using periodically-poled MgO:s-$LiTaO_3$ waveguide,” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 27, no. 15, pp. 1646-1648, Aug. 2015.

[6] **Masahide Okazaki**, and Toshiaki Suhara, “High-performance 1024-pixel EO spatial light modulator using cascaded periodically-poled Raman-Nath gratings,” IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 33, no. 24, pp. 5195-5200, Nov. 2015.

2. 国際会議発表（口頭発表）

[1] **Masahide Okazaki**, Takahisa Hayashi, Zenji Wakimoto, “80-channel optical recording unit for laser plotter,” Lens and Optical systems design (International Symposium on Optical Systems Design), 1780-47, Berlin, FRG, September 14 - 18, 1992.

[2] Toshiyuki Inoue, Toshiaki Suhara and **Masahide Okazaki**, “Electro-optic Bragg deflection modulator using periodically poled MgO:$LiNbO_3$,” The 17th Microoptics Conference (MOC 2011), L-4, Sendai, Japan, October 30 - November 2, 2011.

[3] **Masahide Okazaki**, Takao Chichibu, Syuhei Yoshimoto, Toshiyuki Inoue, and Toshiaki Suhara, “Electro-optic Bragg deflection modulator for UV laser light using periodically poled MgO:s-$LiTaO_3$,” The 17th Microoptics Conference (MOC 2011), L-5, Sendai, Japan, October 30 - November 2, 2011.

[4] **Masahide Okazaki**, Takao Chichibu, Syuhei Yoshimoto, Hirofumi Mizuno, Toshiaki Suhara, “EO spatial UV-light modulator using periodically-poled deep-proton-exchaged s-$LiTaO_3$

waveguide," 16th european conference on integrated optics and technical exhibition (ECIO 2012), 037, Sitges, Spain, April 18 - 20, 2012.

[5] **Masahide Okazaki**, and Toshiaki Suhara, "EO Raman-Nath spatial light modulator with 1024 pixels using cascaded periodically-poled three-stage gratings," The 20th Microoptics Conference (MOC'15), L3, Fukuoka, Japan, October 25 - 28, 2015.

3. 国内学会発表

[1] 岡崎雅英，錦織努，"20ch レーザー出力光学系の開発，" 日本光学会 第 16 回光学シンポジウム，1991 年 6 月 20，21 日（東京）（口頭）

[2] 岡崎雅英，林尚久，脇本善司，"80 チャンネルレーザープロッター用光学系の設計，" 日本光学会 第 17 回光学シンポジウム，1992 年 6 月 25，26 日（東京）（ポスター）

[3] 岡崎雅英，板野義春，"光実装 LD モジュールを用いた平面配列型マルチチャンネル高出力光源ユニット，" 日本光学会年次学術講演会(Optics Japan 2005)，25aB1，2005 年 11 月 23 - 25 日（東京）（口頭）

[4] 井上敏之，栖原敏明，岡崎雅英，"MgO:$LiNbO_3$ 周期分極反転構造を用いた電気光学ブラッグ偏向型光変調器，" 第 71 回応用物理学会学術講演会，16a-G-6，2010 年 10 月.

[5] 岡崎雅英，吉本周平，井上敏之，栖原敏明，"MgO:SLT 周期分極反転構造を用いた紫外レーザ光用電気光学ブラッグ偏向型変調器，" 日本光学会年次学術講演会(Optics & Photonics Japan 2010)，10aD6，2010 年 11 月 8 - 10 日（東京）（口頭）

[6] 岡崎雅英，吉本周平，秩父孝夫，武内 誠，水野博文，栖原敏明，"電気光学ブラッグ偏向型光変調器用の薄型電圧印加構造の作製，" 日本光学会年次学術講演会(Optics & Photonics Japan 2010)，8pP15，2010 年 11 月 8-10 日（東京）（ポスター）

[7] 井上敏之，栖原敏明，岡崎雅英，"MgO:$LiNbO_3$ 分極反転構造 EO ブラッグ偏向型光変調器の短波長光変調特性，" 第 58 回応用物理学関係連合講演会，26a-KB-5，2011 年 3 月.

4. 主要な関連特許

[1] 岡崎雅英，"光変調器および画像記録装置，" 登録番号 JP5232493(B2)（登録日 2013 年 3 月 29 日），公開番号 JP2009031732(A)（公開日 2009 年 2 月 12 日）.

[2] 岡崎雅英，"光変調器および画像記録装置，" 登録番号 JP5058935 (B2)（登録日 2012 年 8 月 10 日），公開番号 JP2010097029(A)（公開日 2010 年 4 月 30 日）.

[3] **OKAZAKI MASAHIDE**, SUHARA TOSHIAKI, "Optical modulator," 登録番号 US8175422 (B2)（登録日 2012 年 5 月 8 日），公開番号 US2010166356 (A1)（公開日 2010 年 7 月 1 日）.

[4] 岡崎雅英，"光変調器，" 登録番号 JP5249009 (B2)（登録日 2013 年 4 月 19 日），公開番号 JP2010152214 (A)（公開日 2010 年 7 月 8 日）.

[5] 岡﨑雅英, “光変調器, ” 登録番号 JP5249008 (B2)（登録日 2013 年 4 月 19 日), 公開番号 JP2010152213 (A)（公開日 2010 年 7 月 8 日).

[6] 岡﨑雅英, 栖原敏明, “光変調器, ” 登録番号 JP5249007 (B2)（登録日 2013 年 4 月 19 日), 公開番号 JP2010152212 (A)（公開日 2010 年 7 月 8 日).

[7] 岡﨑雅英, “空間光変調器およびパターン描画装置, ” 登録番号 JP5318702 (B2)（登録日 2013 年 7 月 19 日), 公開番号 JP2011039415 (A)（公開日 2011 年 2 月 24 日).

[8] 岡﨑雅英, “光変調デバイスおよび露光装置, ” 登録番号 JP5134031 (B2)（登録日 2012 年 11 月 16 日), 公開番号 JP2011197554 (A)（公開日 2011 年 10 月 6 日).

[9] **OKAZAKI MASAHIDE**, SUHARA TOSHIAKI, “OPTICAL DEVICE, A METHOD OF MANUFACTURING OPTICAL DEVICE, AND EXPOSURE APPARATUS,” 登録番号 US8784675 (B2)（登録日 2014 年 7 月 22 日), 公開番号 US2012081772 (A1)（公開日 2012 年 4 月 5 日).

[10] **OKAZAKI MASAHIDE**, SUHARA TOSHIAKI, “OPTICAL DEVICE, EXPOSURE APPARATUS AND LASER APPARATUS,” 登録番号 US8773751 (B2)（登録日 2014 年 7 月 8 日), 公開番号 US2012182535 (A1)（公開日 2012 年 7 月 19 日).

[11] 岡﨑雅英, 栖原敏明, “光学デバイス, レーザ装置および露光装置, ” 公開番号 JP2012145890 (A)（公開日 2012 年 8 月 2 日).

[12] 岡﨑雅英, “光変調器, 光変調デバイスの制御装置, 光変調デバイスの制御方法, 描画装置, ” 公開番号 JP2012208190 (A)（公開日 2012 年 10 月 25 日).

[13] 岡﨑雅英, “空間光変調器, ” 登録番号 JP5643373 (B2)（登録日 2014 年 11 月 7 日）, 公開番号 JP2013164614 (A)（公開日 2013 年 8 月 22 日).

[14] 岡﨑雅英, 栖原敏明, “光学デバイス, 光学デバイスの製造方法および露光装置, ” 公開番号 JP2014219685 (A)（公開日 2014 年 11 月 20 日).

[15] **OKAZAKI MASAHIDE**, SUHARA TOSHIAKI, “Light modulator and exposure head,” 公開番号 EP2846186 (A1)（公開日 2015 年 3 月 11 日).

[16] **OKAZAKI MASAHIDE**, SUHARA TOSHIAKI, “LIGHT MODULATOR AND EXPOSURE HEAD,” 公開番号 US2015070676 (A1)（公開日 2015 年 3 月 12 日).

[17] 岡﨑雅英, 栖原敏明, “光変調器および露光ヘッド, ” 公開番号 JP2015052701 (A)（公開日 2015 年 3 月 19 日).

5. 採択

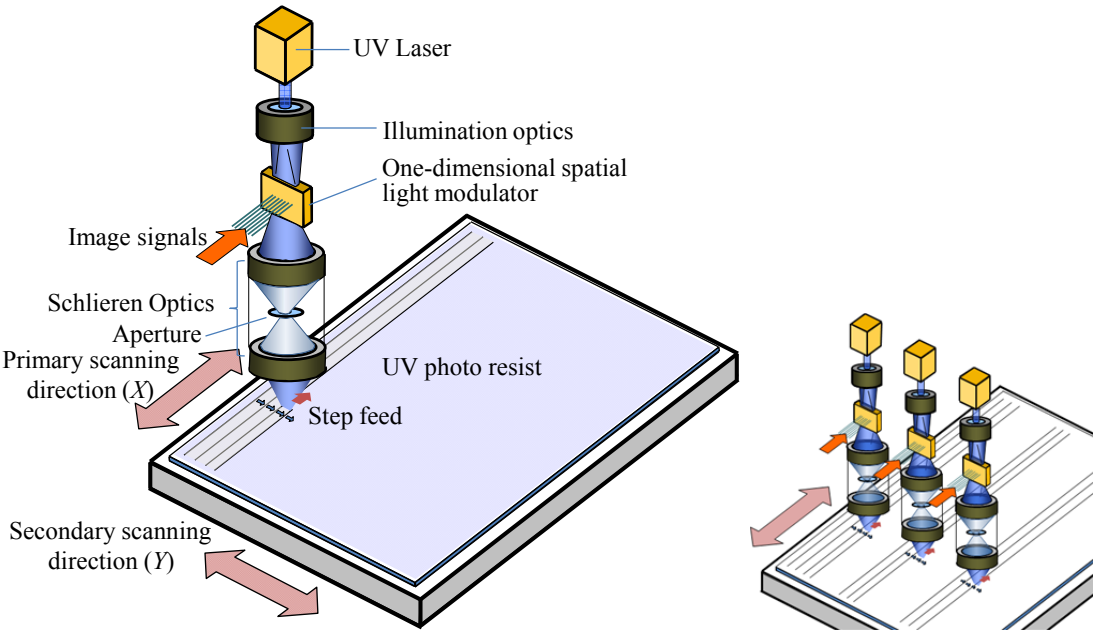
[1] 国立研究開発法人 新エネルギー 産業技術総合開発機構（NEDO）平成 21 年イノベーション実用化開発助成事業（産業技術実用化開発費補助事業）21 度新エネ研第 0427003 号「描画用高速空間光変調デバイスの実用化開発」

付録

A1　レーザリソグラフィ装置におけるビーム走査画像形成方式（平面走査，回転ドラム）

一次元の空間光変調器を用いたレーザリソグラフィ装置におけるビーム走査画像形成方式について述べる．レジストを塗布したガラス基板やシリコンウエハもしくは熱記録材料の印刷版に時間及び空間変調された光ビームを照射しながら一方向に走査（主走査）させて 1 走査線分の画像を形成した後に，走査方向と直角な方向に基板を 1 走査線の幅分だけ移動（副走査）させ再び光ビームを照射し走査を繰り返すラスター走査方式によって画像を形成する．複数ビームを同時に走査させる事で高速描画を可能としている．複数ビームを走査し移動させる方式には，基板やシリコンウエハなどを *X*-*Y* ステージ上に設置し画像形成を行う平面走査方式と薄いアルミ板などの印刷版を回転ドラムに巻きつけて画像形成を行う回転ドラム方式がある．

図 A1.1(a)に平面走査方式の概略図を示す．フラットパネルディスプレイ用ガラス基板への描画を行う装置を例にあげて図示した．プリント配線基板，シリコンウエハなどの高精細パターンを描画する用途にも同様の方式が採用されている．照明光学系によって UV 固体レーザからの出射光を平板状に広げて空間光変調器の幅に一致させる．またこのレーザ光を平行光となるようにコリメートして空間光変調器に入射させる．変調器の画素電極のそれぞれに電圧を印加する．変調器からの出射光は再回折結像光学系によって UV フォトレジストの表面に空間変調された光強度分布を形成する．一方精密な送り精度を持つ *X*-*Y* ステージは UV フォトレジストが塗布された基板を画素配列方向と垂直な *X* 方向に基板の端までステージを移

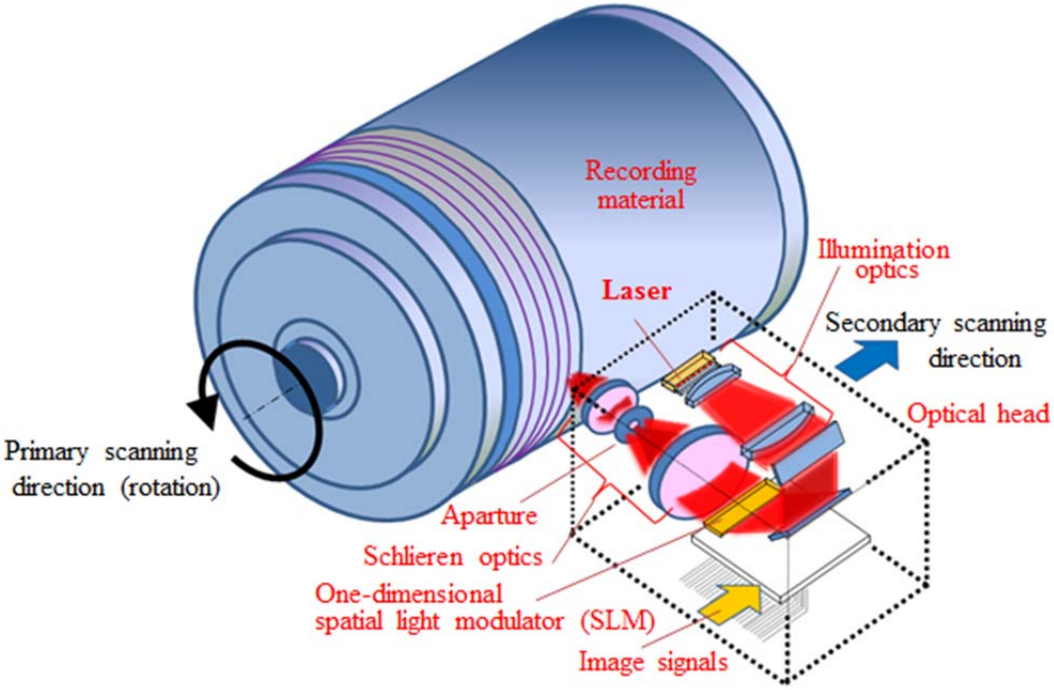


(a)平面走査方式　　(b)複数光学ヘッド搭載タイプ

図A1.1　平面走査方式のレーザリソグラフィ描画装置の概略図

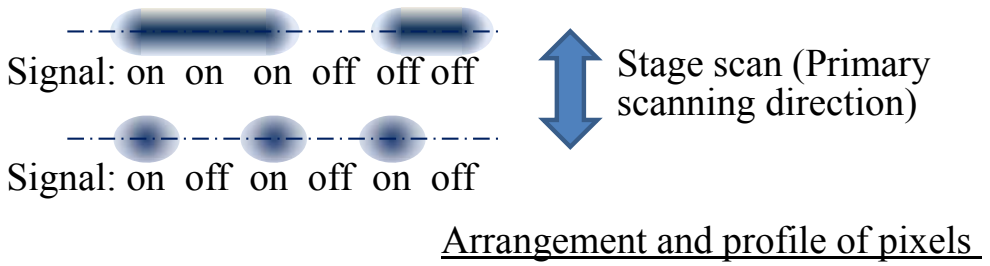
動させる．1 走査を終えると Y 方向にステージを画素配列幅分だけ送る．これらの動作を繰り返しおこなって 1 枚のガラス基板上の UV フォトレジストに画像を形成する．図 A1.1 (b)に複数光学ヘッド搭載タイプを示す．描画領域を分割しそれぞれの領域を描画する複数光学ヘッド（光源，照明光学系，空間光変調器，投影光学系）を搭載している．それぞれの描画領域に対して複数の光学ヘッドで同時に描画することで描画時間を短縮する．高速レーザリソグラフィ装置は複数光学ヘッド搭載タイプを採用している．

図 A1.2 に回転ドラム方式のレーザリソグラフィ描画装置の概略図を示す．CTP(Computer To Plate)版などの露光対象物を真空吸着により回転ドラムに巻きつけ高速に回転させる．照明光学系によって赤外光マルチエミッターハイパワー半導体レーザ光源からの出射光は空間光変調器の幅に一致させコリメートして広がり角が少なくなるよう平板状に広げる．この平板状のレーザ光を空間光変調器に入射させる．変調器のそれぞれの画素電極に電圧を印加する．変調器からの出射光は再回折光学系に入る．再回折光学系の中にあるフーリエ変換面に設置したアパーチャにより，変調器からの回折光を遮断し透過光を通過させ回転ドラムに巻きつけた CTP 印刷版の表面に空間変調された光強度分布を形成する．ドラムが 1 回転する毎にリニアガイドレールに載せられた光学ヘッドが画素配列幅分だけ移動する．印刷版の端まで光学ヘッドが移動し描画が完了する．CTP の場合，ドラム直径は約 200～500 mm，ドラム回転速度は約 100～1000rpm である．平面走査方式では副走査の際に描画を中断させなければならないが，回転ドラム方式では連続的に副走査を行なえるので無駄な時間がなく高速な描画が可能である．従って描画対象物が回転ドラムに巻ける柔らかい材料であれば回転ドラム方式を採用する．

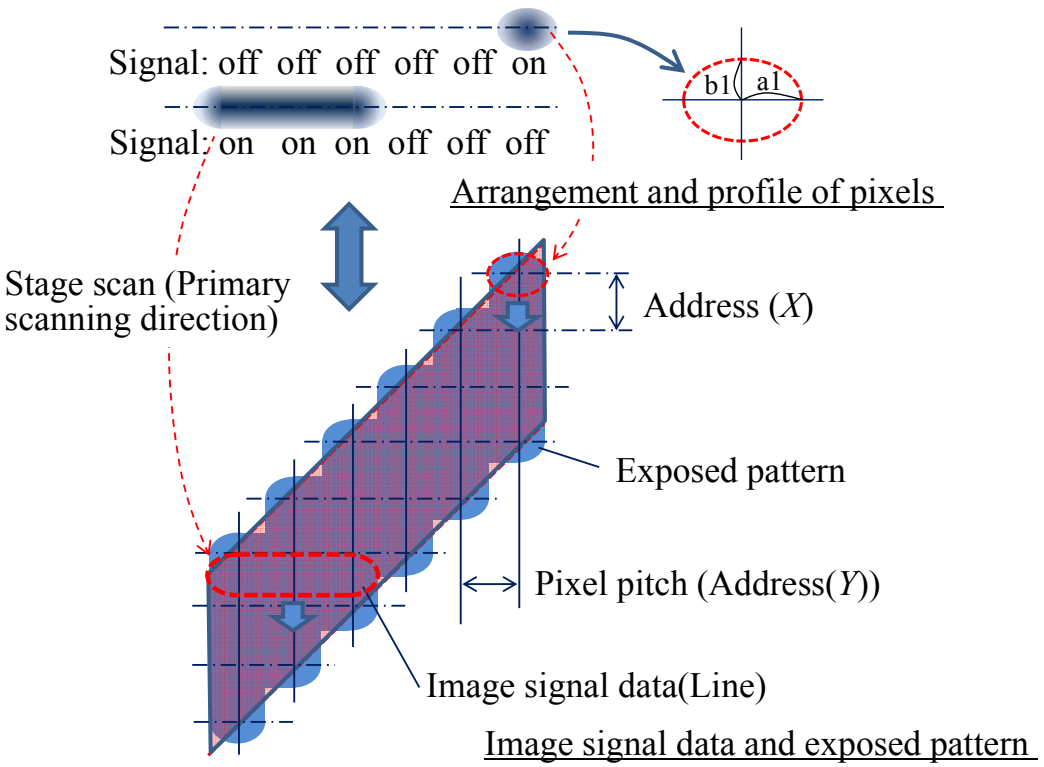


図A1.2　回転ドラム方式のレーザリソグラフィ描画装置の概略図

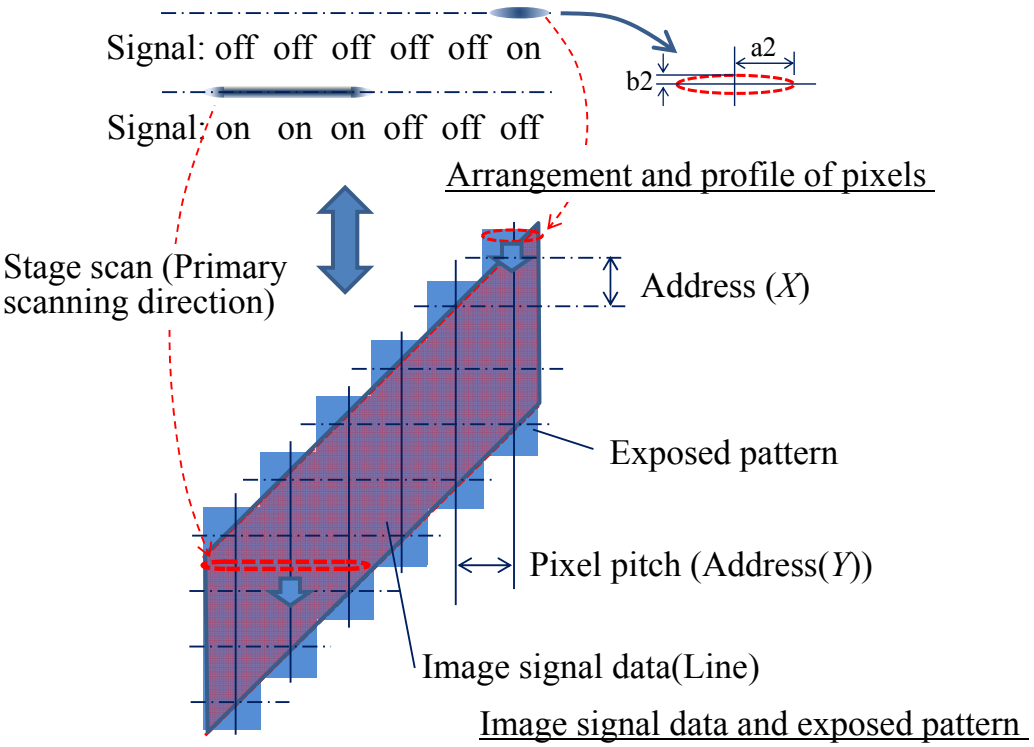
本研究の空間光変調器において，光変調は“1”(on)と“0”(off)のみの 2 値(Binary)制御が行われるものとして考える．また 2 画素以上連続する画素を“1”にする場合に隣り合う画素の間の光強度分布は 1 画素のみ“1”（または少なくとも両隣の画素が“0”）にする場合の画素中央のピーク強度が連続する（図 A1.3）．ここで，上記の図 A1.1 及び図 A1.2 のシステムにおいて画素の光強度分布の違いとその画素を用いた描画パターンの違いを考える．図 A1.4 に空間光変調器の 1 画素のみ“1”とするときと連続する 3 画素を“1”にするときの光強度分布を示す．また主走査に対して傾いた直線の画像データが描画されるパターンを示す. 空間光変調器のそれぞれの画素は変調を行うと同時に画素配列方向と垂直な方向に感光材料を走査させることで描画パターン形成を行う. 画像データのそれぞれの画素の並列信号を空間光変調器が受けて光変調を行う際に, 画素配列方向は画素が配列している画素ピッチ単位（副走査方向アドレスピッチ）で画素パターンが形成される．一方走査方向の主走査方向アドレスピッチは副走査方向アドレスピッチと同じ値にするが，EO 変調器の高速性を生かし副走査方向アドレスピッチの値より小さなピッチで“1”/“0”して高解像度の描画パターンを得る．図 A1.4(a)は画素配列方向に少し長い楕円（長軸及び短軸の長さをそれぞれ a1，b1 とする）の光強度分布を持つ画素とその画素で描画された描画パターン形状を示す．図 A1.4(b)は長軸（長軸及び短軸の長さをそれぞれ a2，b2 とする）が画素配列方向で楕円率の大きな（a2 >> b2）光強度分布を持つ画素とその画素で形成された描画パターン形状を示す. a1 = a2 であり b1 >> b2 である．画像データは幅が約 3 画素幅分で走査方向に対して 45°傾斜した直線とする．(b)の描画パターンは階段形状となりラインエッジラフネスが大きい．(a)は(b)に対して階段形状の角が丸くなりラインエッジラフネスが向上している．(b)よりもラインエッジラフネスが少ない(a)が望ましい．また，ここで(a)で示した画素の光強度分布が画素配列方向に少し長い楕円から円形にする場合は画素の主走査方向の長さが増えるので, その描画パターンは主走査方向の解像度が低下する事になる. そこで画素の光強度分布は画素配列方向にやや長い楕円形状とする光強度分布が有利である.



図A1.3　複数画素の画像信号とその空間光変調器で形成される光強度分布



(a)画素配列方向に少し長い楕円の光強度分布の画素とその描画パターン



(b)長軸が画素配列方向で楕円率の大きな光強度分布を持つ画素とその描画パターン

図A1.4　画素の光強度分布と描画パターン

付録

A2　BPM(Beam Propagation Method)シミュレーションの手法

BPM(Beam Propagation Method)[A2.1 - A2.4]は光波の伝搬方向に沿って導波構造や屈折率が緩やかに変化している場合の電磁界を求める解析手法である. 光導波路や透過型回折格子に伝搬させる光波のふるまいの解析に便利である．BPM のうち本研究で用いたシミュレーションツール(RSoft BeamPROP)の基本となっている FD(finite difference)-BPM（有限差分ビーム伝搬法）の手法について説明する.

光を角周波数ωの単色光とし，電界の時間因子を$e^{-j\omega t}$とすると電界ベクトル $\boldsymbol{E}$ に関するヘルムホルツの波動方程式は次のように記述される.

$$\nabla^2\boldsymbol{E} + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 n^2(x,y,z)\boldsymbol{E} = 0 \tag{A2.1}$$

ここで$n(x,y,z)$は媒質の屈折率分布を表す．光伝搬の多くは，近似的にスカラーのヘルムホルツ方程式で扱うことができる．上記方程式は次のように記述される.

$$\nabla^2 E + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 n^2(x,y,z)E = 0 \tag{A2.2}$$

$E = E(x,y,z)$は電界分布を表す.

ここで，簡単の為に屈折率がy方向に均一で$n(x,z)$と表される場合を考える．屈折率がx方向と光波の伝搬するz方向に緩やかに変化していると仮定する．z方向に伝搬する光の電界Eを, z方向に緩やかに変化する振幅を表す因子$u(x,z)$と波長オーダーで激しく振動する位相を表す因子e^{-jkz}に分け

$$E(x,z) = u(x,z)e^{-jkz} \tag{A2.3}$$

と表す．ここで，$k(= n_0\omega/c = 2\pi n_0/\lambda)$は伝搬定数である．また，$n_0$は媒質の平均屈折率である．式(A2.3)を$z$で 2 階偏微分すると

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}e^{-jkz} - 2jk\frac{\partial u}{\partial z}e^{-jkz} - k^2 u e^{-jkz} \tag{A2.4}$$

が得られる. ここで$u = u(x,z)$とした. 式(A2.4)を式(A2.2)に代入して両辺をe^{-jkz}で割り整理すると，次のようになる.

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2jk\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \{k'^2(x,z) - k^2\}u \tag{A2.5}$$

ここで，$k'(x,z) = k_0 n(x,z), k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda$である．$u(x,z)$が$z$方向に緩やかに変化しているならば

$$\left|\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right| \ll \left|2k\frac{\partial u}{\partial z}\right| \tag{A2.6}$$

である．この場合，式(A2.5)の左辺の第一項を無視すると次のフレネル近似式が得られる.

$$2jk\frac{\partial u}{\partial z}=\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\{k'^2(x,z)-k^2\}u \tag{A2.7}$$

次に差分法を用いて式(A2.7)の解を求める．x,z座標をそれぞれ微小間隔$\Delta x,\Delta z$で分割し以下のように表す．

$$x=m\Delta x \qquad (m=0,1,2,\cdots,M+1) \tag{A2.8a}$$
$$z=p\Delta z \qquad (p=0,1,2,\cdots,P+1) \tag{A2.8b}$$

これにより格子点$(m\Delta x,p\Delta z)$での$u(x,z)$と$n(x,z)$を次のように略記する．

$$u(m\Delta x,p\Delta z)=u_m^p \tag{A2.9a}$$
$$n(m\Delta x,p\Delta z)=n_m^p \tag{A2.9b}$$

式(A2.7)の左辺の微分を差分近似する．

$$2jk\frac{\partial u}{\partial z}\bigg|_{\substack{x=m\Delta x\\ z=(p+1/2)\Delta z}}=2jk\frac{u_m^{p+1}-u_m^p}{\Delta z} \tag{A2.10}$$

式(A2.10)より座標zに関する差分中心は$(p+1/2)\Delta z$であるので，式(A2.7)の右辺も差分中心を一致させて式(A2.7)の右辺第 1 項の微分を差分近似すると

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\bigg|_{\substack{x=m\Delta x\\ z=(p+1/2)\Delta z}}=\frac{1}{\Delta x}\left(\frac{u_{m+1}^{p+\frac{1}{2}}-u_m^{p+\frac{1}{2}}}{\Delta x}-\frac{u_m^{p+\frac{1}{2}}-u_{m-1}^{p+\frac{1}{2}}}{\Delta x}\right)$$
$$=\frac{1}{\Delta x^2}\left(u_{m+1}^{p+\frac{1}{2}}-2u_m^{p+\frac{1}{2}}+u_{m-1}^{p+\frac{1}{2}}\right) \tag{A2.11}$$

が得られる．式(A2.10)と式(A2.11)を使うと式(A2.7)の差分近似が得られる．

$$2jk\frac{u_m^{p+1}-u_m^p}{\Delta z}=\frac{1}{\Delta x^2}\left(u_{m+1}^{p+\frac{1}{2}}-2u_m^{p+\frac{1}{2}}+u_{m-1}^{p+\frac{1}{2}}\right)+{k_0}^2\left\{\left(n_m^{p+\frac{1}{2}}\right)^2-{n_0}^2\right\}u_m^{p+\frac{1}{2}}$$
$$=\frac{u_{m-1}^{p+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}+\left[\frac{-2}{\Delta x^2}+{k_0}^2\left\{\left(n_m^{p+\frac{1}{2}}\right)^2-{n_0}^2\right\}\right]u_m^{p+\frac{1}{2}}+\frac{u_{m+1}^{p+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \tag{A2.12}$$

ここで格子点にない$u_m^{p+\frac{1}{2}}$を格子点にあるu_m^{p+1}とu_m^pを用いて

$$u_m^{p+\frac{1}{2}}=\frac{1}{2}\left(u_m^{p+1}+u_m^p\right) \tag{A2.13a}$$

$$\left(n_m^{p+\frac{1}{2}}\right)^2u_m^{p+\frac{1}{2}}=\frac{1}{2}\left({n_m^{p+1}}^2u_m^{p+1}+{n_m^p}^2u_m^p\right) \tag{A2.13b}$$

と近似するクランク・ニコルソン法[A2.2, A2.4]を式(A2.12)の右辺に適用すると

$$2jk\frac{u_m^{p+1}-u_m^p}{\Delta z}=\frac{1}{2}\left[\frac{u_{m-1}^{p+1}}{\Delta x^2}+\left\{\frac{-2}{\Delta x^2}+{k_0}^2\left({n_m^{p+1}}^2-{n_0}^2\right)\right\}u_m^{p+1}+\frac{u_{m+1}^{p+1}}{\Delta x^2}\right]$$
$$+\frac{1}{2}\left[\frac{u_{m-1}^{p}}{\Delta x^2}+\left\{\frac{-2}{\Delta x^2}+{k_0}^2\left({n_m^{p}}^2-{n_0}^2\right)\right\}u_m^{p}+\frac{u_{m+1}^{p}}{\Delta x^2}\right] \qquad \text{(A2.14)}$$

となる．式(A2.14)において，計算を進めていく際に未知数となるz座標の$(p+1)\Delta z$の項を左辺に，既知の$p\Delta z$の項が右辺にくるよう移項すると

$$-\frac{u_{m-1}^{p+1}}{\Delta x^2}+\left\{\frac{2}{\Delta x^2}-{k_0}^2\left({n_m^{p+1}}^2-{n_0}^2\right)+\frac{4jk}{\Delta z}\right\}u_m^{p+1}-\frac{u_{m+1}^{p+1}}{\Delta x^2}$$
$$=\frac{u_{m-1}^{p}}{\Delta x^2}+\left\{\frac{-2}{\Delta x^2}+{k_0}^2\left({n_m^{p}}^2-{n_0}^2\right)+\frac{4jk}{\Delta z}\right\}u_m^{p}+\frac{u_{m+1}^{p}}{\Delta x^2} \qquad \text{(A2.15)}$$

が得られる．解析領域内の格子点$(m=1,2,\cdots,M;p=0,1,2,\cdots,P)$に屈折率$n_m^p$を与える．次に，$z$方向に進む平面波を入射させる場合を考え$z=0\ (p=0)$における格子点$(m=2,\cdots,M-1)$に$u_m^0=1$を初期値として式(A2.15)の右辺に与える（$z$方向に対して$\theta$の角度を持つ平面波を入射させる場合は$u_m^0=e^{-j(ksin\theta)m\Delta x}$を与える）と右辺は既知となり，左辺では$z$方向の次の格子点列（座標$(m\Delta x,\Delta z)$，$m=1,\cdots,M$）において，それぞれの$m$に対し連続した$u_m^1(m=1,\cdots,M)$の 3 個の未知数を含む$M-2$個の方程式が得られる．ここで周期的境界条件$u_0^1=u_M^1$を適用して方程式を解いて$u_m^1(m=1,\cdots,M)$の値を求める．同様にして$z$方向の次の格子点列（座標$(m\Delta x,(P+1)\Delta z)$，$m=1,\cdots,M$）における$u_m^{p+1}$の方程式を得て境界条件$u_0^{p+1}=u_M^{p+1}$を適用して$u_m^{p+1}(m=1,\cdots,M)$の値を得る．順次$z$方向の格子点列を 1 つ進めて同様の計算を行ってゆく事で解析領域の$u_m^p(m=1,2,\cdots,M\,;p=1,2,\cdots,P+1)$の値が求まる．このように有限差分法を用い光伝搬方向に区切られた微小区間ごとに逐次計算しこれを繰り返して解析領域全体の電界特性を求めてゆく手法を有限差分ビーム伝搬法という．

参考文献

[A2.1] 岡本勝就，光導波路の基礎，コロナ社，東京，1992.

[A2.2] 河野健治，鬼頭勉，光導波路解析の基礎，現代工学社，東京，1998.

[A2.3] G. Lifante, *Integrated Photonics: Fundamentals*, Wiley, Chichester, 2003.

[A2.4] 左貝潤一，光導波路の電磁界数値解析法，森北出版，東京，2015.