

ホログラフィー立体映像表示用
スピン注入型光変調デバイスに関する研究

2019年 3月

金城 秀和

ホログラフィー立体映像表示用
スピン注入型光変調デバイスに関する研究

金城 秀和

システム情報工学研究科
筑波大学

2019年 3月

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 研究の目的.....	8
1.3 本論文の構成.....	9
第2章 ホログラフィー立体映像表示用空間光変調デバイスの動作原理.....	12
2.1 反射型液晶デバイス.....	12
2.2 デジタルマイクロミラーデバイス (DMD)	14
2.3 スピン注入型光変調デバイス.....	15
2.3.1 スピン注入磁化反転デバイス.....	15
2.3.2 磁気光学効果を用いたスピン注入磁化反転デバイス.....	16
第3章 スピン注入型光変調デバイスの低電流化技術.....	19
3.1 トンネル効果を用いたスピン注入磁化反転.....	19
3.2 トンネル構造のスピン注入型光変調デバイス.....	21
3.3 まとめ.....	29
第4章 スピン注入型光変調デバイスの2次元アレイ化技術.....	31
4.1 2次元アレイのスピン注入型光変調デバイス.....	31
4.2 5 μ m画素ピッチのシリコンバックプレーン.....	33
4.3 5 μ m画素ピッチのスピン注入型光変調デバイス.....	35
4.4 まとめ.....	40
第5章 スピン注入型光変調デバイスの高密度化技術.....	42
5.1 シフトレジスタ内蔵のシリコンバックプレーン.....	42
5.2 磁界アシスト法を用いたスピン注入磁化反転.....	45
5.3 2 μ m画素ピッチのスピン注入型光変調デバイス.....	47
5.4 超多画素のスピン注入型光変調デバイス.....	55
5.5 まとめ.....	58

第6章 結 論.....	60
6.1 研究成果.....	60
6.2 今後の展望.....	61
謝 辞.....	63
参考文献.....	65
著者論文.....	70

第1章

序 論

1.1 研究の背景

高い臨場感を再現し，その場にいるかのような迫力を与える新 4K8K 衛星放送が 2018 年 12 月 1 日に始まった．しかしながら，4K8K 放送による映像は従来と同様に平面のテレビ上に表示される．人間は立体的に物を見るため，究極の高臨場感を得るには，立体映像を表示するテレビ（立体テレビ）が必要となる．人間は奥行き距離感を得る際に，様々な手がかりを用いる．表 1.1 に奥行き印象をもたらす視覚の手がかりを示す[1]．輻輳は両眼で物体を見つめた時に，視線が対象の上で交差することである．両眼視差は物体を眺めた時の両眼の網膜上における像の位置ずれであり，立体感の効果が最も大きい．輻輳と両眼視差は，両眼による奥行きの手がかりである．単眼での奥行きの手がかりには，調節や運動視差などがある．調節は物体までの距離に応じて水晶体と呼ばれる眼のレン

表 1.1 奥行き印象をもたらす視覚の手がかり

両眼による手がかり	単眼による手がかり
輻輳	調節
両眼視差	運動視差
	視野の大きさ
	網膜像の大きさ
	空気透視
	影
	進出色・後退色

ズが厚みを変え、物体との距離が 2～3m 以内の近距離の場合に有効となる。運動視差は見る位置を相対的に変化させることにより物体の見え方が変わり、両眼視差と同程度に奥行き感を与える。また、視野の大きさや網膜像の大きさなども単眼による手がかりである。視野の大きさは臨場感を強め、網膜像の大きさは物体の奥行きを判断する。このほか、遠くにある物体ほど霞んで見える空気透しの効果や影の効果、赤は近くに青は遠くに感じやすい進出色・後退色の効果など、単眼による手がかりは多岐にわたる。奥行き印象をもたらす視覚の手がかりのなかで、輻輳、両眼視差、調節、運動視差は人体の機能に関する生理的要因である。このため、立体テレビの研究開発では、これらの要因を満たすことが重要となる。一方、視野の大きさや空気透視、影の効果などは人間が経験的に獲得した心理的要因であり、2次元テレビに対しても機能する。現在主流のフルハイビジョン（2K）映像や 8K 映像における立体感の効果は心理的要因によるものと考えられる。立体映像方式は図 1.1 のように分類することができる。近年の 3D（Three Dimensions）映画や 3D テレビの映像は特殊な立体メガネを用いる 2 眼方式を採用している[2]。立体メガネには偏光フィルタを用いる偏光式と液晶シ

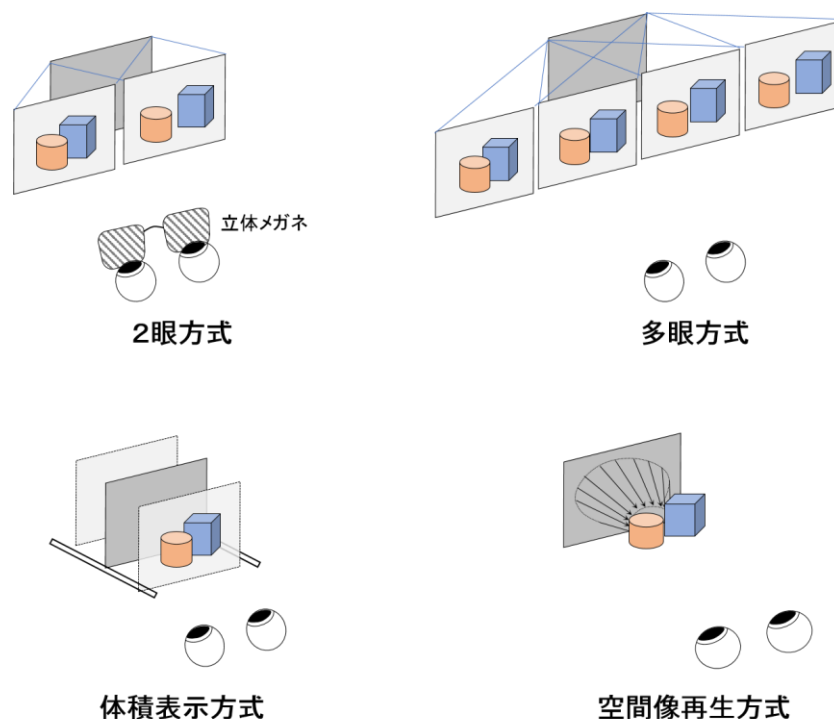
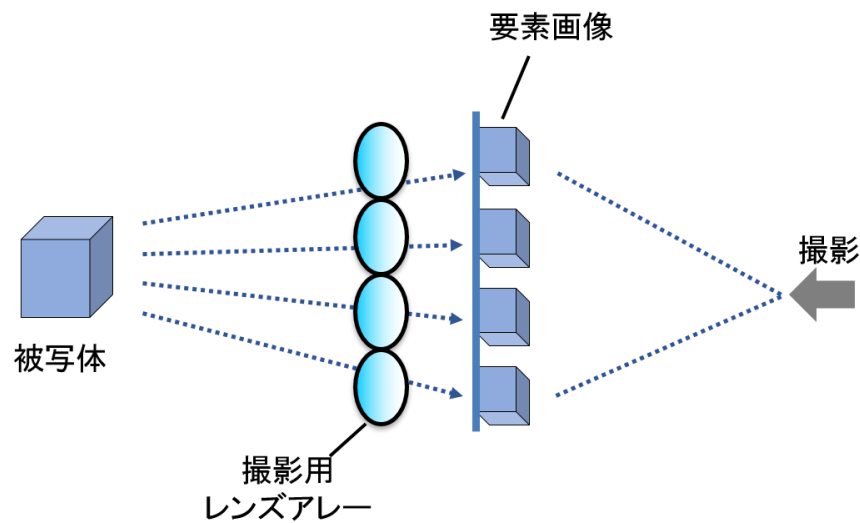


図 1.1 立体映像方式の分類

ャッターを用いる時分割シャッター式がある。偏光式では、テレビの走査線毎に異なる偏光を与える波長板を画面に張り付けることで、奇数と偶数の走査線で異なる映像（右目用と左目用）を表示する。観察側では、左右に対応する偏光のみを通過するフィルタ（偏光子）を取り付けた偏光メガネを用いる。時分割シャッター式では、ディスプレイの高速駆動により左右の映像を交互に時分割表示する。観察側では、メガネに取り付けた液晶シャッターをディスプレイに同期して交互に開閉する。このほか、右目と左目の視点位置を固定し、それぞれの視点にディスプレイから光線を集光することで右目と左目に異なった映像を表示するメガネなしの 2 眼方式も存在する。2 眼方式の立体テレビは、左右の目に異なった映像を見せることにより輻輳と両眼視差を再現している。一方、目の焦点は奥行き位置に関わらず、常に表示画面に対して調整される。そのため、輻輳と調節で矛盾が生じ、これが疲労の原因になると言われている。また、左右の目に対応した一对の映像だけを用いるため、運動視差の再現は不可能である。多眼方式はレンチキュラーレンズなどを用いることで、各レンズに 3 個以上の画素を対応させ、3 個以上の視点を空間に発生させる[3]。多眼方式では、水平方向に複数の視点があるため、水平方向の運動視差を再現することが可能になる。また、通常は視点間隔を両目の間隔（6.5mm）、あるいはその半分にすることが一般的であるが、瞳孔径以下まで間隔を狭めることで、限定的に輻輳と調節の矛盾を解決できる。体積表示方式は、例えばスクリーンを表示画面として高速に平行移動させ、スクリーンの位置の応じた画像をプロジェクターにより投影する[4]。表示画面が物理的に移動するため、輻輳と調節の矛盾は生じないが、機械的操作を伴うことや奥行きの異なる物体の表現が難しいことなどの課題がある。様々な立体映像方式のなかで、空間像再生方式は生理的要因だけでなく、表 1.1 に示す立体感の手がかりを全て満たす。人間は、物体から反射してくる光（物体光）によって、物体を視覚している。したがって、実際には物体が存在しない場合においても、何らかの手段により物体光を再生することで、あたかも物体が存在するかのように見せることが可能となる。これが空間像再生方式の原理である。空間像再生方式はインテグラル式とホログラフィー式の 2 種類がある。インテグラル式は、2 次元に配列した多数のレンズから成るレンズアレーを用いて、被写体（物体）を撮影・表示する[5]。撮影の際、図 1.2(a)に示すように物体光は各々のレン

ズを通過し、記録される．レンズにより生成される物体像を要素画像と呼ぶ．表示側では、記録された要素画像とレンズアレーを組み合わせる．この状態において、要素画像からの光は各々のレンズを通過し、撮影時の光線を逆戻りするため、物体光を再生できる（図 1.2(b))．インテグラル式は、多眼方式の視点数が大幅に増加した超多眼方式と混同されやすいが、空間上に視点を定めず、光線群を再

(a)



(b)

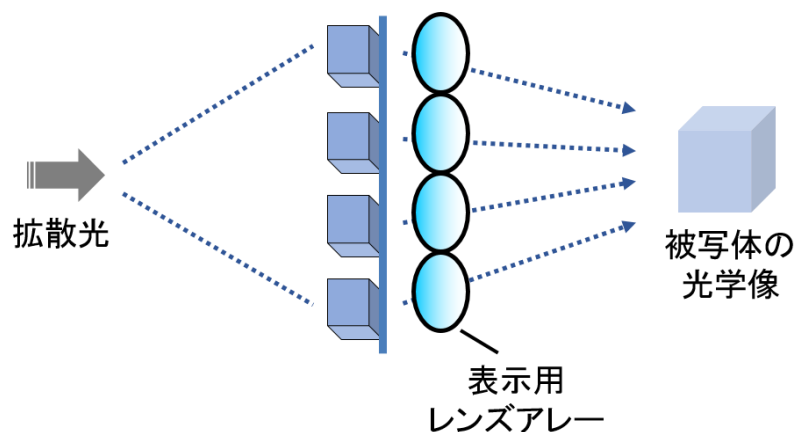


図 1.2 インテグラル式立体の原理
(a)：撮影，(b)：表示

現するインテグラル式（空間像再生方式）が自然な立体像の生成が可能といえる。他方，ホログラフィー式は光の回折，干渉を用いて物体光を記録・再生する[6]。図 1.3(a)に示すようにレーザーなどのコヒーレント光を 2 つに分け，一方の光を物体に，もう一方（参照光）を写真乾板などのホログラム媒体に照射する。ホロ

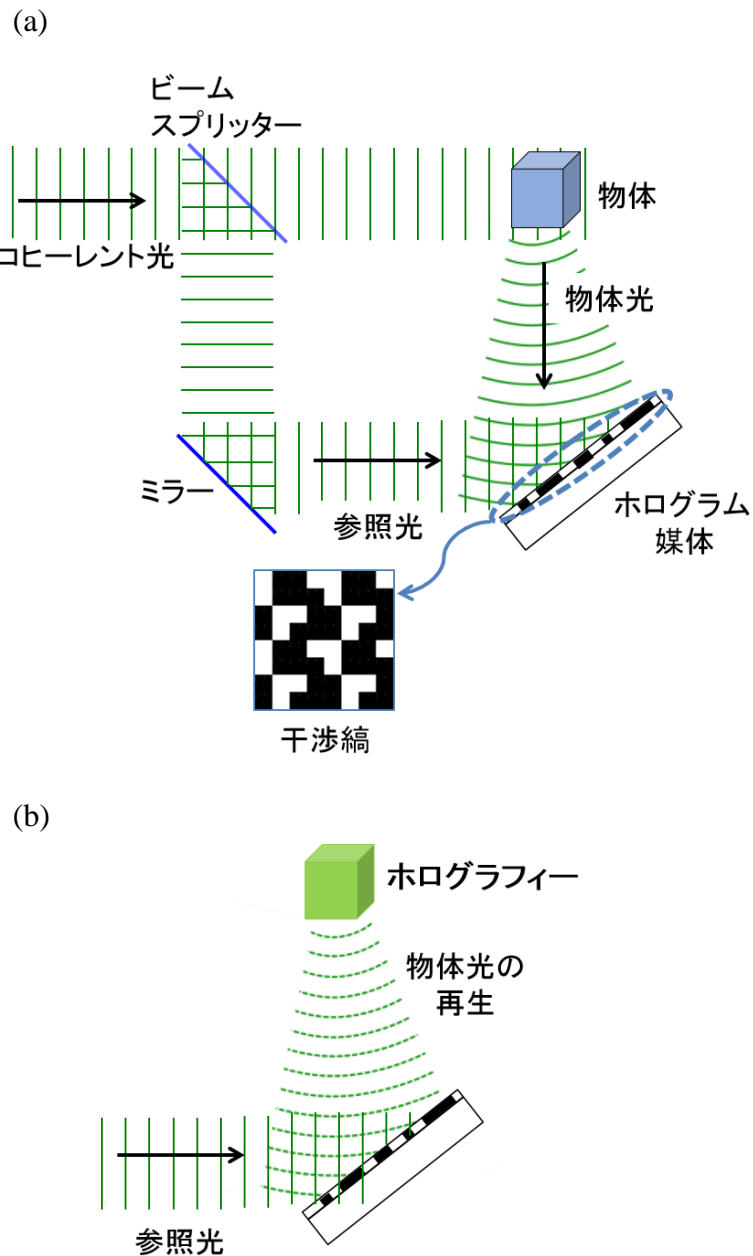


図 1.3 ホログラフィーの原理

(a) : 記録, (b) : 再生

グラム媒体には物体光と参照光が干渉し、光の干渉縞が記録される．この干渉縞に再び参照光を照射すると、干渉縞によって参照光が回折し、物体光が再生される（図 1.3(b)）．物体光そのものを忠実に再現するホログラフィーは、究極の立体技術といえる．しかしながら、ホログラム媒体を用いた場合、干渉縞の書換えが行えないため、立体テレビの実現は不可能である．ホログラフィー立体テレビを実現するには、通常のテレビと同様に画像を書換え可能な表示デバイスを媒体に用いる必要がある．ホログラフィー立体映像表示用のデバイス（ディスプレイ）として、光の振幅、位相、偏光面などの空間的な分布を変調する空間光変調器（以下、空間光変調デバイスと呼ぶ）の研究が進められている．図 1.4 に空間光変調デバイスによるホログラフィー立体テレビシステムの一例を示す．インテグラル式により撮影した立体像を計算によってリアルタイムに干渉縞のデータに変換し、伝送する．家庭など受け側の表示デバイス（携帯端末サイズの空間光変調デバイス）において、受信信号から干渉縞を生成し、ホログラフィー立体映像を表示する．ホログラフィーは光の回折現象を用いるため、通常のディスプレイと比較して画素の間隔（画素ピッチ）が狭いことが求められる．ホログラフィーにより立体像を視認できる範囲（視域角）は、次式で与えられる．

$$\theta = 2 \sin^{-1} \frac{\lambda}{2d} \quad (1.1)$$

λ は入射光の波長、 d は空間光変調デバイスの画素ピッチである[7]．図 1.5 に式 (1.1) より求めた視域角の画素ピッチ依存性を示す．視域の広い立体像を表示するためには、画素ピッチが可視光の波長程度となる非常に微細な空間光変調デバイスを開発する必要がある．また、立体像を表示するには、ある程度の画面サイズが必要となる．画面サイズは画素数を $N \times M$ とすると $Nd \times Md$ で与えられるため、ホログラフィー用空間光変調デバイスは膨大な画素数となる．例えば、画素ピッチが $1\mu\text{m}$ の場合、画面サイズが 4.7 インチ ($104\text{mm} \times 58.5\text{mm}$) の携帯端末において、ホログラフィー動画を実現するためには、 $104\text{K} \times 58.5\text{K}$ の画素が必要である．このように、ホログラフィーにおいて動画を表示するためには、通常のディスプレイと比較して超高密度な表示デバイスを開発しなければならない．そのほか、インテグラル式による撮影技術、干渉縞データへのリアルタイム変換技

術，データの圧縮・伝送技術，立体映像表示技術など様々な技術がホログラフイー立体テレビ実現のために必要となる．

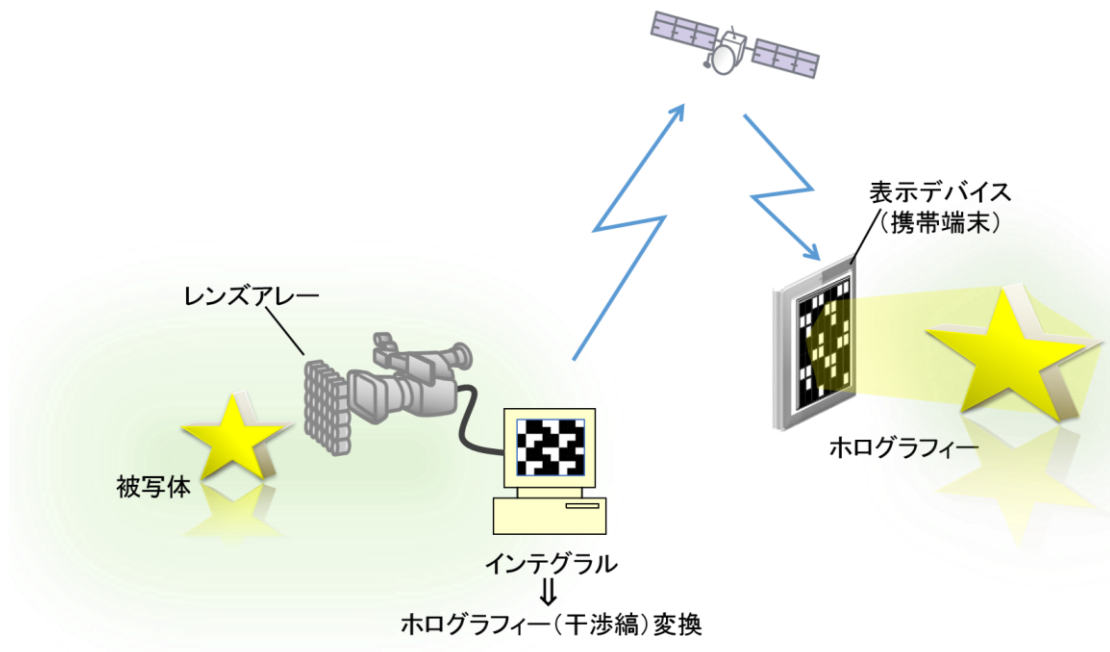


図 1.4 ホログラフイー立体映像システムの一例

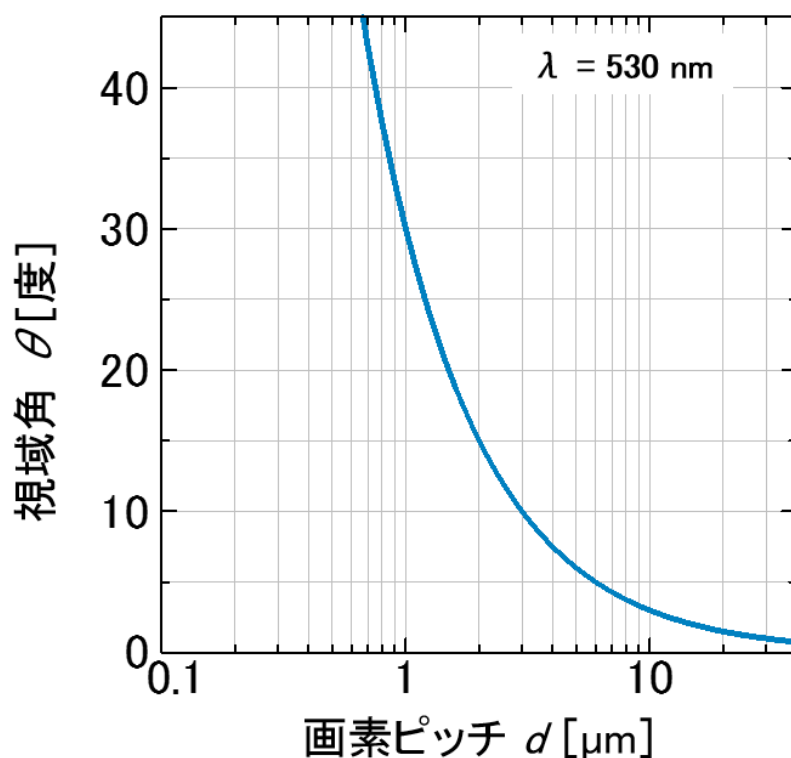


図 1.5 視域角の画素ピッチ依存性

1.2 研究の目的

超高密度の空間光変調デバイス開発は、ホログラフィー立体テレビの可能性を示すために重要な課題である。空間光変調デバイスの高密度化を実現するには、画素の微細化が可能な光変調材料を用いることが望ましい。代表的な空間光変調デバイスはプロジェクターに用いられている反射型液晶デバイスやデジタルマイクロミラーデバイス (Digital Micromirror Devices : DMD) である。しかしながら、これらのデバイスは画素ピッチが $3.5\mu\text{m}$ 以上であり、ホログラフィーの視域角は 10 度以下となる。この視域では立体像の再生範囲が狭いため、ホログラフィーの利点である運動視差が不十分となる。一方、メモリの分野において研究が盛んな磁石デバイス (スピン注入磁化反転デバイス) は微細化技術が確立している。磁石は磁気光学効果による光変調が可能なため、表示デバイスとして適用した場合、狭画素ピッチのホログラフィー立体映像表示用デバイスの開発

が期待できる．そこで本論文では，スピン注入磁化反転技術と磁気光学効果を組み合わせたスピン注入型光変調デバイスに着目し，ホログラフィー立体映像表示用のスピン注入型光変調デバイス開発を目的に研究を行う．多画素のスピン注入型光変調デバイスでは，各画素の確実な駆動を可能とするアクティブマトリクス駆動方式の適用が必須となる．したがって，本論文ではアクティブマトリクス駆動方式を用いた狭画素ピッチ，超多画素のスピン注入型光変調デバイス開発に必要な要素技術の研究を行う．

1.3 本論文の構成

本論文における各章の位置づけを図 1.6 に示す．第 3 章から第 5 章が本論文のホログラフィー立体映像表示用スピン注入型光変調デバイスに関する研究である．第 3 章は低電流化技術の研究，第 4 章は 2 次元アレイ化技術の研究，第 5 章は高密度化技術の研究から成る．

本論文は以下の各章から構成される．

第 2 章では，代表的なホログラフィー立体映像表示用空間光変調デバイスである反射型液晶デバイス，デジタルマイクロミラーデバイスと本論文の研究対象であるスピン注入型光変調デバイスの動作原理について述べる．

第 3 章では，ホログラフィー用スピン注入型空間光変調デバイス実現のために，スピン注入型光変調デバイスの低電流化に関する研究を行う．スピン注入型光変調デバイスは電流駆動である．したがって，アクティブマトリクス駆動方式ではトランジスタからの供給電流により動作する．デバイスに供給可能な電流量はトランジスタのサイズにより制限されるため，デバイスの低電流化が必須となる．すなわち，第 3 章は本論文の基幹となる技術の研究である．低電流化を実現するためにトンネル構造のスピン注入型光変調デバイス (1 画素) を試作し，トンネルデバイスの基礎特性であるトンネル磁気抵抗比やスピン注入特性の調査を行う．調査結果から，トンネル構造のスピン注入型光変調デバイスにおける低電流駆動のメカニズムについて考察する．

第 4 章では，ホログラフィー用スピン注入型空間光変調デバイス実現のために，スピン注入型光変調デバイスの 2 次元アレイ化に関する研究を行う．第 1 次

試作として、画素ピッチ： $5\mu\text{m}$ 、画素数： 5×10 のアクティブマトリクス駆動用シリコンバックプレーンを作製する。作製したバックプレーンに第 3 章において開発したトンネル構造のデバイスを実装し、アクティブマトリクス駆動のスピニ注入型光変調デバイスの開発を試みる。トランジスタにより画素を制御し、デバイスがトランジスタからの供給電流により駆動可能なことを実証する。

第 5 章では、ホログラフィー用スピニ注入型空間光変調デバイス実現のために、スピニ注入型光変調デバイスの高密度化に関する研究を行う。第 2 次試作として、多画素駆動に適したシフトレジスタ内蔵のシリコンバックプレーンを作製し、画素ピッチ： $2\mu\text{m}$ 、画素数： 100×100 のスピニ注入型光変調デバイスの開発を試みる。さらなる低電流化のために磁界アシスト法を適用し、 $2\mu\text{m}$ 画素ピッチのデバイスにおける画素の制御、磁気光学像の取得を行う。また、第 3 次試作として、画素ピッチ： $1\mu\text{m}$ 、画素数 $10\text{K}\times 10\text{K}$ のシリコンバックプレーンを作製し、超多画素駆動の検討を行う。

第 6 章では本論文を総括して研究の結論を述べる。

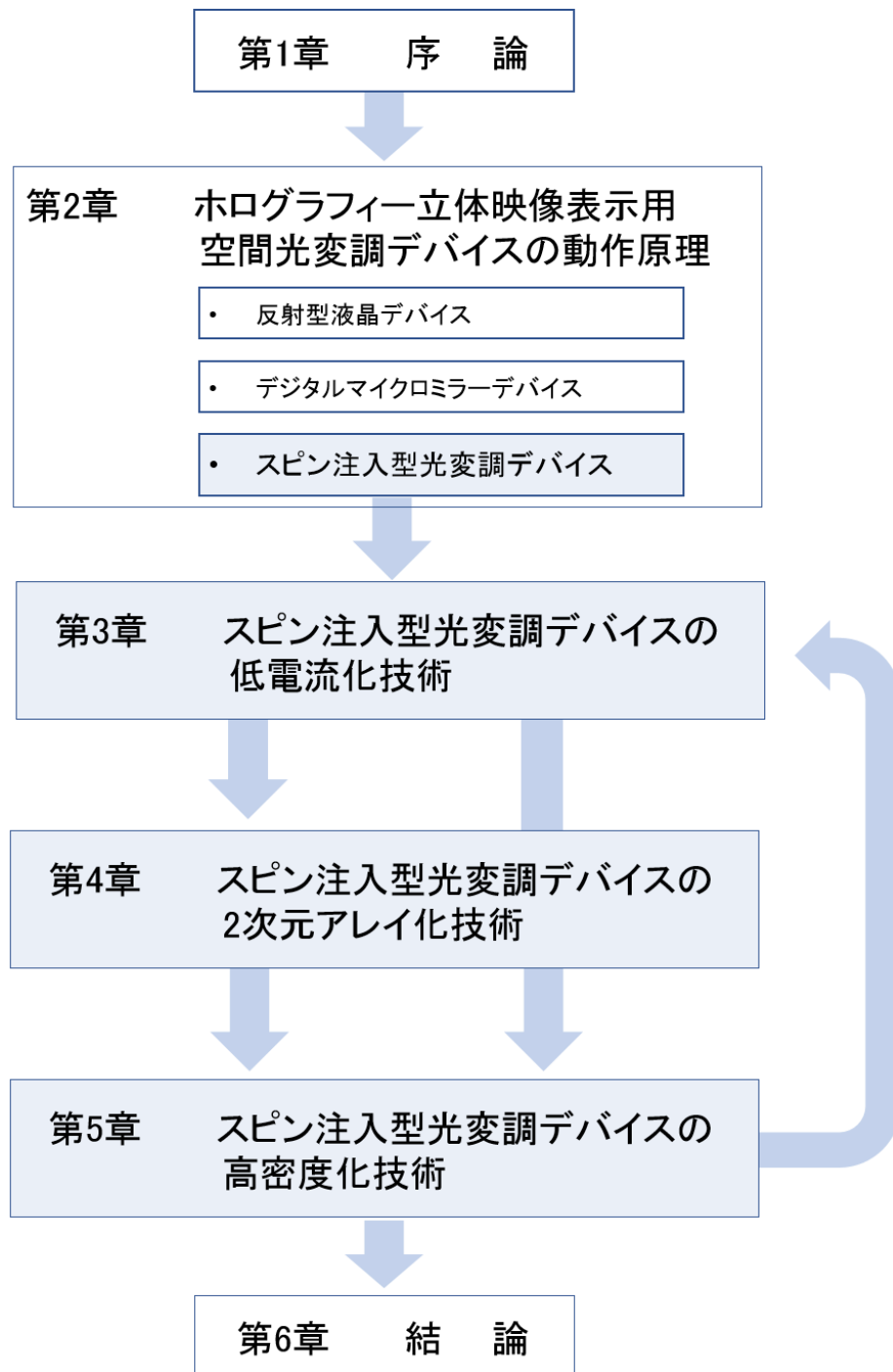


図 1.6 本論文における各章の位置づけ

第2章

ホログラフィー立体映像表示用空間光変調デバイスの動作原理

2.1 反射型液晶デバイス

液晶は光の振幅や位相を電氣的に制御することが可能なため，ディスプレイやプロジェクターなどの表示デバイスとして幅広く用いられている．ホログラフィー立体の分野においても，液晶を用いた空間光変調デバイスの研究が進められてきた[8][9][10][11]．図 2.1 に示す反射型の液晶デバイスは，シリコンバックプレーン上にアルミニウム (Al) などの反射率が高い金属の下部電極を形成する．単結晶シリコンによるトランジスタ回路を作製するため，透過型液晶デバイスと比較して狭画素ピッチ化が可能である．また，下部電極表面は全面が金属となる．したがって，光の反射面積が大きくなり，光利用効率が非常に高いという利点がある．液晶層には，基板面に対して垂直配向の VA (Vertical Alignment) モード液晶を用いることが多い．画素電極に電圧を印加した場合，VA 液晶は電圧値に応じて垂直方向から水平方向に傾く．傾いた液晶に偏光を照射すると，複屈折現象により反射光の偏光面が回転するため，偏光フィルタにより，光の明暗を電圧により制御できる．これが VA モード液晶を用いた反射型液晶デバイスの動作原理である．現在，高精細プロジェクター用に画素ピッチ $3.5\mu\text{m}$ の反射型液晶デバイスが開発されている．しかしながら液晶デバイスは，さらに狭画素ピッチ化を進めた場合，電界クロストークの影響が顕著になる．図 2.2 は画素ピッチ $2\mu\text{m}$ の反射型液晶デバイスにおいて，ON 状態（右側）の画素と OFF 状態（左側）の画素が隣接した場合における電界分布のシミュレーション結果である．等電位線から OFF 状態の画素への漏れ電界が確認できる．この漏れ電界の

影響により、OFF 状態の画素においても液晶が動作するため、デバイスの ON/OFF 比（コントラスト比）は劣化する．したがって、液晶デバイスをホログラフィー立体映像に応用するためには、電界クロストークの抑制が最大の課題といえる．

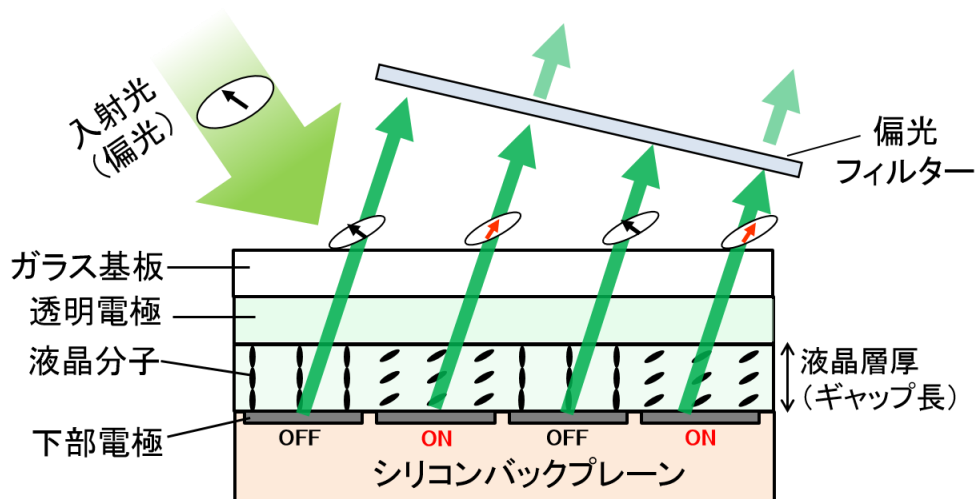


図 2.1 反射型液晶デバイスの構造と動作原理

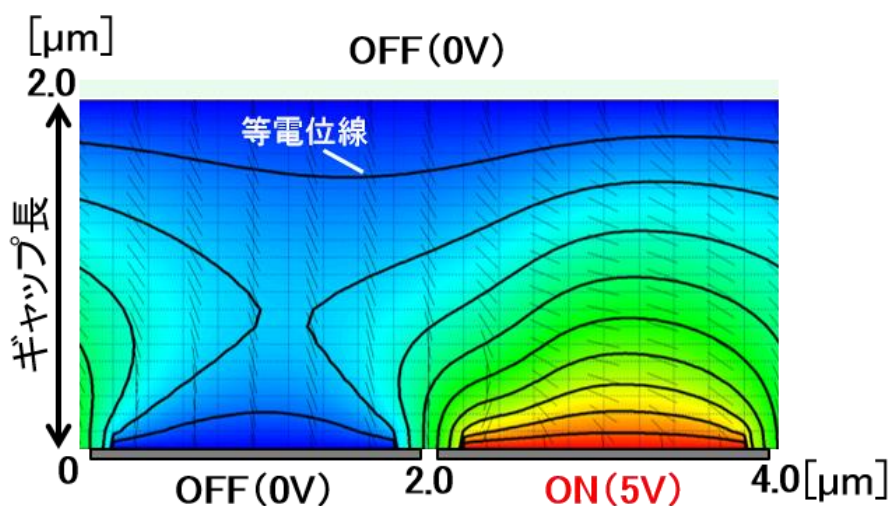


図 2.2 2μm 画素ピッチ反射型液晶デバイスにおける電界分布のシミュレーション結果

2.2 デジタルマイクロミラーデバイス(DMD)

DMD はシリコンバックプレーン上に画素に相当する極小のミラーを配置した反射型の光変調デバイスであり、液晶と同様にプロジェクターに応用されている。図 2.3 に構造と動作原理を示す。ヒンジと呼ばれる部品上にミラーとヨーク（ミラーの台座）が固定されている。ヒンジの両側にある下部電極の一方に電圧を印加すると、電極とミラー（ヨーク）の間に静電引力が発生し、ミラーは傾く。このミラーに光を照射すると、ミラーの傾きによって光は 2 つの方向に反射する。一方の反射光を光出力として利用することにより、光の明暗 (ON/OFF) を電氣的に制御できる[12]。駆動速度は約 $10\mu\text{s}$ であり、時分割による階調表現が可能である。反射型液晶デバイスと同様に DMD をホログラフィー立体映像へ応用する研究も行われている[13][14]。しかしながら、DMD のミラーは機械的に動作するため、可動部の微細化は信頼性や耐久性などの低下を招く。DMD をホログラフィーに応用するためには、狭画素ピッチに耐えうる可動部の開発が必要不可欠といえる。

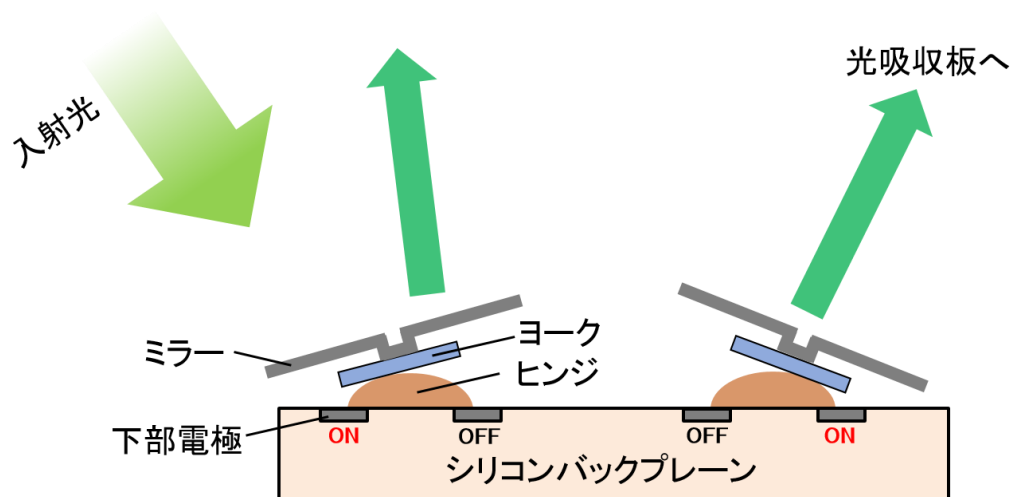


図 2.3 デジタルマイクロミラーデバイス (DMD) の構造と動作原理

2.3 スピン注入型光変調デバイス

2.3.1 スピン注入磁化反転デバイス

現在、パソコンなどで使用されている DRAM (Dynamic Random Access Memory) の置き換えを目指した高速かつ不揮発性を有する次世代メモリとして、磁気抵抗メモリ (Magnetoresistive Random Access Memory : MRAM) の研究が盛んに行われている。MRAM は図 2.4 に示すように、磁性材料の磁化固定層、磁化自由層と非磁性のスペーサー層から成るスピン注入磁化反転デバイスを用いる。磁化固定層は、磁石 (磁化) の向き (S 極または N 極) が固定された材料を用いる。図 2.4(a)に示すように、自由層と固定層の磁化の向きが逆方向 (Anti-Parallel : AP) の時に、上部電極側に電圧を印加すると、下部電極側から上部電極側へ電子が流れる。電子は磁化の向きを担うスピンという性質があり、固定層を通過できる電子は、固定層の磁化と同一方向のスピンを備えた電子 (下向き電子) に限定され、反対方向のスピンを備えた電子 (上向き電子) は反射される。このため、自由層には下向き電子のみが流れ、自由層の磁化に角運動量を受け渡す。この際に自由層の磁化を反転させるトルクが生じるため、自由層に注入される下向き電子の割合が増えると、自由層の磁化は下向きに反転する。この現象をスピン注入磁化反転と呼ぶ[15][16][17]。自由層と固定層の磁化が同一方向 (Parallel : P) の場合、下部電極側に電圧を印加すると、固定層に反射された電子の影響により、自由層の磁化は上向きに反転する (図 2.4(b))。スピン注入磁化反転デバイスの抵抗値は、2つの磁性体の磁化が同一方向の場合に低く、逆方向の場合に高くなるため、抵抗値の大小を「0」、「1」に対応させることで、情報の書込みが可能となる。したがって、自由層は記録層として機能する。読み出し時は、記録層の磁化が反転しない微小電圧にて、抵抗値 (0, 1 情報) を取得する。これがスピン注入磁化反転デバイスを用いた MRAM の動作原理である。記録層は、電源を供給せずとも磁化を保持するため、MRAM はフラッシュメモリと同様に不揮発性のメモリとなる。さらに、磁化反転の速度は 10ns オーダーであり、DRAM と遜色ない高速メモリが実現できる。現状、製品化されている MRAM は容量が 1Gbit 未満であり、大容量化が課題となっている。今後、DRAM と同等の容量が

実現された際、パソコンのメモリは不揮発性の **MRAM** に置換され、起動後、瞬時に操作可能となるであろう。

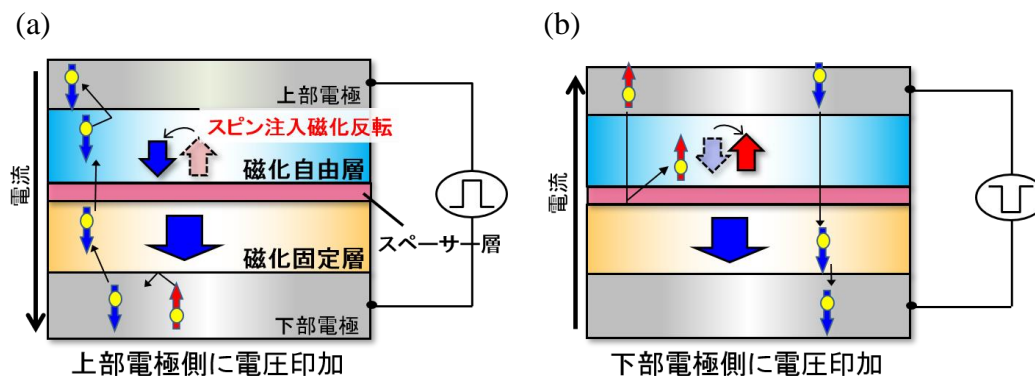


図 2.4 スピン注入磁化反転デバイスの構造と動作原理

2.3.2 磁気光学効果を用いたスピン注入磁化反転デバイス

直線偏光は振動面が一つの面内に限定される偏光であり、振動面が時間とともに反時計回りの正円の軌跡で回転する偏光（左回り円偏光）と時計回りの正円の軌跡で回転する偏光（右回り円偏光）の重ね合わせといえる。直線偏光が磁化を持つ物質に入射した際、左右の円偏光に対する屈折率は異なり、位相差を生じる（旋光性）。また、左右円偏光の吸光度も異なるため、振幅も差が生じる（円二色性）。この旋光性と円二色性により、直線偏光を磁性体に入射した際の反射光は楕円偏光となり、偏光面が回転する。この現象を磁気光学効果（磁気カー効果）と呼び、磁化の向きに応じて回転角が変化する。したがって、図 2.5 に示すように **MRAM** で用いられているスピン注入磁化反転技術と組み合わせることで、光変調を電氣的に制御することが可能となる。これがスピン注入型光変調デバイスの動作原理であり、磁化自由層は光変調層として機能する[18][19][20][21]。スピン注入型光変調デバイスは **MRAM** 応用を目的としたデバイスと同じ構造から成るため、微細化技術が確立しており、狭画素ピッチ化が容易なデバイスといえる。とりわけ、光変調層（画素）は絶縁層により分離されていることから、反射型液晶デバイスの課題である電界クロストークが発生することは無い。また、スピン注入磁化反転は非常に高速であり、液晶や **DMD** と比較してホログラフィー立体像の書換え（フレームレート）においても優位性があると考えられる。

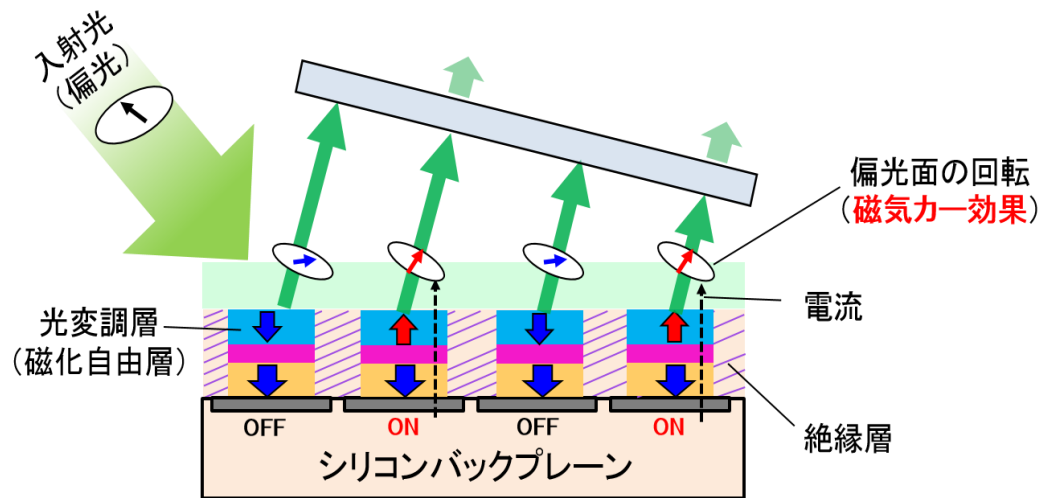


図 2.5 スピン注入型光変調デバイスの動作原理

これまでの研究において、 $1\mu\text{m}$ 画素ピッチの 1 次元スピン注入型光変調デバイス（画素数： 1×10 ）が開発され、その基本動作の検証が行われてきた[22]。また、 $1\mu\text{m}$ 画素ピッチの磁性体を用いたホログラム（画素数： $3,840\times 2,160$ ）の立体表示実験を行うことで、広視域のホログラフィー立体テレビ実現の可能性が示されてきた[23]。ホログラフィー立体テレビを実現するには、スピン注入型光変調デバイスの 2 次元アレイ化、超多画素化が必須となる。図 2.6 に示すように、表示デバイスの駆動方式は、下部電極と上部電極の交点を動作させるパッシブマトリクス駆動方式と各画素にトランジスタを配置したアクティブマトリクス駆動方式がある。超多画素を確実に駆動するためには、電流漏れが無いアクティブマトリクス駆動方式の適用が望ましい。アクティブマトリクス駆動方式において、スピン注入型光変調デバイスはトランジスタからの供給電流により動作する。供給電流量はトランジスタのサイズに制限されるため、低電流駆動のスピン注入型光変調デバイスの開発が必要となる。また、超多画素の電流駆動デバイスに適した駆動方法も検討しなければならない。次章以降では、狭画素ピッチ・超多画素のホログラフィー立体映像表示用スピン注入型光変調デバイスを実現するための要素技術を研究する。

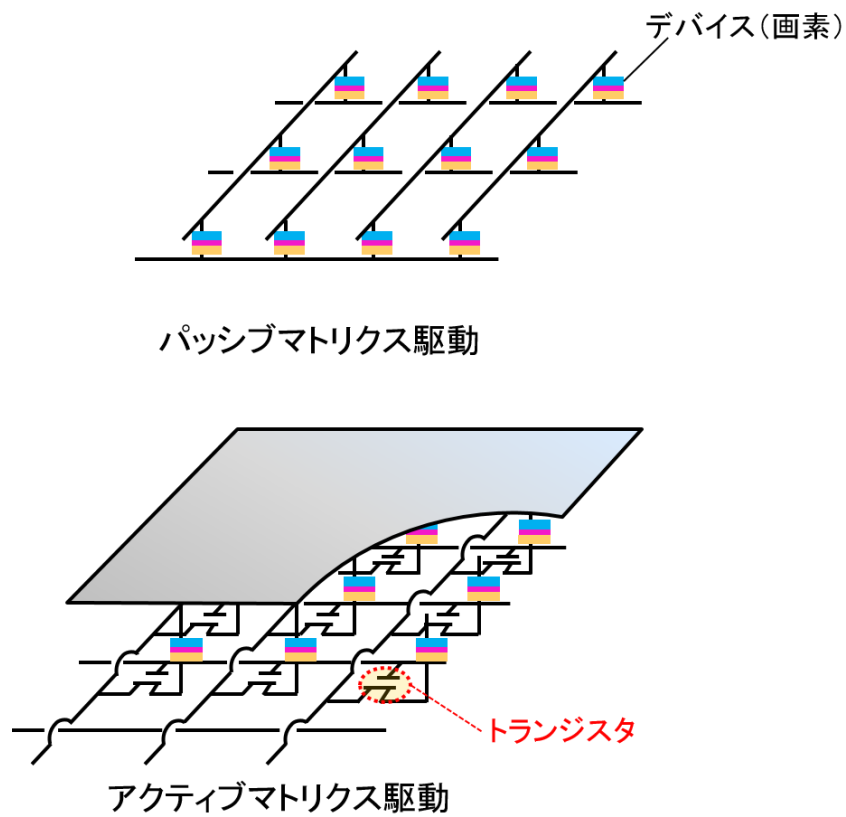


図 2.6 スピン注入型光変調デバイスの駆動方式

第3章

スピン注入型光変調デバイスの 低電流化技術

本章では、ホログラフィー立体映像表示用デバイスを開発するために、スピン注入型光変調デバイスにおける低電流化技術の研究を行う。従来のスピン注入型光変調デバイスは、磁化反転に大電流が必要なため、アクティブマトリクス駆動の実現は難しい。そこで本研究では、デバイスの低電流化を目指し、トンネル構造のスピン注入型光変調デバイスの開発を試みる。開発したデバイスのトンネル磁気抵抗比やスピン注入特性を調査し、アクティブマトリクス駆動の適用可否を検討する。

3.1 トンネル効果を用いたスピン注入磁化反転

スピン注入磁化反転デバイスは、スペーサー層に非磁性の金属を用いる構造（以下、従来構造と呼ぶ）と極薄の絶縁層を用いるトンネル構造の2種類がある。従来構造は、スペーサー層に銅（Cu）や銀（Ag）などの金属を用いており作製は容易である。他方、トンネル構造は層厚 1nm 程度の絶縁体をスペーサー層に適用し、電子（スピン）のトンネル磁気抵抗効果を利用する[24]。トンネル磁気抵抗効果は、Julliere モデルによって説明される[25]。固定層、あるいは自由層において、磁化と同一（反対）方向のスピンを備えた電子を majority-spin (minority-spin) と定義すると、固定層と自由層の磁化が P 状態の場合、図 3.1(a)に示すように majority-spin (minority-spin) は、majority-spin (minority-spin) バンドにトンネルするため、トンネル確率が高い。一方、固定層と自由層の磁化が AP 状態の場合、majority-spin (minority-spin) は、図 3.1(b)のように minority-spin (majority-spin) バンドにトンネルするので、トンネル確率は低くなる。固定層と自由層の

磁化が P (AP) 状態の抵抗値を R_P (R_{AP}) とすると、トンネル磁気抵抗比は次式で与えられる。

$$\text{トンネル磁気抵抗比} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} = \frac{2P_{o1}P_{o2}}{1 - P_{o1}P_{o2}} \quad (3.1)$$

P_{o1} , P_{o2} は自由層, 固定層のスピンの分極率 (majority-spin が占める割合) である。MRAM は読み出しにデバイスの抵抗値を用いるため, 抵抗値の変化量が大

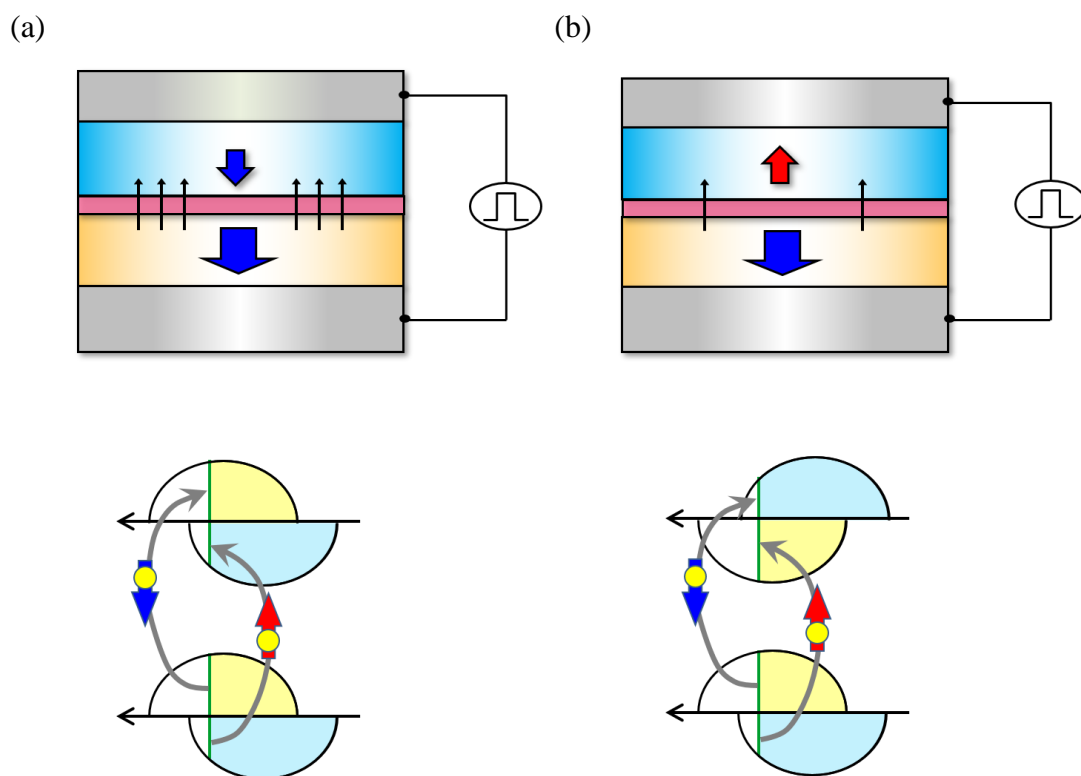


図 3.1 トンネル磁気抵抗効果の概念図

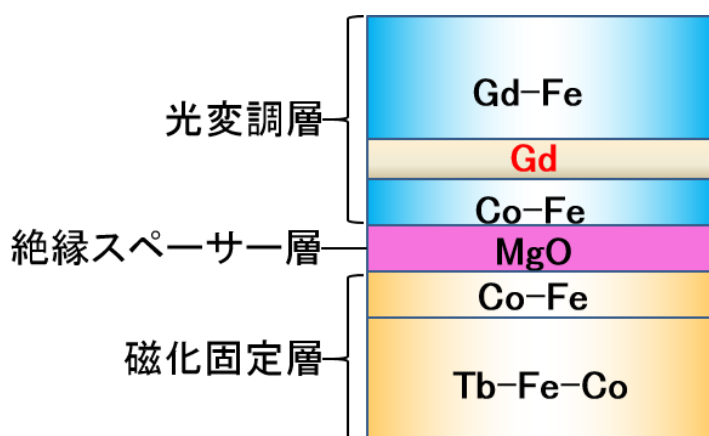
きいトンネル構造の適用が望ましい。式 (3.1) より, トンネル磁気抵抗比は固定層, あるいは自由層のスピンの分極率が大きいほど高くなる。以上の理由から, 自由層や固定層にコバルト (Co), 鉄 (Fe), ボロン (B) の合金 (Co-Fe-B) などの高いスピンの分極率を有する材料を用いたスピン注入磁化反転デバイスの研究が本格化した。当初, スペーサー層は非晶質の酸化アルミニウム (Al-O) が用いられた[24]。その後, 2001 年に単結晶の酸化マグネシウム (MgO) をスペーサー層に適用することにより, トンネル磁気抵抗比が 1000%を超えることが理論

的に示され[26][27], MgO を用いた研究へ移行した. 磁性材料のスピン分極率は最大で 50%程度であるため, Julliere モデルでは 100 %を超えるトンネル磁気抵抗比のデバイス開発は不可能である. しかしながら, 単結晶 MgO をスペーサー層に用いた場合, Fe 系材料との組み合わせにより, 理論上, 完全にスピン分極した電子 ($P_0 = 1$) のみが伝導する. 良質な MgO 単結晶の製膜技術の確立により, 実験においてもトンネル磁気抵抗比が 100 %を超えるデバイスが開発された[28][29][30][31]. また, トンネル磁気抵抗比の増加に伴いスピン注入効率も飛躍的に向上し, スピン注入磁化反転電流の減少に成功した[32][33][34].

3.2 トンネル構造のスピン注入型光変調デバイス

元来のスピン注入型光変調デバイスは, 光変調層に磁気光学効果の大きなガドリニウム鉄合金 (Gd-Fe), スペーサー層に Ag を用いた従来構造である. Gd-Fe 光変調層の組成調整により, スピン注入磁化反転電流の大幅な減少が達成された[35]. しかしながら, 反転電流密度の値はトンネル構造のスピン注入磁化反転デバイスと比較して, 1 桁以上大きい. スピン注入型光変調デバイスは, 良好な光変調特性を得るために光変調層は大面積 (体積) が必要となる. 磁化反転に必要な電流量は光変調層の面積に比例するため, MRAM 用途のデバイス以上に低電流化が求められる. 本章では, 低電流駆動を実現するために, スペーサー層に MgO を用いたトンネル構造のスピン注入型光変調デバイス開発に取り組む. MRAM 用途のデバイスは自由層の磁気カー効果がいいため, 表示デバイスには適さない. スピン注入磁化反転デバイスをホログラフィー立体映像表示に用いるには, 光変調層に大きな磁気カー回転角を示す材料の適用が必須となる. そこで本研究では, デバイスの層構成から着手し, 独自のトンネル構造を備えたスピン注入型光変調デバイスの開発を試みる. トンネル構造のスピン注入型光変調デバイス開発の条件を以下に示す.

- ・ 結晶性の良い MgO 薄膜
- ・ MgO 薄膜との接合に適した磁性材料
- ・ 高い光変調度 (磁気光学効果) を示す磁性材料



熱酸化膜付きシリコン (Si) 基板上にタンタル (Ta), Cu, ルテニウム (Ru) の積層膜を下部電極として製膜した. その後, 磁化固定層として Ru を 2nm, テルビウム (Tb) と Fe および Co の合金 (Tb-Fe-Co) を 20nm, Co-Fe 合金を 0.5nm, 絶縁スペーサー層として MgO を 1nm, 光変調層として Co-Fe 合金を 0.3nm, Gd を 0.2nm, Gd-Fe 合金を 9nm, 保護層として Ru を 3nm 製膜した. 下部電極や磁化固定層, 光変調層など金属の製膜には DC イオンビームスパッタ装置, 絶縁層の MgO 製膜には RF イオンビームスパッタ装置を用いて, 超高真空中にて製膜した. スパッタは真空中で行う製膜製造法の一つであり, 高電圧でイオン化させたアルゴン (Ar) などの希ガス元素を材料に衝突させ, 材料表面の原子をはじき飛ばし, 基板に製膜する方法である. とりわけ, イオンビームスパッタ装置は装置内に必要な希ガスイオンのみを使用するため, 組成ずれが生じにくく, 緻密で平坦な薄膜が作製可能である. なお, 光変調層の Gd 0.2nm は Gd-Fe 合金の光変調特性を保持するバッファ層として挿入した[37]. Co-Fe は Gd-Fe の磁気光学特性を劣化させるため, バッファ層の挿入が必要となる. しかしながら, 層厚が増えると Co-Fe と Gd-Fe の接続が途切れ, 完全に分離する. そこで, 光変調

層の Co-Fe と Gd の層厚を変化させながら、光変調特性等を調査し、最適な厚さを設定した。図 3.3 は Gd バッファ層有無の光変調層における磁気カー回転角の外部磁界依存性を示す。Gd バッファ層が無い場合は、カー回転角が磁界に応じて単調に増加する特性を示す。一方、バッファ層を挿入した光変調膜は、外部磁界が 0 の時に 2 値状態を持つ良好な光変調特性を示した。この結果から、Gd バッファ層の挿入はトンネル構造のスピン注入型光変調デバイス開発に必要不可欠であることが分かった。

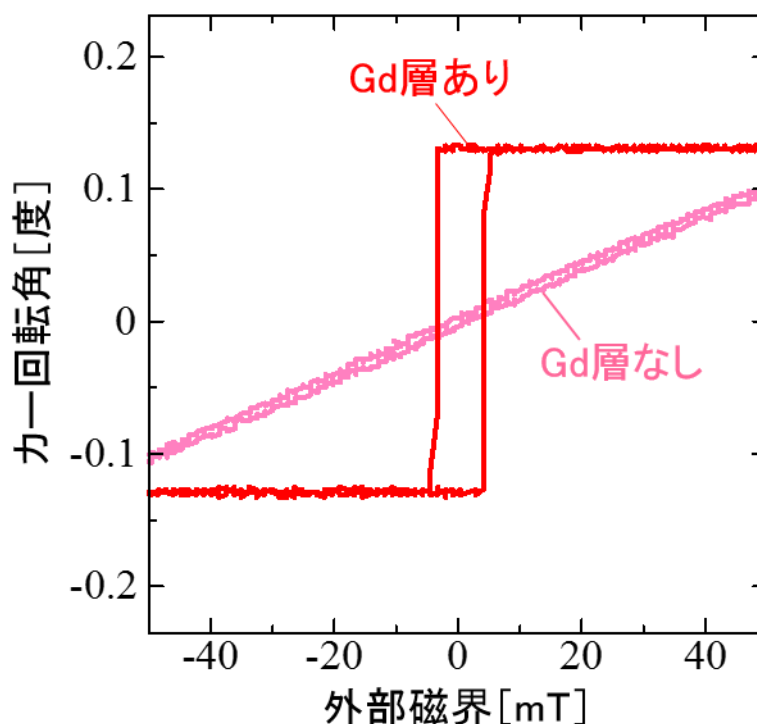


図 3.3 光変調度（カー回転角）の外部磁界依存性

図 3.4 にデバイスの作製行程を示す。前述の下部電極用金属膜とトンネル構造の光変調膜を堆積後、フォトリソグラフィーによる下部電極パターン形成、Ar イオンビームエッチング、絶縁膜堆積などの微細加工を施し、下部電極を形成した。その後、電子線リソグラフィーによるスピン注入型光変調デバイスのパターン形成などを行い、 $0.56\mu\text{m}\times 0.56\mu\text{m}$ サイズのデバイスを作製し、最後に上部電極を堆積して完成となる。デバイス形成時のエッチング終点は、磁化固定層の直前とした。これはエッチングによる磁化固定層の特性劣化を防ぐためである。また、

本章では低電流化技術の研究に特化したため，上部電極は，Ru (3 nm) / Ta (3 nm) / Cu (100 nm) / Ru (3 nm) / Au (10 nm) から成る金属電極を用いた．図 3.5 に開発したデバイスの透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope : TEM) 像を示す．TEM 像の結果から，設計に基づいたトンネル構造を有するデバイス作製に成功していることが分かる．

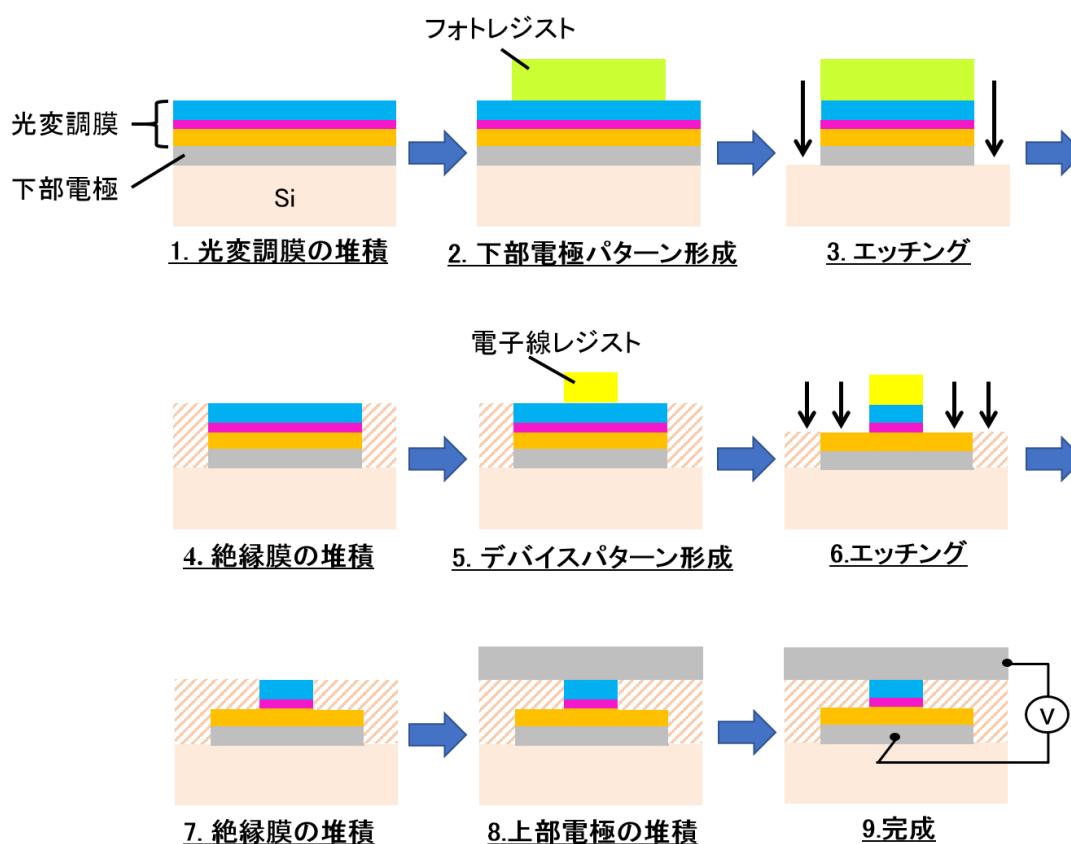


図 3.4 トンネル構造を有するスピン注入型光変調デバイスの作製行程

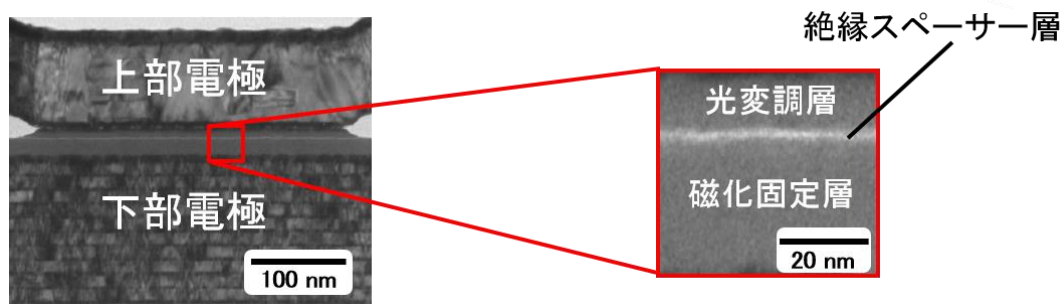


図 3.5 トンネル構造のスピン注入型光変調デバイスにおける TEM 像

図 3.6 はデバイス抵抗値の外部磁界依存性を示す．光変調層の磁化の向きに応じて電気抵抗値が変化する理想的なトンネル磁気抵抗曲線が得られた．しかしながら，トンネル磁気抵抗比は 6.0% であり，MRAM 用途で研究されているトンネル構造のデバイスと比較して 2 桁低い．この要因は MgO の結晶化が不十分であったためと考えられる．図 3.7 は，デバイスの MgO 層近傍を観察した TEM

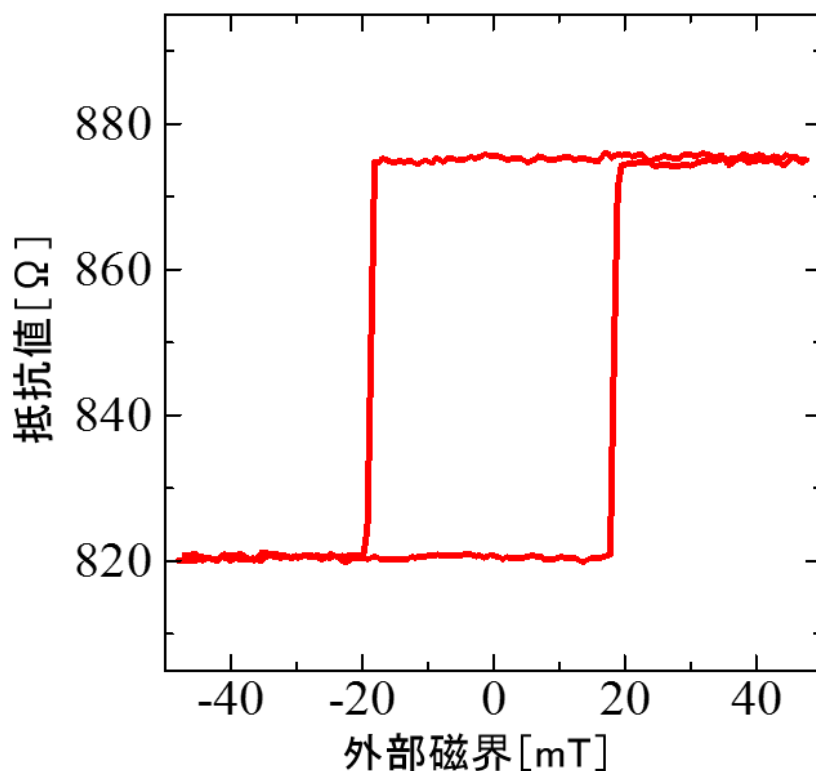


図 3.6 抵抗値の外部磁界依存性

像である。高いトンネル磁気抵抗比を示すデバイスの TEM 像は、MgO 層の原子が規則的に配列し、結晶化していることが一目瞭然である[38]。一方、本研究で作製した MgO 層は原子の配列は見られず、非晶質である。スピン注入型光変調デバイスの MgO を結晶化させるためには、界面材料の厚さの調整や熱処理が必要と考えられる。しかしながら、これらの方法は光変調材料 Gd-Fe の特性を劣化させるため、適用が難しい。

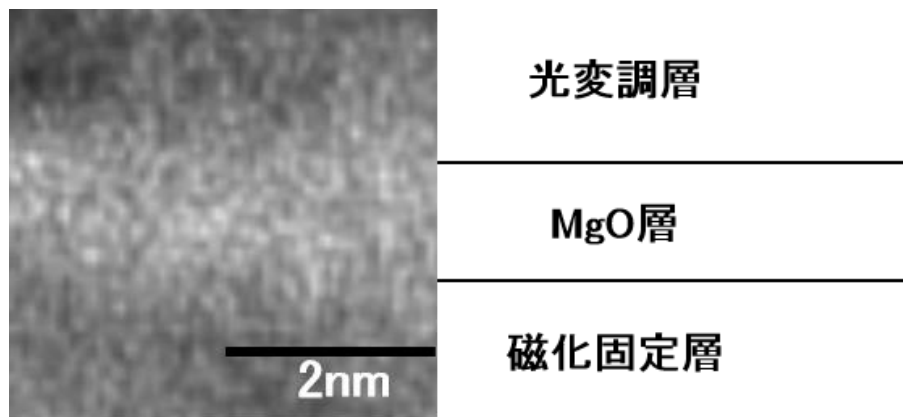


図 3.7 MgO 層近傍の TEM 像

アクティブマトリクス駆動の適用可否を検討するために、スピン注入磁化反転特性を調査した。電流（スピン）注入のパルス幅は $10\mu\text{sec}$ で行った。図 3.8 はパルス電流に対するデバイス抵抗値を示す。比較として、従来構造デバイスのスピン注入磁化反転特性も図示し、横軸はデバイスの面積を統一するために反転電流密度で規格化した。トンネル光変調デバイスの電気抵抗値は電流の値に応じて変化し、その変化量は外部磁界を印加した場合と同等であった。すなわち、トンネル光変調デバイスは従来構造デバイスと同様に、電流による磁化反転が可能なことを実証した。トンネル光変調デバイスの磁化反転電流密度は $1.0 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ であり、従来構造デバイスにおける値 ($14 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$) と比較して、1桁低減させることに成功した[39]。この磁化反転電流密度は、トンネル磁気抵抗比が 100%を超えるデバイスにおいて成し遂げられている値である。開発したデバイスのトンネル磁気抵抗比は 6%であり、高いスピン注入効率を実現できているとは考えにくい。トンネル光変調デバイスにおける低電流での磁化反転は、パル

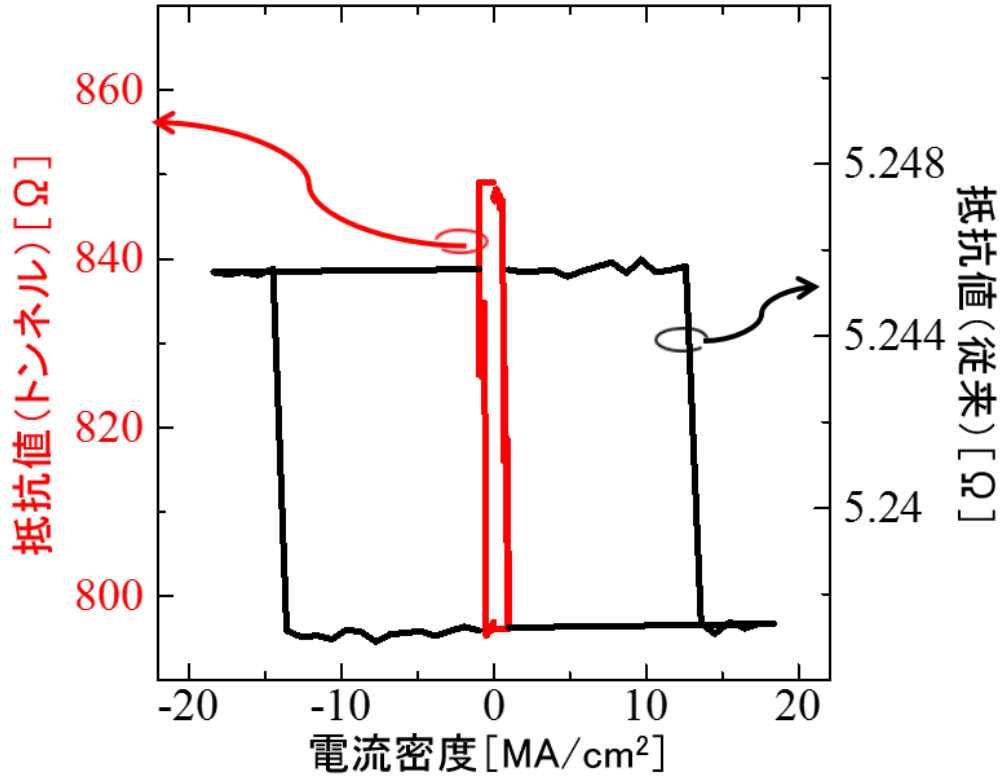


図 3.8 スピン注入特性（トンネル構造と従来構造の比較）

ス電流（スピン）注入の際に発生するジュール熱が磁化反転に寄与していると考えられる．Gd-Fe のような希土類遷移金属合金の磁化特性は温度の影響を受けやすい[40]．とりわけ，従来構造のデバイスと比較して，トンネル構造のデバイスは絶縁層を有するために抵抗値が高い．したがって，パルス電流注入の際に発生するジュール熱も大きくなる．パルス電流注入時における熱安定性指標（ Δ_1 ）は次式で与えられる[41]．

$$J_c = J_{c0} \left[1 - \frac{1}{\Delta_1} \ln \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right) \right] \quad (3.2)$$

ここで， J_c は電流パルス幅 τ における磁化反転電流密度， J_{c0} は電流パルス幅 1 nsec（ τ_0 ）における磁化反転電流密度である．図 3.9 に磁化反転電流値 J_c のスピン注入時間依存性を示す．なお， $J_c^{\text{AP} \rightarrow \text{P}}$ （ $J_c^{\text{P} \rightarrow \text{AP}}$ ）は光変調層の磁化が AP（P）状態から P（AP）状態になる際の反転電流値である[42]．図 3.9 の傾きから外挿することにより求めた J_{c0} は 3.52mA（ $J_{c0} = 1.1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ ）であり，式（3.2）か

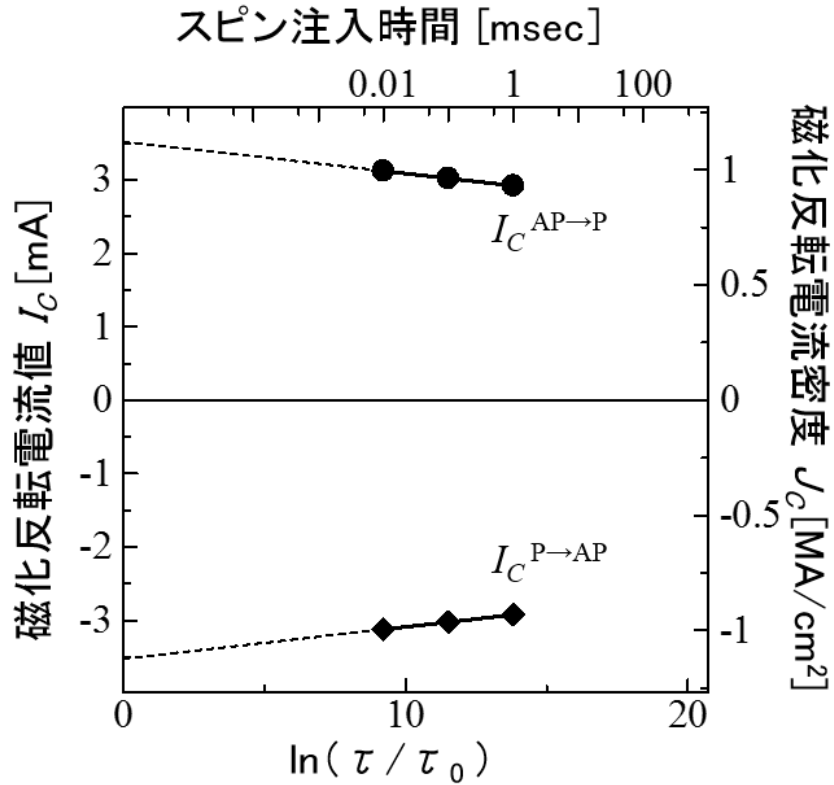


図 3.9 磁化反転電流値のスピン注入時間依存性

ら Δ_1 はおよそ 80 と見積もることができる．一方，熱安定性指標は磁気異方性（磁化の向き易さ）から K_{eff} から次式で表すことも可能である．

$$\Delta_2 = \frac{K_{\text{eff}} V}{K_B T} \quad (3.3)$$

V は光変調層の体積， K_B はボルツマン定数， T は絶対温度である．図 3.10 はトンネル光変調膜に対して，垂直（面直）方向，および水平（面内）方向に磁界を印加した際の磁化曲線である． K_{eff} はこの 2 つの磁化曲線で囲まれる面積であり，その値は 5700 J/m^3 である． K_{eff} の値から求めた Δ_2 は 4000 と Δ_1 の 50 倍となった．この結果より，開発したトンネル構造のスピン注入型光変調デバイスにおける熱安定性はスピン注入時に大幅に減少することが判明した．トンネル構造は従来構造と比較して高抵抗なため，スピン注入時にジュール熱の影響が大きい．光変調層（Gd-Fe）の磁化は，ジュール熱の影響により揺らぎやすくなる．すな

わち，スピン注入時にジュール熱は磁化反転のアシスト効果として機能するため，低電流でのスピン注入磁化反転が可能となる．

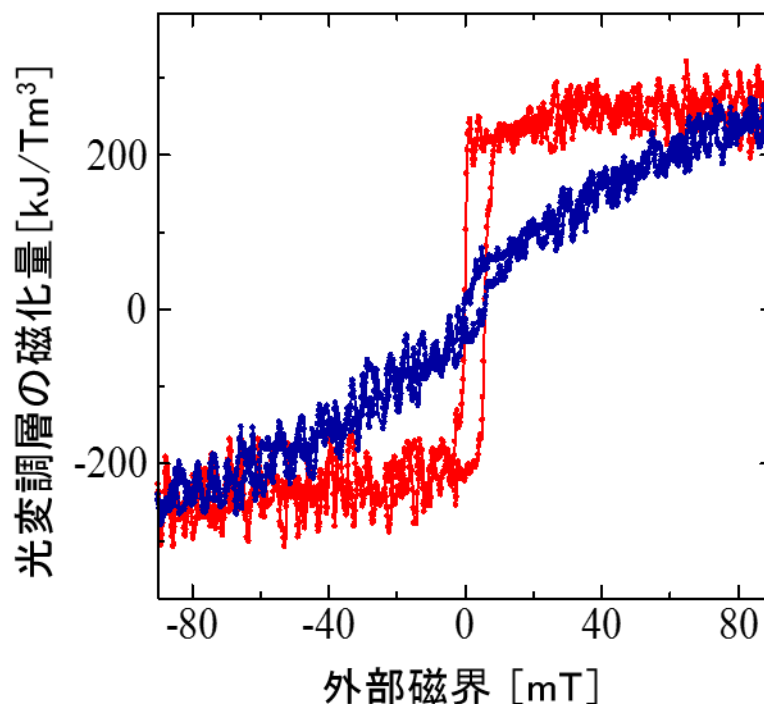


図 3.10 光変調層の磁化曲線（赤線：面直磁界，青線：面内磁界）

3.3 まとめ

本章では，ホログラフィー立体映像表示用のデバイスを開発するために，スピン注入型光変調デバイスにおける低電流化技術の研究を行った．アクティブマトリクス駆動方式の超多画素スピン注入型光変調デバイスを実現するために，低電流動作が可能なトンネル構造のスピン注入型光変調デバイス開発を試みた．絶縁スペーサー層 MgO と接合性が良い Co-Fe を光変調層に適用し， Gd バッファ層を挿入することで， Co-Fe と光変調材料 Gd-Fe を組み合わせた独自のトンネル光変調膜を作製した．デバイスのトンネル磁気抵抗比は 6.0% と低い値にもかかわらず，スピン注入磁化反転電流密度は， $1.0 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ と低電流化に成功した．反転電流値のスピン注入時間依存性と磁化測定結果から，低電流駆動の要因

は、スピン注入時に発生する大きなジュール熱が磁化反転に寄与しているためと考えられる。ジュール熱を利用した磁化反転は、大面積の磁化反転が必要なホログラフィー用のスピン注入型光変調デバイスにとって有効な手法である。以上から、開発したトンネル構造のスピン注入型光変調デバイスは、従来構造のデバイスでは不可能なアクティブマトリクス駆動用シリコンバックプレーンへの実装が期待できる結果を示した。

第4章

スピン注入型光変調デバイスの 2次元アレイ化技術

本章では、ホログラフィー立体映像表示用デバイスを開発するために、スピン注入型光変調デバイスにおける2次元アレイ化技術の研究を行う。立体映像を表示するには、ディスプレイと同様に画素（デバイス）の2次元アレイ化が必須となる。第2章で述べたとおり、スピン注入型光変調デバイスの2次元アレイ化には、電流漏れが無いアクティブマトリクス（Active-Matrix : AM）方式の適用が望ましい。本章では、まず第1次試作として、画素ピッチ： $5\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ 、画素数： 10×5 から成る AM 駆動のスピン注入型光変調デバイス開発に取り組む。画素選択トランジスタを備えたシリコンバックプレーンに第3章で開発した低電流駆動のスピン注入型光変調デバイスを実装し、AM 駆動方式スピン注入型光変調デバイスの開発を試みる。開発したデバイスをトランジスタにより選択・駆動することでトンネル磁気抵抗比やスピン注入特性を調査する。

4.1 2次元アレイのスピン注入型光変調デバイス

図4.1にAM駆動方式スピン注入型光変調デバイスの模式図、および画素の断面構造を示す。図4.1から分かるように、スピン注入型光変調デバイスは、画素選択（スイッチング）の役割を担う金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ（Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor : MOSFET）が2次元配列したシリコンバックプレーン上にトンネル構造のスピン注入型光変調デバイスが形成されている。スピン注入型光変調デバイスの下部電極は画素選択トランジスタのドレイン端子と接続されており、デバイス（画素）はトランジスタからの供

給電流によって動作する．トランジスタの ON/OFF 比は 10^9 程度であるため，漏れ電流が発生せず，確実なスイッチングが可能となる．

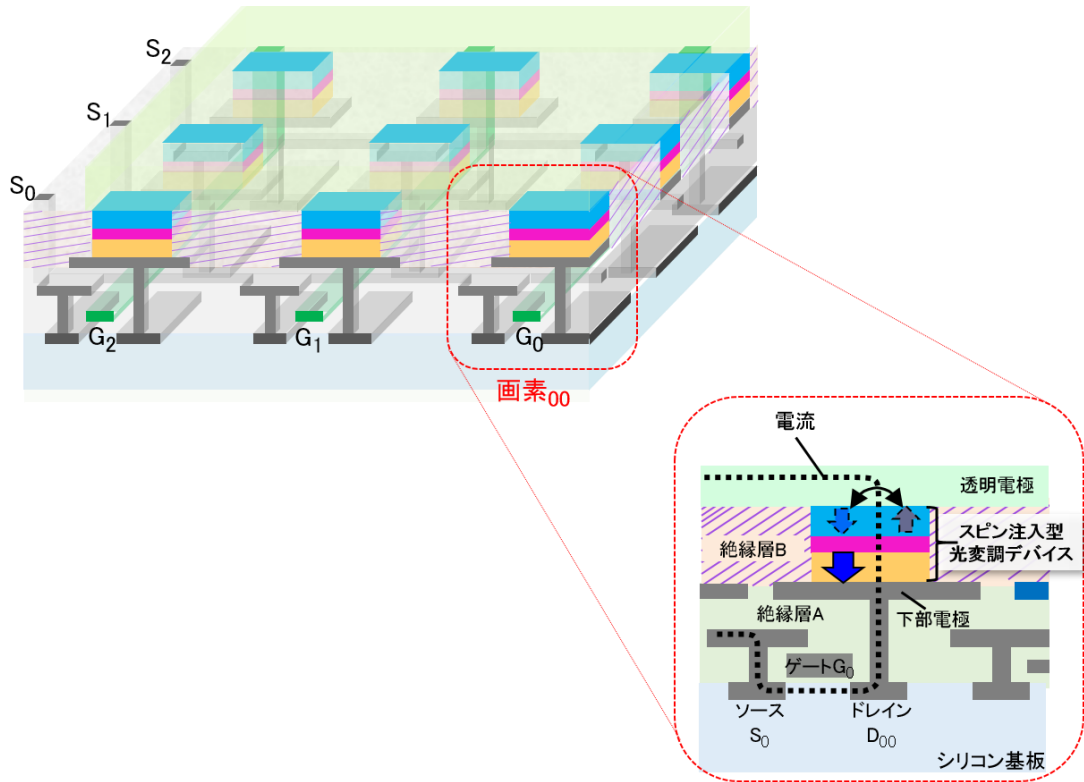


図 4.1 AM 駆動方式スピン注入型光変調デバイスの模式図と断面構造

図 4.2 は AM 駆動方式スピン注入型光変調デバイスの回路構成を示す．より確実に画素をスイッチングするために，行選択トランジスタを設け，画素選択トランジスタと併用する．ゲートライン G_0 とソースライン S_0 にそれぞれ電圧を印加すると，ドレイン D_{00} と接続された画素 00 が選択される． $V(+)$ ，あるいは $V(-)$ 側から適切な電圧を印加することで画素 00 の光変調が可能となる．前述のとおり，スピン注入型光変調デバイスは不揮発性を有するので，一旦高速に情報を書き込むと，電源を切っても画素の動作状態は保持される．このため，反射型液晶デバイスに用いられている画素情報保持の役割を果たすコンデンサが不要となり，単純な回路構成でバックプレーンを作製することが可能である．

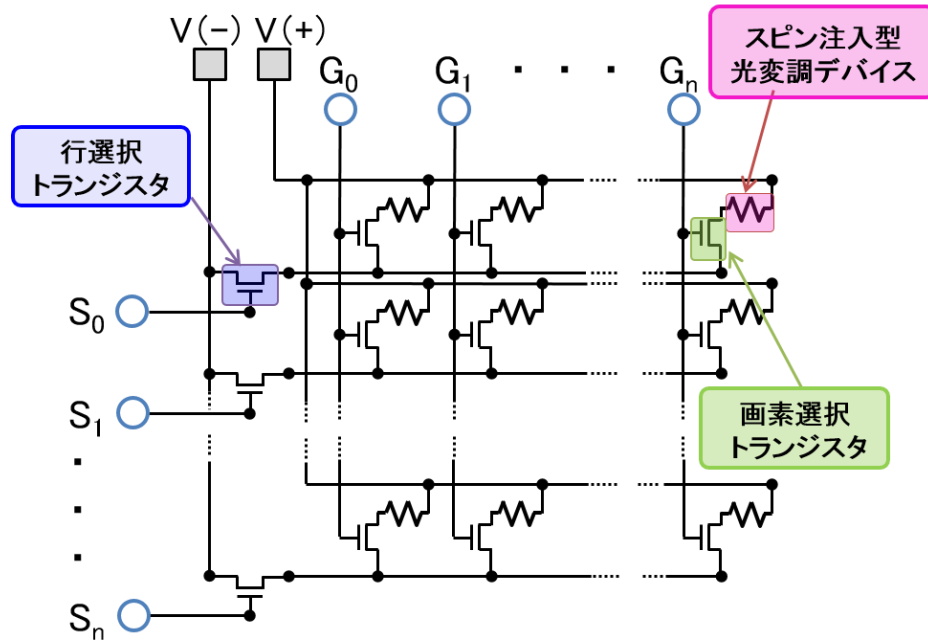


図 4.2 AM 駆動方式スピン注入型光変調デバイスの回路構成

4.2 5 μm 画素ピッチのシリコンバックプレーン

AM 駆動のスピン注入型光変調デバイスは画素選択トランジスタからの供給電流によって動作する。ドレイン電流は、トランジスタの形状比 W/L (W : チャンネル幅, L : チャンネル長) に比例する。このため、狭画素ピッチでは W が小さくなり、供給電流量が少ない。そこで第1次試作では、十分な電流を供給可能な 5 μm 画素ピッチのシリコンバックプレーンを用いて、画素ピッチ: 5 $\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$, 画素数: 10 \times 5 のスピン注入型光変調デバイスを作製し、評価する。5 μm 画素ピッチのシリコンバックプレーンにおける画素選択トランジスタの仕様は、 $W = 4.34\mu\text{m}$, $L = 0.35\mu\text{m}$, ゲートの耐圧は 3.3V である。図 4.3 は 5 μm 画素トランジスタ配置の上面図(概略図)である。画素内に6個のトランジスタを配置し、並列接続することで、大電流の供給を可能としている。なお、隣り合ったトランジスタは反転して配置することにより、1つのドレインで2個のトランジスタ形成を可能としている。画素選択トランジスタの特性を調査するために、トランジ

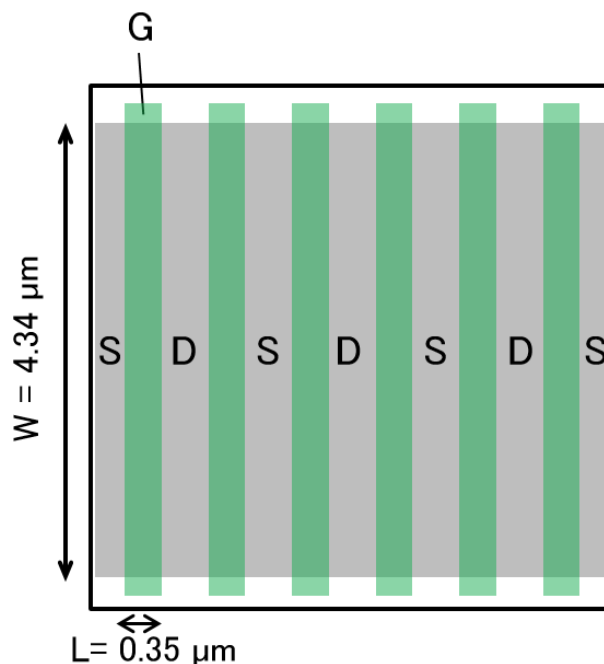


図 4.3 5μm 画素トランジスタ配置の上面図（概略図）

スタのドレイン端子と電圧印加端子（図 4.2 における $V(+)$ 端子）を短絡したデバイスを作製した．図 4.4 に任意の画素選択トランジスタにおける静特性（電流－電圧特性）を示す．ゲート電圧は 3.3V に設定した．ドレイン－ソース間の電圧（ V_{ds} ）がおおよそ 2.5V 以上でドレイン電流（ I_d ）は飽和領域に達し，飽和電流値は 13.7mA であった．線形領域の傾きからトランジスタのオン抵抗は 86Ω と見積もることができる．また，図 4.2 に示すようにスピン注入型光変調デバイスと画素選択トランジスタを接続した場合のドレイン電流 I_d はキルヒホッフの第 2 法則から次式で与えられる．

$$I_d = -\frac{1}{R}V_{ds} + \frac{V}{R} \quad (4.1)$$

R はデバイスの抵抗値， V は印加電圧値であり，デバイスへの印加電圧は， $V - V_{ds}$ となる．図 4.4 の破線は式 (4.1) から求めた．トランジスタの耐電圧は 3.3V であるが，デバイスの絶縁破壊を考慮し， V は 2.5V に設定した． R は第 3 章で作製したトンネル構造のスピン注入型光変調デバイスから 800Ω とした．この破線は負荷線といい，実線との交点がデバイスへの供給電流量となる．図 4.4 から，

デバイスへの供給電流量は、2.8mA と見積もることができる。デバイスの面積が $0.5\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$ の場合、第3章の結果から、スイッチングに必要な電流量は 2.5mA となる。トランジスタの供給電流量は、この値を十分に上回っているため、画素選択トランジスタを用いたデバイスの駆動が可能と考えられる。

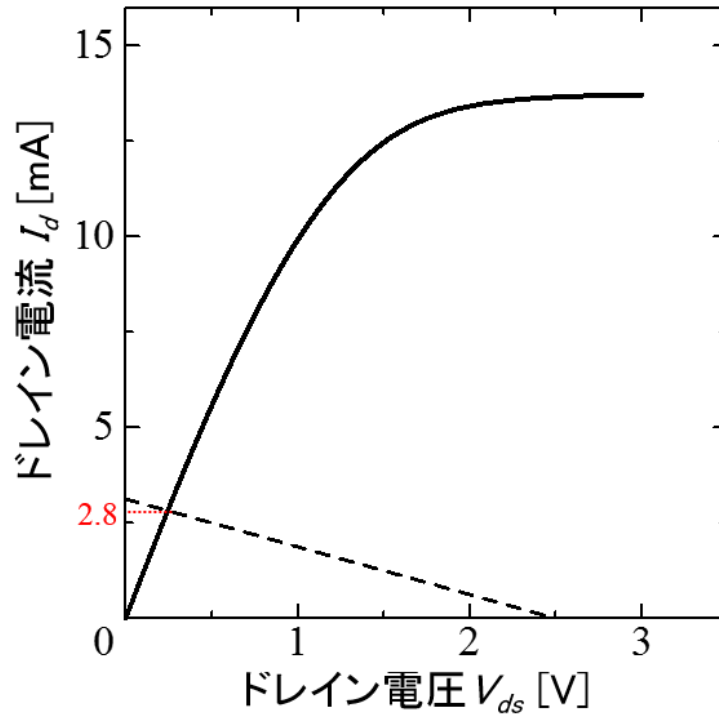


図 4.4 5 μm 画素トランジスタの静特性

4.3 5 μm 画素ピッチのスピ注入型光変調デバイス

5 μm 画素ピッチのシリコンバックプレーンは、画素選択トランジスタとスピ注入型光変調デバイスとの接続用に、トランジスタのドレイン端子に通じた via（貫通端子）が形成されている。表面の via 端子上に下部電極、トンネル構造のスピ注入型光変調デバイスを形成することで、5 μm 画素ピッチのスピ注入型光変調デバイスを作製した。図 4.5 に作製行程を示す。Ru と Ag の下部電極、および Ru (2nm) / Tb-Fe-Co (20nm) / Co-Fe (0.5nm) / MgO (0.8nm) / Co-Fe (0.3nm) / Gd (0.2nm) / Gd-Fe (9nm) / Ru (3nm) から成るト

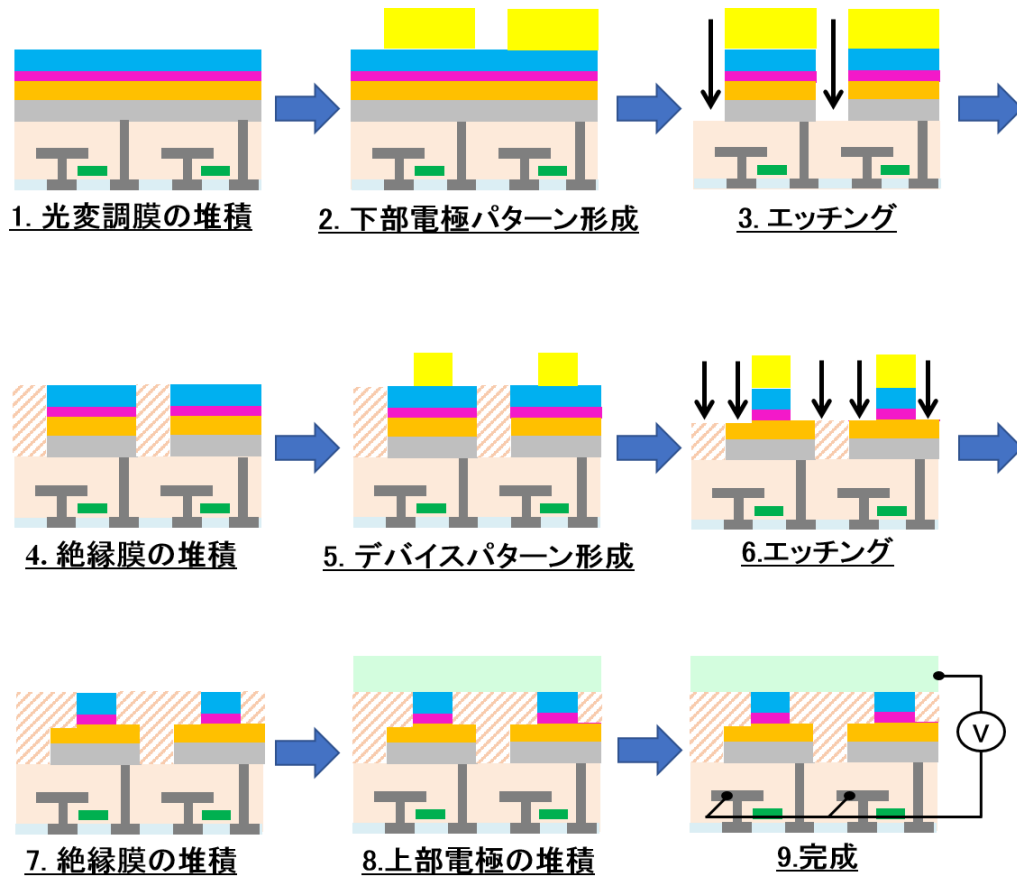


図 4.5 スピン注入型光変調デバイス（5 μm 画素ピッチ）の作製行程

ネル構造の光変調膜を製膜した。デバイス抵抗値が低いほど、トランジスタからの供給電流量は増加するため、絶縁スペーサー層には高純度の MgO を適用し、薄層化した。初めに via 端子を覆うように、4.1 μm ×4.1 μm サイズの下部電極パターンを形成した。次に 0.5 μm ×0.5 μm サイズのデバイスパターンを形成した。第3章と同様にデバイス形成時におけるエッチング終点は磁化固定層の直前とした。デバイスの上部には、酸化インジウム・酸化亜鉛（In-Zn-O）から成る透明電極を画素全体の共通電極として形成し、図 4.2 に示す V(+) 端子へ接続した。なお、In-Zn-O の厚さは Gd-Fe 光変調層との屈折率などを考慮し、135nm とした [43][44]。

図 4.6 に作製した 5 μm 画素ピッチのスピ注入型光変調デバイスの光学顕微鏡像を示す。下部電極上の中央上部に 0.5 μm ×0.5 μm の画素が形成されているこ

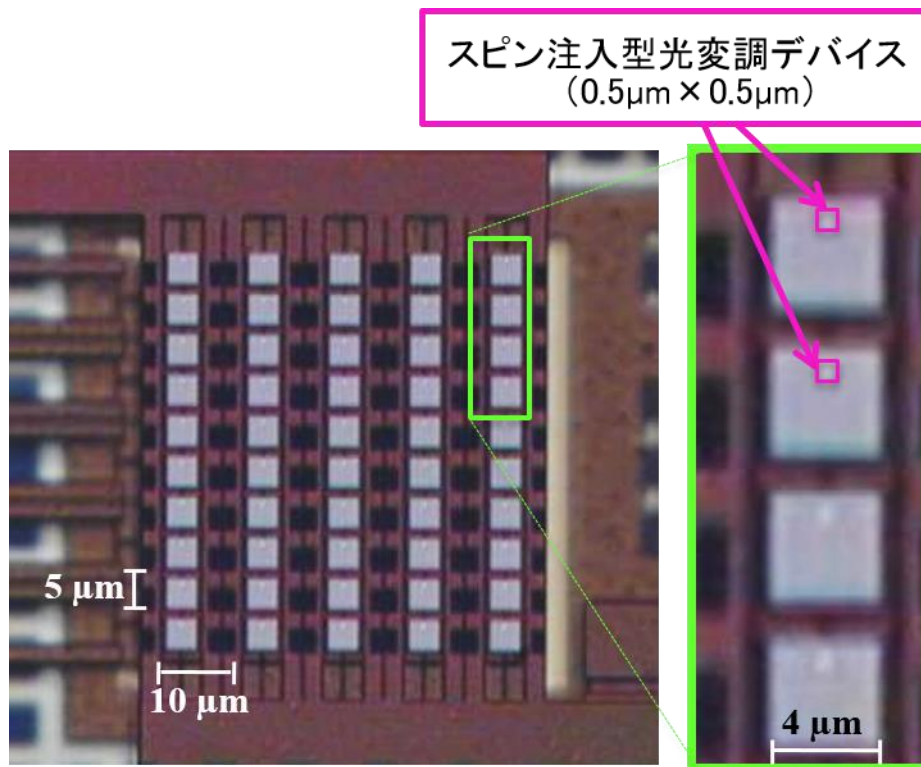


図 4.6 スピン注入型光変調デバイスの光学顕微鏡像 (5μm 画素ピッチ)

とが分かる．図 4.7 は任意の 1 画素における抵抗値の外部磁界依存性を示す．デバイス抵抗値は，画素の抵抗値からトランジスタのオン抵抗 ($86\ \Omega$) を差し引くことにより求めた．第 3 章で開発したデバイスと同様に良好なトンネル磁気抵抗曲線が得られた．トンネル磁気抵抗比は 6.0% であり，絶縁性能が良い高純度の MgO は，薄層化によるトンネル磁気抵抗比の低下を防ぐことが分かった．図 4.8 は外部磁界一定 (2mT) の条件において，任意の 1 画素にパルス電圧 (パルス幅 10μsec) を印加した際のデバイス抵抗値を示す．デバイスの抵抗値は印加電圧が約 $\pm 1.1\text{V}$ の時に急激に変化し，その変化量は外部磁界印加による変化量と一致する．この結果から，5μm 画素ピッチの AM 駆動方式スピン注入型光変調デバイスは，トランジスタからの供給電流による磁化反転が可能なが実証された．また，負荷線から求めた反転電流値 (反転電流密度) は $\pm 1.5\text{mA}$ ($0.6 \times 10^6\text{A/cm}^2$) となり，高純度 MgO の適用による薄層化が低電流化につながる事が判明した．

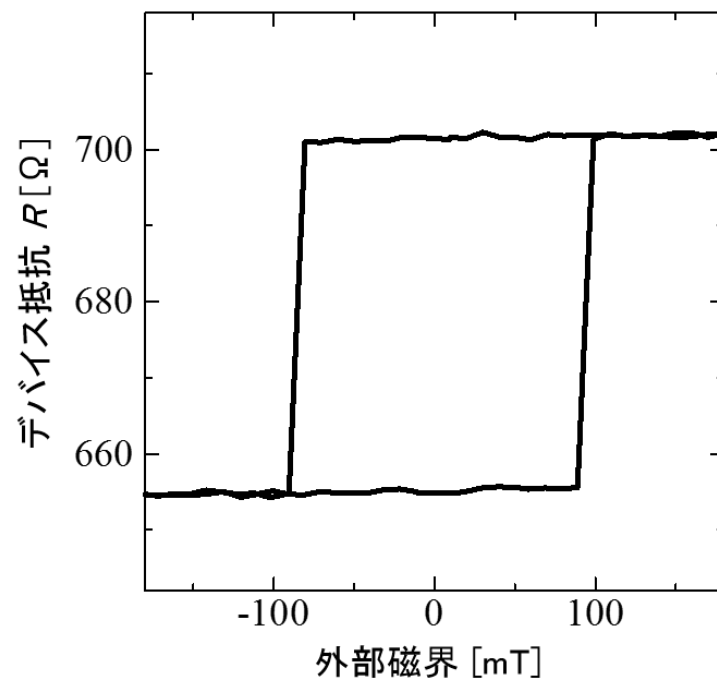


図 4.7 デバイス抵抗値の外部磁界依存性 (任意の 1 画素)

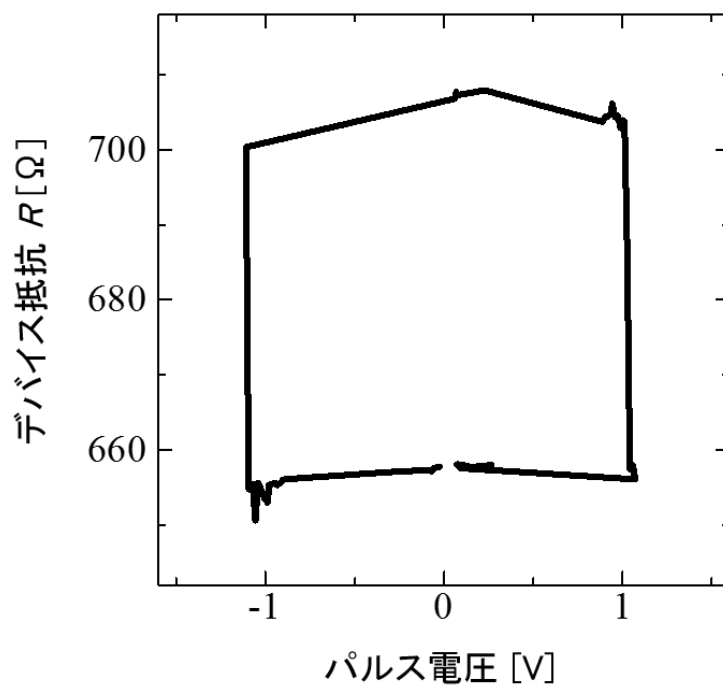


図 4.8 デバイス抵抗値の印加電圧依存性 (任意の 1 画素)

電流による光変調層の磁化反転を検証するために、磁気光学像（偏光顕微鏡像）の取得を試みた．初めに全画素に-800mT の外部磁界を印加し，P 状態にした（初期状態）．次に磁界を 3.5mT に設定し，偶数（2，4 列）の画素を電流注入により AP 状態とした（最終状態）．図 4.9 は最終状態の抵抗値を示したものである．電流注入した 2，4 列は，他の列（1，3，5 列）と比較して高抵抗となっている．これは電流注入により，光変調層の磁化が上向きに変化していること

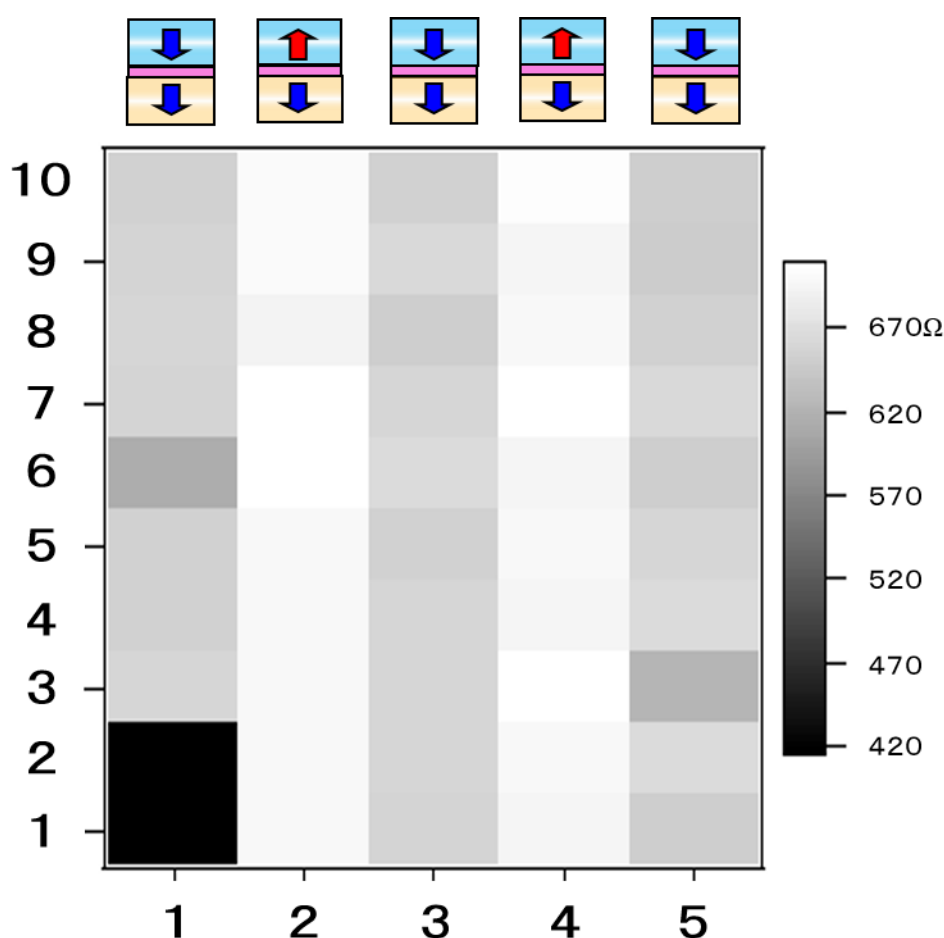


図 4.9 偶数列に電流注入後のデバイス抵抗値（10×5 画素）

を示している．図 4.10 に偏光顕微鏡にて，画素の偏光状態を観察した結果を示す．光源には，ピーク波長が 463nm の発光ダイオード (Light Emitting Diode: LED) を用いた．図 4.10 は偏光顕微鏡にて観察した最終状態と初期状態の差分像であ

る．電流注入した2, 4列の画素が白く変化していることが分かる．この結果から，作製した $5\mu\text{m}$ 画素ピッチの AM 駆動方式スピン注入型光変調デバイスは，画素選択トランジスタによる任意の画素選択，光変調動作が可能なが分かった[45][46]．

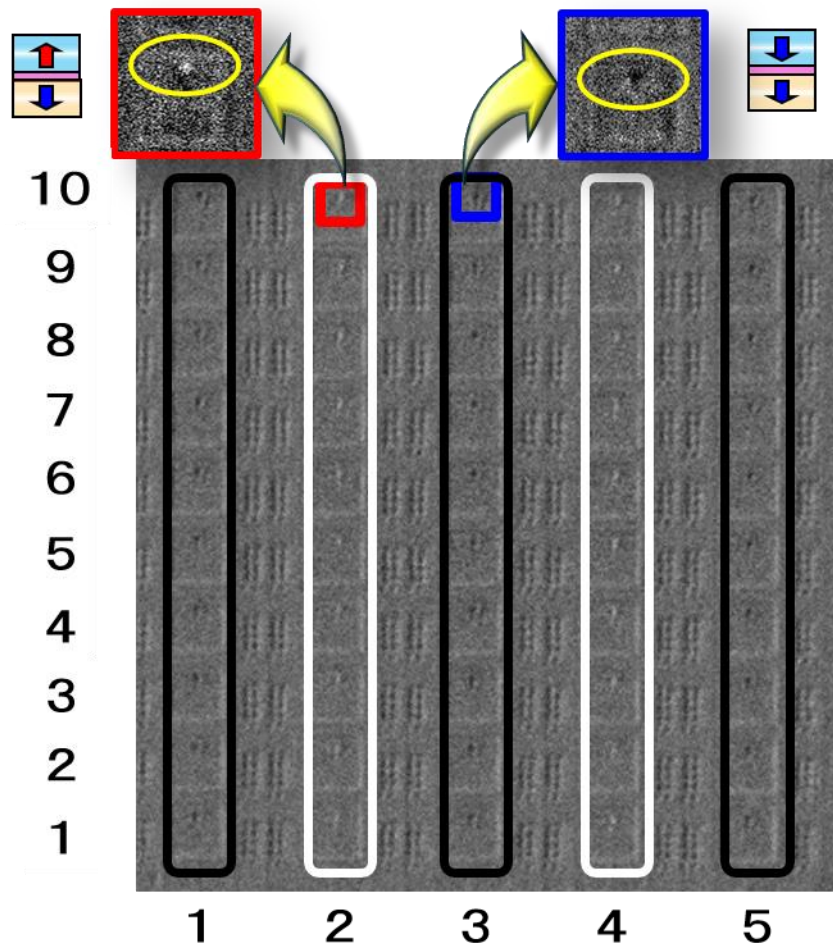


図 4.10 偶数列に電流注入後の偏光顕微鏡像（10×5 画素）

4.4 まとめ

本章では，ホログラフィー立体映像表示用デバイスを開発するために，スピン注入型光変調デバイスにおける 2 次元アレイ化技術の研究を行った．画素選択トランジスタを備えたシリコンバックプレーンを用いて，画素ピッチ： $5\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ ，画素数：10×5 の AM 駆動方式スピン注入型光変調デバイスを開発

した．シリコンバックプレーンに第3章で開発した低電流駆動のトンネル構造を有するスピン注入型光変調デバイスを実装し，トランジスタによる任意画素の選択・駆動が可能なことを実証した．また，磁気光学像（偏光顕微鏡像）を取得することにより，開発したデバイスの光変調動作を確認した．今後は，狭画素ピッチ・多画素のバックプレーンを用いたデバイス開発を行い，高密度化を目指す．

第5章

スピン注入型光変調デバイスの 高密度化技術

本章では、ホログラフィー立体映像表示用デバイスを開発するために、スピン注入型光変調デバイスにおける高密度化技術の研究を行う。狭画素ピッチ・多画素のデバイス開発を目的に、AM 駆動方式スピン注入型光変調デバイスの第 2 次試作として、画素ピッチ： $2\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ 、画素数： 100×100 のデバイス開発に取り組む。多画素駆動に適したシフトレジスタ内蔵のシリコンバックプレーンを設計・作製し、第 4 章と同様にトンネル構造のスピン注入型光変調デバイスを実装する。狭画素ピッチ化により、画素選択トランジスタからの供給電流量が減少するため、スピン注入磁化反転に磁界アシスト法を適用することで、さらなる低電流化を試みる。スピン注入型光変調デバイスが干渉縞の書換えが可能なことを示すために、 100×100 画素のデバイスにおける任意の磁気光学像を取得する。また、ホログラフィー立体動画表示のために、第 3 次試作（画素ピッチ： $1\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ 、画素数： $10\text{K}\times 10\text{K}$ ）のシリコンバックプレーンを作製し、超多画素駆動の検討を行う。

5.1 シフトレジスタ内蔵のシリコンバックプレーン

スピン注入型光変調デバイスの高密度化を進めるために、第 2 次試作（画素ピッチ： $2\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ 、画素数： 100×100 ）用のバックプレーンを設計・作製した。第 1 次試作と比較して、画素数が 2 桁増加したため、多画素駆動に有利なシフトレジスタを駆動部に適用した。図 5.1 に 100×100 画素のシフトレジスタ内蔵バックプレーンの模式図を示す。行・列それぞれ 10 本の Data 入力端子で 100×100

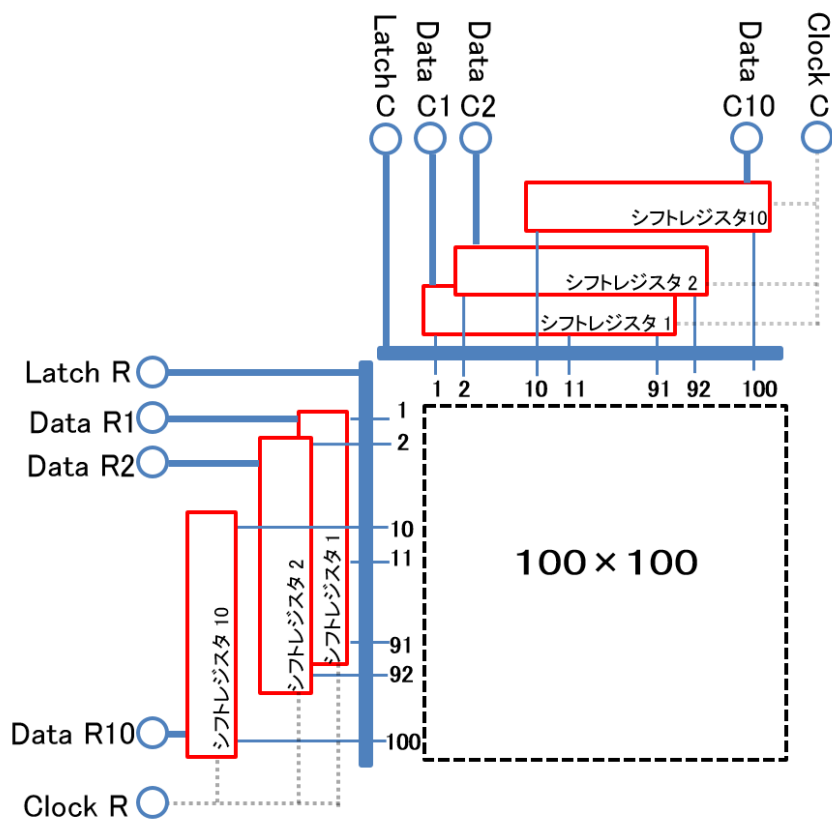


図 5.1 100×100 画素バックプレーンの模式図（画素ピッチ：2 μ m×2 μ m）

画素の選択が可能である．図 5.2 は，あるデータを入力した際の(a)シフトレジスタの動作と(b)駆動波形を示す．行（列）の選択情報は Data 端子からシリアルに入力され，Clock 信号によりシフトレジスタ内のフリップフロップ回路を 1 段ずつシフトする．10 ビット（Clock 信号 10 回分）のデータがシフトレジスタに入力された後に，ラッチ信号により平行に出力され，該当の画素が選択される．この構成により，1 つの Data 入力端子において 10 行（列）の画素を選択可能となるため，入力端子の大幅な減少が実現できる．

図 5.3 に 2 μ m 画素トランジスタの静特性を示す．2 μ m 画素ピッチのシリコンバックプレーンにおける画素選択トランジスタの仕様は， $W = 1.68\mu\text{m}$ ， $L = 0.28\mu\text{m}$ ，ゲートの耐圧は 2.5V であり，2 $\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ の画素内に 2 個配置されている．飽和電流値は 1.75mA であり，線形領域の傾きからトランジスタのオン抵抗は 370 Ω と見積もることができる．5 μm 画素ピッチと同様に負荷線からデバイスへの供給電流量を求めた．負荷（デバイス抵抗値）は第 3 章，および第 4 章の結

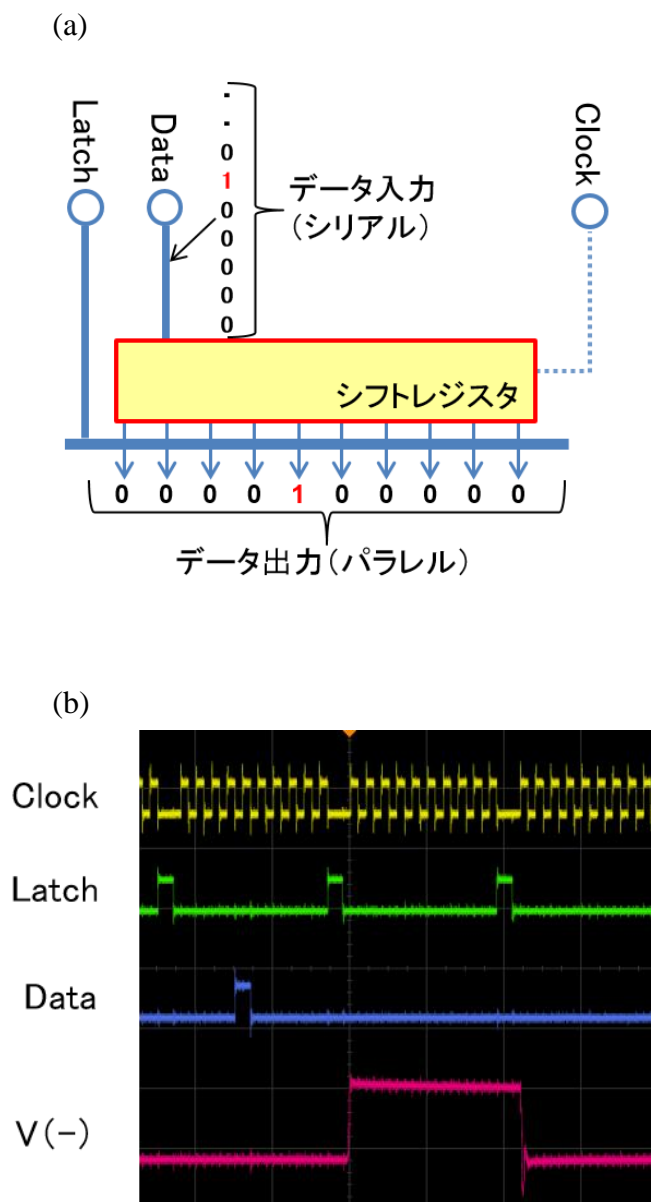


図 5.2 (a)シフトレジスタの動作, (b)駆動波形の一例

果から, $600 \sim 800 \Omega$ を想定した. $2 \mu\text{m}$ 画素ピッチのバックプレーンでは, 画素周辺の論理回路が 1.2V で動作する. したがって, 画素印加電圧の上限値も 1.2V に規制される. 図 5.3 の負荷線よりデバイスへの供給電流量は, $0.99 \sim 1.15\text{mA}$ と推算した. $5 \mu\text{m}$ 画素ピッチと比較して, 画素選択トランジスタの面積が減少したため, 供給電流量は半分以下まで減少することが判明した.

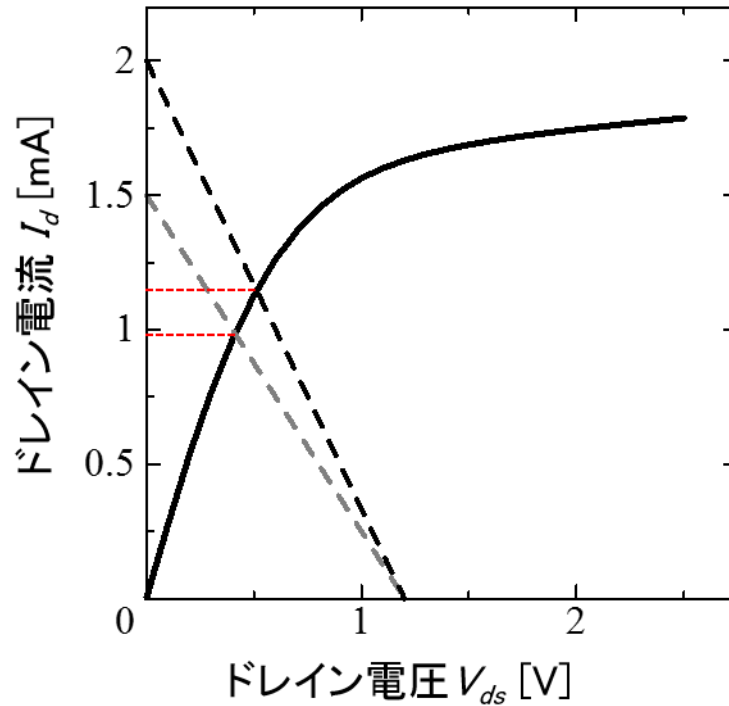


図 5.3 2 μm 画素トランジスタの静特性
(黒色：600 Ω の負荷線，灰色：800 Ω の負荷線)

5.2 磁界アシスト法を用いたスピン注入磁化反転

第4章の結果より，スピン注入型光変調デバイス（0.5 $\mu\text{m}\times 0.5\mu\text{m}$ ）の磁化反転に必要な電流量は1.5mAと推定される．一方，2 μm 画素トランジスタの静特性から得られた供給電流量は1.5mAを下回っている．したがって，AM駆動を実現するためには駆動電流のさらなる低減化が必要となる．そこで図5.4に示すように，電流注入時に磁化反転方向へ外部磁界を印加し，磁化反転電流の低減化を試みた．図5.5は第3章で作製したデバイスを用いて，磁化反転電流値のバイアス磁界依存性を調査した結果である．縦軸は反転電流密度に規格化した．図5.5から磁化反転電流値は磁界が増えるにつれて減少しており，4mTのバイアス磁界印加により磁化反転電流密度は，0.33MA/cm²（0.5 $\mu\text{m}\times 0.5\mu\text{m}$ サイズの場合，0.83mA）となる．この結果から，磁界アシスト法は2 μm 狭画素ピッチのデバイス開発に有効な手法といえる．

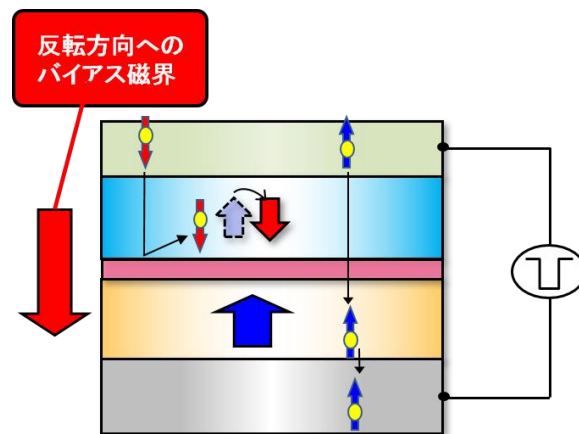


図 5.4 磁界アシスト法を用いたスピン注入磁化反転の動作原理

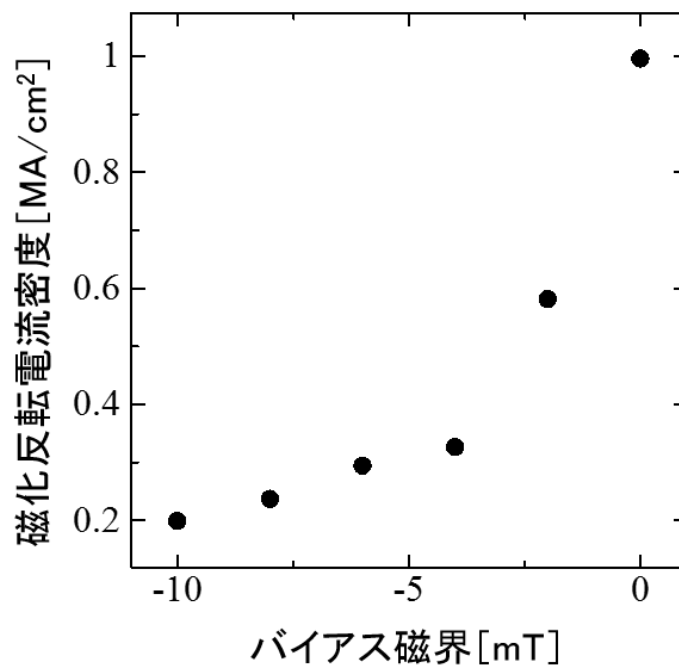


図 5.5 スピン注入磁化反転電流密度のバイアス磁界依存性

5.3 2 μm 画素ピッチのスピ注入型光変調デバイス

2 μm 画素ピッチのシリコンバックプレーンは、最表面に 1.76 $\mu\text{m}\times 1.76\mu\text{m}$ サイズの下部電極（Cu 電極）が形成されている。この下部電極上に、トンネル光変調膜を堆積し、0.5 $\mu\text{m}\times 0.5\mu\text{m}$ サイズのデバイスパターンを形成することで、2 μm 画素ピッチのスピ注入型光変調デバイスを作製した（図 5.6）。トンネル光変調膜の構成は、Ru (3nm) / Tb-Fe-Co (10nm) / Co-Fe (0.5nm) / MgO (1.0nm) / Co-Fe (0.25nm) / Gd (0.2nm) / Gd-Fe (9nm) / Ru (3nm) である。5 μm 画素ピッチ（画素数：10 \times 5）と比較して、MgO を厚膜化した。この要因は、画素数が大幅に増加したことや、磁化反転に磁界アシスト法を適用することから、デバイス抵抗値の均一化を優先したためである。

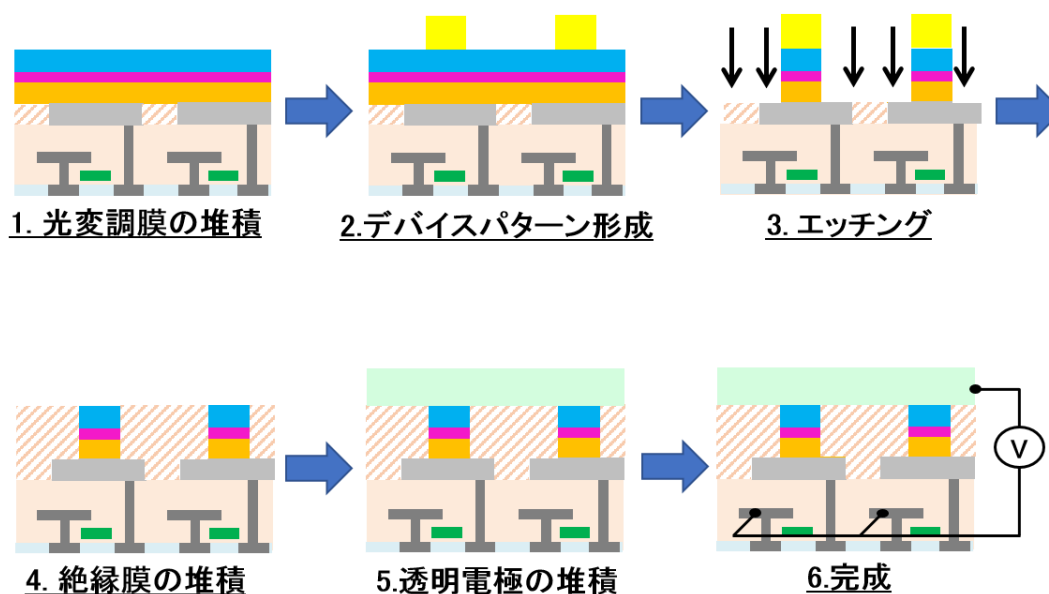


図 5.6 スピン注入型光変調デバイス（2 μm 画素ピッチ）の作製行程

図 5.7 に開発した 2 μm 画素ピッチ，100 \times 100 画素のスピ注入型光変調デバイスの光学顕微鏡像を示す。下部電極上に 0.47 $\mu\text{m}\times 0.47\mu\text{m}$ のスピ注入型光変調デバイスが形成されている。光学顕微鏡像から，100 \times 100 画素内に欠陥画素は確認されなかった。表 5.1 に 5 μm 画素ピッチ（全 50 画素）と 2 μm 画素ピッチ（無作為に抽出した 50 画素）のデバイスにおける電気特性を比較した結果を示す。

す. $2\mu\text{m}$ 画素ピッチのデバイスにおける抵抗の標準偏差は $5\mu\text{m}$ 画素ピッチの 3 割程度まで減少していることが分かる.

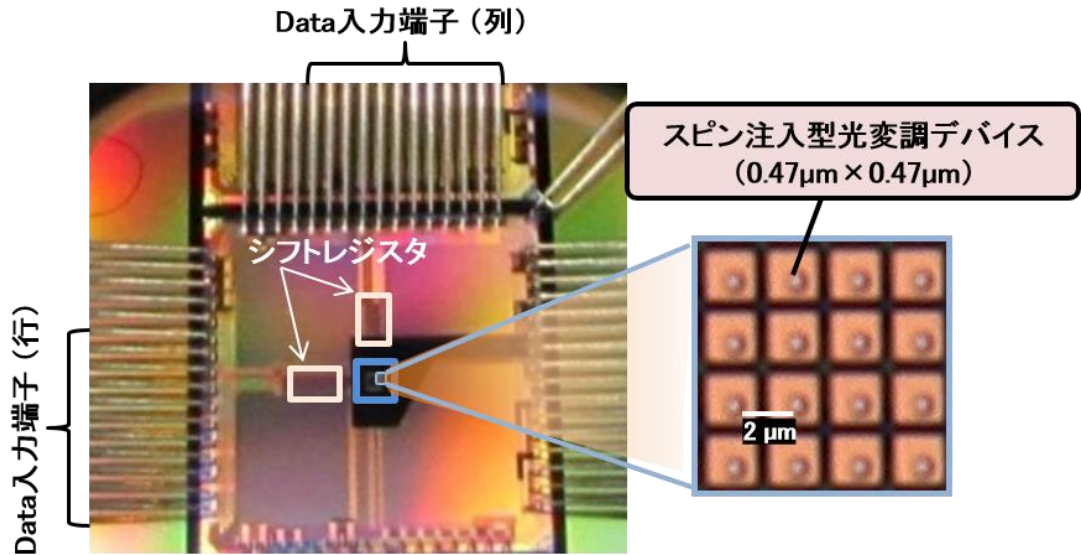


図 5.7 スピン注入型光変調デバイスの光学顕微鏡像
($2\mu\text{m}$ 画素ピッチ, 100×100 画素)

表 5.1 スピン注入型光変調デバイスの電気特性

	$2\mu\text{m}$ 画素ピッチ	$5\mu\text{m}$ 画素ピッチ
絶縁スペーサー層厚	1.0 nm	0.8 nm
抵抗の平均値	1150 Ω	640 Ω
抵抗の標準偏差	16.3 Ω	47.5 Ω

図 5.8 は 1 画素における抵抗値の外部磁界依存性を示す. デバイス抵抗値は, 画素の抵抗値からトランジスタのオン抵抗 (370Ω) を差し引くことにより求めた. トンネル磁気抵抗比は 20% であり, $5\mu\text{m}$ 画素ピッチのデバイスと比較して, 3 倍以上の値となった. この要因は MgO 層厚が増えたことやバックプレーンの平坦性が改善されたためと考えられる. P 状態から AP 状態, AP 状態から P 状

態へ反転する磁界は、 -20mT 、 -7mT であり、ヒステリシスの中心はマイナス方向に 13.5mT 移動している。これは、デバイス形成時のエッチングにより、磁化固定層も微細化したために、磁化固定層自体が発生する磁界が増大し、光変調層に漏洩したことが原因と考えられる。デバイスの抵抗値は 1180Ω であり、負荷線からトランジスタの供給電流量は 0.75mA ($0.34\text{MA}/\text{cm}^2$) と見積もることができる。デバイスを $2\mu\text{m}$ 画素ピッチのシリコンバックプレーンで動作させるために、磁界アシスト法を用いたスピン注入磁化反転を試みた。図 5.9 はスピン注入磁化反転をアシストするために、 -17mT (ヒステリシスループの中心から -3.5mT) のバイアス磁界を印加し、任意の 1 画素に電圧を印加した際のデバイス抵抗値を示す。Clock 周波数は 10MHz に設定した (電圧パルス幅: $1\mu\text{sec}$)。印加電圧が、 1.1V において抵抗値が急激に変化していることが分かる。この変化量は外部磁界を印加した場合における P 状態から AP 状態の変化と一致する。磁化反転電流値は 0.70mA ($0.32\text{MA}/\text{cm}^2$) であり、前述の磁界アシスト法を用いたスピン注入磁化反転の実験結果とほぼ一致する。この結果から、 $2\mu\text{m}$ 画素ピッチのスピン注入型光変調デバイスは、磁界アシスト法の適用により、トランジスタからの供給電流による磁化反転が可能なことを実証した。

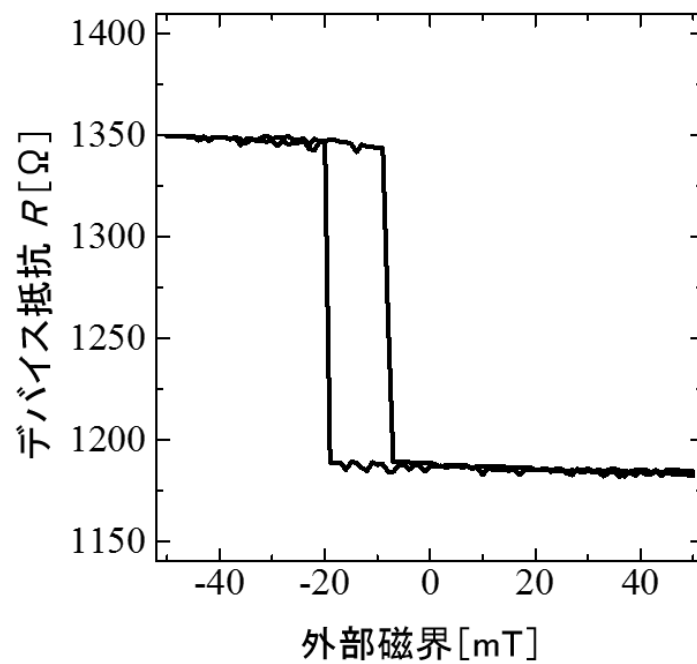


図 5.8 デバイス抵抗値の外部磁界依存性（任意の 1 画素）

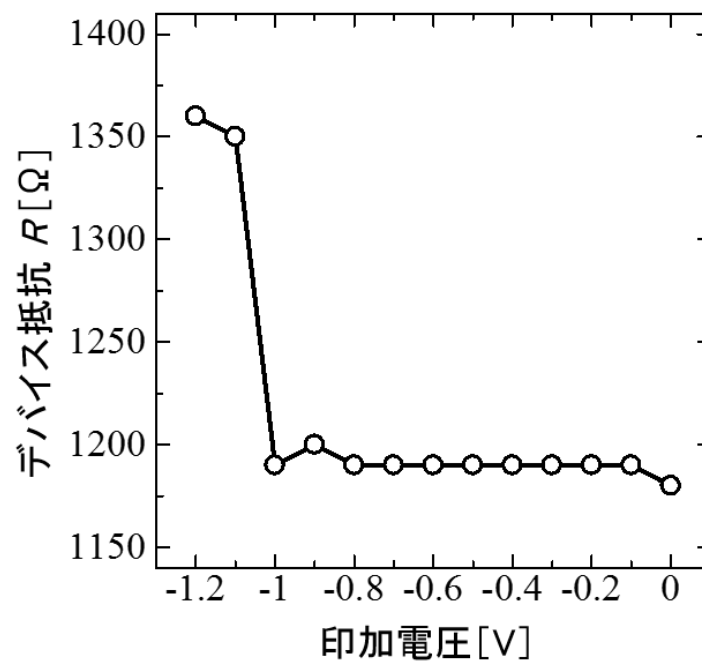
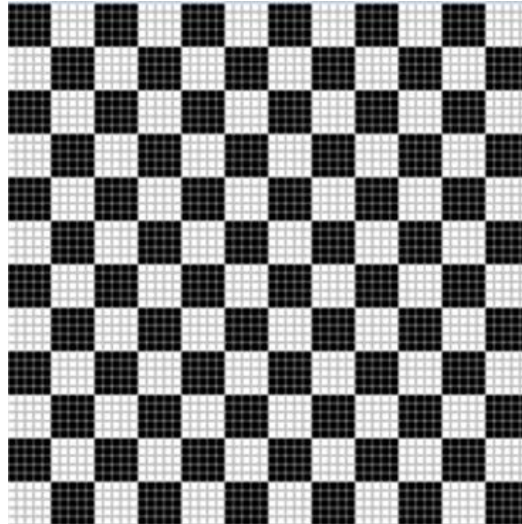


図 5.9 デバイス抵抗値の印加電圧依存性（任意の 1 画素）
[バイアス磁界：-3.5mT]

電流による光変調層の磁化反転を検証するために、磁気光学像の取得を試みた。初期状態として、全画素に+800mTの外部磁界を印加し、光変調層の磁化方向を上向きにした。その後、磁化反転をアシストするために、バイアス磁界を-17mT（実効磁界：-3.5mT）に設定した。次に、外部駆動装置を用いて、図 5.10(a)に示す入力画像の「白」に相当する画素を選択し、1.2Vの電圧を印加することで電流注入を試みた。なお、画素駆動時における Clock 周波数は 10MHz、画素への電圧印加時間は 1 μ sec（1画面の書込み時間：10msec）に設定し、実験を行った。図 5.10(b)は電流注入後に取得した偏光顕微鏡像と初期状態の偏光顕微鏡像の差分像である。電流による磁化反転が生じなかった画素や、バイアス磁界の影響により反転した画素もあるが、概ね、選択画素は光変調層の磁化方向が下向きに変化し、入力画像（図 5.10(a)）と同様の出力画像が得られた。次に、再びデバイスを初期状態とし、バイアス磁界を設定後に入力画像（図 5.11(a)）を用いて、画素を駆動した。出力画像（図 5.11(b)）は入力画像に対応しており、この結果から、作製した 2 μ m 画素ピッチのスピン注入型光変調デバイス（画素数：100 \times 100）は、磁界アシスト法の適用により、入力画像の書換えが可能なことを証明した[47]。図 5.12(a), (b)は画素数を 1K \times 1K に拡張した 2 μ m 画素ピッチのスピン注入型光変調デバイスの入力画像、および出力画像であり、画素数 100 \times 100 と同様に入力画像に対応した出力画像を得ることに成功した[48]。

(a)



(b)

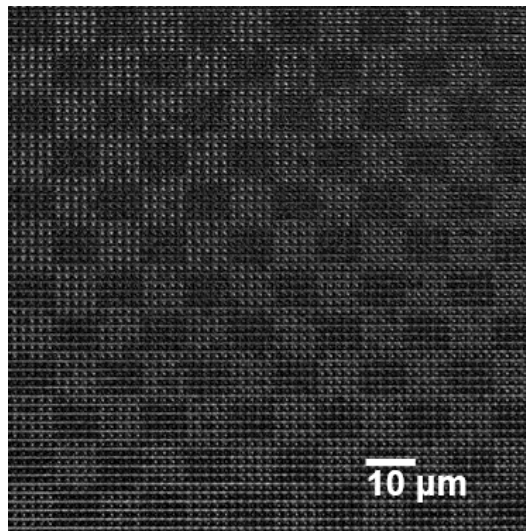
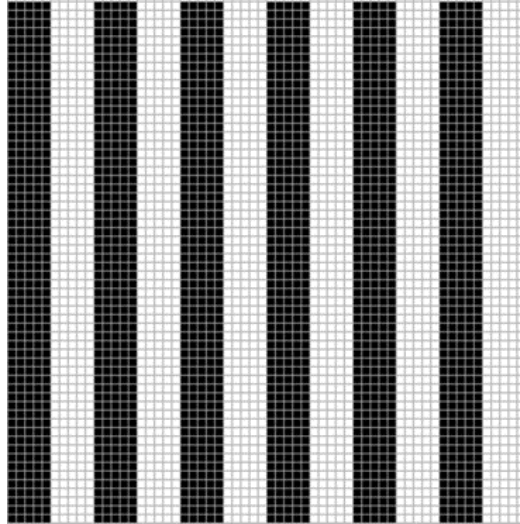


図 5.10 2 μm 画素デバイス（画素数 100 \times 100）の(a)入力画像，(b)出力画像

(a)



(b)

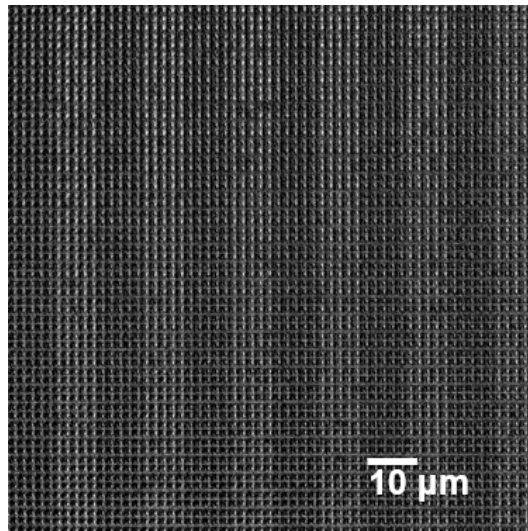


図 5.11 2 μ m 画素デバイス（画素数 100 \times 100）の(a)入力画像, (b)出力画像

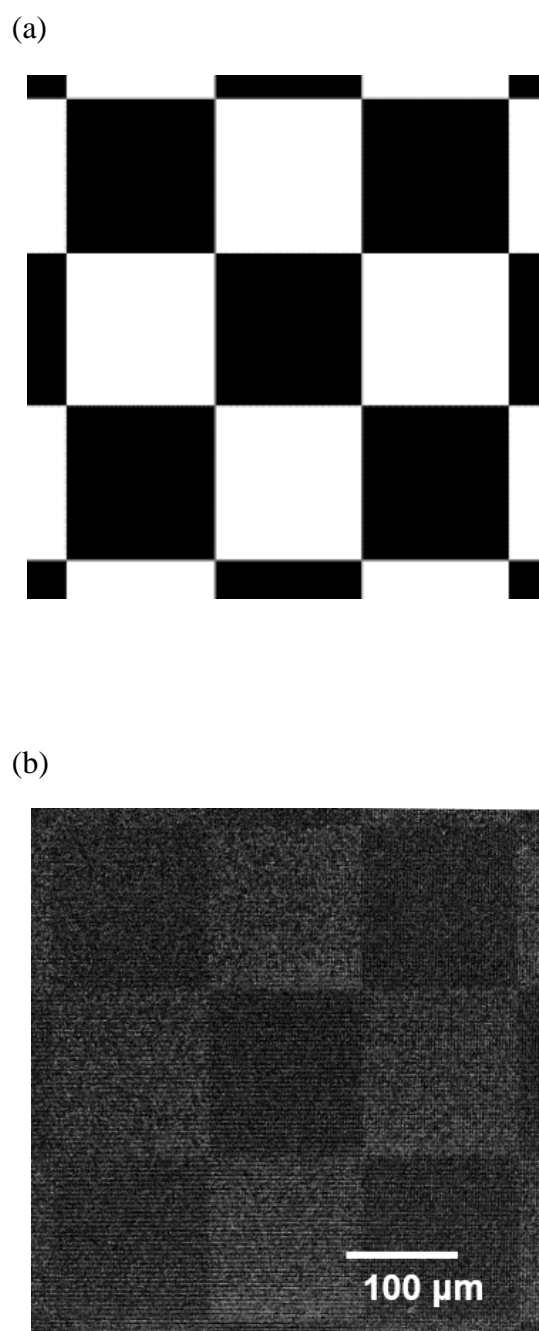


図 5.12 2 μm 画素デバイス（画素数 1K \times 1K）の(a)入力画像，(b)出力画像

5.4 超多画素のスピ注入型光変調デバイス

表 5.2 は画素数が 100×100 と 1K×1K のデバイスにおける 1 画面の書込み時間（Clock 周波数：20MHz）を示したものである．100×100 のデバイスと比較し

表 5.2 画素数：100×100 と 1K×1K の書込み時間比較

画素数	シフトレジスタ ビット数	1画素の書込み時間	1画面の書込み時間
100×100	10	0.5 μ sec	0.005 sec
1K×1K	100	5 μ sec	5 sec

て、1K×1K は書込み時間が大幅に増加している．この最大の要因は、1 画素ずつ書込みを行っているためである．第 1, 2 次試作は基本動作検証のために、1 画素ごとの確実な駆動を行ってきた．しかしながら、立体動画を実現するためには、ある程度の速度（フレームレート）が必要となるため、画素の並列駆動を行わなければならない．また、端子数減少のために導入したシフトレジスタは、画素数増加に伴い駆動部の面積が増えることや、データ指定と行（列）の選択を同時に行うことで、駆動時間が延びるといった課題がある．そこで第 3 次試作では、並列駆動が可能であり、かつ行（並列駆動数）の選択部とデータ指定部を独立させたシフトレジスタを有する画素数 10K×10K（画素ピッチ：1 μ m×2 μ m）のバックプレーンを設計・作製した．図 5.13 にバックプレーンの模式図を示す．行・列の選択部は 16 ビットの二進化十進数コードを用いて、それぞれ 3 端子で 10K の選択が可能となる．行選択部は並列駆動数の設定用に 4 ビット追加し、合計 20 ビットのシフトレジスタで構成される．行のデータ指定部は 1000 ビットのシフトレジスタ 10 段から成る．走査方向に相当する 10K 個の列は 16 ビットのシフトレジスタ 1 段のみで賄えるため、駆動部の面積を減少できる．また、行・列ともに画素部への転送を制御する Enable 端子を設けた．Enable を活用することにより、画素部への電圧印加時間を任意に設定することが可能となる．図 5.14 は 1 μ m×2 μ m 画素トランジスタの静特性を示す．画素選択トランジスタの仕様は、2 μ m 画素トランジスタと同等であり、飽和電流値は 0.9mA であった．線形領域の傾きからトランジスタのオン抵抗は 870 Ω と見積もることができる．

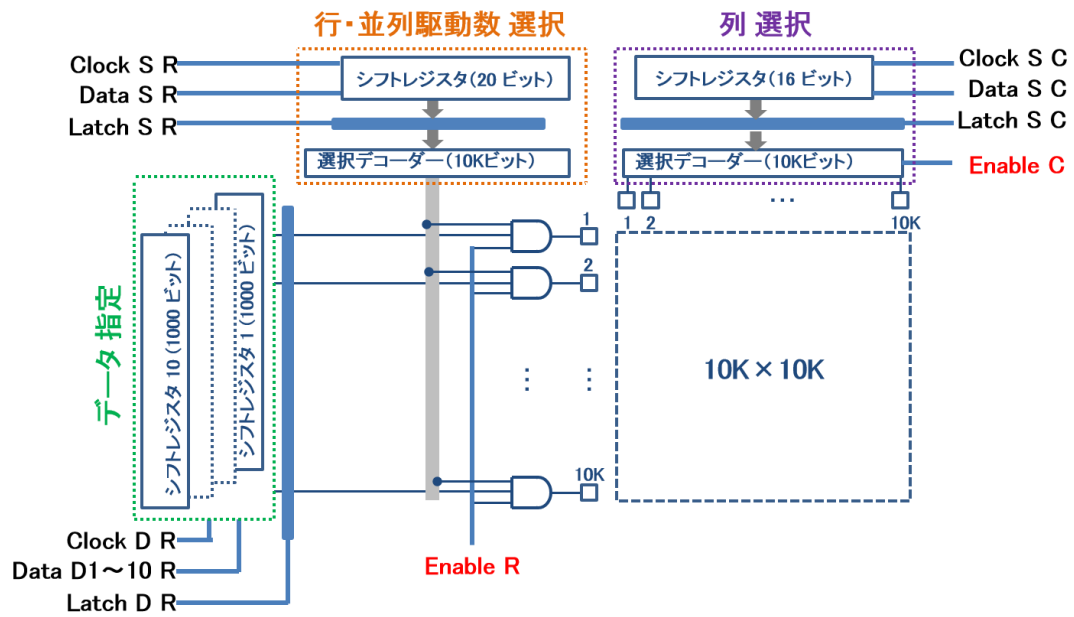


図 5.13 10K×10K バックプレーンの模式図（画素ピッチ：1 μ m×2 μ m）

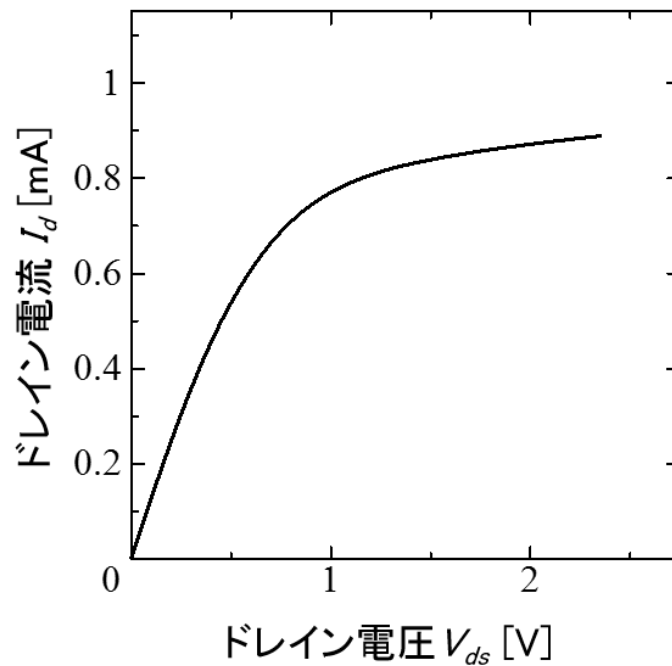


図 5.14 1 μ m×2 μ m 画素トランジスタの静特性

バックプレーンの表面に形成された下部電極の全面に金属電極を形成し、V(+)端子に接続することで、10K×10K バックプレーンの電気特性を調査した。図 5.15 は並列駆動数と電流量の関係を示したものである。1000 画素の並列駆動を行う場合、バックプレーンは画素選択トランジスタ 1 個あたりの飽和電流値 (0.9mA) ×1000 = 900mA の電流を出力する必要があるが、この結果から 10K×10K のバックプレーンは 1000 画素の並列駆動が可能であることを示している。表 5.3 にバックプレーンにおいて 1000 画素並列に駆動した場合の書込み時間の一例を示す。Clock 周波数はバックプレーンに入力可能な最大周波数 50MHz に設定した。1000 画素の並列駆動時の書込み時間は $20\mu\text{sec} \times 10\text{K} = 0.2\text{sec}$ となる。初期化に同等の時間を要すると仮定すると、1 画面の書換え時間は 0.4sec (フレームレート: 2.5Hz) と推算できる。この値はテレビのフレームレート (30Hz, または 60Hz) と比較すると低いが、Clock 周波数の高速化や分割駆動を導入することにより、実用的な数値に近づけることは可能と考えられる。

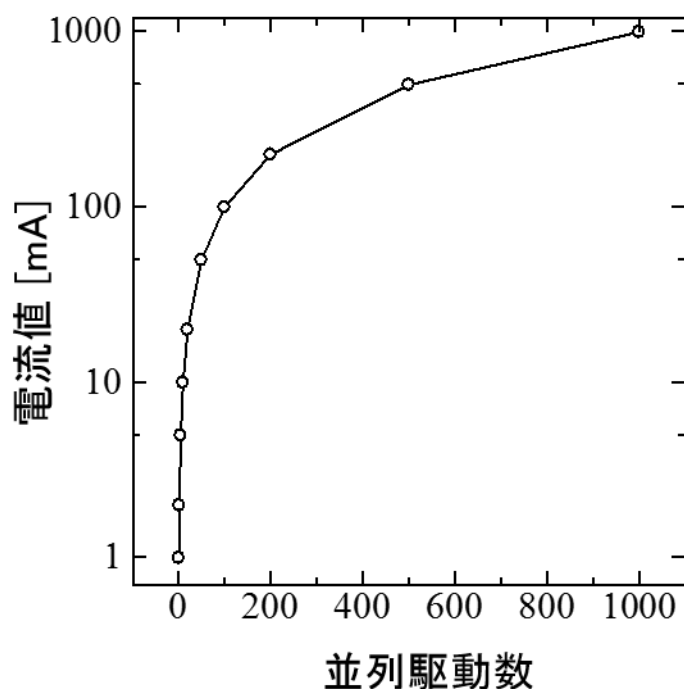


図 5.15 10K×10K バックプレーンにおける並列駆動数と電流量の関係

表 5.3 1000 画素並列駆動時の 1 画面書換え時間

画素書込み時間	1	[μ sec]
列データ転送時間	20	[μ sec]
行(並列数)選択時間	0.4	[μ sec]
列選択時間	0.32	[μ sec]
列駆動時間	20	[μ sec]
1画面書換え時間	0.4	[sec]

5.5 まとめ

本章では、ホログラフィー立体映像表示用デバイスを開発するために、スピン注入型光変調デバイスにおける高密度化技術の研究を行った。第 2 次試作として、多画素駆動に適したシフトレジスタ内蔵のシリコンバックプレーンを設計・作製し、画素ピッチ： $2\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ 、画素数： 100×100 （1K \times 1K）のスピン注入型光変調デバイスを開発した。 $5\mu\text{m}$ 画素トランジスタと比較して、 $2\mu\text{m}$ 画素トランジスタは供給電流量が大幅に減少するため、スピン注入型光変調デバイスの駆動時に磁界アシスト法を適用した。磁界アシスト法を用いたスピン注入磁化反転により、任意の入力画像に対応した出力画像（磁気光学像）の取得に成功した。この結果は、開発したデバイスがホログラフィー立体テレビに必要な干渉縞データの書換えが可能なことを示す。また第 3 次試作として、1000 画素の並列駆動が可能な画素ピッチ： $1\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ 、画素数： $10\text{K}\times 10\text{K}$ のスピン注入型光変調デバイス用バックプレーンを設計・作製した。バックプレーンを用いて、超多画素駆動の検討を行い、 $10\text{K}\times 10\text{K}$ スピン注入型光変調デバイスの画面書換えが

0.4sec（フレームレート：2.5Hz）で行えることを示した．以上から，スピン注入型光変調デバイスは，ホログラフィー立体映像表示用デバイスへの応用が可能であることを実証した．

第6章

結 論

6.1 研究成果

本論文では、スピン注入磁化反転技術と磁気光学効果を組み合わせたスピン注入型光変調デバイスをホログラフィー立体映像表示に応用するために、低電流化技術、2次元アレイ化技術、高密度化技術の研究を行った。これらの研究成果は、将来の立体映像放送実現のために必要不可欠な表示デバイス研究に有益な情報を与えたと考える。以下、各章における研究成果の概要を示す。

第3章では、アクティブマトリクス駆動方式を実現するスピン注入型光変調デバイス開発を目的として、低電流化に関する研究を行った。MgO 絶縁スペーサー層と Gd-Fe 光変調層から成る新奇のトンネル構造を有するスピン注入型光変調デバイスを開発し、ジュール熱をスピン注入磁化反転のアシストに用いて、低電流化を実現した。トンネルデバイスの高い抵抗値によって生じるジュール熱を利用した磁化反転は、大面積の磁化反転が必要なホログラフィー用のスピン注入型光変調デバイスにとって有効な手法であるとともに、多画素駆動に適したアクティブマトリクス方式実現の可能性を示した。

第4章では、アクティブマトリクス駆動方式のスピン注入型光変調デバイス開発を目的として、2次元アレイ化に関する研究を行った。画素選択トランジスタを備えたシリコンバックプレーンに第3章で開発したトンネル構造のデバイスを実装し、画素ピッチ： $5\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ 、画素数： 10×5 のスピン注入型光変調デバイスを開発した。任意の画素をトランジスタにより選択・駆動可能なことを実証し、磁気光学像を取得することで、開発したデバイスの光変調動作が可能なことを示した。

第5章では、アクティブマトリクス駆動方式スピン注入型光変調デバイスの狭画素ピッチ化、多画素化を目的として高密度化に関する研究を行った。多画素駆動に適したシフトレジスタ内蔵のシリコンバックプレーンを用いて、画素ピッチ： $2\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ 、画素数： 100×100 ($1\text{K}\times 1\text{K}$) のスピン注入型光変調デバイスを開発した。磁界アシスト法を用いることで、 $2\mu\text{m}$ 画素トランジスタからの供給電流によるスピン注入磁化反転を可能とし、任意の入力画像に対応した磁気光学像の取得に成功した。この結果は、開発したデバイスがホログラフィー立体テレビに必要な干渉縞データの書換えが可能なことを示す。また、画素ピッチ： $1\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ 、画素数： $10\text{K}\times 10\text{K}$ のスピン注入型光変調デバイス用バックプレーンを作製し、超多画素駆動の検討を行った。行（並列駆動数）の選択部とデータ指定部を独立させ、1000 画素の並列駆動を行うことで、 $10\text{K}\times 10\text{K}$ スピン注入型光変調デバイスの画面書換えが 0.4sec（フレームレート： 2.5Hz ）で行えることを示した。

以上の研究成果は、スピン注入型光変調デバイスがホログラフィー立体映像表示用デバイスへの応用が可能なことを示すものである。

6.2 今後の展望

本論文は、微細化技術の確立したスピン注入型光変調デバイスに関する研究を行い、狭画素ピッチ、超多画素のホログラフィー立体映像表示用デバイスの実現性を示した。また各章で研究した個別の技術は、さらなる発展により、ホログラフィー以外の分野にも貢献することが可能と考えられる。

第3章で開発したトンネル構造のスピン注入型光変調デバイスは、トンネル磁気抵抗比を向上させることや、電圧効果の詳細な検証を行うことにより [49][50]、次世代メモリである **MRAM** への応用が考えられる。

第4章および第5章の高密度表示デバイスの作製技術、電流駆動デバイスに適したバックプレーン技術や超多画素駆動技術の研究は、スピン注入型光変調デバイスの光変調度を改善することにより、インテグラル立体や **4K8K** の表示デバイスとして必要なマイクロディスプレイへの応用が考えられる。

一方，本研究内容は光変調デバイスの動作検証にとどまっており，ホログラフィー立体映像の検証は，課題として残る．今後は，ホログラフィー立体映像表示実験が可能なデバイス開発を行い，評価を進めることが望まれる．

謝 辞

本論文の執筆にあたり、筑波大学 システム情報系・水谷孝一教授に心より感謝申し上げます。水谷教授にはご多忙の中、研究の体系的なまとめ方から用語の使用法など、細部にいたるまで懇切丁寧にご指導・ご鞭撻を賜りました。著者は社会人学生として在学させて頂きましたが、常にご配慮頂き、円滑に学位論文を執筆することができました。

本論文の審査委員として、有益なご助言を賜りました筑波大学 システム情報系・海老原格准教授，同・若槻尚斗准教授，同・善甫啓一助教，同・庄野和宏准教授，NTT 未来ねっと研究所 ワイヤレスシステムイノベーション研究部・安藤篤也主任研究員に深く御礼申し上げます。

著者が社会人学生として在学するにあたり、ご助言を頂きました本研究室の卒業生である NHK 放送技術研究所・岩城正和専任局長に深く感謝いたします。

本研究室の卒業生であり、社会人学生として学位を取得された NHK 放送技術研究所 伝送システム研究部・川本潤一郎氏には、入学前から今日まで様々なご助言を頂きました。深く感謝いたします。

筑波大学 システム情報工学研究科 博士後期課程に進学するにあたり、その機会を与えて下さった NHK 長崎放送局 遠藤理史局長に心より感謝申し上げます。

著者のキャリア形成のために、学位取得を推奨して下さった NHK 長崎放送局 技術部・江頭伸弘部長，同・長倉敏彦（元）副部長に心より感謝申し上げます。

本論文は、著者が NHK 放送技術研究所に在籍中にその機会を与えられて実施した研究成果をまとめたものです。第 3 章のトンネル構造のスピン注入型光

変調デバイスに関する研究では、NHK 放送技術研究所 旧立体映像研究部・町田賢司上級研究員にご指導いただきました。心より謝意を表します。

第4章、および第5章のシリコンバックプレーンに関する研究の共同研究者である NHK 放送技術研究所 旧立体映像研究部・青島賢一主任研究員に心より謝意を表します。

第5章の駆動回路に関する研究では、NHK 放送技術研究所 新機能デバイス研究部・薄井武順氏にご指導いただきました。心より謝意を表します。

最後に、共に過ごすべき貴重な時間を学位取得に費やすことに理解を示し、全面的に支えてくれた妻 有美子に感謝いたします。

参考文献

- [1] 泉武博監, “3 次元映像の基礎”, オーム社, 240p, 1995.
- [2] 高木康博, “立体ディスプレイの基礎”, 映像情報メディア学会誌, Vol.67, No.11, pp.966-971, 2013.
- [3] 高木康博, “多眼式・超多眼式 3D 技術”, 映像情報メディア学会誌, Vol.65, No.7, pp.933-939, 2011.
- [4] 宮崎大介, “体積表示方式”, 映像情報メディア学会誌, Vol.68, No.11, pp.844-849, 2014.
- [5] 洗井淳, “インテグラル式立体映像”, 映像情報メディア学会誌, Vol.65, No.9, pp.1293-1298, 2011.
- [6] D. Gabor, “A New Microscopic Principle”, Nature, Vol.161, No. 4098, pp.777-778, 1948.
- [7] T. Mishina, M. Okui, and F. Okano, “Viewing-zone enlargement method for sampled hologram that uses high-order diffraction”, Appl. Opt., Vol.41, No.8, pp. 1489-1499, 2002.
- [8] N. Hashimoto, S. Morokawa, and K. Kitamura, “Real-time holography using the high-resolution LCTV-SLM”, Proc. SPIE, Vol.1461, pp.291-302, 1991.
- [9] J. Amako, and T. Sonehara, “Kinoform using an electrically controlled birefringent liquid-crystal spatial light modulator”, Appl. Opt., Vol.30, No.32, pp. 4622-4628, 1991.
- [10] K. Sato, K. Higuchi and H. Katsuma, “Holographic television by liquid-crystal device”, Proc. SPIE, Vol.1667, pp. 19-31, 1992.
- [11] 上原 寛樹, 平井 大智, 加賀城 宏毅, 市橋 保之, 中山 弘敬, 下馬場 朋禄, 増田 信之, 伊藤 智義, “位相変調型液晶ディスプレイを用いた電子ホログラフィ”, 映像情報メディア学会誌, Vol.65, No.3, pp.403-406, 2011.
- [12] P.F. Van Kessel, L.J. Hornbeck, R.E. Meier, M.R. Douglass, “A MEMS-based projection display”, Proceedings of the IEEE, Vol.86, No.8, pp.1687-1704, 1998.

- [13] Y. Takaki and K. Fujii, "Viewing-zone scanning holographic display using a MEMS spatial light modulator", *Opt. Exp.*, Vol.22, No.20, pp.24713-24721, 2014.
- [14] Y. Takaki, Y. Matsumoto, and T. Nakajima, "Color image generation for screen-scanning holographic display", *Opt. Exp.*, Vol.23, No.21, pp.26986-26998, 2015.
- [15] J.C. Slonczewski, "Current-driven excitation of magnetic multilayers", *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol.159, No.1-2, pp. L1-L7, 1996.
- [16] L. Berger, "Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current", *Phys. Rev. B*, Vol.54, No.13, pp.9353-9358, 1996.
- [17] E. B. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine, R. N. Louie, R. A. Buhrman, "Current-Induced Switching of Domains in Magnetic Multilayer Devices", *Science*, Vol.285, No.5429, pp.867-870, 1999.
- [18] K. Aoshima, N. Funabashi, K. Machida, Y. Miyamoto, N. Kawamura, K. Kuga, N. Shimidzu, F. Sato, T. Kimura, and Y. Otani, "Spin transfer switching in current-perpendicular-to-plane spin valve observed by magneto-optical Kerr effect using visible light," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.91, No.5, 052507, 2007.
- [19] K. Aoshima, N. Funabashi, K. Machida, Y. Miyamoto, N. Kawamura, K. Kuga, N. Shimidzu, T. Kimura, Y. Otani, and F. Sato, "Magneto-Optical and Spin-Transfer Switching Properties of Current-Perpendicular-to Plane Spin Valves With Perpendicular Magnetic Anisotropy", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.44, No.11, pp.2491-2495, 2008.
- [20] 町田 賢司, 青島 賢一, 加藤 大典, 金城 秀和, 久我 淳, 菊池 宏, 石橋 隆幸, 清水 直樹, "広視域のホログラフィ立体表示に向けた超高精細スピン SLM" , *映像情報メディア学会誌*, Vol.36, No.36, pp.5-8, 2012.
- [21] K. Aoshima, N. Funabashi, K. Machida, Y. Miyamoto, K. Kuga, T. Ishibashi, N. Shimidzu, and F. Sato, "Submicron Magneto-Optical Spatial Light Modulation Device for Holographic Displays Driven by Spin-Polarized Electrons," *J. Disp. Technol.*, Vol.6, No.9, pp.374-380, 2010.
- [22] K. Aoshima, K. Machida, D. Kato, T. Mishina, K. Wada, Y. Cai, H. Kinjo, K. Kuga, T. Ishibashi, H. Kikuchi, N. Shimidzu, "A Magneto-Optical Spatial Light Modulator Driven by Spin Transfer Switching for 3D Holography Applications," *J. Disp. Technol.*, Vol.11, No.2, pp. 129-135, 2015.
- [23] K. Machida, D. Kato, T. Mishina, H. Kinjo, K. Aoshima, K. Kuga, H. Kikuchi and N. Shimidzu, "Three-Dimensional Image Reconstruction with a Wide Viewing-Zone-Angle Using a GMR-Based Hologram" , *OSA Topical Meeting Digital*

Holography and 3-D Imaging (DH), DTh2A.5, 2013.

- [24] T. Miyazaki and N. Tezuka, “Giant magnetic tunneling effect in Fe / Al₂O₃ / Fe junction”, J. Magn. Magn. Mater., Vol.139, No.3, pp. L231-L234, 1995.
- [25] M. Julliere, “Tunneling Between Ferromagnetic Films”, Phys. Lett., Vol.54A, No.3, pp.225-226, 1975.
- [26] W. H. Butler, X.-G. Zhang, T. C. Schulthess, and J. M. MacLaren, “Spin-dependent tunneling conductance of Fe|MgO|Fe sandwiches”, Phys. Rev. B, Vol.63, No.5, 054416, 2001.
- [27] J. Mathon and A. Umerski, “Theory of tunneling magnetoresistance of an epitaxial Fe/MgO/Fe(001) junction”, Phys. Rev. B, Vol.63, No.22, 220403, 2001.
- [28] S. Yuasa, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Ando and Y. Suzuki, “High Tunnel Magnetoresistance at Room Temperature in Fully Epitaxial Fe/MgO/Fe Tunnel Junctions due to Coherent Spin-Polarized Tunneling” J. J. Appl. Phys., Vol.43, No.4B, pp. L588-L590, 2004.
- [29] D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, M. Nagai, H. Maehara, S. Yamagata, and N. Watanabe, S. Yuasa, Y. Suzuki and K. Ando, “230% room-temperature magnetoresistance in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions”, Appl. Phys. Lett., Vol. 86, No. 9, 092502, 2005.
- [30] K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, M. Nagai, H. Maehara, S. Yamagata, and N. Watanabe, S. Yuasa, Y. Suzuki and K. Ando, “Giant tunneling magnetoresistance effect in low-resistance CoFeB/MgO(001)/CoFeB magnetic tunnel junctions for read-head applications”, Appl. Phys. Lett., Vol. 87, No. 7, 072503, 2005.
- [31] M. Yoshikawa, E. Kitagawa, T. Nagase, T. Daibou, M. Nagamine, K. Nishiyama, T. Kishi, “Tunnel Magnetoresistance Over 100% in MgO-Based Magnetic Tunnel Junction Films with Perpendicular Magnetic L₁₀-FePt Electrodes”, IEEE Trans. Magn., Vol.44, No11, pp.2573-2576, 2008.
- [32] S. Ikeda, K. Miura, H. Yamamoto, K. Mizunuma, H. D. Gan, M. Endo, S. Kanai, J. Hayakawa, F. Matsukura and H. Ohno, “A perpendicular-anisotropy CoFeB–MgO magnetic tunnel junction, Nature Mater., Vol.9, No.9, pp.721-724, 2010.
- [33] 與田 博明, “垂直磁化方式の MTJ 記憶素子を用いたスピン注入書込み MRAM”, 東芝レビュー, Vol.66, No.9, pp.20-23, 2011.
- [34] K. Ando, S. Fujita, J. Ito, S. Yuasa, Y. Suzuki, Y. Nakatani, T. Miyazaki, and H. Yoda, “Spin-transfer torque magnetoresistive random-access memory technologies for normally off computing (invited)”, J. Appl. Phys., Vol.115, No.17, 172607, 2014.

- [35] K. Aoshima, Y. Hashimoto, N. Funabashi, K. Machida, K. Kuga, H. Kikuchi, N. Shimidzu and T. Ishibashi, “Spin transfer switching of current-perpendicular-to-plane giant MagnetoResistance with various Gd-Fe free Layer compositions”, J. Appl. Phys., Vol.111, No.7, 07C911, 2012.
- [36] K. Yakushiji, T. Saruya, H. Kubota, A. Fukushima, T. Nagahama, S.Yuasa and K. Ando, “High Magnetoresistance Ratio and Low Resistance – Area Product in Magnetic Tunnel Junctions with Perpendicularly Magnetized Electrodes”, Appl. Phys. Exp., Vol.3, No.5, 053003, 2010.
- [37] 松井昂一, 金城秀和, 町田賢司, 中山達哉, 杉本茂貴, 青島賢一, 加藤大典, 久我淳, 田巻明, 菊池宏, “Gd22Fe78 フリー層 TMR 素子における垂直磁気特性の改善”, 春季第 60 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 29a-A8-10, pp.10-073, 2013.
- [38] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki and K. Ando, “Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions”, Nature Mater., Vol.3, pp.868-871, 2004.
- [39] H. Kinjo, K. Machida, K. Matsui, K. Aoshima, D. Kato, K. Kuga, H. Kikuchi and N. Shimidzu, “Low-current-density spin-transfer switching in Gd22Fe78-MgO magnetic tunnel junction”, J. Appl. Phys., Vol.115, No.20, 203903, 2014.
- [40] B. Dai, T. Kato, S. Iwata and S. Tsunashima, “Spin Transfer Torque Switching of Amorphous GdFeCo with Perpendicular Magnetic Anisotropy for Thermally Assisted Magnetic Memories”, IEEE Trans. Magn., Vol.48, No.11, pp.3223-3226, 2012.
- [41] R. H. Koch, J. A. Katine, and J. Z. Sun, “Time-Resolved Reversal of Spin-Transfer Switching in a Nanomagnet”, Phys. Rev. Lett., Vol.92, No.8, 088302, 2004.
- [42] K. Yagami, A. A. Tulapurkar, A. Fukushima, and Y. Suzuki, “Low-current spin-transfer switching and its thermal durability in a low-saturation-magnetization nanomagnet”, Appl. Phys. Lett., Vol.85, No.23, pp.5634-5636., 2004.
- [43] 後藤聡希, 湯勝軍, 青島賢一, 町田賢司, 久我淳, 菊池宏, 清水直樹, 石橋隆幸, “空間光変調器用 GMR 構造の磁気光学特性シミュレーション”, 春季第 59 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 18a-B4-11, pp.10-100, 2012.
- [44] S. Goto, K. Machida, K. Aoshima, K. Kuga, H. Kikuchi, N. Shimidzu, and T. Ishibashi, “Magneto-optical Properties of (Pt/Co)/X/IZO (X = Ta, Au, Pt, Ru and Ag) Structures for Magneto-optical Spatial Light Modulators”, EPJ Web of Conferences, 40, 12005, 2013.

- [45] K. Aoshima, H. Kinjo, K. Machida, D. Kato, K. Kuga, T. Ishibashi, and H. Kikuchi, “Active Matrix Magneto-Optical Spatial Light Modulator Driven by Spin-Transfer-Switching”, *J. Disp. Technol.*, Vol.12, No.10, pp.1212-1217, 2016.
- [46] K. Aoshima, H. Kinjo, K. Machida, D. Kato, K. Kuga, T. Mishina, H. Kikuchi, and N. Shimidzu, “Three dimensional motion picture technologies”, *IEEE Industry Applications Society 49th Annual Meeting*, 2014-ILDC-0351, 2014.
- [47] H. Kinjo, K. Aoshima, N. Funabashi, T. Usui, S. Aso, D. Kato, K. Machida, K. Kuga, T. Ishibashi, and H. Kikuchi, “Two Micron Pixel Pitch Active Matrix Spatial Light Modulator Driven by Spin Transfer Switching,” *Electronics*, Vol.5, No.3, 55, 2016.
- [48] H. Kinjo, N. Funabashi, K. Aoshima, T. Usui, S. Aso, D. Kato, K. Machida, K. Kuga, T. Ishibashi, and H. Kikuchi, “Two micron pixel pitch magneto-optical spatial light modulator driven by active matrix transistors,” *Digests of the IEEE International Magnetism Conference*, HC-09, 1684, 2017.
- [49] N. Funabashi, H. Kinjo, T. Ueno, S. Aso, D. Kato, K. Aoshima, K. Kuga, M. Motohashi, and K. Machida, “Voltage-Controlled Magnetic Anisotropy in Tb-Fe-Co/MgO/Gd-Fe MTJ Devices,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol.53, No.11, 4003304, 2017.
- [50] 上野鷹幸, 船橋信彦, 金城秀和, 麻生慎太郎, 加藤大典, 青島賢一, 久我淳, 本橋光也, 町田賢司, “ $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{80}/\text{Gd}/\text{Gd}_{21}\text{Fe}_{79}$ フリー層の電圧磁気異方性制御”, *Transactions of the Magnetism Society of Japan*, Vol.2, No.1, pp.15-19, 2018.

著者論文

公表済み論文(学位請求申請に関連のある論文)

査読付雑誌論文

- (J-1) H. Kinjo, K. Machida, K. Matsui, K. Aoshima, D. Kato, K. Kuga, H. Kikuchi, and N. Shimidzu, “Low-current-density spin-transfer switching in Gd₂₂Fe₇₈-MgO magnetic tunnel junction”, J. Appl. Phys. Vol.115, No.20, 203903, 2014.
- (J-2) K. Aoshima, H. Kinjo, K. Machida, D. Kato, K. Kuga, T. Ishibashi, and H. Kikuchi, “Active Matrix Magneto-Optical Spatial Light Modulator Driven by Spin-Transfer-Switching”, J. Disp. Technol., Vol.12, No.10, pp.1212-1217, 2016.
- (J-3) H. Kinjo, K. Aoshima, N. Funabashi, T. Usui, S. Aso, D. Kato, K. Machida, K. Kuga, T. Ishibashi, and H. Kikuchi, “Two Micron Pixel Pitch Active Matrix Spatial Light Modulator Driven by Spin Transfer Switching”, Electronics, Vol.5, No.3, 55, 2016.

国際会議論文

- (P-1) K. Aoshima, H. Kinjo, K. Machida, D. Kato, K. Kuga, T. Mishina, H. Kikuchi and N.Shimidzu, “Three dimensional motion picture technologies”, IEEE Industry Applications Society 49th Annual Meeting, 2014-ILDC-0351, 2014.