



電子 1215

平成 17 年度 修士論文

強磁性 MnAs による非相反損失変化に基づく
TM モード導波路型アイソレータ

TM-mode waveguide optical isolator based on the
nonreciprocal loss shift induced by ferromagnetic MnAs

平成 18 年 2 月 3 日提出

指導教員 中野 義昭 教授

東京大学先端科学技術研究センター

工学系研究科 電子工学専攻

46381 雨宮 智宏

目次

<u>Chapter 1</u>	<u>序論</u>	
1-1.	導波路型アイソレータとは	1
1-2.	導波路型アイソレータの現在	2
1-3.	非相反損失変化を利用した導波路型アイソレータ	5
1-4.	本研究の目的および特徴	7
<u>Chapter 2</u>	<u>理論</u>	
2-1.	磁気光学効果とは	9
2-2.	MnAs における誘電率テンソル	14
2-3.	本アイソレータにおける理論計算	22
<u>Chapter 3</u>	<u>素子作製</u>	
3-1.	MOVPE による InAlGaAs/InP 半導体光増幅器 (SOA)	27
3-2.	MBE による強磁性 MnAs 薄膜	30
3-3.	利得導波型導波路の作製	33
<u>Chapter 4</u>	<u>測定</u>	
4-1.	SOA による利得特性	35
4-2.	アイソレータ特性の評価	39
4-3.	アイソレータ特性の MnAs 膜厚依存性	44
<u>Chapter 5</u>	<u>まとめと今後の展望</u>	47
<u>Appendix A, B</u>		49
<u>各 Chapter の参考文献</u>		55
<u>本研究に関連する発表文献</u>		57
<u>謝辞</u>		59



1

序論

1-0. INTRODUCTION

中野研究室では、高機能な光波回路の実現を目指し、光集積回路の開発をメインテーマとして研究を行っている。特に、我々のグループは、光アイソレータと光能動素子の集積化（光デバイス集積化）を目指し、導波路型アイソレータの研究を推進している。本章では、その歴史・近年の動向などを述べることにより、本研究の位置づけを確認し、次章への布石とする。

1-1. 導波路型光アイソレータとは

現在の光通信・光情報システムにおいて、情報担体は光の強度情報である。より進んだ光システムの実現のためには、種々の光素子を集積一体化するとともに、光の波動としての特長をフルに生かして、周波数情報や位相情報を情報の担い手として利用する技術が必要である。この後者の目的には、レーザ光の強度、周波数、位相の安定化が不可欠であるが、レーザの発振状態は外部からの反射による戻り光により不安定化しやすい。そのため、レーザからの出力光は透過させるが、反対方向に進む戻り光はカットする機能を持つ光アイソレータの重要性が認識されるようになり、その研究は近年とくにわが国において盛んに行われている。すでにバルク結晶や厚膜を用いた個別素子としての光アイソレータは実現可能となっているが、我々のグループではそれからさらに一歩進み、将来の光集積回路化に対応が可能なアイソレータの研究に取り組んでいる。

現在の光ネットワークはバルク型の光部品を組み合わせて構成されている。光ネットワークをより高信頼で低コストなものとし、広く社会に浸透させていくためには、これら各種の光部品を

一体的に集積化していく技術の開発が必要である。磁気光学素子であるアイソレータは光ネットワークに大量に使用されている重要な光部品である。バルク型アイソレータには磁性ガーネット酸化物結晶が用いられているが、この結晶の成長には約900℃の高温が必要なため、半導体基板上に成長させることは出来ない。磁性ガーネット酸化物結晶を使用する限りは、アイソレータと他の半導体光部品を一体的に集積化することは困難である。各種光部品の一体的集積化という目的にとって、磁気光学素子の集積化は最も実現困難な課題となっている。我々のグループでは、磁性ガーネット酸化物結晶に代わる新しい磁気光学材料を使用することにより、この課題の解決を目指している。そのために、主に以下の2つのアプローチがある。

1つ目のアイデアは、半導体系材料でありながら大きな磁気光学効果を有する希薄磁性半導体材料を用いて、半導体基板上に磁気光学導波路を形成することである。産総研では、この手法を用いて既に34%の磁気光学導波路モード変換効率を実証している[1]。

2つ目のアイデアは、通常の半導体で構成される光増幅器と大きな磁気光学効果を有する強磁性金属を組み合わせたハイブリッド型磁気光学導波路の提案である。この独創的なアイデアについては、すでに、理論計算によるその動作原理が国際誌上[2-4]に報告されており、大きな反響を呼んでいる。この提案を受けて、国内外の複数の研究機関がその実現を目指した研究開発を開始しているが、いずれの機関においても未だには実用段階には至っていない。しかし非常に先進的かつ将来性のあるものだと考えられる。

本研究では、後者のアプローチに基づく導波路型アイソレータを筆者自身の手により実証することを目指す。なお、このハイブリッド構造を用いた導波路型磁気光学素子は、光アイソレータのみでなく、その機能を磁氣的に調整することのできる光双安定性素子や強磁性体のメモリ機能を組み合わせた不揮発性メモリ機能付きの光論理素子[5]への発展の可能性も秘めているため、実現されれば光通信のみでなく高速光計算などへの応用のインパクトも大きい。

以上、導波路型の光アイソレータは光集積回路と整合性が良いのみでなく、バルク型素子の作製に不可欠な結晶のカットや、研磨の工程が不要で、高価なバルク型の偏光子も必要としないため、低コスト化が可能で信頼性も高い等の優れた可能性を秘めている。

1-2. 導波路型光アイソレータの現在

この節では、研究の本題に移る前に、現段階で提案・研究されている導波路型アイソレータをいくつか挙げ、それらに関する原理を簡単に説明する。現在までに提案されている導波路型アイソレータを動作原理について大別すると2つに集約される。(A) 導波路型にすることにより、自由空間ではなかった空間的な非対称性によって発生する磁気光学効果を用いたもの。これは導波路という閉じ込めがある空間の磁気光学効果をうまく利用したもので、導波路型特有のものである。(B) バルク型光アイソレータをそのままの形で導波路型にしたもの。これは基本的には

バルク型と同様に、ファラデー回転を利用している。以降、それぞれの特徴を述べる。

■ 非相反移相変化型アイソレータ (TE mode) [6-9]

非相反移相変化を利用した本研究は、東工大のグループを中心に進められ、導波路型アイソレータの中でも老舗といえる。このアイソレータは前述した (A) グループに属しており、 90° の相反移相器及び 90° の非相反移相器 (伝搬方向によって光波が受ける位相変化量が異なる) を含むマッハツェンダ干渉計で構成される (Fig. 1-1)。ここで、入射光の偏波と同じ偏波の反射光に対する相反移相の大きさが 90° になり、かつ、入射光の偏波と逆の偏波の反射光に対する相反移相の大きさが 180° になるように相反移相器の長さが調整されている。

この素子の動作実証に加えて、近年、研究グループ内では LD 集積化形光アイソレータの開発も行なわれている。半導体導波層の上に隙間無く磁性ガーネットを装荷するために、ダイレクトボンディング という技術を用い、一偏波のみで比較的容易な磁化制御で動作することを目標としている。半導体レーザーから出力された光は、そのまま右方向に伝搬して出力端から出力される。逆に、外部から反射された光は左方向に伝搬するが、前述した 90° の非相反移相器による移相変化によって打ち消され、半導体レーザーには戻らない。

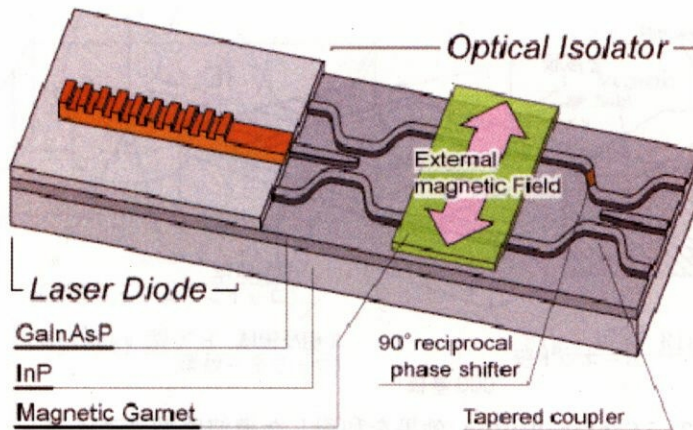


Fig. 1-1 半導体レーザーと一体化された非相反移相変化を利用した導波路型光アイソレータ。 90° の相反移相器及び 90° の非相反移相器を含んだマッハツェンダ干渉計で構成される。

■ Cotton-Mouton 型アイソレータ (TE mode) [10, 11]

次に前述した (B) グループに属するものの中で、代表的なものを挙げる。この素子は Cotton-Mouton 効果を利用したもので、導波路内にて偏光面の回転を引き起こす。つまり、「バルク型アイソレータをそのまま導波路上に作製した」と言い換えることもできる。

この光アイソレータの構造を Fig. 1-2 に示す。薄膜導波路を互いに隣接する二つの領域に分け、その一つの領域では磁気モーメントの方向を光の進行方向と平行にすることでファラデー効

果を起こす。他の領域では磁気モーメントの方向を、光の進行方向に垂直な面でかつ薄膜の法線方向から約25度傾け、これにより二次の磁気光学効果であるCotton-Mouton効果を起こす。Cotton-Mouton効果は相反効果の一種である。このように磁気光学効果には、光の進行方向に対する磁気モーメントの相対的方向に依存して、同一の物質で非相反効果も、相反効果も起こすことが出来るという特長があるが、Fig. 1-2の構造はこの特長を活用したものである。ここで各々の領域の長さを偏光面が45度回転するように調整する。すると、Fig. 1-2において入射光（左→右）に対しては、ファラデー効果による45度の偏光面の回転がCotton-Mouton効果による反対方向の45度回転により打ち消され、出力光の偏光方向は入射光と平行になる。即ちTEモードの光はそのまま出力光となる。一方、反対方向（右→左）に入射したTEモードの光は、各々の領域における45度の回転が足し合わされて90度異なる方向の偏光を持つ光(TMモード)となる。TMモードの光は薄膜上に蒸着した金属薄膜により吸収されるため、この構造は光アイソレータとしての機能を持つことになる。

この導波路型光アイソレータを実現するには、磁気モーメントの方向を正確に制御する必要がある。よって、高い性能を得るためには、導波路の厚みや磁気モーメントの傾き角度等を最適化する必要がある。なお、この導波路型光アイソレータの動作に必要な外部磁場は、単一の弱い磁場のみであり素子の大幅な小型化が可能となることも付記しておく。

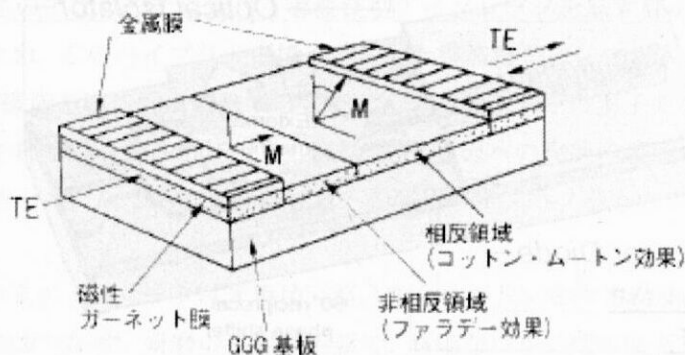


Fig. 1-2 Cotton-Mouton 効果を利用した導波路型光アイソレータ

■ Semileaky 型アイソレータ (TE mode) , Rib 型アイソレータ (TM mode) [12, 13]

Semileaky 型の素子構造を Fig. 1-3 に示す。このタイプは非相反領域と相反領域を別々に設けることはなく、同じ場所に作製している。素子は磁気光学媒質である YIG 上に LiNbO3 層を設けた構造を成しており、LiNbO3 の複屈折のために、相反偏光回転が起きる。TE モードで入射してきた光は YIG の Faraday 効果による偏光の回転および LiNbO3 による偏光の回転を同時に受け、トータルとして回転は打ち消され TE モードのまま透過する。一方、戻り光は逆に TM モードに変換される。ここで、LiNbO3 の屈折率が YIG の屈折率よりも大きいため、TM モード光は LiNbO3 側へ漏れ、減衰する。よって、この素子はアイソレータとして動作する。この方式で

は非相反領域と相反領域を同じ場所に作製できるため、より小型化が期待できる。また、戻り光はモードが連続して存在する漏れ光の TM モードと結合するので、TE モードとの正確な位相整合を必要としないという利点も持ち合わせている。このデバイスでは過去 1dB/mm 程度のアイソレーション比が達成されている。

Rib 型の素子構造を Fig. 1-4 に示す。これは、Cotton-Mouton 型と同様に、非相反な等価屈折率の変化を用いたものである。TM モードに関してカットオフ寸前になるよう素子を作製すると、磁場を印加したときに進行波はどのモードとも結合せず、そのまま出射される。逆に、戻り光は放射モードの TE モードと結合することで減衰してしまい、アイソレータの機能を有する。動作原理は、Semileaky 型と非常に良く似ているが、TM モードで動作することが異なる点である。この方式を用いると、Fig. 1-4 のように単純な Rib 型導波路のみでアイソレータを構成することができるが、TM モードの等価屈折率をカットオフ近くにするために、素子作製に非常に精度を求められる。本アイソレータでは、1550nm 帯域において 30dB のアイソレーション比が実現されており、性能的には導波路型アイソレータの中でも特に優れている。しかし、素子作製に精度を求められるため、その他光素子との集積一体化という面では、大きな困難が伴うことになる。

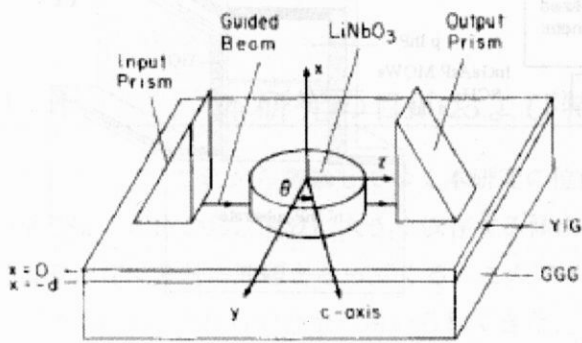


Fig. 1-3 Semileaky 型アイソレータ

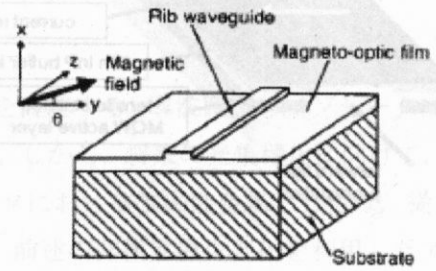


Fig. 1-4 Rib 型アイソレータ

1-3. 非相反損失変化を利用した導波路型光アイソレータ

1-2 において、現在研究段階にある様々な導波路型アイソレータを紹介した。それらを踏まえて、本題である非相反損失変化を利用したアイソレータの概要を解説する。このタイプのアイソレータは近年目覚ましい発展を遂げており、導波路型アイソレータ研究の主流の1つとなってきている。動作モード別に TM 型・TE 型の2つがあり (Fig. 1-5), TM 型は Gent 大学 (ベルギー) のグループで研究されており、1.3um 帯において 11.3dB/mm の性能が [14-16], また、TE 型は当研究室で研究が行われており、1.55um 帯において 14.7dB/mm の性能が得られている [17-19]。

このアイソレータでは、強磁性金属を積層させた半導体導波路中において、導波路中を伝搬する光の磁場ベクトルと強磁性のスピンのマクロな発現としての磁化の相互作用 (磁気光学効果)

により引き起こされる非相反損失変化に注目している。素子構造は、端面出射型半導体レーザや半導体光増幅器などのプレーナ型光導波路の上部(TM型)もしくは側面(TE型)に強磁性金属を配置した形となっている。このような導波路に各モード光を入射させ、光の伝搬方向に垂直、かつ基板面内(TM型)または基板面直(TE型)に外部磁場を印加すると、光の伝搬方向によって実効屈折率が異なる現象が起きる(Fig. 1-6)。具体的には、前進波に比べて後退波の損失が大きくなる。この現象はMaxwellの方程式を解くことによって導かれ、実効屈折率の虚部の変化が非相反損失変化である。ここで、強磁性金属によりもたらされる前進波の伝搬損失を半導体光増幅器の利得で補うことにより、光アイソレータとしての動作が可能となる。

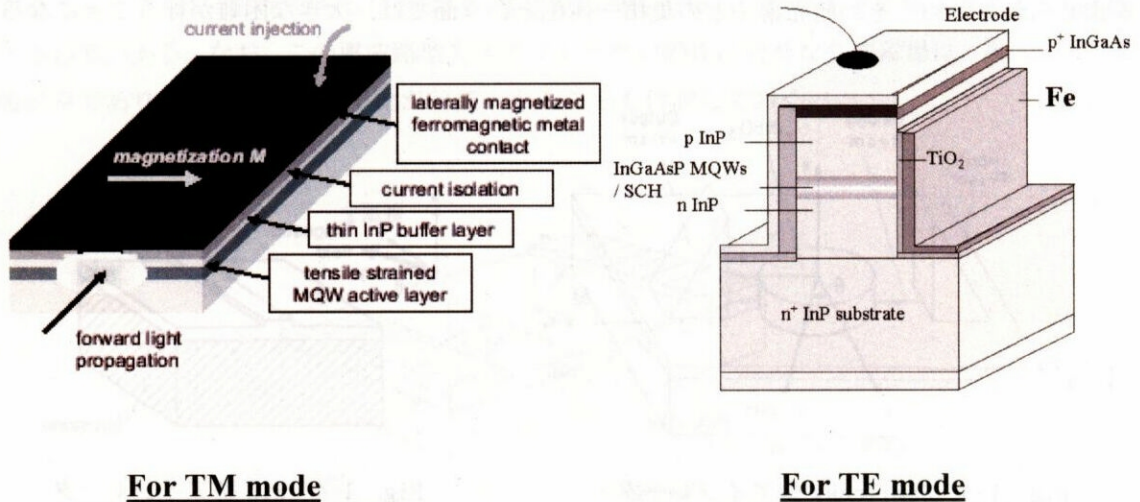


Fig. 1-5 非相反損失変化を利用した導波路型光アイソレータ。左が TM モード 1300nm で動作するもの。右が TE モード 1550nm で動作するもの。

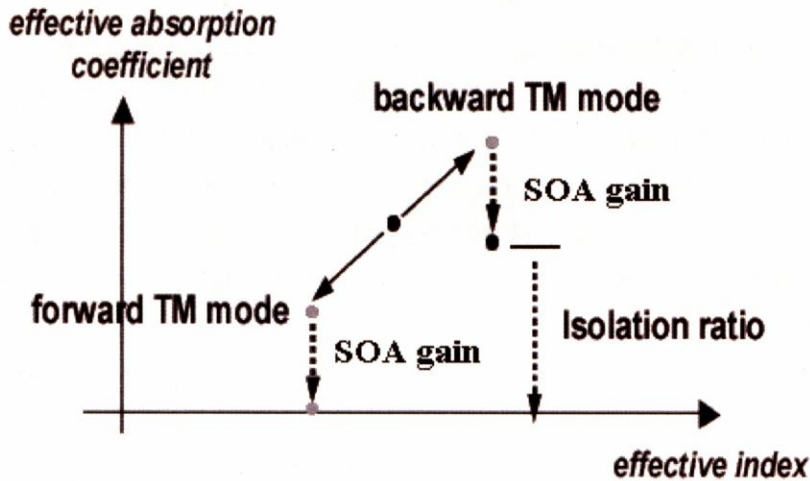


Fig. 1-6 非相反損失変化の概念図。強磁性層の磁化がそろふことによつて素子全体の有効屈折率に変化が生じる。前進波損失<後退波損失となり前進波損失を SOA で補う。

1-4. 本研究の目的および特徴

さてここで、これから議論してゆく本研究の位置づけを確認する。導波路型アイソレータはその構造上の理由から、偏波に大きく依存する傾向にある。しかし、将来の光集積化に向けて、この偏波依存は非常に問題となってくる。このアイソレータにおける強磁性金属としては、従来、Ni や Fe およびそれらの合金が用いられてきた。しかし、前述の非相反損失変化を利用したアイソレータは TE・TM 型ともに同じような構造をしており、この2つを合わせることで偏波無依存素子を作製しやすいという利点がある。

当研究室では、すでに 1.55 μm 帯において TE モード型素子の原型が出来上がっているが、同一帯域で TM モード型素子の研究が成されたという事例はない。よつて、本稿では、1.55 μm 帯域における非相反損失変化を利用した TM モード導波路型アイソレータを扱うことにする（これにより、将来的には TE・TM 両素子を合わせることを目指してゆく）。ただし、同じ TM モード型素子の研究を行っているベルギーのグループとの差別化を図るために、動作帯域以外にも、本研究ならではの特徴を導入する。それは、「強磁性金属として分子線エピタキシー (Molecular-beam Epitaxy; MBE) で成長した単結晶 MnAs (六方晶, NiAs 型) を用いる」ことである。この一見単純な特長が以下に示す様々な恩恵をもたらす。

1

非相反損失変化型アイソレータは、前述のように損失を補償する必要性から SOA を常時動作させておく必要がある。つまり、常時電流を流し続けなければならない。これにより素子の消費電

力が問題になってくる。本素子での強磁性金属は電極の役割も兼ねているが代表的な強磁性金属 (Co, Fe 等) と p 型半導体の良好なオーミックコンタクトをとることは一般的に難しく, さらにコンタクトアニール処理は FeAs などの非強磁性複合化合物の生成をもたらすため, 行うことができない。このため素子抵抗が自ずと大きくなり, 消費電力も増大する。(このことは, 本稿末の APPENDIX A 参照。実際に Ni, Fe を用いたアイソレータの作製・実験を行ったので, その結果を載せている。) しかし単結晶 MnAs を用いると, 熱力学的・電氣的に安定, 良好な強磁性金属/半導体界面を得ることができ, オーミックコンタクトがとり易く, その分だけ消費電力を抑えることができる。

2

また, 素子には永久磁石により外部磁場をかけ続けているが, この外部磁場の強度も問題となる。素子の小型化を目指すのであれば, 必要な磁場は単一の弱い磁場のみであることが望ましい。半導体上に堆積した単結晶 MnAs は, 結晶磁気異方性があるものの, 磁化容易軸方向では飽和磁化は数百 Oe 程度であるとの報告がある [20]。このため, 外部磁場の大きさはほぼ考える必要がなくなり, 素子の大幅な小型化が可能となる。

以上のようなことを踏まえて, TM モード型デバイスを作製し, 実際に素子性能が改善することを確認したので, これから順を追って解説してゆくことにする。

- Chapter 2 -

本研究で使用した MnAs の磁気光学的性質を理論から実験に至るまで簡単に論じる。その後, 本 TM モードアイソレータの理論計算を行い, 素子性能の見積もりを行う。

- Chapter 3 -

素子の作製方法。成長からプロセスまでを簡潔に説明する。

- Chapter 4 -

実験結果。左右透過強度の測定, MnAs 膜厚の特性依存性など, 素子の基本となる性能および物理を明らかにする。

- Chapter 5 -

全体の総括を行う。