

# 5

## 結論

さて、以上が現状の全てである。最後にこの章では、1-4 節で述べた指標をどこまで満たしたのかを確認する。

### 1 : 1.55 $\mu$ m 帯域におけるアイソレータは実現できたのか

まだまだ損失が多く、アイソレータ素子とは言えないかもしれないが、1.55 $\mu$ m において 10dB/mm 程度の非相反損失変化を得られたことは非常に喜ばしいことだと言える。

### 2 : 強磁性金属/半導体コンタクトの接触抵抗について

これに関しては、できたといえる。MnAs デバイスでは 100mA において 1.7V 程度の電圧を示しており、APPENDIX A や APPENDIX B に記載した一般的強磁性金属を使用した場合に比べて小さい。これにより、消費電力は十分抑えられると考えられる。

### 3 : 外部磁場の低減化について

単結晶 MnAs の磁化曲線でも示したとおり、1700e 程度の外部磁場があればよいことになる。これは非常に小さい磁場であり、素子のより小型化が望める。今回 InGaAsP コンタクト上に MnAs を単結晶成長したが、これはデバイスに関係なく、結晶成長分野から見ても珍しい実験である。

なお、今後の展開として以下のことを考えている。

### 今後の展開

第一に、アイソレーション性能の増加と透過損失の低減を図る必要がある。実用化されているバルク型アイソレータのアイソレーション比は 20 dB/mm 以上なので、これまでの検討で得た試作アイソレータの 10dB/mm はまだ不十分であり改良の必要がある。また、現段階では透過損失が非常に大きいので、それも改善する必要がある。これらを実現するために、MQW 層における補償増加(現状からの量子井戸層数増加)等のアプローチがある。

また、より結晶性の良い MnAs を結晶成長できれば、ゼロ磁場での保存も可能となり、将来的には外部磁場が必要なくなる可能性もある。

	Conventional Faraday optical isolator	Our waveguide optical isolator
Temperature characteristics	Temperature dependence on Faraday rotation	Temperature control is required for SOA
Bias current	Not necessary	Necessary
External magnetic field	Not necessary	Necessary
Integration	Difficult 2 mm	<b>Possible</b> <b>&lt; 1mm</b>
Isolation ratio	> 30 dB/mm	<b>= 10 dB/mm</b>
Propagation loss	None	> 30 dB/mm

Fig. 5-1 アスリートなバルク型アイソレータとの比較。性能の面では足元にも及ばないが、導波路型アイソレータの将来に期待したい。



# A

## Ni/Fe<sub>2</sub> 層構造による非相反損失変化

本稿のメインテーマは単結晶 MnAs 薄膜を用いたアイソレータであるが、本研究ではそれ以外に、強磁性金属として Ni/Fe の 2 層薄膜を用いた素子も作製した[39]。ここではその特性について論じ、MnAs アイソレータとの比較を行う。Ni/Fe アイソレータはそのプロセス方法の違いにより、Fig. A-1 のようなリッジ型導波路構造にすることができる。(本来は、磁性層に光を集光させる点および単一モードで動作させる点などを考えるとリッジ型導波路の方が利点は多い。MnAs アイソレータの場合は、酸化膜ストライプ構造を作製したが、これは MnAs のサイドエッチグレートが非常に大きく、リッジ型導波路を作ることができないからである。) 以下その手順を Fig. A-2 を用いて簡単に説明する。(a) レジスト S1805 を塗り、5.5um の型導波路パターンを露光・現像によって作製する。その後、パターン以外の部分を SOA 直前まで Br<sub>2</sub>/HBr/H<sub>2</sub>O を用いてエッチングすることによりリッジ型導波路を作製する。(b) その上から電子ビーム (EB) 蒸着により全面に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 100nm を蒸着する。(c) lift-off プロセスにより、リッジ型導波路の上部にある Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜を除去する。(d) Ni : 20nm / Fe : 100nm および Au : 200nm を同じく EB によって斜め蒸着する。(a)-(d) の後、サンプルの裏面を 150um 程度まで研磨し、裏面に Au を蒸着するのは MnAs アイソレータの場合と同一である。Fig. A-3 に作製した素子の断面走査電子顕微鏡 (SEM) 画像を示す。これにより、設計どおりに素子は出来上がっていることが分かる。本素子は MnAs アイソレータに比べて以下のような特徴を有する。

Ni および Fe の誘電率テンソル非対角成分が MnAs よりも大きいため、より大きい性能が得られる可能性がある。ただし吸収係数 (損失) も非常に大きいため、4-2 節で述べたようにアイソレーションが雑音に埋もれてしまう可能性もある。

一般的な強磁性金属と半導体コンタクトとのオーミックコンタクトを取ることが困難なことから、素子の消費電力が大きくなると考えられる。また、EB により蒸着された強磁性薄膜の飽和磁化は 300-400Oe 程度まで上がってしまうので、MnAs アイソレータに比べて大きい外部磁場が必要とされ、素子の小型化という面では適していない。

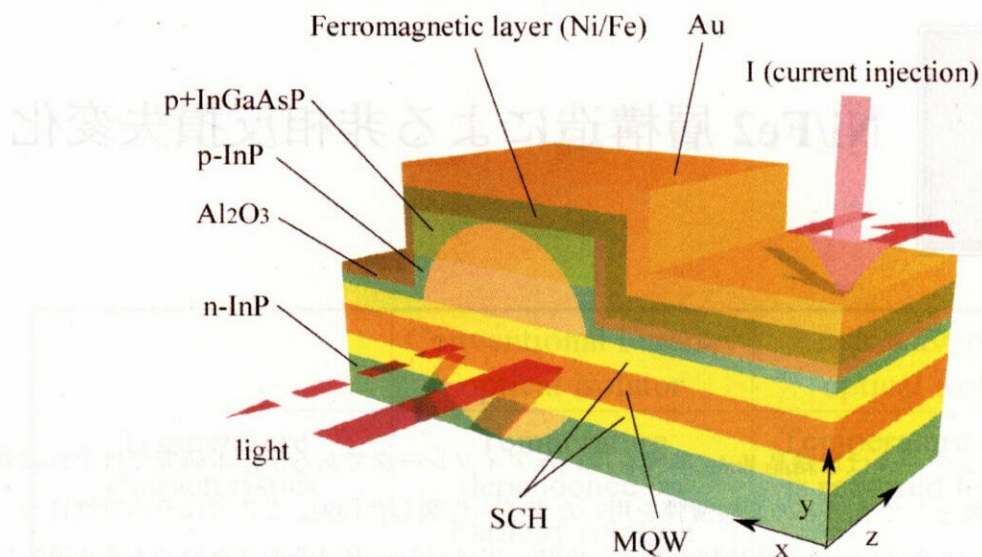


Fig. A-1 Ni/Fe 型アイソレータの概要図。TM モードにて増幅がなされるよう，活性層の部分は伸張歪み補償量子井戸を導入している点は MnAs 型と同じである。

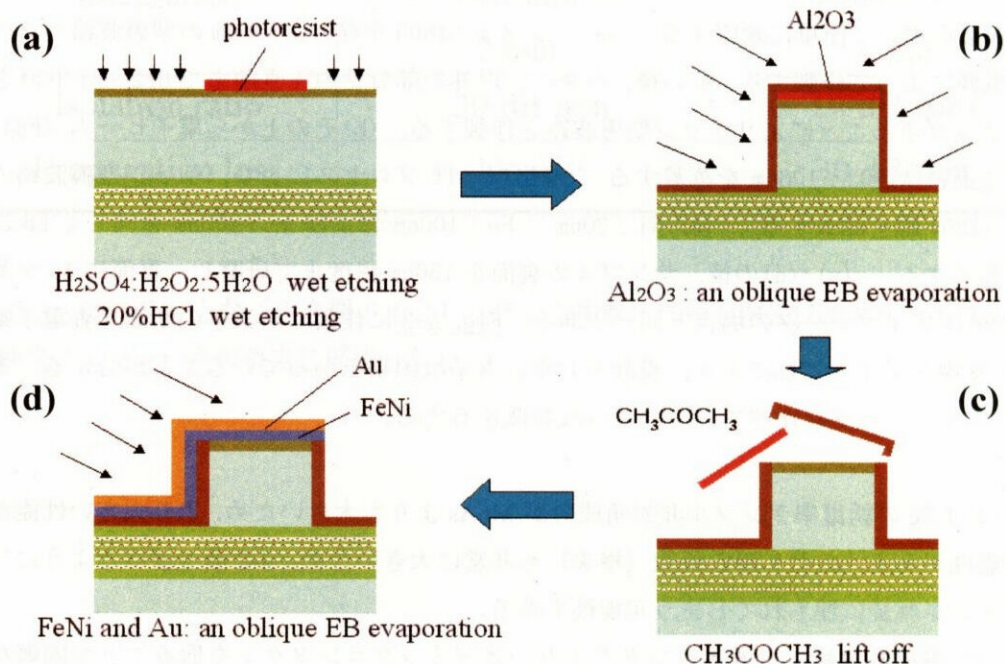
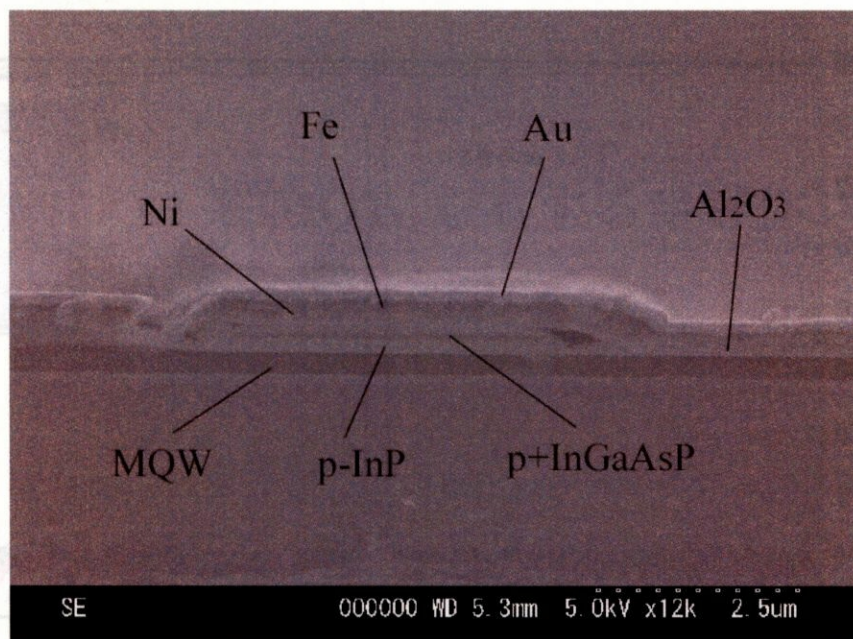


Fig. A-2 Ni/Fe 型アイソレータのプロセス手順。





**Fig. A-3** Ni/Fe 型アイソレータの断面 SEM 画像。リッジ導波路型の形を成しており，Ni の膜厚は 20nm，Fe の膜厚は 100nm である。

この実験系では，永久磁石により 1kG 程度の磁場を素子に印加し，光の伝播方向を変える代わりにこの磁場印加方向を変化させた。入力光の波長帯域および強度はそれぞれ 1520–1560nm，8dBm となっている。偏波コントローラにより入力光の TE/TM モード変換を行い，素子の温度は 15℃ で一定に保たれるよう調節した。0.75mm の素子においてバイアス電流を 100mA としたとき，素子電圧は約 2.5V となったが，これは半導体コンタクト層/強磁性金属層間 (Ni/Fe) 間にショットキー障壁が生じているためであると考えられる。

**Fig. A-4** に，この実験系によって測定された磁場印加方向における素子の透過特性を示す。このとき注入電流は 100mA，1530nm（利得ピーク）の光を入力した。磁場印加方向によってアイソレーション比は，ゼロ磁場を中心にしてスプリットし，最大で（素子長 0.75mm を考慮して）6.6dB/mm の非相反損失変化が見られた。一方，注入電流が 100mA 時，1540nm の TE モード光を入力した場合の素子の透過測定は磁場印加方向によって，ファイバの若干のずれはあるものの，ほとんど変化が見られず，<1dB/mm といえ，明確な偏波依存性があることを示している。この素子は入力光の強度が 8dBm であるにもかかわらず，MnAs の素子に比べて（MnAs 素子は 5dBm で測定している）損失が非常に大きい。これは 1.55μm 帯における MnAs の吸収係数に比べて，Ni, Fe の吸収係数が大きいことに由来すると考えられる。

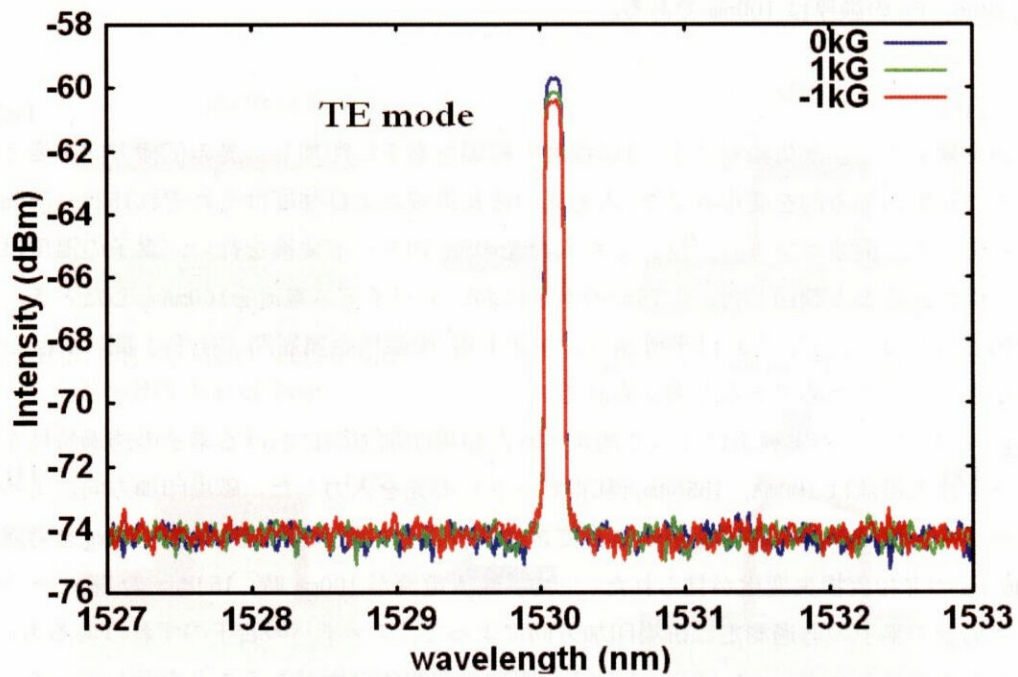
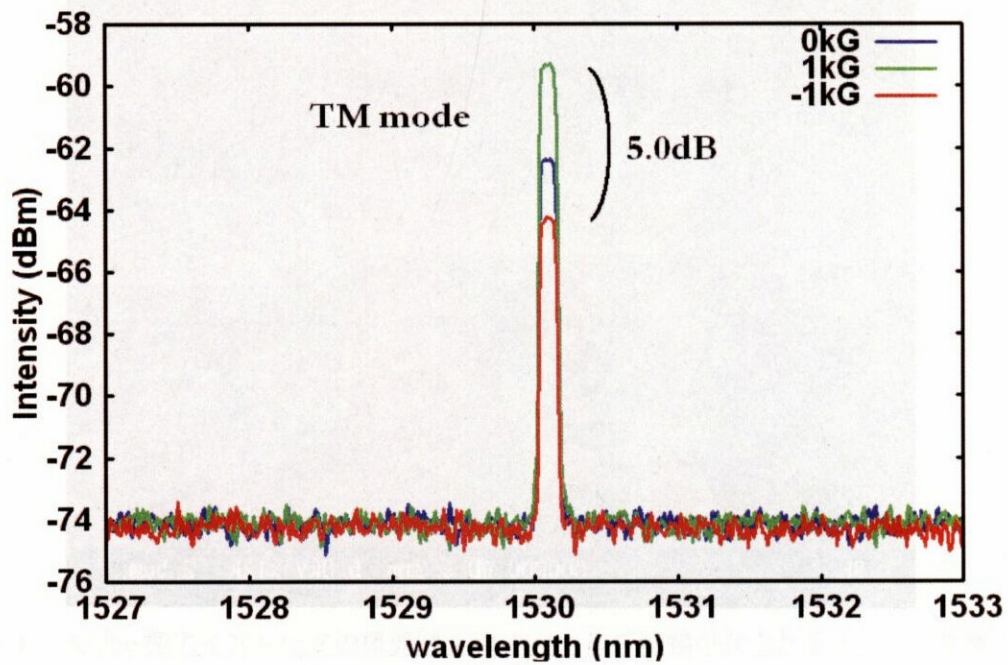


Fig. A-4 注入電流が 100mA 時, 8dBm, 1540nm の TM モード光を入力した時の透過特性。このとき電流値によって TM モードのみ 5.0dB/0.75mm=6.6dB/mm のアイソレーションが得られた。



# B

## Al系 MQW を有する半導体レーザ

近年、インターネットの普及による通信トラフィックの急増に伴い、メトロネットワークやアクセスネットワーク等の短距離伝送においても高速性が求められている。10ギガビットイーサネットやOC-192用の10Gbit/sクラスの光トランシーバ用光源には、低コスト・低消費電力が要求されており、温度制御を不要とした直接変調型DFBレーザモジュールの開発が盛んに行われている。使用される素子には、高温においても高速動作を可能とする高い変調特性が必要となる。長波長帯のレーザ素子の材料として従来から用いられているInGaAsP系では、高温におけるレーザ特性の劣化が大きく、そのような状況では、必ずしも十分な特性が得られない。そのため、GaInAsP系に替わる材料としてInGaAlAsを用いたレーザが注目されている[40-42]。本稿ではアイソレータの特性に話を絞ってきたが、実験上Fig. 4-1のようなAl系レーザを作製する機会があったので、ここでは、その温度特性について述べる。InGaAlAs量子井戸が、InGaAsP量子井戸と異なる点は、電子側のバンドオフセットが大きいことである。これによりAl系量子井戸は通常に比べて電子の閉じ込めを大きくできる。そのため、高温における量子井戸からの電子のリークを抑制でき、CW、変調特性ともに温度特性に優れたレーザが作製可能になる。また、ホール側のバンドオフセットが小さいため、変調特性を上げるために量子井戸数を増やしても、有効質量の大きいホールの不均一注入が起りにくく、高速変調に適した設計が容易になる。

実験に使用した素子は、前述したようにFig. 4-1をそのまま流用する。まずレーザ素子のIV特性はFig. B-1のようになった。100mAで2.3Vと抵抗がやや大きいのが、これは半導体コンタクトと強磁性金属Niの間にショットキー障壁があるものと考えられる。(素子構造が違うため一概に比較はできないが、MnAsを使用したFig. 4-6と比べてもやはり抵抗は高い。)

Fig. B-2に各温度での光出力-電流特性を示す。60℃のみ光出力の劣化が顕著に見られるが、それ以外の出力は直線的に得られている。0-50℃間での閾値電流閾値電流の温度依存性を示すパラメータ $T_0$ は64K、スロープ効率の変動量( $\Delta\eta$ )は67%が得られた。InGaAsPレーザでは、 $T_0=46K$ 、 $\Delta\eta=65\%$ であり、InGaAlAs材料系が温度特性に優れていることがわかる。

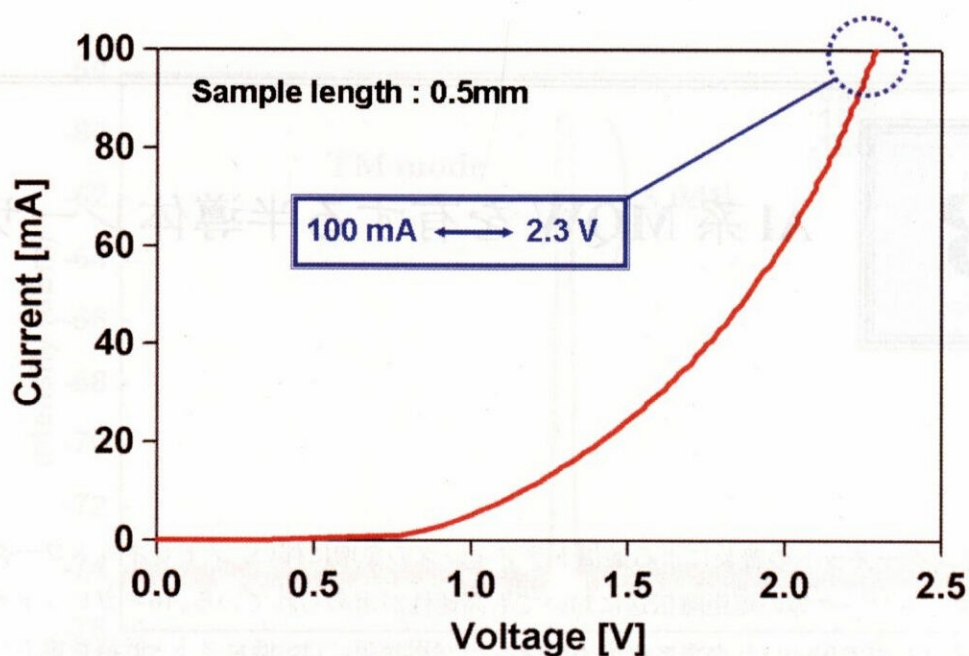


Fig. B-1 レーザ素子における IV 特性。半導体コンタクトの上に Ni 層を堆積しているためにショットキー障壁ができていると考えられる。

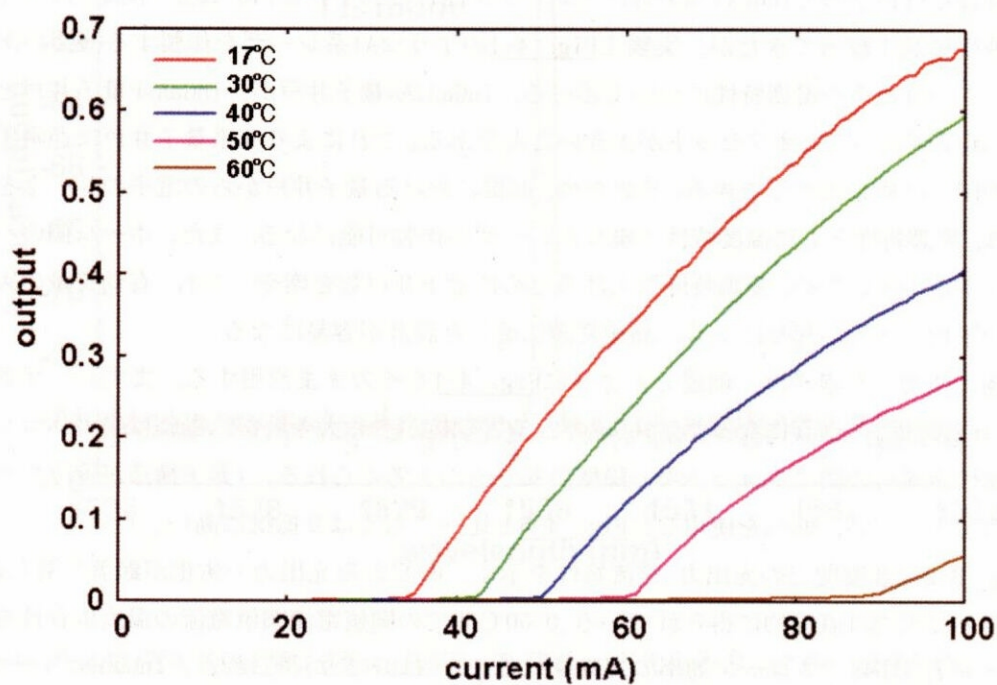


Fig. B-2 各温度における光出力-電流特性



## 各 Chapter の参考文献

### Chapter 1

- [1] Zayets et al., Appl. Phys. Lett. **77**,1593 (2000).
- [2] Zayets et al., IEEE Photonics Technol. Lett. **11**, 1012 (1999).
- [3] M. Takenaka and Y. Nakano, *Proceeding of 11<sup>th</sup> International Conference on Indium Phosphide and related materials*, 289 (1999).
- [4] H. Shimizu et al., Appl. Phys. Lett., Vol. **81**, No. 27 (2002).
- [5] Zayets et al., IEEE Photonics Technol. Lett. **13**, 185 (2001).
- [6] H. Yokoi, et al., Appl. Optics, **38**, No. 36, 7409 (1999).
- [7] H. Yokoi, et al., Appl. Optics, **41**, No. 33, 7045 (2002).
- [8] H. Yokoi, et al., Appl. Optics, **42**, No. 33, 6605 (2003).
- [9] K. Sakurai, et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol. **43**, No. 4A (2004).
- [10] K. Ando, et al., J. Appl. Phys. **57**, 1277 (1985).
- [11] H. Dammann, et al., Appl. Phys. Lett. **49**, 1755 (1986).
- [12] N. Sugimoto, et al, J. Lightwave Technology **14**, **11**, 2537 (1996).
- [13] M. Fehndrich, A. Josef, L. Wilkens, J. Kleine-Börger, N. Bahlmann, M. Lohmeyer, P. Hertel and H. Dötsch: Appl. Phys. Lett. 2918 (1999).
- [14] M. Vanwolleghem, *et al.*, *Proceedings Symposium IEEE/LEOS* (2002).
- [15] M. Vanwolleghem, et al., Appl. Phys. Lett. **85**, 3980 (2004).
- [16] W. V. Parys et al., *Proc. 12th European Conference in Integrated Optics*, WeA1-2 (2005).
- [17] H. Shimizu and Y. Nakano, Jpn. J. Appl. Phys. **43**, L1561 (2004).
- [18] H. Shimizu and Y. Nakano, *24th International Semiconductor Laser Conference*, PD1 (2004).
- [19] H. Shimizu and Y. Nakano, *Optical Fiber Communication Conference*, PDP18 (2005).
- [20] A. K. Das, C. Pampuch, A. Ney, T. Hesjedal, L. Däweritz, R. Koch, and K. H. Ploog, Phys. Rev. Lett. **91**, 087203 (2003).

### Chapter 2

- [21] L.F. Mollenauer, D. Downie, H. Engstrom and W.B. Grant: Appl. Opt. **8**, 661 (1969).
- [22] S.N. Jasperson and S.E. Schnatterly, Rev. Sci. Instr. **40**, 761 (1969).
- [23] K. Sato, Jpn. J. Appl. Phys. **20**, 2403 (1981).

- [24] K. Sato, H. Hongu, H. Ikekame, Y. Tosaka, M. Watanabe, K. Takanashi and H. Fujimori, Jpn. J. Appl. Phys. **32**, 989 (1993).
- [25] H. Yokoi et al., Appl. Optics, **39**, 33 (2000).

## Chapter 3

- [26] M. Tanaka, Semicond. Sci. Technol. **17**, 327 (2002)
- [27] S. Sugahara and M. Tanaka, J. Appl. Phys. **89**, 6677 (2001).
- [28] M. Tanaka and K. Takahashi, J. Crystal Growth **227**, 847 (2001).
- [29] M. Tanaka et al., J. Vac. Sci. Technol. **B12**, 1091 (1994).
- [30] K. Akeura, M. Tanaka, M. Ueki, and T. Nishinaga, Appl. Phys. Lett. **67**, 3349 (1995).
- [31] K. Akeura, M. Tanaka, T. Nishinaga, and J. De Boeck, J. Appl. Phys. **79**, 4957 (1996).
- [32] 明浦公彦;平成7年度修士論文『半導体基板上の強磁性 MnAs エピタキシャル薄膜』, (1996).
- [33] M. Tanaka, J.P. Harbison and G.M. Rothberg, Appl. Phys. Lett. **65**, 1964 (1994).
- [34] Ahsan M. Nazmul, H. Shimizu, and M. Tanaka, J. Appl. Phys. **87**, 6791 (2000).
- [35] Ahsan .M. Nazmul, A. G. Banshchikov, H. Shimizu, and M. Tanaka, J. Crystal Growth **227**, 874 (2001).
- [36] J. Lee, Y. Cui, J. Song, Y. Kim, A. J. Freeman, J. B. Ketterson, and S. Cho, J. Appl. Phys. **95**, 6562 (2004).
- [37] S. Sanvito and N. A. Hill, Physcal Rev. B **62**, 15553 (2000).

## Chapter 4

- [38]R. G. Walker et al., Electron. Lerr., **21**, 581 (1985).

## APPENDIX A and B

- [39]T. Amemiya, et al., *17<sup>th</sup> IEEE Indium Phosphide and Related Materials Conference*, TP-41 (2005).
- [40] C. E. Zah, et al., “High-performance uncooled 1.3μm Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>In<sub>1-x-y</sub>As/InP strained-layer quantum well lasers for subscriber loop application”, IEEE J Quantum Electron., **30**, 511 (1994).
- [41] K.Takemasa et al., “1.3-μm AlGaInAs-AlGaInAs Strained Multiple-Quantum-Well Lasers with a p-AlInAs Electron Stopper Layer”, IEEE Photon. Technol. Lett., **10**, 495 (1998).
- [42] M.Aoki et al., “85°C-10Gbit/s operation of 1.3-μm InGaAlAs MQW-DFB laser”, ECOC2000, **1**, 123 (2000).



## 本研究に関連する発表文献

### International Journals

[1] T. Amemiya, H. Shimizu, P. N. Hai, M. Yokoyama, M. Tanaka, and Y. Nakano, “Fabrication of a Semiconductor Active Waveguide Optical Isolator With an Epitaxially Grown MnAs Ferromagnetic Electrode”, submitted to *Appl. Phys. Lett.*

### Proceedings of international conferences

[1] T. Amemiya, H. Shimizu, and Y. Nakano “TM mode waveguide optical isolator based on the nonreciprocal loss shift”, *17<sup>th</sup> IEEE Indium Phosphide and Related Materials Conference (IPRM 2005)*, TP-41, Glasgow, Scotland, UK (May 5-10, 2005).

[2] T. Amemiya, H. Shimizu, P. N. Hai, M. Yokoyama, M. Tanaka, and Y. Nakano, “TM mode optical waveguide isolator with 8.8 dB/mm nonreciprocal propagation induced by ferromagnetic MnAs”, *The Optical Fiber Communication Conference 2006 (OFC 2006)*, OFA1, Anaheim, USA (March 5-10, 2006).

[3] T. Amemiya, H. Shimizu, P. N. Hai, M. Yokoyama, M. Tanaka, and Y. Nakano, “Optical waveguide isolator based on nonreciprocal loss shift induced by ferromagnetic MnAs”, *17th International Conference on Magnetism (ICM 2006)*, submitted, Kyoto, Japan (August 20-25, 2006).

### Proceedings of domestic conferences

[1] 雨宮智宏, 清水大雅, 中野義昭, “TM モード非相反伝搬損失導波路の作製と実証”, 第 52 回春季応用物理学関係連合講演会 31a-ZQ-11, 埼玉大学 (2005 年 3 月).

[2] 雨宮智宏, 清水大雅, ファムナムハイ, 横山正史, 田中雅明, 中野義昭, “エピタキシャル強磁性金属 MnAs を電極に用いた TM モード非相反導波路型光アイソレータ”, 第 29 回応用磁気学会学術講演会 21pE-11, 信州大学 (2005 年 9 月).

[3] 清水大雅, 雨宮智宏, ファムナムハイ, 横山正史, 田中雅明, 中野義昭, “非相反損失変化に基づく集積化可能な導波路型光アイソレータ”, 電子情報通信学会 2005 年ソサイエティー大会, CS-8-10, 北海道大学 (2005 年 9 月)

[4] 雨宮智宏, 清水大雅, ファムナムハイ, 横山正史, 田中雅明, 中野義昭, “エピタキシャル強磁性電極 MnAs を用いた非相反損失変化による導波路型光アイソレータ”, 第 53 回春季応用物理学関係連合講演会 25p-Y-13, 武蔵工業大学 (2006 年 3 月).





## 謝辞

本研究にあたってご指導を頂きました中野義昭教授には心から感謝致します。研究活動のみならず、各種活動の機会を与えて下さったことで、修士課程の2年間を有意義に過ごすことができました。誠にありがとうございました。また、杉山正和助教授にはお忙しい中、研究姿勢や適切なアドバイスなど、多くの力添えをしていただき、大変お世話になりました。グループリーダーである清水助手には、研究方法の初歩から、研究の内容、展開、論文の執筆に至るまで様々なご指導を頂き、誠心誠意ご尽力して下さったこと、ここに感謝いたします。

また、共同研究として、同大学の田中雅明教授、横山正史さんならびにP. N. Hai君には、MnAsの成長をはじめとして、研究を進めてゆく上で非常に良い経験をさせてもらいました。

最後に中野研究室・杉山研究室の皆様、研究活動について様々な手助けをしていただいたこと、心よりお礼申し上げます。

皆様のご協力により、修士論文が完成したことへ心から感謝をこめて

2006 年 2 月 14 日

先端科学技術研究センター 情報デバイス部 中野研究室

46381 雨宮智宏