

3

素子作製

3-0. INTRODUCTION

この章では、MnAs を用いた TM モード非相反損失型アイソレータを実際に作製してゆく。本素子は、TM モード半導体光増幅器(InGaAlAs/InP)と単結晶 MnAs 電極からなる利得導波型導波路の形を成している。この構造において、半導体光増幅器 (SOA) 部は MOVPE によって成長し、強磁性金属である単結晶 MnAs 層は MBE により堆積する。最後にプロセスにより、酸化膜ストライプ構造を作製するという工程をたどる。そのそれぞれについて、以降詳細を論じてゆく。

3-1. MOVPE による InAlGaAs/InP 半導体光増幅器 (SOA)

半導体光増幅器(SOA)部分は有機金属気相エピタキシー(Metal Organic Vapor Phase Epitaxy; MOVPE)で作製した。作製した SOA の詳細を Fig. 3-1 に示す。ここで、活性層は InGaAs(7.7nm) / InGaAlAs(14.4nm) 5 層量子井戸を 1.1 μ m 帯 InGaAlAs の SCH(100nm) で挟んだ構造をしている。ここで TM モードに選択的に光利得をもたらす必要性から、量子井戸の InGaAs well には 0.4%の伸張歪を導入しており、また歪み補償のために、InGaAlAs barrier には 0.6%の圧縮歪を導入している。なお、ここで量子井戸の材料として Al 系を用いたが、これは一般的に使用されている P 系に比べて、歪を入れ易いと考えたからである。活性層上部のクラッド層およびコンタクト層は、それぞれ p-InP(150nm), 1.4 μ m 帯 p+InGaAsP(250nm)としている。InP より屈折率が大幅に高い InGaAsP をコンタクト層として厚く積む理由は、活性層から漏れ出した光が、より磁性層側へ集光することを目的としているためである。

Fig. 3-2 に本 SOA の X 線回折の測定結果およびシミュレーションピークを示す。ここで、青線が実測値を示し、赤線がシミュレーション値を表している。なお、シミュレーションは上記の

素子構造パラメータを考慮して行ったものであり、実測値とピークの箇所がほぼ一致していることから、素子の各層における歪・膜厚が正確に制御できていることが分かる。

Fig. 3-3はPL強度の測定結果を示したものである。バンドスプリットが起きており、2つのピークの波長は1475nm および 1540nm となっている。ここで、1475nm がヘビーホールの遷移によるもの、1540nm がライトホールの遷移によるものであると考えられる。これにより TM モード光は 1540nm において最大の利得が得られると予想できる。

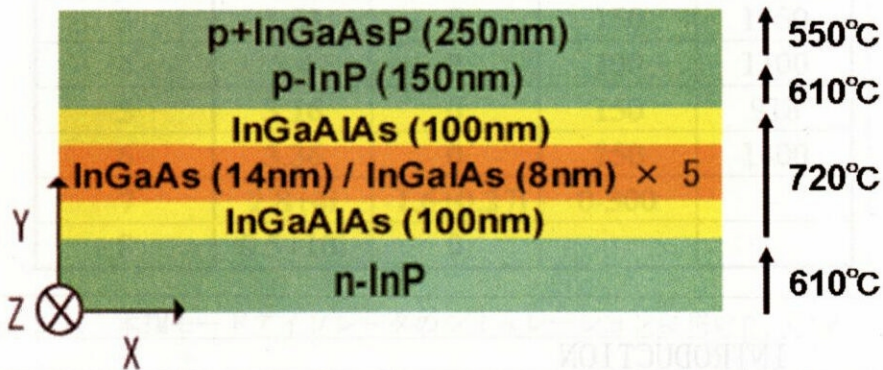


Fig. 3-1 本研究において成長した SOA の断面図。TM モードにて増幅がなされるよう、活性層の部分は伸張歪み補償量子井戸を導入している。

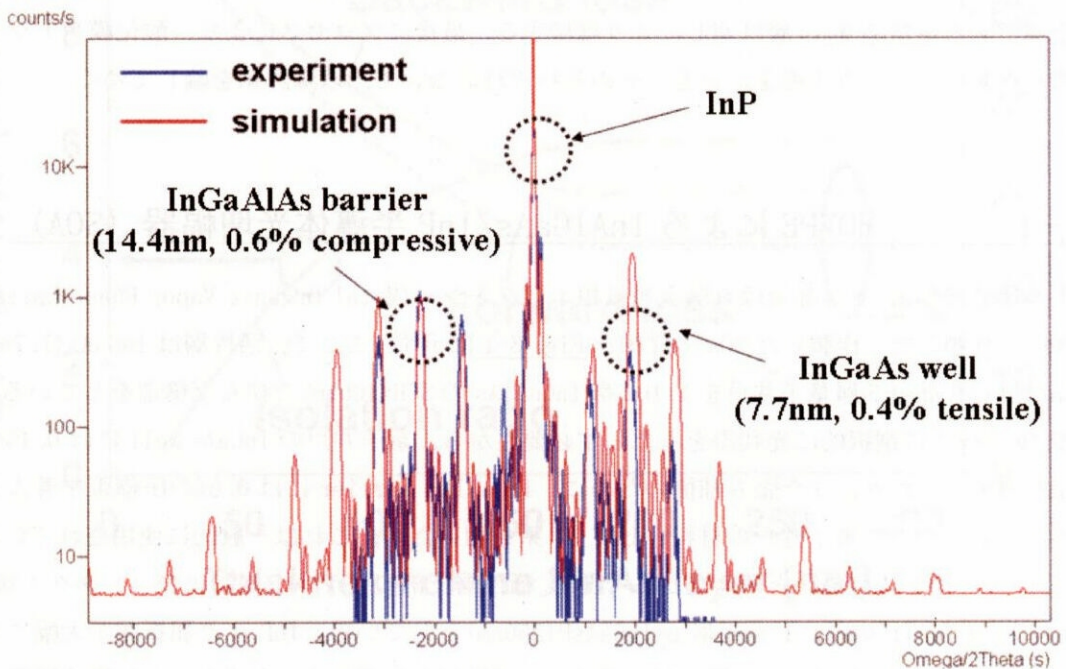


Fig. 3-2 本研究において成長した SOA の X線回折の測定結果およびシミュレーション。青線が測定結果を示し、赤線がシミュレーションを表している。ピークの箇所はほぼ一致している。

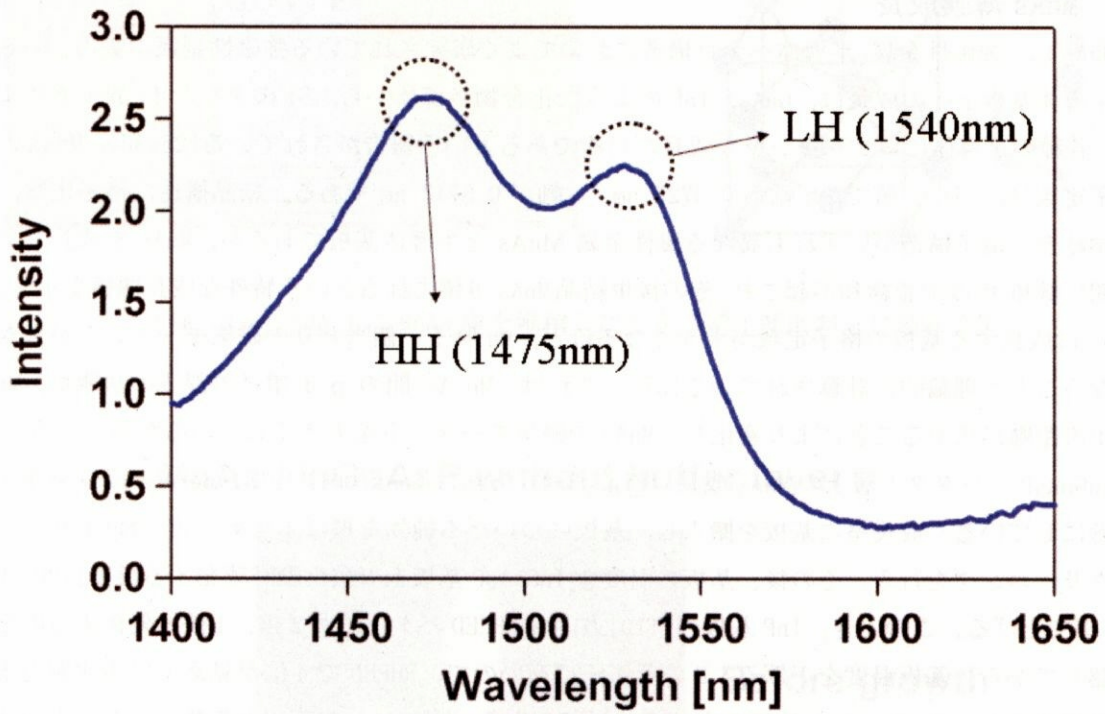


Fig. 3-3 本研究において成長したSOAのPL強度の測定結果。バンドスプリットが起きており、2つのピークの波長は1475nmおよび1540nmとなっている。これによりTMモードは1540nmにおいて最大の利得が得られると予想できる。

3-2. MBEによる強磁性 MnAs 薄膜

本アイソレータでは、熱力学的・電氣的に安定、良好な強磁性金属/半導体界面を得る必要性から、MBEにより成長した MnAs(六方晶, NiAs 型)を単結晶強磁性金属として用いている。この節では、前述の SOA 上への MnAs 成長およびその磁化特性について論じる。

■ MnAs 薄膜成長

MnAs は、強磁性金属/半導体ヘテロ構造においてよく研究されている強磁性金属である。MnAs の半導体基板上への成長は、GaAs, InP のような化合物半導体から、Si のような IV 族半導体まで、各種の半導体にエピタキシャル成長が可能であるという報告がされている[26-36]。MnAs の格子定数は、バルク値で、a 軸が 0.3725 nm, c 軸が 0.5713 nm である。結晶構造、格子定数、化学結合、電子構造がいずれも異なる磁性金属 MnAs と半導体基板であるが、MnAs を成長した瞬間に数 ML 程度で歪緩和が起これり、その後単結晶 MnAs が積まれるという特殊な成長機構を示す。MnAs は成長する基板の格子定数が大きくなるほど、Mn 原子一個当たりの磁気モーメントが大きくなるのが理論的に計算されている[37]。これは、Mn-As 間の p-d 電子の混成の状態が、Mn 同士の距離が広がることにより変化し、MnAs の磁気モーメントを大きくしているからである。

InGaAsP コンタクト層上の MnAs 成長 (Fig. 3-4) 方法は GaAs(001) 上の type-A の成長条件を参考にしている。成長室に基板を搬入し、基板についた不純物を飛ばすため、30 分以上サーマルクリーニングを行う。その後、基板の温度を InGaAsP 基板上的酸化膜が蒸発する温度(700° C 弱)まで上げる。このとき、InP 基板の[110]方向の RHEED パターンが 2 倍、4 倍と変化するのを確認してから、基板温度を下げる。P の蒸気圧は高いので、RHEED で 4 倍が見えている状態のまま放置すると、すぐに InP 基板の表面が荒れてしまう。さらに、表面にある数パーセントの P は As と置換してしまうため、表面に InAs ドットが形成され表面の平坦性が失われてしまう可能性が考えられる。そのため、酸化膜が飛んだ後は、直ちに基板の温度を下げる必要がある。基板温度を 200° C まで下げた後、As テンプレートをつけ、その後、基板温度を 250° C に設定し、MnAs を 200nm 成長した。また、Chapter 2 でシミュレーションした素子性能の MnAs 膜厚依存性を観測するために、200nm の他に、20nm, 50nm, 100nm, 150nm の MnAs を成長したサンプルも用意した。このとき MnAs の成長レートは、およそ 80 nm/h であった。MnAs 成長終了後、MnAs 表面を平坦化させるため、350° C で約 10 分間アニールを行った。

RHEED のストリークパターンを Fig. 3-5 に示す。100nm の MnAs を堆積した後でも、非常に綺麗なパターンが観測されている。これは、P が表面から離脱した後で、その組成において As が増加し P が減少したとしても、InGaAsP の構造が保たれるため、比較的平坦な表面を維持しやすいのではないかと考えられる。また、もともと As が含有されている構造であるため、As テンプレートが付き易いとも考えられる。

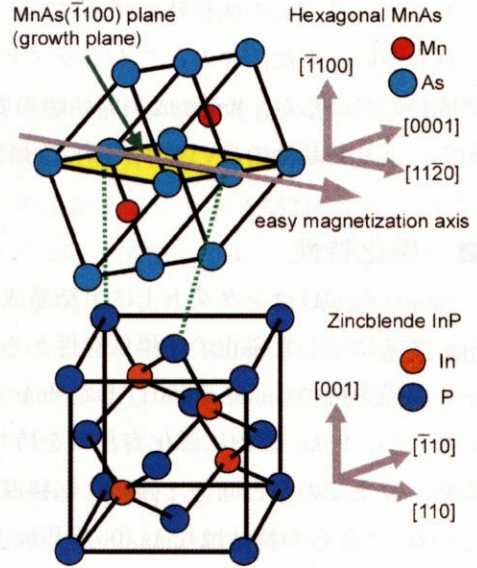
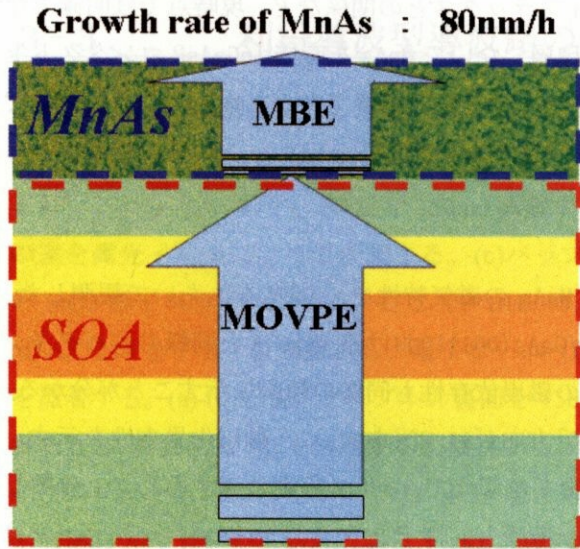


Fig. 3-4 SOA 上に MnAs 層を堆積したときの素子断面および結晶界面

MnAs / InGaAsP without buffer layer

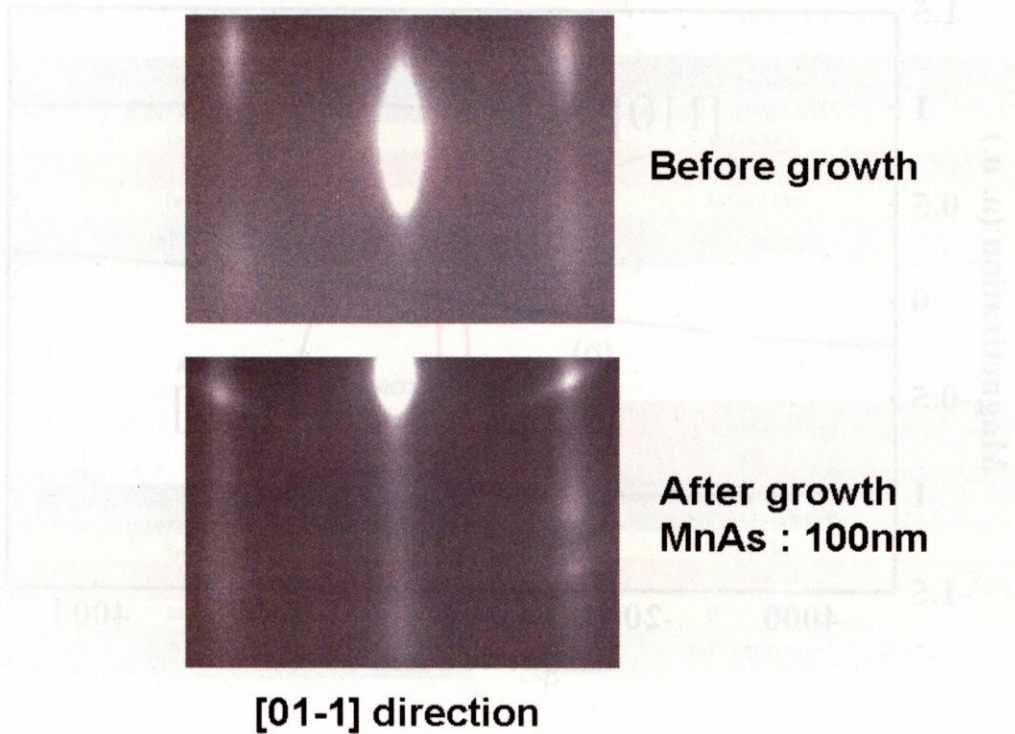


Fig. 3-5 バッファ層なしで InGaAsP コンタクトの上に MnAs を単結晶成長させた場合の RHEED パターン (MnAs の成長レートは 80 nm/h である)

一方で、 As_2 と As_4 の成長時の制御性、As 圧と Mn フラックスとの関係など、現時点では明確でない点も多い。また、今のところバッファ層を積層しないで MnAs を直接 InGaAsP コンタクト上に成長しているが、MnAs 成長開始時の表面の平坦性は非常に重要であるため、この点も問題である。より結晶性の良い MnAs を作製することを現在検討中である。

■ 磁化特性

InGaAsP(001)コンタクト上に単結晶成長した MnAs の磁気特性を、AGFM をもちいて観測した。Fig. 3-6 に示した磁化の磁場依存性から、MnAs/GaAs(001)における type-A と同様のエピタキシャル関係を持つ InGaAsP(001)上の MnAs は、その磁場依存性も同様の傾向を示すことが分かる。すなわち、MnAs 面内に磁化容易軸を持ち、 $[110]$ 方向($[11-20]$ 方向)に一軸磁化異方性を示す。また、今までの報告同様、強磁性転移温度は 300 K を超えて、320 K 程度に達することも確認している。これらの特性は GaAs(001) 基板上の MnAs 薄膜と同様であり、100 nm MnAs/isolator(001)において飽和磁化の大きさが 300 K で 530 emu/cc、とほぼ同程度の大きさを示し、また保磁力は 1900e 程度と、50 nm MnAs/GaAs(001)の 200 Oe と比べても妥当な値といえる[20]。実際の素子では外部磁場を印加する方向が決まっているので、その方向を磁化容易軸とする必要がある。よって、プロセスを行うときはその点に十分注意した。

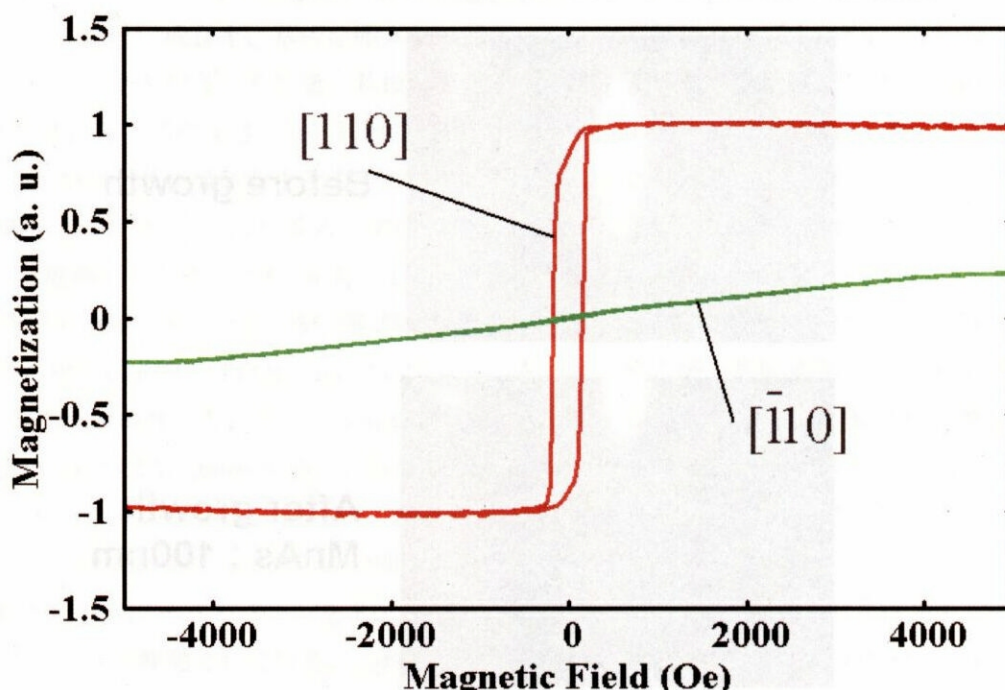


Fig. 3-6 バッファ層なしで InGaAsP コンタクトの上に堆積された単結晶 MnAs の結晶磁気異方性 (本実験では、 $[110]$ 方向に磁化容易軸を持っており、この方向を素子において外部磁場をかける方向としてプロセスする必要がある)

3-3. 利得導波型導波路の作製

単結晶 MnAs 薄膜を堆積した後、プロセスにより、酸化膜 window 構造を持った利得導波型導波路の作製を行う。以下その手順を Fig. 3-7 を用いて簡単に説明する。(a)素子の全面にマグネトロンスパッタを用いて、SiO₂ を 150nm 蒸着する。(b)その上からレジスト AZ5214 を塗り、5.5um の窓を露光・現像によって作製する。(c)バッファードフッ酸 (BHF) によって窓を開けた部分の SiO₂ 膜をエッチングする。ここで、BHF の選択性により、エッチングは MnAs 層で止まる。(d)AZ5214 をアセトンで除去し、電子ビーム (EB) 蒸着によって、Ti : 100nm および Au : 200nm を蒸着する。(a)-(d)の後、サンプルの裏面を 150um 程度まで研磨し (へきかきを容易にする目的がある)、裏面にも Au を蒸着する必要がある。

このプロセスにおける利点は、MnAs 層に対してエッチングを行わないことから、MnAs 薄膜の構造異方性が生じない点にある。つまり、Fig. 3-6 のような MnAs の磁化特性が変化することではなく、[110] 方向に磁化容易軸を持ったままである。よって本実験では、x 軸方向が [110] となるようにプロセスを行った。Fig 3-8 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。

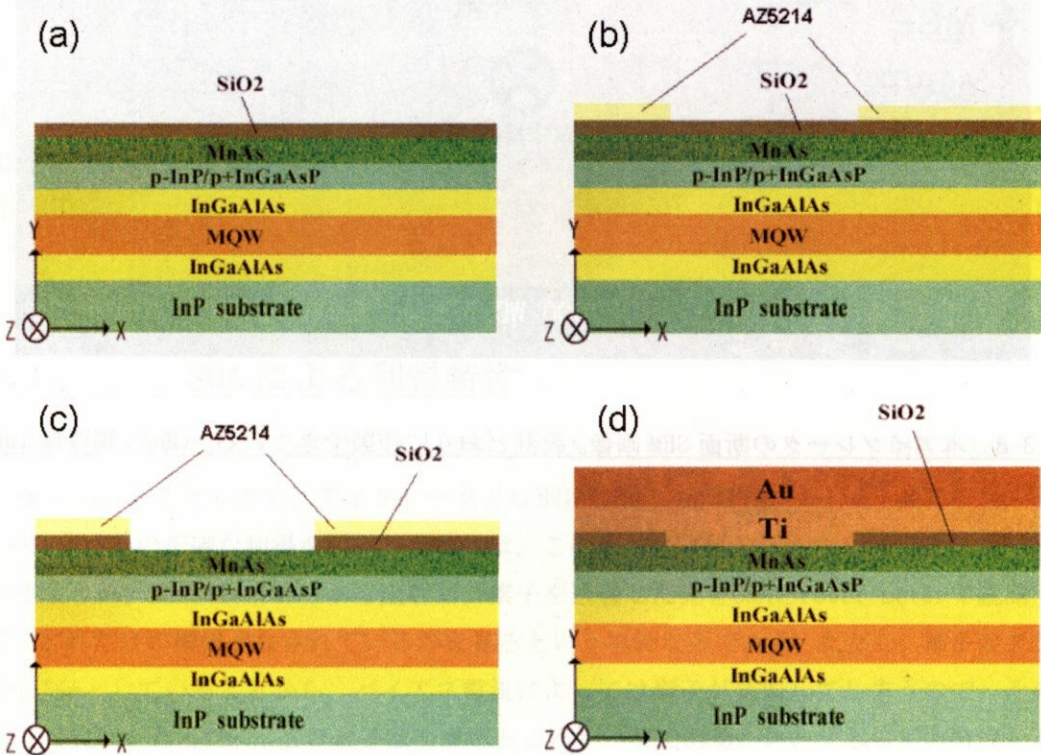


Fig. 3-7 単結晶 MnAs を用いた 1550nmTM モード導波路型アイソレータのプロセス手順。前述のように、MnAs は [110] 方向に磁化容易軸を持っているので、x 軸方向が [110] となるようにプロセスをおこなった。なお、酸化膜ストライプの window 幅は 5.5um である。

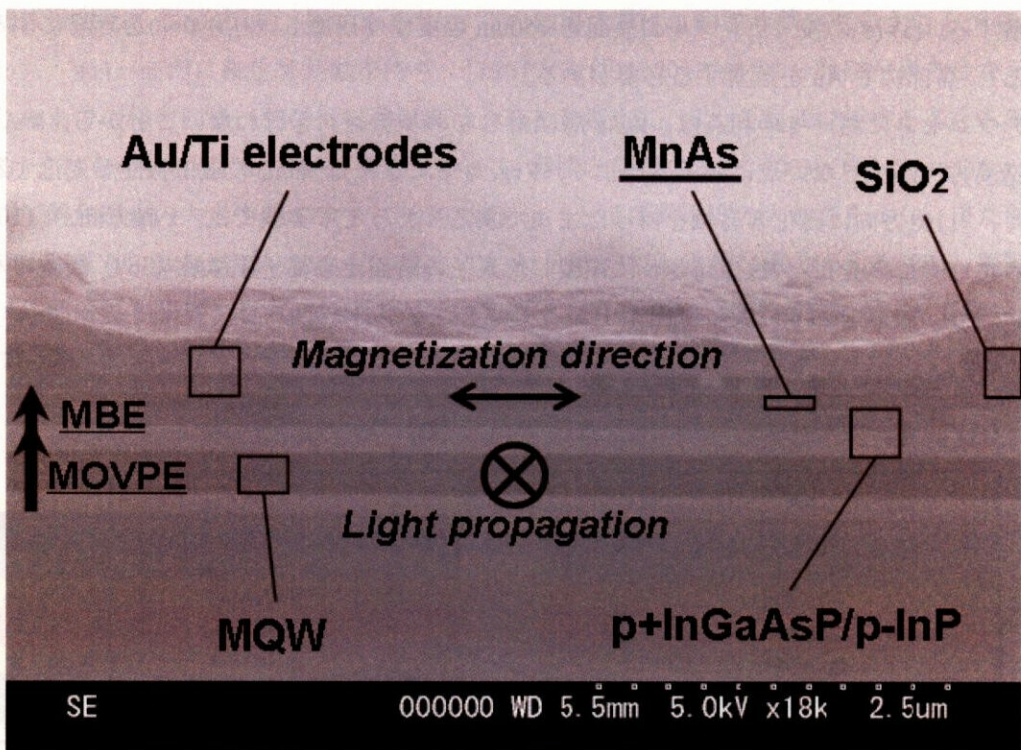


Fig. 3-8 本アイソレータの断面 SEM 画像。設計どおりに作製できている。(MnAs 膜厚は 100nm)