

フォトリックネットワークにおける波長分波型光スイッチに関する研究

下 村 和 彦 上智大学理工学部教授

1 背景

インターネットなどのデータ通信ネットワークの爆発的な広がりと共に、世界規模で光通信ネットワークの大容量化の要求がますます大きくなっている。光通信ネットワークにおいて伝送路の大容量化を実現可能とし、光通信技術の発展を支えている技術が、WDM 伝送である。WDM システムは、1 本の光ファイバに複数の異なる波長の光を同時に多重伝送することから、新たな線路を敷設する必要なくネットワークの伝送容量の飛躍的な増加をもたらすことが可能である。

従来の WDM 通信の仕組みの一例である光分岐挿入装置(OADM:Optical Add/Drop Multiplexer)は光の分離、混合を行うノードであり、波長分波器に入った波長を適当な光スイッチに分波し、光スイッチはこの波長に乗った情報を Drop してトランスポンダ部に送るか Through して波長合波器に送り、他のノードに送るかを選択する。また、トランスポンダ部から来た情報を波長合波器に送る役割も担うため、従来の OADM では、光の Through、Drop を行うスイッチにおいて固定波長であるため、その OADM における波長帯域も固定されている。そのため、スイッチとつながるトランスポンダ部での Add、Drop も固定波長で行わなければならない。問題点となるのはこの部分であり、例えばマンションの住人が変わるなどの事情により、1 箇所の波長を変更しなくてはならなくなる。その際、トランスポンダとスイッチの波長が固定されているため、実際に人が改修工事にあたり、適当な波長に変更するという手間が出てしまう。これを改善するための新しいシステムが ROADM であり、フォトリックネットワークの基本構成をリングトポロジのネットワークを構成する光分岐挿入ノードに適用したものである。ROADM での光スイッチは波長選択スイッチ WSS(Wavelength Selective Switch)になっている。波長選択スイッチは波長帯域を自由に選ぶことができるので、分岐挿入ポートは波長との関係が固定的ではなくなる。このことにより遠隔からの波長変更が可能になり、直接的な工事が必要となくなる。例えばマンションの住人が変わっても、間接的な操作により、波長帯域を変更し、即使用することができる。この波長選択スイッチは、WDM 信号から任意波長の光信号を挿入・分岐する機能や任意波長の光信号を選択して任意の出力ポートへ出力する 1 対多接続機能を担っている。WDM のスイッチには、①各波長の光信号へ分波②各波長の光信号への切り替え③各波長の光信号の合波の 3 つの機能が必要であり、これらを 1 つにまとめたものが WSS である。メリットとしては、任意波長の任意ポートへのスイッチング、小型・低損失・光パワー調整機能、高い拡張性などがある。

このようにフォトリックネットワークの構成要素として必要不可欠な素子である、波長選択スイッチを実現すべく、従来の曲線型の AWG [1]を直線型にした階段型屈折率分布アレイ導波路[2-4]を用いた波長分波型光スイッチの開発に関する研究を行った。本報告においては屈折率分布アレイ導波路を用いた波長分波型光スイッチの構造及び動作原理、ビーム伝搬法による波長分波型光スイッチの解析と特性評価、熱光学効果を用いた波長分波型光スイッチのスイッチング特性に関して説明する。

2 屈折率分布アレイ導波路を用いた波長分波型光スイッチ

屈折率分布アレイ導波路を用いた波長分波器・波長分波型光スイッチの原理について説明する。まず屈折率分布アレイ導波路を形成する際用いた選択成長について述べ、次に屈折率分布アレイ導波路波長分波器と波長分波型光スイッチの原理について述べる。

2-1 MOVPE 選択成長

エピタキシャル結晶成長では、基板結晶表面に存在する安定点に成長原料ガスから供給される原子が次々と結合して層状に結晶が積層されていく。従ってマスクで結晶表面が覆われていると、適当な成長条件下では基板表面が露出している部分にのみ結晶成長が起こる。Fig. 1 に MOVPE 選択成長法の模式図を示す。原料ガスが分解され、マスク上に付着した原子が成長できずに動き回り、表面が露出した領域に到達して結晶成

長に關与する場合（表面マイグレーション：MMI）、マスク上で原料ガス濃度が相対的に高くなり、濃度勾配により表面が露出した領域に拡散する場合（横方向気相拡散：LVD）などのマスク上で起こる原料の振る舞いにより、選択成長マスク近傍ではマスクのない平坦領域と比べて実効的に原料ガス供給量が増加するため、成長速度が増加し、その程度はマスク幅が広がるほど大きくなる。特に量子井戸構造を選択成長した場合には、マスク幅に応じて井戸層厚を変化させることができ、各領域のバンドギャップ波長を制御することができる。

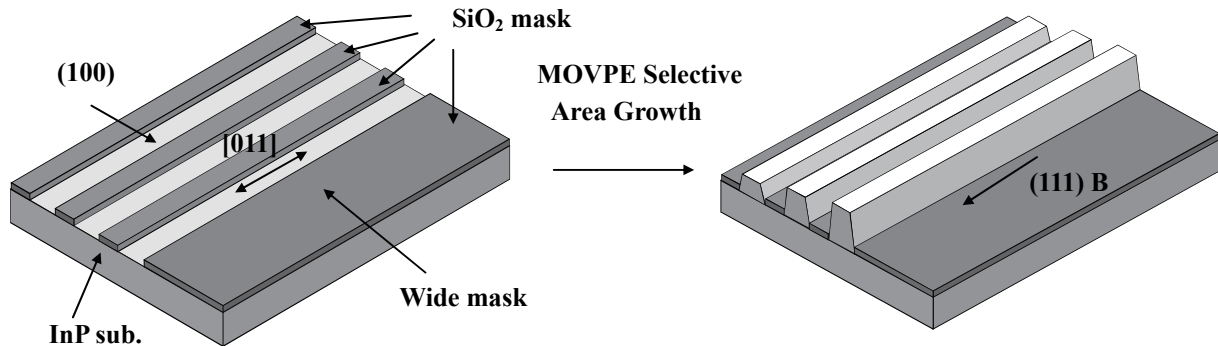


Fig.1 MOVPE 選択成長の模式図

我々が用いる階段型屈折率分布アレイ導波路は、Fig.1に示すような非対称なSiO₂ マスクを用いることによって作製された[3]。このマスクパターンでは片側にのみ幅の広いSiO₂領域（ワイドマスクと呼ぶ）を配置した。このようなマスクパターンを用いてMOVPE選択成長法によってアレイ導波路を作製すると、ワイドマスク上に供給された原料はワイドマスク上には積層されず、気相拡散や表面マイグレーションによりストライプ領域に到達する。このとき、ワイドマスクに近い領域では供給される原料が多く、ワイドマスクからの距離が遠くなるにつれ供給される原料の量が少なくなるため、それぞれのアレイ導波路で原料の供給量が変化し、Fig.2-1に示すような異なる層厚を有するアレイ導波路が形成される[4,5]。これにより異なるバンドギャップエネルギーを有する導波路をエッチングの工程を踏むことなく、1回の結晶成長で作製することが可能となる。

2-2 屈折率分布アレイ導波路を用いた波長分波器および波長分波型光スイッチ

階段型屈折率分布アレイ導波路を用いた波長分波器[6,7]の概略図をFig.2に示す。基板には入射導波路、入射スラブ導波路、異なる屈折率を有するアレイ導波路、出射スラブ導波路、出射導波路が形成されている。各アレイ導波路は、非対称ストライプのSiO₂マスクを用いたMOVPE選択成長法によって形成される。入出射導波路、入出射スラブ導波路に関しても選択成長で成長し形成している。

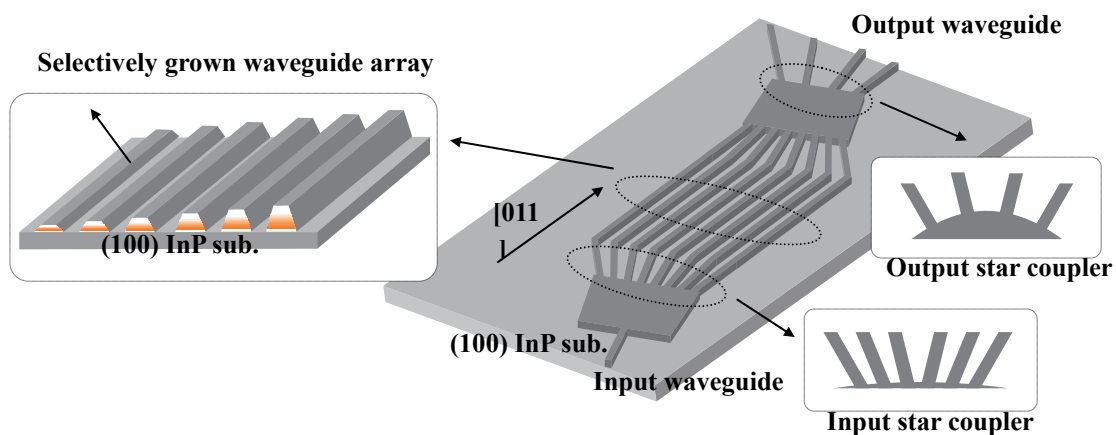


Fig.2 屈折率分布アレイ導波路を用いた波長分波器

この構造の動作原理について説明する。入射導波路から入射された光は、入射スラブ導波路で回折され広がって各アレイ導波路に入射する。層厚の異なるアレイ導波路を伝搬した光は、出射スラブ導波路でそれぞれ異なる位相で出射し、互いに干渉し波面の揃う方向に回折する。また、回折角は波長に依存することから、波長の異なる光の集

光する位置はそれぞれ異なり、異なる波長を別々に取り出すことが可能となる。また、集光性の向上のため、アレイ導波路はスラブ導波路面でRowland円上に配置している。

この屈折率分布波長分波器において、アレイ導波路部分に QCSE や熱光学効果などの効果によりアレイ導波路の屈折率を変化させることで、光信号を波長ごとに動的に出力ポートを切りかえる波長選択スイッチの実現が期待できる[8, 9]。例えば、元々のアレイ導波路の屈折率差を大きくするような屈折率変化を与えることで、出射ポートは順にシフトしていく。その様子を Fig. 3 に示す。(b)のように屈折率変化を与えることで、(a)のようにポートを順にシフトしていく。(a)の図は同色が同波長を示しており、下にいくほど屈折率変化がかかっていることを示している。この特性を我々は波長巡回パターンと呼んでいる。

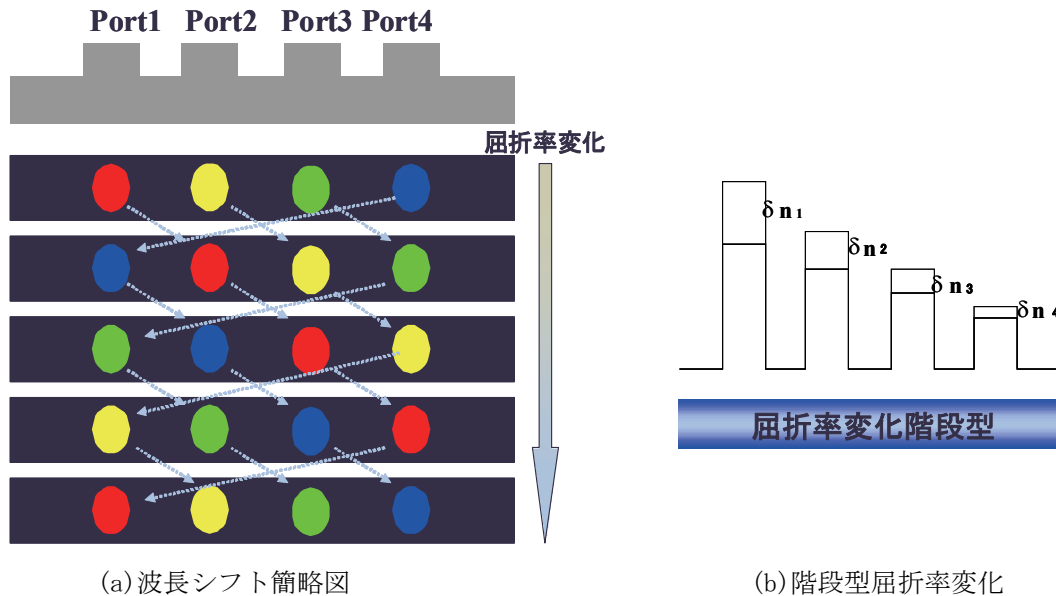


Fig. 3 波長巡回パターン

3 ビーム伝搬法による屈折率分布アレイ導波路を用いた波長分波型光スイッチの解析と評価

3-1 ビーム伝搬法による屈折率分布アレイ導波路を用いた波長分波型光スイッチの解析

アレイ型波長選択スイッチの特性を検討するため、2次元ビーム伝搬法(2D-BPM)を用いて数値解析を行った。以前の研究においてアレイ導波路端面から離れた面での界分布を、フレネル・キルヒホッフ (Fresnel-Kirchhoff) 回折積分により計算を行っていたが、この計算においては出射導波路との結合を考慮に入れていなかった。今回ビーム伝搬法を用いてスラブ領域と出射導波路の結合も考慮にいれ計算を行った。

光デバイス等の設計において、光がデバイス内をどのように伝搬していくかを視覚的に計算する方法がビーム伝搬法(BPM)である。光の伝搬を記述する方程式はマクスウェル方程式より導かれる波動方程式であるが、これを光の伝搬とともに逐次的に計算するのがBPMである。波動方程式を数値計算する方法として有限差分法を用いて解析を行った。

まず我々が研究を行っている直線型アレイ導波路と曲げアレイ導波路の互換性を確認した。直線アレイ導波路と曲げアレイ導波路の互換性を Fig. 4 に示す。このグラフから、直線型屈折率分布アレイ導波路長 10mm と等価の曲げ導波路(AWG)の隣接導波路間差は $10.037 \mu\text{m}$ と計算から算出できる。次に屈折率分波アレイ導波路において波長分波間隔に関して解析を行った。波長分波間隔 $\Delta\lambda$ のアレイ長 L_{array} 、両端屈折率段差 Δn 依存性を Fig. 5, 6 に示す。

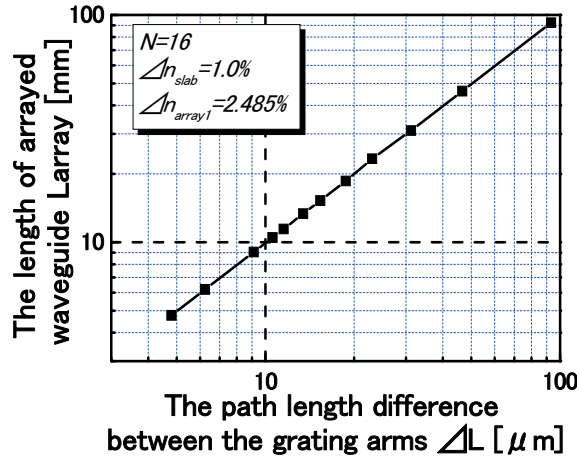


Fig. 4 直線アレイと曲げアレイの互換性

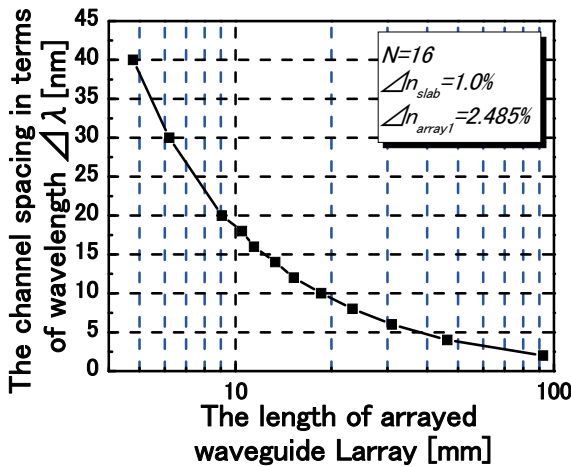


Fig. 5 $\Delta\lambda$ のアレイ長依存性

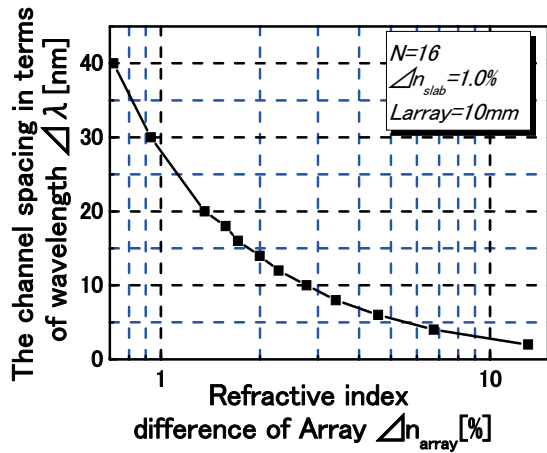


Fig. 6 $\Delta\lambda$ のアレイ両端屈折率段差依存性

ここで、 $\Delta\lambda$ とは、波長 $1.55 \mu\text{m}$ における回折像の光強度分布が重なりをもつ波長との間隔と定義している。この結果より、アレイ導波路長及び Δn の増加に伴い、 $\Delta\lambda$ が狭くなるのが分かる。例えば、 $\Delta n=1.5\%$ 、 $L_{\text{array}}=10000 \mu\text{m}$ の時、 $\Delta\lambda \approx 18 \text{ nm}$ が得られ、これは、低密度波長分割多重 (CWDM: Coarse-WDM) 伝送に適応する。一方、DWDMに適応するには $\Delta\lambda=0.8 \text{ nm}$ が要求されるが、 $\Delta\lambda$ を狭くする方法としては、 Δn を大きくすること、 N を増加させることが上げられる。 $\Delta\lambda=0.8 \text{ nm}$ は、 $L_{\text{array}}=10000 \mu\text{m}$ の場合 $\Delta n > 10\%$ で実現可能と考えられるが、現在利用しているGaInAs/InP MQW材料では、 $\Delta n > 10\%$ は困難である。また $\Delta n=1.5\%$ の場合は $L_{\text{array}} > 100 \text{ mm}$ で実現可能である。したがって、DWDMに適応するデバイスの実現には、更に高い Δn が得られる材料、及び構造を利用し、サイズを大きくする必要がある。

次にクロストーク、波長分波間隔の特性改善を目指すために下記の網掛けをほどこしてあるパラメータに関して、それぞれ解析をおこなった。

$$\Delta\lambda = \frac{D_o \cdot n_{\text{slab}} \cdot n_{\text{array}}}{L_{\text{star}} \cdot n_g} \frac{\lambda_0 (N-1) D_i}{\Delta n \cdot L_{\text{array}}} \approx \frac{D_o \cdot n_{\text{slab}}}{L_{\text{star}}} \frac{\lambda_0 (N-1) D_i}{\Delta n \cdot L_{\text{array}}} \quad (1)$$

式(1)はアレイ導波路及びスラブ導波路に関する波長分波間隔の式である。ここで D_o : アレイ導波路出射端のピッチ、 D_i : 出射導波路のピッチ、 L_{array} : アレイ導波路長、 L_{star} : スラブ導波路長、 N : アレイ導波路本数、 Δn : アレイ導波路両端の屈折率差、 n_{array} : アレイ導波路の等価屈折率、 n_{slab} : スラブ導波路の屈折率、 n_g : アレイ導波路の群屈折率、 λ_0 : 分波中心波長、 W_{in} : 出射ポートテーパ幅、 W_{out} : アレイポートテーパ

幅である。

スラブ導波路長に対するクロストーク特性を Fig. 7 に示す。波長分波間隔が 20nm となるように出射ポート間隔幅を各スラブ長に合わせて設定している。4 ポートで各クロストークが -20dB 以下になるスラブ長はシミュレーション結果から 1100 μm 以上ということが分かる。スラブ長が短いと出力端において回折光が重なってしまうためクロストークが悪化すると考えられる。実際デバイスを作製する際はスラブ長を大きくすることでスラブ領域における吸収損失、またサイズが大きくなるのがトレードオフとしてあげられる。よってそれらのことを考慮しデバイス製作する必要がある。

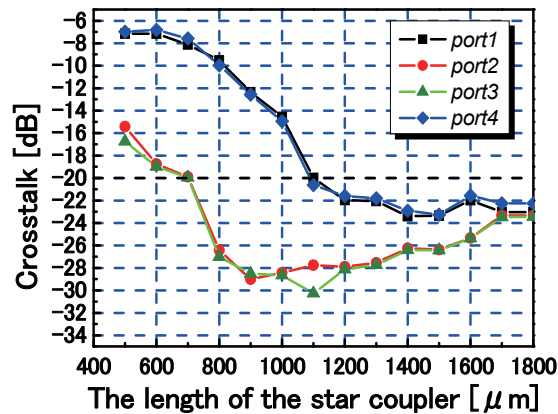


Fig. 7 スラブ導波路長に対するクロストーク

出射ポート間隔 D_i に対するクロストーク特性および波長分波間隔を Fig. 8 に示す。このシミュレーションに関してはスラブ長 1200 μm でおこなった。波長分波間隔の必要十分条件の式 (1) より D_i を大きくすると $\Delta\lambda$ が線形的に大きくなるのが分かるが、数値解析結果からも確認できた。この解析結果 4 ポートでクロストーク -20dB 以下になる出射ポート間隔は 19~21 μm であることが分かる。出射ポート間隔はスラブ長によって最適な値に設定する必要がある。また出射ポート間隔を適当な値に設定しないと群と群の間隔があいてしまうことがシミュレーション結果から分かる。この原因は出射ポート間隔が最適値からずれてしまうことで光強度がピークになる位置からポートの位置がずれてしまうことが考えられる。このことは port4 から port1 にスイッチングするさいに大きな屈折率変化量が必要になってしまう。このことから群と群が離れないように出射ポート間隔を最適な値にする必要がある。

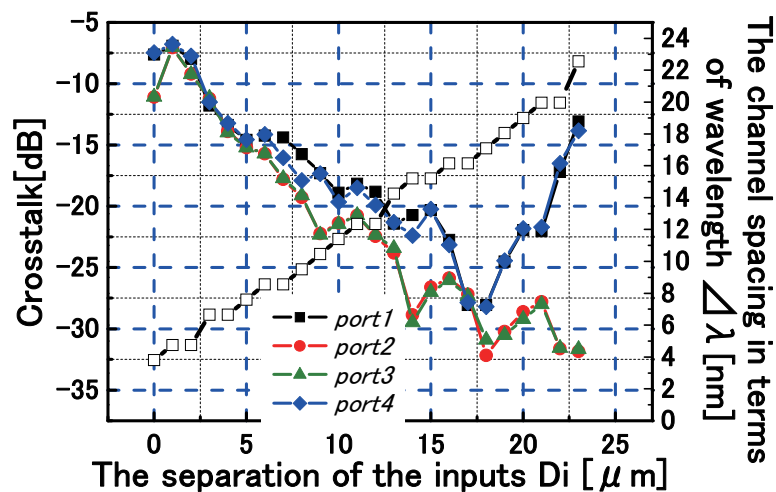


Fig. 8 出射ポート間隔 D_i に対するクロストーク特性および分波波長間隔 $\Delta\lambda$

3-2 屈折率分布アレイ導波路を用いた波長分波器の特性評価

次に実際に試作した屈折率分布アレイ導波路を用いた波長分波器の測定結果の一例を Fig. 9, 10 に示す。左図は波長分波のスペクトル特性また右図は異なる波長における出射端面の近視野像である。Fig. 9 はスラブ長 $600\mu\text{m}$ 、出射ポート間隔 $6\mu\text{m}$ の素子における波長分波特性であり、Fig. 10 はスラブ長 $1000\mu\text{m}$ 、出射ポート間隔 $13.5\mu\text{m}$ の素子における波長分波特性である。Fig. 9 の素子の波長分波間隔はおよそ 20nm 、平均のクロストークは -5.55dB であり、Fig. 10 の素子の波長分波間隔はおよそ 18nm 、平均のクロストークは -18.4dB である。これらの図よりスラブ導波路長 L_{star} 、出射ポート間隔 D_i を適切な値に設計することにより波長分波におけるクロストーク特性を改善できることが実証された。

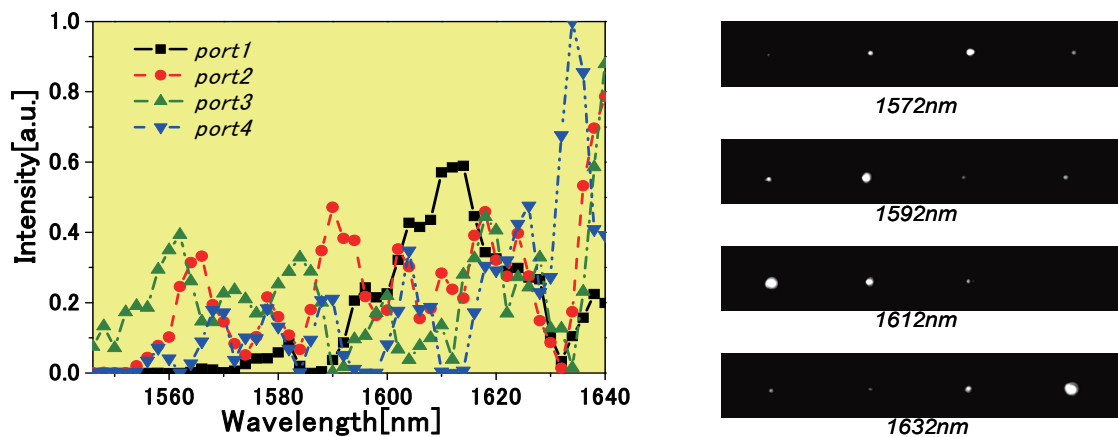


Fig. 9 波長分波のスペクトル特性と近視野像 ($L_{\text{star}}=600\mu\text{m}$, $D_i=6\mu\text{m}$)

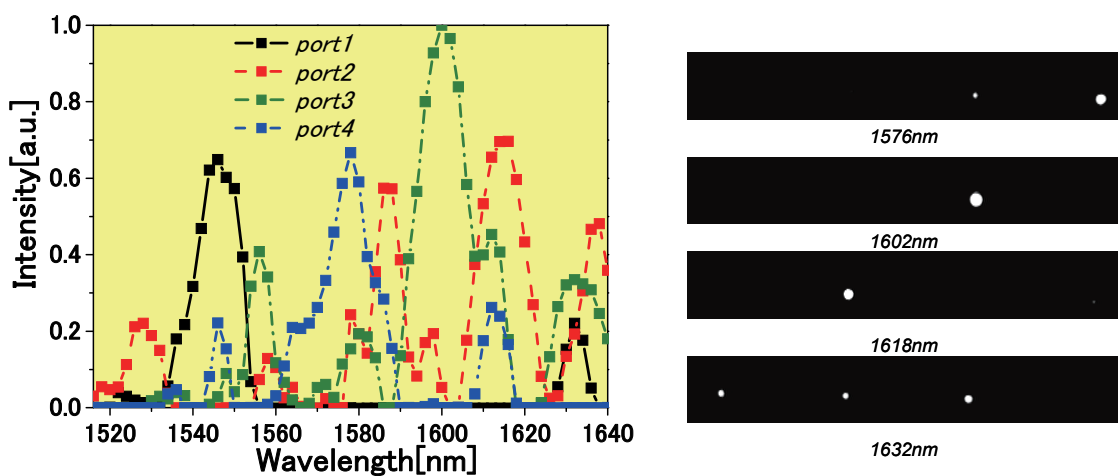


Fig. 10 波長分波のスペクトル特性と近視野像 ($L_{\text{star}}=1000\mu\text{m}$, $D_i=13.5\mu\text{m}$)

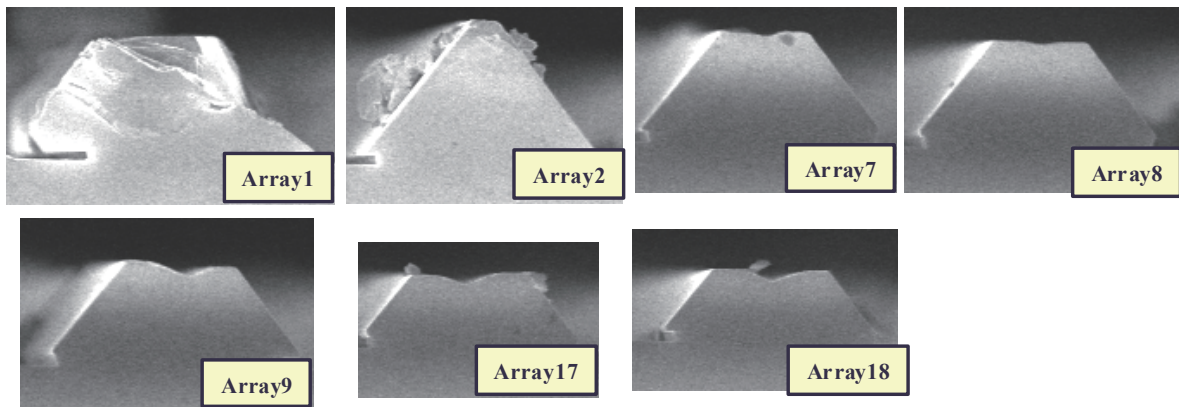
4 熱光学効果を用いた波長分波型光スイッチ

次に実際に試作した屈折率分布アレイ導波路を用いた波長分波型光スイッチの熱光学効果によるスイッチング特性[10]に関して説明する。

実際に成長した基板を SEM(走査電子顕微鏡:Scanning Electron Microscopy)にて断面画像を撮影した。Fig.11 に全選択成長後のアレイ導波路の画像を示す。Fig.11 より、アレイ導波路が MOVPE 選択成長により階段型に層厚変化していることを確認した。また、アレイ導波路の両端はダミー導波路と呼ばれている光の導波しない部分であり、画像からもアレイ No.1 は異常成長していることが確認できる。



(a) アレイ導波路全体



(b)各アレイ導波路

Fig.11 アレイ導波路断面 SEM 画像

全選択成長した基板はこれだけで波長分波器としての機能を備えており、入射波長を変えるだけで静特性として出射ポートを変えることができる。ここに動的に屈折率変化を与えることで波長分波型光スイッチとしての機能を有することになる。動的に屈折率変化を与える方法として、金属ヒータを蒸着するものと、外部ヒータにより素子全体を下部から温める 2 つのアプローチを取った。金属ヒータを蒸着した素子構造の模式図を Fig.12 に、その写真を Fig.13 に示す。

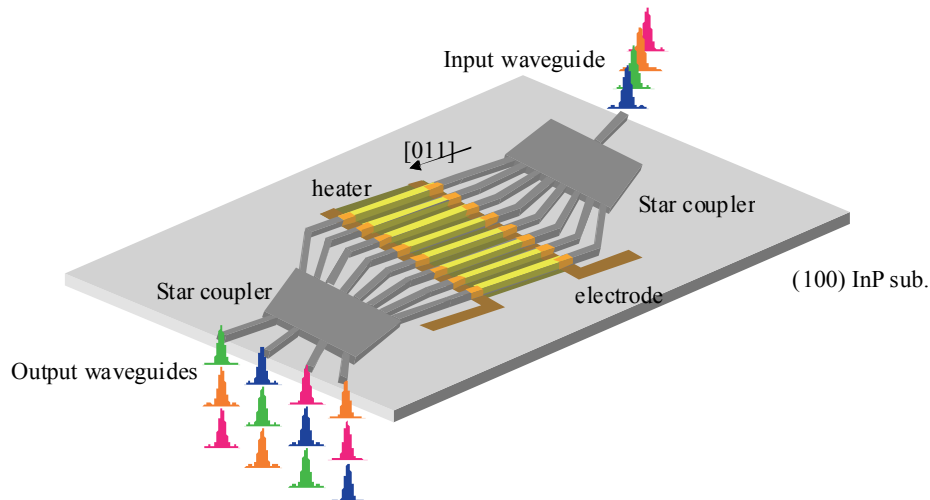


Fig.12 金属ヒータ型屈折率分布アレイ導波路波長分波型光スイッチ模式図

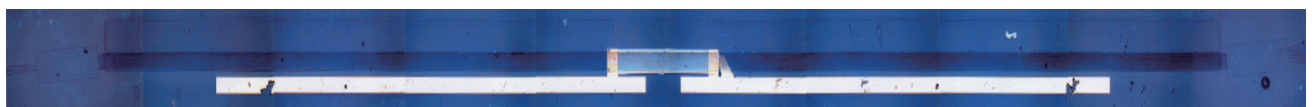


Fig.13 金属ヒータ型屈折率分布アレイ導波路波長分波型光スイッチ写真

Fig.13 では、左側に入射導波路および入射スラブ導波路、次に屈折率分布アレイ導波路があり、アレイ導波路上にヒータおよび下につながっているパッド部分、アレイ導波路を出た後には出射スラブ導波路で集光効果を得て出射導波路に出力される。

光導波路において、フォトルミネッセンス(PL)波長は重要なパラメータである。それはPLピーク波長がバンドギャップ波長とほぼ同様の値を示すためであり、バンドギャップ波長より短波長の光は導波路に吸収されるためである。この

ことから、我々は以前から成長条件を変更することやワイドマスクを用いることにより、バンドギャップ波長を制御している。今回作製したデバイスの PL 測定結果を示す。Fig.14 はアレイ導波路 No.1、No.8、No.16 の PL 波長である。

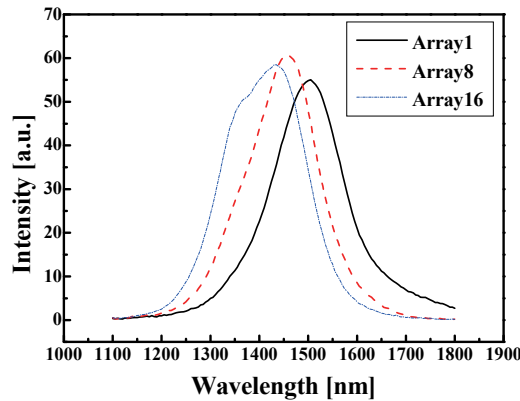


Fig.14 屈折率分布アレイ導波路内の PL スペクトル

Fig.14 より、アレイ導波路 No.1 が最も長波にピークを持ち、No.16 が最も短波にピークを持つという結果になった。これはバンドギャップエネルギーが No.16 が最も大きく、No.1 が最も小さいということであり、ワイドマスクに近い側である No.1 が層厚が最も厚いため、量子サイズ効果を考慮しても妥当である。

PL ピーク波長より短波長の光は光導波路に吸収される。このことから、熱光学効果を用いて屈折率変化を与える際に、PL ピーク波長がどのような変化をするのか知っておくことは必須である。実際に作製したアレイ導波路の温度を変化して PL 測定を行った。温度に対する各アレイ導波路の PL ピーク波長の変化を Fig.15 に示す。図より、PL ピーク波長が温度上昇とともに長波長側にシフトしていることが確認できた。長波側にシフトする理由として、熱光学効果により相対的にバンドギャップエネルギーが小さくなる。それに付随してバンドギャップ波長も長波側にシフトすることとなる。長波側に吸収端がシフトすることで、測定可能範囲が狭まるため、シフト量を明確にする必要がある。

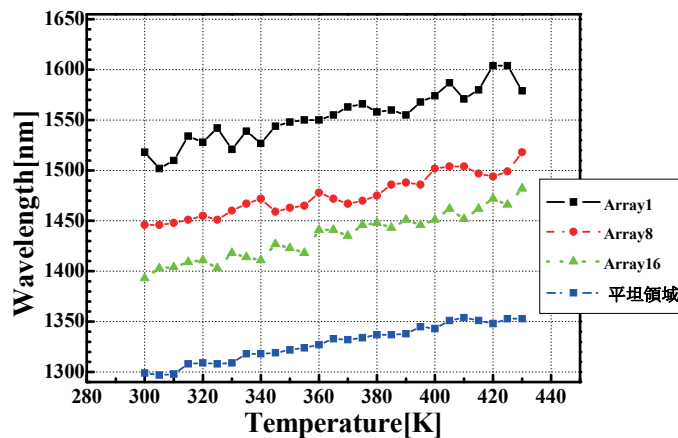


Fig.15 PL ピーク波長の温度依存性

また図より各アレイ導波路および平坦領域のピーク波長は、ほぼ線形的にシフトしている。また、各アレイ導波路や平坦領域について、大きな違いは見られなかった。このシフト量 $d\lambda/dT$ はおよそ $d\lambda/dT=0.61[\text{nm}/\text{K}]$ であった。これは $1[\text{K}]$ 基板の温度が上昇するとピーク波長が $0.61[\text{nm}]$ 長波側にシフトするということであり、重要なパラメータとして測定の際に考慮する必要がある。

熱光学効果型光スイッチの場合、温度変化に対する屈折率変化量も重要なパラメータである。ここではファブリ・ペローエタロン法を用いた屈折率変化量の測定結果を示す。測定に用いた試料は、屈折率分布アレイ導波路をへき開した共振器構造であり、共振器長は $170[\mu\text{m}]$ である。Fig.16 は入射光波長 1550nm における各アレイ導波路における温度変化に対する屈折率変化量である。約 75°C の温度変化で約 0.52% の屈折率変化量が得られた。すなわち $6.9 \times 10^{-3}[\%/\text{C}]$ の温度変化に対しての変化量である。どのアレイ導波路においても相対的な屈折率変化量はほぼ一定であった。

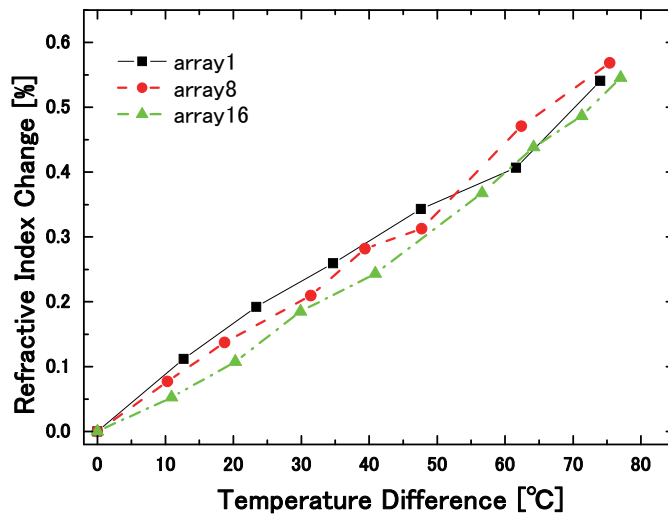


Fig.16 波長 1550[nm]における屈折率変化量の温度依存性

アレイ No.16 の導波路における屈折率変化量の波長依存性を Fig.17 に示す。図より熱光学効果を用いたときの屈折率変化の波長依存性はなく、どの波長帯でも一定の屈折率変化量が得られる。従来の研究において、量子閉じ込めシュタルク効果を用いたときの屈折率変化は、バンド端付近では変調が確認できたがバンド端から離れた波長では変調が確認できなかった。熱光学効果を用いることで、波長依存性がみられないことからバンド端から離れた波長においても変調が確認でき、屈折率分布アレイ導波路を用いた波長分波型光スイッチのスイッチング動作を得るためには適した変調方法と思われる。

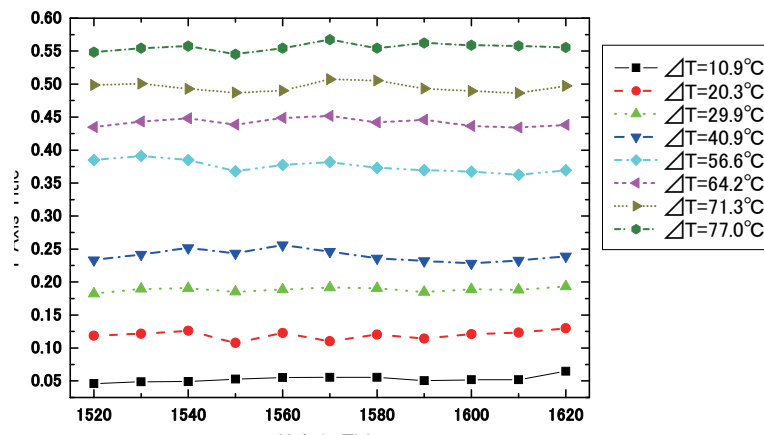


Fig.17 アレイ No.16 の屈折率変化量の波長依存性

測定に用いた素子の波長分波特性について Fig.18 に示す。(a)は出射ポート端面における近視野像であり、(b)は各出射ポートからの出射光のスペクトル特性である。図より、1548[nm]では port1 が最も強く、そこから順に、port4⇒port3⇒port2⇒port1⇒port4⇒port3⇒port2 と、強く出射するポートが移っている。これは分波特性において 2 周巡回を達成するものである。また、(b)から、分波間隔 $\Delta\lambda$ に違いがあることがわかる。これは分波間隔が中心波長に依存するため、長波側の方が分波間隔が広がるためである。これに伴い、分波間隔と同様に FSR も短波側と長波側で異なることになる。この素子では、短波側が分波間隔 8~10[nm]、長波側が 10~14[nm]となり、FSR は短波側で 46[nm]、長波側で 53[nm]ほどとなった。また隣接チャンネル間クロストークは~2.6[dB]、消光比は~2[dB]となった。

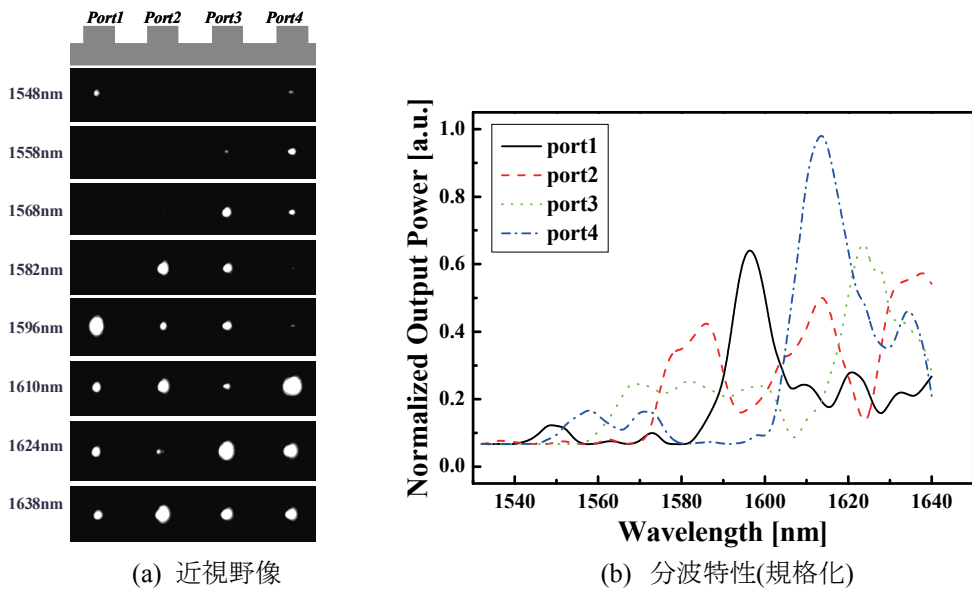


Fig.18 波長分波特性

次に実際に測定したスイッチング特性の測定結果について述べる。今回熱光学効果を利用する際のアプローチとして、上に金属ヒータを蒸着して金属に電流を流すものと、外部ヒータを用いて下から素子全体を加熱するものの2パターンで行った。金属ヒータの方が速度の面で優れ、また集積化を意識する上でも金属ヒータにおいてアレイ導波路だけを温める方が良いが、ここでは波長分波型スイッチの基本動作が確認できた素子全体を加熱する波長分波型光スイッチのスイッチング特性について説明する。

Fig. 19はこの素子の温度に対するスイッチング特性の近視野像を4波長ピックアップしたものである。またこのスイッチング特性表をTable. Iに示す。

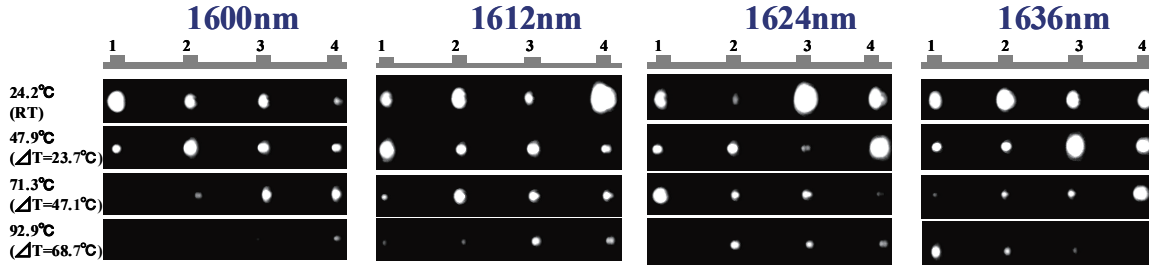


Fig.19 波長スイッチング特性

Table.I 波長スイッチング特性表

	port1	port2	port3	port4
24[°C] RT	●	●	●	●
46[°C] $\Delta T=22[°C]$	●	●	●	●
71[°C] $\Delta T=47[°C]$	●	●	●	●
91[°C] $\Delta T=67[°C]$	●	●	●	●

● $\lambda=1600nm$ ● $\lambda=1612nm$ ● $\lambda=1624nm$ ● $\lambda=1636nm$

これらの図表より、各波長で4ポートのスイッチング特性を達成した。室温においてそれぞれの波長の出射ポートは異なっている。そして温度を上昇することによって、各波長の出射ポートは port1⇒port2⇒port3⇒port4とスイッチングしていることがわかる。これは Fig.3 で示した、波長分波型光スイッチにおける波長巡回スイッチング特性の達成であり、提案した素子構造が波長選択スイッチングデバイスとしての有効であることを示すことができた。今後はこの実験データを元に各ポートにおける消光比、隣接間チャンネルおよび波長間におけるクロストークを求める予定である。

今回の研究において初めてスイッチング動作を達成することができたが、クロストーク等の性能は不十分である。BPM を用いたスイッチング動作の解析を進め、素子構造の最適設計を行うことが必要である。また熱光学効果を用いたデバイスにおいてはスイッチング速度が msec オーダーである。高速なスイッチングを達成するためには、電界印加による QCSE や電流注入によるプラズマ効果等を利用することが必要不可欠である。そのためには半導体の pin 構造を作製することが必要不可欠である。これまで有機金属気相成長装置に有機金属のドーパントを導入するための配管工事が終了し、そして n 型ドーパントとして DTBSi 有機金属材料を導入した。供給量と不純物濃度の関係は現在検討中であり、今後このドーパントを用いた pin 構造の素子試作を行う予定である。

5 まとめ

我々が提案した階段型屈折率分布アレイ導波路を用いた波長分波型光スイッチに関する研究を行った。屈折率分布アレイ導波路を用いた波長分波型光スイッチのビーム伝搬法による解析を行い、その解析に基づいたマスク設計を行った。このマスクを用いて有機金属気相成長法選択成長によって作製した素子の特性評価を行い、設計どおりのクロストーク特性を得ることができた。さらに波長分波型光スイッチの試作を行い、熱光学効果による屈折率変化を用いることによって、初めて4ポート4波長の波長選択スイッチング特性を達成することができた。

【参考文献】

- [1] C. A. Brackett, A. S. Acampora, J. Sweitzer, G. Tangonan, M. T. Smith, W. Lennon, K. C. Wang, and R. H. Hobbs, "A scalable multiwavelength multihop optical network: A proposal for research on all-optical networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, no. 5, pp. 736–753, May/June 1993.
- [2] K. Miki, Y. Kawakita, T. Kihara, and K. Shimomura, "Numerical analysis of 1.55 μm wavelength optical deflector using arrayed waveguide with linearly changing refractive index distribution" *Trans. IEICE*, vol. j85-c, no. 8, pp. 728–736, Aug. 2002 in Japanese.
- [3] Y. Moriguchi, T. Kihara, and K. Shimomura, "High growth enhancement factor in arrayed waveguide by MOVPE selective area growth," *J. Cryst. Growth*, vol. 248, pp. 395–399, Feb. 2003.
- [4] T. Yoshioka, Y. Kawakita, A. Kawai, T. Okawa and K. Shimomura, "Simple estimation of strain distribution in narrow-stripe waveguide array fabricated by selective MOVPE", *J. Crystal Growth*, vol.298, pp.676–681, Jan. 2007.
- [5] Y. Kawakita, T. Saitoh, S. Shimotaya, and K. Shimomura, "A novel straight arrayed waveguide grating with linearly varying refractive-index distribution," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 1, pp. 144–146, Jan. 2004.
- [6] Y. Kawakita, T. Saitoh, A. Kawai, S. Shimotaya, and K. Shimomura, "Arrayed waveguides with linearly varying refractive index distribution and its application for wavelength demultiplexer," in *Proc. Indium Phosphide and Related Materials (IPRM'04)*, pp. 484–487, 2004.
- [7] Y. Kawakita, S. Shimotaya, D. Machida, and K. Shimomura, "Four-channel wavelength demultiplexing with 25-nm spacing in variable refractive-index arrayed waveguides," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 14, pp. 900–901, 8th July 2004.
- [8] Y. Kawakita, S. Shimotaya, D. Machida, and K. Shimomura "Wavelength demultiplexing and optical deflection in variable refractive-index waveguide array based on selectively grown GaInAs/InP MQW structure" *IEICE Trans. Electron*, vol. E88–C, no. 5 May. 2005.

- [9] K.Shimomura and Y.Kawakita, "Wavelength selective switch using arrayed waveguides with linearly varying refractive index distribution," Photonics Based on Wavelength Integration and Manipulation, IPAP Books 2, pp.341-354, Feb. 2005.
- [10] Y. Shimizu, S. Kawabe, H. Iwasaki, T. Sugio, and K. Shimomura, "Wavelength switching using GaInAs/InP MQW variable refractive-index arrayed waveguides by thermo-optic effect", IEICE Trans. Electron., vol.E91-C, no.7, pp.1110-1116, July 2008.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Wavelength switching using GaInAs/InP MQW variable refractive-index arrayed waveguides by thermo-optic effect	IEICE Trans. Electron.	July 2008
Selective MOVPE grown semiconductor optical waveguide array and its application for optical devices	2008 International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW 2008)	Aug. 2008
Switching characteristics in wavelength switch using selectively grown waveguide array by thermooptic effect	2008 International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW 2008)	Aug. 2008
選択成長導波路アレイを用いた熱光学効果型波長スイッチのスイッチング特性	第 69 回応用物理学学術講演会	平成 20 年 9 月
熱光学効果型波長選択スイッチのスイッチング特性	第 56 回応用物理学関係連合講演会	平成 21 年 4 月
屈折率分布導波路アレイを用いた電流注入型波長選択スイッチの作製	第 56 回応用物理学関係連合講演会	平成 21 年 4 月
熱光学効果型 GaInAs/InP MQW 波長選択スイッチの 4 波長スイッチング特性	電子情報通信学会,光エレクトロニクス研究会	平成 21 年 4 月
Wavelength Selective Switch using GaInAs/InP MQW Variable Index Arrayed Waveguides	Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 09)	June 2009(発表予定)
階段型屈折率分布アレイ導波路を用いた波長選択スイッチのBPM解析と試作	電子情報通信学会,光エレクトロニクス研究会	平成 21 年 6 月(発表予定)
Switching Characteristics in Variable Index Arrayed Waveguide Wavelength Selective Switch	Opto Electronics and Communications Conference (OECC 2009)	July 2009(発表予定)
Waveguide Design of Variable Refractive-Index Waveguide Array Demultiplexer and Wavelength Selective Switch	Opto Electronics and Communications Conference (OECC 2009)	July 2009(発表予定)