

「電子・光子等の機能制御」

平成 11 年度採択研究代表者

中野 義昭

(東京大学大学院工学系研究科 教授)

## 「人工光物性に基づく新しい光子制御デバイス」

### 1. 研究実施の概要(公開)

半導体材料の光物性を一原子層単位で設計・制御された人工結晶構造により変革し、電気光学効果、相互位相変調、四光波混合、磁気光学効果など、広義の光非線型性を飛躍的に高めること、ならびに、これら半導体人工光物性と半導体分布ブラッグ反射器やファイバブラッグ格子鏡で構成される高度な光共振器／干渉計構造に基づいて、ダイナミック光メモリ、光ロジック、デジタル波長変換器、光 3R 中継器などの全光子制御デジタルデバイス／回路を実現し、デジタルフォトリソの基礎を築くことによって光情報通信技術の発展に資することを目指している。

平成 13 年度は、InGaAsP 系選択 MOVPE 成長解析、MOVPE による InGaP/GaAs 界面形成における組成急峻性の制御、GaAs:MnAs ナノクラスター構造の作製・構造制御・磁気光学効果、半導体/磁性体複合構造 GaAs:MnAs と GaAs/AlAs 分布ブラッグ反射鏡から成る多層構造における磁気光学効果の増大、四元混晶強磁性半導体(InGaMn)As のエピタキシャル成長、電界吸収光変調器の偏光依存性を利用した全光波長変換器、方向性結合双安定レーザによる全光フリップフロップ、サブバンド間遷移超高速光デバイスに向けた AlN/GaN 超格子構造の MOVPE 成長、超短光パルスの発生と DWDM 通信への応用、顕微ラマン分光法による光通信用光素子および材料の解析、電気光学・磁気光学プローブを用いたマイクロ波・ミリ波回路計測技術、モード同期半導体レーザの物理と応用、超広帯域・高密度光ファイバグレーティング、全光半導体再生中継器、などの研究を行って、成果を挙げている。

今後は、界面急峻性など量子効果の操作に不可欠な原子層レベル構造制御技術の窒化物系材料への拡張、MOVPE 選択成長集積化技術の高度化、電界吸収型光変調器に基づく全光スイッチ集積回路の試作実証、半導体レーザを用いたデジタル光デバイスの試作・高速化の研究を行うとともに、磁性金属/半導体複合多層膜構造による非相反型光デバイス、ファイバブラッグ格子と半導体光増幅器を融合した高機能ハイブリッド光デバイスなどを具体的研究課題とし、冒頭に述べた最終目標の全光子制御デジタルデバイス／回路の開発につなげてゆく予定である。

### 2. 研究実施内容(公開)

半導体材料の光物性を一原子層単位で設計・制御された人工結晶構造により変革し、電気光学効果、相互位相変調、四光波混合、磁気光学効果など、広義の光非線型性を飛躍的に高める

こと、ならびに、これら半導体人口光物性と半導体分布ブラッグ反射器やファイバブラッグ格子鏡で構成される高度な光共振器／干渉計構造に基づいて、ダイナミック光メモリ、光ロジック、デジタル波長変換器、光 3R 中継器などの全光子制御デジタルデバイス／回路を実現し、デジタルフォニクス基礎を築くことによって光情報通信技術の発展に資することを目指している。それに向けて、以下の各項目の研究を行った。

#### ☆単原子層 MOVPE／集積プロセス技術の研究

##### (1) InGaAsP 系選択 MOVPE 成長解析

有機金属気相エピタキシー(MOVPE)は化合物半導体薄膜成長において量産に適した重要な技術であるが、反応機構の本質的な理解が不足しているのが現状である。そのため、成長の最適化には多くの手間と費用がかけられており、デバイスメーカーがこのために消費するウェハや原料のコストだけでも年間数億円に達すると言われている。MOVPE の精密な制御を行うには、反応器内での気相や表面での反応の理解が重要となる。今まで、気相反応はある程度理論から予測が出来たが、表面反応は予測精度が低く、観測手段も限られている。

一方、MOVPE における選択成長技術は、モノリシック光集積回路(photonic integrated circuits; PICs) 製造プロセスを単純にするために重要な技術である。SiO<sub>2</sub> マスクの形を調整して同じ面の上に組成や厚みの異なる結晶薄膜を成長することができる。選択成長において、成長領域面積が広く、気相拡散だけで成長速度分布が説明ができる場合には、その成長速度プロファイルを解析することによって、製膜種の表面での付着確率(反応速度)を求めることが可能である。このことに着目し、様々な条件において付着確率を求めれば、CFD(熱流体数値解析)シミュレーションにおける重要な速度パラメータとして用いることができる。そのため平成 13 年度は、InP, GaAs 成長の選択成長を解析した。

基板(InP, GaAs)上にSiO<sub>2</sub>膜をスパッタリングで製膜してマスクとし、その上にInP, GaAsの成長を行った。MOVPE装置には、水平反応器型を用いた。成長した膜の成長分布は、表面形状プロファイラを用いて測定した。選択成長分布を比較するためGrowth Enhancement Ratioという概念を導入した。これは成長速度をマスクが全く無い部分の膜厚で規格化した値である。成長温度は610℃、反応器内全圧は50mbar, 100mbar, 200mbarに変化させた。一方、得られた成長速度分布は、MATLAB™を用いた2次元拡散シミュレーションの結果と比較した。シミュレーションでは成長速度分布を決めるのは、製膜種の拡散係数(D)と表面反応速度(付着確率に対応、k)の比、D/kである。従って、実験との比較からD/kが求まり、Dは理論から推算可能であるため、製膜種の付着確率を決定できる。全圧を変えた実験では、Dのみが圧力に反比例するはずであるが、今回得られた結果では、D/kの値は圧力に反比例しており、kの値が各実験において温度(今回は一定)のみの関数であるという妥当な結果が得られた。In系の場合、求められた付着確率は0.9、Ga系の場合は0.2であった。この知見をCFDシミュレーションに反映させてさらなる検討を行う予定である。

(2) MOVPE による InGaP/GaAs 界面形成における組成急峻性の改善

MOVPE法で作製された InGaP/GaAs ヘテロ構造の界面急峻性を確保する目的で研究を行っている。この問題に対して、分光エリプソメトリーのその場観察と X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) などの評価装置を用いて、ガス切り替えシーケンスの改良というアプローチでの急峻性向上を試みた。その中でも今年度の研究目的を InGaP 成長後の GaAs 成長における In の表面偏析という問題に絞り、その改善を目指した。

GaAs 上の InGaP を成長する場合には図 1(a)に示したガス切り替えシーケンスを採用した。これは我々が V 族原子最適化の目的で以前に考案したガス切り替えシーケンスと同一である。問題の InGaP 上の GaAs の成長では図 1(b)のガス切り替えシーケンスと図 1(c)のガス切り替えシーケンスで成長している。図 1(b)は従来用いられてきた典型的なガス切り替えシーケンスであり、時間について V 族を主眼に最適化してある。図 1(c)は今回の実験事実から考案した III 族最適化ガス切り替えシーケンスである。

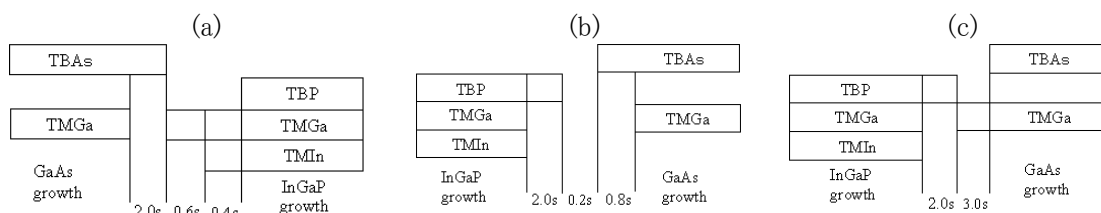


図 1 今回の XPS 測定の試料作製で使ったガス切り替えシーケンスの図。

どの試料も GaAs 上の InGaP 成長では(a)の V 族最適化シーケンスを用いた。(b)は以前に報告した V 族最適化シーケンスである。(c)は In の表面偏析を抑制するために新しく考案した III 族最適化シーケンス。

図 2 にサンプルの構造を示す。これらの試料を用いて XPS による In の信号を比較した。ここで図 2 の左図は In と P の XPS 信号の基準となる試料 (RS: Reference Sample) である。

この RS に XPS の X 線を 45° で入射して In と P の XPS 信号を測定した。次に In の表面偏析の様子を測定するために、図 2 の右図のように RS と同じ構造の試料にさらにノンドープの GaAs 層を成長した測定用試料 (MS: Measurement Sample) を作製した。この GaAs 層の幅は 1, 2, 4, 8, 12nm として、この幅の違いによって In と P の信号強度の減衰を測定した。

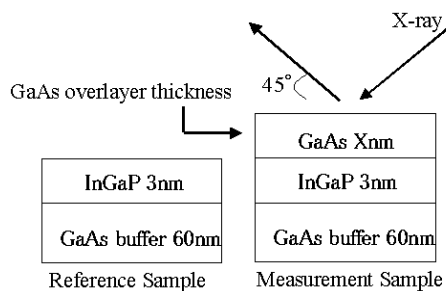


図 2 XPS による GaAs overlayer の違いによる In 信号減衰比較用の試料。Reference Sample は GaAs overlayer のない場合の強度基準。Measurement Sample で GaAs overlayer の幅を 1, 2, 4, 8, 12nm と変えて減衰を比較した。全試料 660°C 成長。

図 3 は図 1(a)と(b)の V 族最適化シーケンスを用いて作製した図 2 の MS の XPS 信号変化である。このグラフの縦軸は対数グラフに直してある。この

グラフの減衰の様子から、GaAs overlayerの膜厚が増えるとともにP原子は指数関数的に減少しているが、In原子は単純な指数関数的な減衰ではなく、二つの減衰長さを持っている。このことは、In原子がなんらかの形でGaAs overlayerに拡散していることからおきていると考えられる。

そこで我々はこのInの拡散は表面偏析によるものであると推定した。今回我々は格子整合させて成長していることから、InGaP成長中もInの表面偏析が起き成長中のInGaP表面に過剰なInが吸着していると考えた。InGaP成長後にGaAs成長を行うと、InGaP表面に偏析したInがGaAs中でさらに表面偏析することで拡散したものと考えた。

次に我々はこのInの表面偏析をガス切り替えシーケンスの工夫によって抑えることを考えた。InGaP成長中のInGaP表面にIn原子が過剰に吸着しているとするならば、このIn原子をPとGaで終端すれば表面偏析するIn原子の絶対量は減るはずである。そこで我々は、その過剰なIn原子をInGaP層に終端するために、図1(c)のようなガス切り替えシーケンス(III族最適化シーケンス)を考案した。このIII族最適化シーケンスはInGaP成長後、TBPを過剰に供給し、次にTMGaを過剰に供給してその後GaAsを成長する方法を取る。これまでと同様にRSとMSを作製し、V族最適化シーケンスとの比較をした。III族最適化シーケンスを用いた結果が図4である。Pについてはシーケンスの違いは出ていないが、Inについては明らかに改善した。このことはInGaP上のGaAs成長でTMGaの先流しが過剰なInの減少に有効であることを示している。

以上のように、今回は図1(c)のシーケンスで作製したInの表面偏析を減少させるのに成功したが、同様のシーケンスはいくつも候補に考えることができ、より有効なシーケンスを追求してゆく予定である。

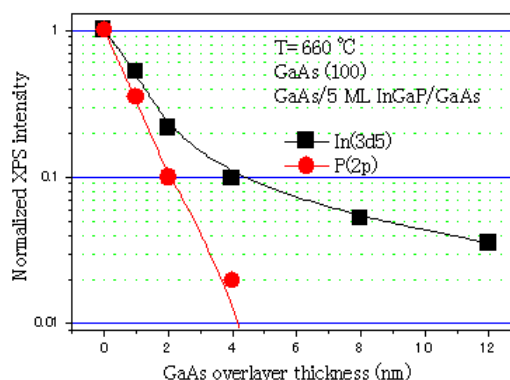


図3 図1(a)と図1(b)のV族最適化シーケンスで作製したMSのIn, PのXPS信号減衰グラフ。四角はInの3d信号、丸はPの2p信号である。これらの信号はRSを基準にMSからのIn, Pの信号を規格化したものを用いている。PのXPS信号はGaAs overlayerが6nm以上の場合には測定できないほど小さくなっている。

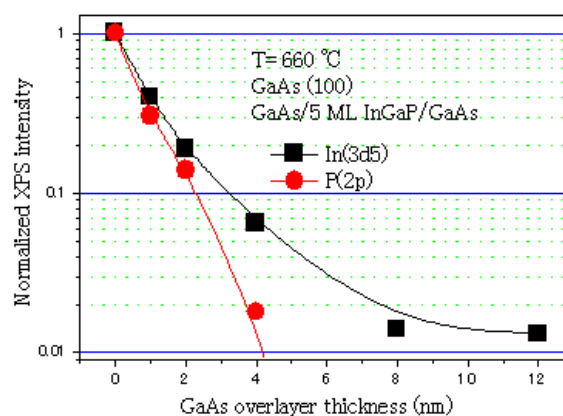


図4 図1(a)と(c)のガス切り替えシーケンスで作製したMSのIn, PのXPS信号減衰グラフ。

我々は今回、XPSを用いてInGaP上のGaAs成長でInがどのように表面偏析するかを測定し、InGaP成長中にInGaP表面はIn過剰になっており、このInはInGaP成長中だけでなくGaAs成長中でも表面偏析することがわかった。また、その表面偏析の減衰長は $\sim 10\text{nm}$ オーダーであることがわかった。我々は表面偏析の抑制方法としてガス切り替えシーケンスを採用し、InGaP成長後のGaAs成長ではTBPを過剰に供給し、その後にTMGaを過剰に供給することが有効であることを示した。今後は分光エリプソトリーのその場観察を用いて、ガス切り替えシーケンスの切り替え時間を最適化し、より急峻な界面の作製を試みる予定である。

#### ☆人工光磁性材料／スピン機能光デバイスの研究

##### (1) GaAs:MnAs ナノクラスター構造の作製、構造制御、磁気光学効果

半導体GaAs中に強磁性金属MnAsのナノクラスターを埋め込んだ複合構造(以下、GaAs:MnAsと称す)を作製し、その構造評価、磁気特性、光学特性、磁気光学特性を明らかにした。まず、MnAsナノクラスターは(GaMn)Asを熱処理する際に相分離によってGaAs中に自己組織的に形成されること、形成されたGaAs:MnAsは単結晶でIII-V族ヘテロ構造と整合性が良いことなどを明らかにした。さらに、数nm周期の[GaAs:MnAs]/AlAs超格子構造の導入によってMnAsクラスターのサイズを制御できること、GaAs:MnAsの磁化及び磁気光学効果が(GaMn)As成長中のSiのドーピングによって増強されること、MnAsナノクラスターの形成に寄与するMnイオンの割合が $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ のSiのドーピングによって77%から99%と高まることを示した。磁気光学デバイスへの応用のためには大きな磁気光学効果を得ると同時に高い透過率を得る必要があるが、[GaAs:MnAs]/AlAs超格子構造の導入によってこれらを同時に得られること、また長距離光通信に重要な波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯における透過率と磁気光学効果を測定し、GaAsバンド端波長である $0.87\mu\text{m}$ 付近と比較して透過率が上昇することを示し、GaAs:MnAsの光学損失と磁気光学効果の起源について考察を行った。

##### (2) 半導体/磁性体複合構造GaAs:MnAsとGaAs/AlAs分布ブラッグ反射鏡から成る多層構造における磁気光学効果の増大

半導体/磁性体複合構造の基本物性の評価を基に、光アイソレータ応用を視野に入れた多層膜における磁気光学効果の研究を行った。現在、光アイソレータのファラデー回転子に用いられている材料はバルク材料であり、III-V族化合物半導体との整合性が悪いという問題点からIII-V族半導体光電子デバイスとの集積化は困難である。磁気光学デバイスのモノリシック集積化のためには、III-V族ベースの薄膜でかつ大きな磁気光学効果を示す材料が求められる。本研究ではGaAs:MnAsをGaAs/AlAs周期構造から成る分布ブラッグ反射鏡(DBR)で挟み込んだ多層構造(一次元半導体ベース磁性フォトニック結晶)を作製し、光の多重反射を利用して薄膜で大きな磁気光学効果を得ることに成功した。動作波長を $\lambda = 0.98\mu\text{m}$ とし、膜厚 $139\text{nm}$ ( $\lambda/2n$ ,  $n$ :屈折率)のGaAs:MnAsを10周期のGaAs/AlAsDBR(膜厚 $\lambda/4n$ )で挟んだ多層構造において、単層のGaAs:MnAsに比べて7倍の磁気光学効果の増大を室温で観測した。この多層膜の磁気光学効果はGaAs:MnAsの超常磁性を反映して $0.1\sim 0.2\text{T}$ の低磁場で飽和する特性を示すが、この低磁場

動作は光アイソレータの小型化に寄与すると考えられる。さらに、多層構造の磁気光学特性を理論的に解析し、光アイソレータへの応用に必要な  $45^\circ$  のファラデー回転角の実現に必要な条件を明らかにしている。さらに、実用デバイスに向けて最大の課題である GaAs:MnAs の光学損失低減のために、1) [GaAs:MnAs] / AlAs 超格子構造の導入、2) Si のカウンタードーピング、3) 動作波長の長波長化、の3つの試みを行いある程度の有効性を示した。

### (3) 四元混晶強磁性半導体(InGaMn)As のエピタキシャル成長

III-V 族ベースの四元混晶強磁性半導体(InGaMn)As の低温 MBE によるエピタキシャル成長に初めて成功した。光通信で使われる長波長帯で動作する磁気光学デバイス用の III-V 族磁性半導体として初めて作製されたものである。GaAs および InP 基板の上の両方で、良質の単結晶薄膜が得られ、特に InP 基板に格子整合させた場合には、原子レベルで平坦な表面モルフォロジーを得た。磁気光学効果および磁気輸送特性の測定により、低温で明瞭な強磁性秩序を観測した。Mn 濃度が 14%、In/Ga 組成が 53%/47% の時、強磁性転移温度  $T_c$  が最高で 73 K を示した。また  $T_c$  以下で極めて大きな磁気光学効果を観測した。

### ☆人工光物性に基づくデジタル光デバイスの研究

#### (1) 電界吸収光変調器による全光波長変換器

本研究では、多重量子井戸(MQW)電界吸収(EA)光変調器における光誘起屈折率変化を利用することで、全光デバイスを実現せんとしている。平成 13 年度は、MQW-EA 変調器における光誘起屈折率変化の偏光依存性を用いた、簡便な波長変換の方式を提案し、動作解析および全光波長変換実験を行った。ここで提案する波長変換の方式を図 5 に示す。シグナル光を光変調器に入射することにより吸収飽和が起こり、その結果屈折率変化が生じるが、その変化量には偏光依存性がある。プローブ光の偏光を、シグナル光がオフの時に変調器の出射端において x 軸から  $45^\circ$  傾いた状態にし、それに直交するように偏光子を配置する。シグナル光を入射し屈折率変化が起こり、プローブ光の TE 偏光と TM 偏光の位相差が  $\pi$  に達すると、図に示すように、変調器の出射端でのプローブ光の偏光が  $\pi/2$  回転し、偏光子を透過するようになる。格子整合 InGaAs / InAlAs 多重量子井戸 EA 変調器を用いた際の波長変換特性をシミュレーションしたところ、+3dBm 程度のシグナル光強度で波長変換の実現できることが予測された。

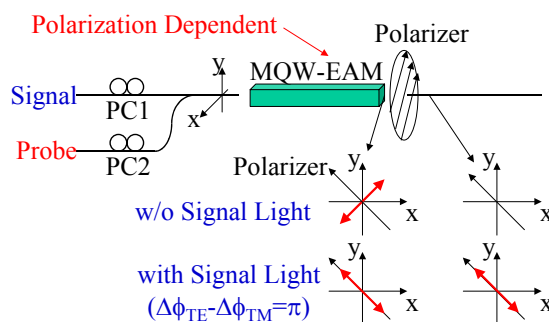


図 5 波長変換器の構成と偏光状態

次に、素子の試作・検証実験を行った。量子井戸は試作の都合上、今回は上記の InGaAs/InAlAs ではなく、0.8%の圧縮歪を加えた InGaAsP/InGaAsP 多重量子井戸とし、MOVPE により成長作製した。このエピタキシャル基板上に素子長  $325 \mu\text{m}$  のリッジ導波路型 EA 光変調器

を作製し(エキシトン波長=1525nm (TE 偏光)、1420nm (TM 偏光))、全光波長変換実験を行った。プローブ光の波長を 1560nm に固定し、シグナル光の波長は 1555nm または 1565nm とした。図 6 は MQW-EA 変調器の逆バイアス電圧を 0V または 1V に設定した場合の波長変換特性である。予測通り、図 5

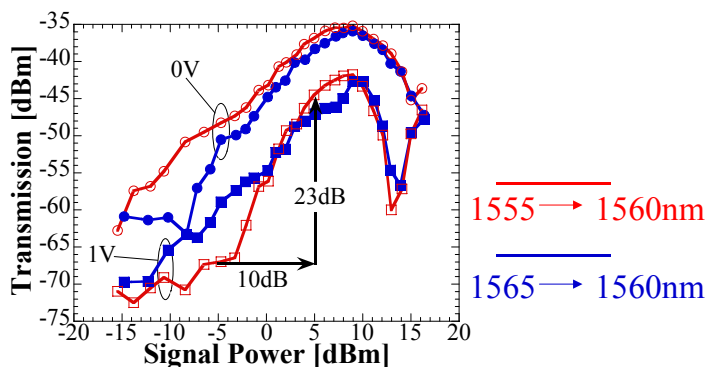


図 6 全光波長変換の静特性(実験)

のような極めて簡単な構成で、低パワーで動作する全光波長変換の得られていることが分かる(図 6 の横軸は、結合損失を含めた値なので、実際の動作パワーはこれよりさらに数 dB 程度小さい)。シグナル光パワーが-5dBm から 5dBm に変化する間に、プローブ光パワーは 23dB 変化した。即ちこの波長変換には S/N 比改善の効果がある。また、1565nm から 1560nm への変換(ダウンコンバージョン)も 1555nm から 1560nm への変換(アップコンバージョン)も同様の特性で可能であることが分かる。逆バイアス電圧を高くすると動作速度は向上するが、吸収端が動作波長に近づくため挿入損失が大きくなる。

## (2) 方向性結合双安定レーザによる全光フリップフロップ

全光フリップ・フロップは、光パケットのバッファメモリやビット長変換などの役割を果たすデジタルフォトニックデバイスとして期待されている。平成 13 年度は、電極分離方向性結合器型半導体レーザ構造を有する光双安定レーザ(図 7)によって、全光フリップ・フロップが実現できることを提案した。まず、同素子の動作特性の理論解析を行った。大きな光非線型性を持つ半導体可飽和吸収領域を有する方向性結合器の特性を正確に解析するために、有限差分ビーム伝搬法(FD-BPM)を用

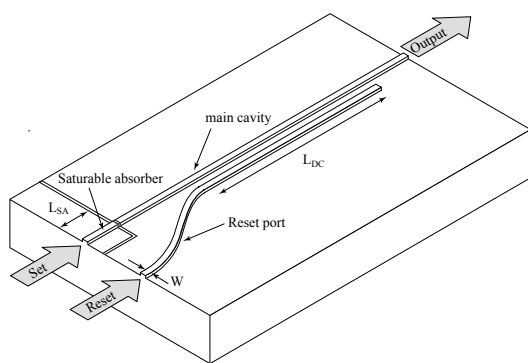


図 7 全光フリップフロップの概念図

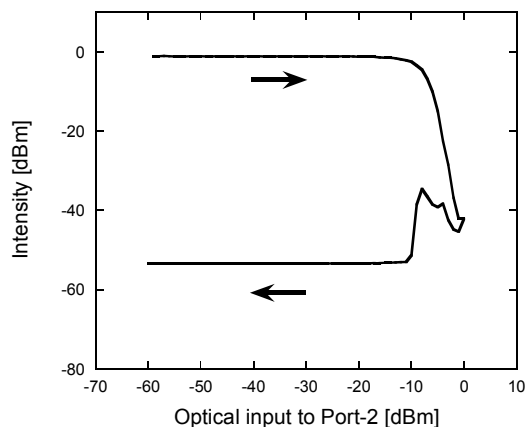


図 8 全光フリップフロップのスイッチオフ特性のシミュレーション

いた。レート方程式と組み合わせることで、キャリアと光子の相互作用を考慮した静特性を計算した。リセット・ポートから光を注入した場合の出力特性の解析結果を図 8 に示す。リセット光により、方向性結合器の結合定数が増加することで発振が停止する。リセットするための入射強度は 0 dBm 程度で良いことが分かった。以上の結果から、方向性結合器型双安定性レーザを用いて、全光フリップ・フロップの実現できることが分かった。

次に、素子の試作プロセスを検討した。本構造では、方向性結合部の近接する一対の半導体電動導波路の電極を電氣的に分離することが必要である。ここでは、電極を斜め蒸着することで、自己形成的に電極分離することを考えた。まず MOVPE によって InP 基板の上に +0.8% 圧縮歪み多重量子井戸構造 (バンドギャップ波長 = 1.55  $\mu\text{m}$ ) を成長し、リッジ導波路半導体レーザの標準的作製プロセスを利用することで素子を作製した。上部電極である Au/Ti を電子線真空蒸着装置によって 75 度の入射角度で蒸着した。斜めから蒸着することで導波路のリッジが影となり、方向性結合器の導波路間に電極が蒸着されなかった。このことを利用して、方向性結合器の電極を自己形成的に分離した (図 9)。電極間の分離抵抗を測定したところ、130  $\Omega$  であった。実際にそれぞれの導波路に電流注入したところ、電流注入していない導波路からはほとんど光が放出されず、方向性結合器の電極分離が成功していることを確かめた。これにより、二つの導波路を独立に電流バイアスすることが可能となった。試作素子の動作特性は現在評価中であり、その詳細は平成 14 年度に報告するが、初期的評価ではシミュレーションに合致する全光フリップフロップ動作が確認されている。

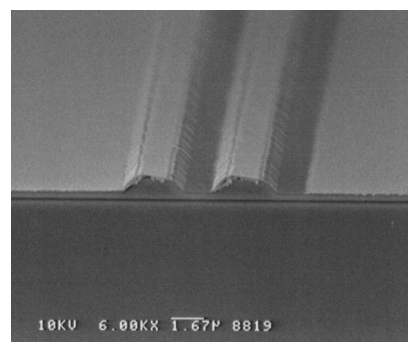


図 9 能動方向性結合器部分の電極分離 (電子顕微鏡写真)

### (3) サブバンド間遷移超高速光デバイスに向けた AlN/GaN 超格子構造の MOVPE 成長

量子井戸 / 超格子におけるサブバンド間遷移を用いると、バンド間遷移を用いる場合に比べ全光デバイスの動作速度を格段に向上することができる。ただし、光通信で重要な 1.3–1.55  $\mu\text{m}$  帯のサブバンド間遷移を実現するには、伝導帯オフセットの大きな材料を用いる必要がある。本研究では、AlN/GaN 超格子構造を用いてこれを行うことを計画しており、平成 13 年度はその MOVPE による結晶成長を研究した。この超格子は AlN と GaN の間に存在する格子定数差のために、容易にクラックが入ることが問題である。ここでは結晶成長条件を最適化し、クラックフリーの超格子構造を得ることに成功し、またそのように成長したサンプルにおいて、世界最高レベルの 2 次元電子ガス移動度の得られていることが確認され、良好な界面であることが示された。平成 14 年度へ向けて本テーマを本格化してゆく。

## ☆光物理と光システム

### (1) 超短光パルスの発生と DWDM 通信への応用

光の極限性能のひとつである時間軸の高速性を追究する技術分野はフェムト秒フォトニクスある



いは超高速光エレクトロニクスと称される。これに関連し、世に先駆ける形で光パルス計測法、光パルス発生法、高感度光学的非線形デバイスの開発、などを実施したものである。平成 12 年度には、超短光パルス伝搬において発現する光ファイバ内非線形効果に対して高次分散効果が与える影響を詳細に分析した。特に、サブ 100 フェムト秒光パルスの分散平坦化光ファイバ伝搬に着目し、非線形効果の発現と高次分散効果が与える影響を数値シミュレーションにより明らかにしつつ、パラメトリック効果を活用する光スペクトル生成法とフェムト秒赤外光パルス発生器としての利用法を提案することができた。平成 13 年度はこの成果に引き続いて、パラメトリック効果の積極的応用を検討した。その結果、分散平坦化光ファイバが有する四次分散がパラメトリック効果の帯域を延伸し得ることが判明した。これに対して光パルス伝搬実験を行い、サブ 100 フェムト秒光パルスに適用したところ、以下に記す大変に興味深い新たな知見を得た。(1) 極めて短尺な(4 m 未満)光ファイバにおいて広帯域なスーパーコンティニューム光が発生し得ること(図 10)、(2) 光ファイバ長の適切な調整により平坦度の極めて良いスペクトルとすることができること、(3) その結果として S バンドを包含する高品質スペクトルとすることができること。

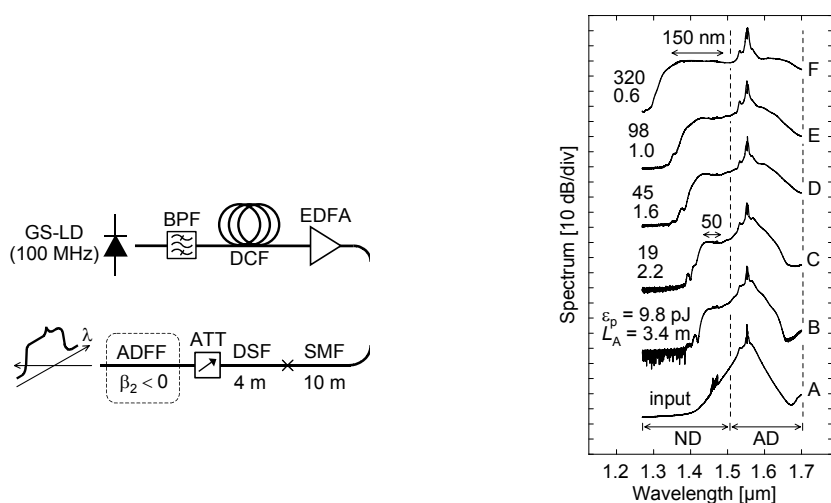


図 10 広帯域スーパーコンティニューム光の発生

## (2) 顕微ラマン分光法による光通信用光素子および材料の解析

光ファイバ増幅器の発明・発達に呼応して光通信に関わる素子の入出力光パワーは上昇の一途を辿っている。これに対して、光パワー上昇がもたらす光電子デバイスの信頼性劣化の原因解明とその対策が重要である。本研究では、顕微ラマン分光法に着目し、動作中デバイス入出力端面を詳細分析する方法を開発している。平成 13 年度は、既設の高感度顕微ラマン分光システムを利用して、光電子デバイス端面の局所的な温度や組成の二次元マッピングを高精度に行う測定方法の検討を行った。特に、ヘテロ界面を横断しつつ温度分布を求める手法に着目し、組成変動が温度データの誤差に与える影響を抑圧する方法を検討した。また、光るシリコン材料として注目を集めつつある鉄シリサイドに着目し、この光物性を調査する試みを開始した。

### (3) 電気光学・磁気光学プローブを用いたマイクロ波・ミリ波回路計測技術

平成 13 年度は、空間分解能に優れた磁気光学プローブの開発に成功した。これにより、高周波線路上の RF 磁界分布を約 10 $\mu\text{m}$  の空間分解能を以ってマッピングする手法が実現できる(図 11)。この発展形として、逆問題解法導入による電流分布推定法を開発する予定である。

また、磁気光学結晶の配置を工夫することによりプローブの周波数特性の改善を図る試みを行い、10GHz を超える帯域を有する磁気光学プローブの開発に成功した。

### (4) モード同期半導体レーザの物理と応用

デジタルフォトリックデバイス開発の一環として、集積型モード同期半導体レーザを利用した光インバータの開発を実施している。電子回路インバータと遜色のないインバータ静特性(光入出力特性)を確認した(図 12)。平成 13 年度には、これを受けて動特性測定を行い、インバータ動作を確認した。しかしながら、モード分配雑音や動作周波数の点で課題が浮上し、改善手法を今後検討する必要がある。またこれに並行して、2 モード出力を有する DFB-LD を光インバータとする手法を検討し、高感度化に成功した。

## ☆ファイバハイブリッドデジタル光デバイスとシステム応用

### (1) 超広帯域・高密度光ファイバグレーティング

現在の WDM 光ファイバ通信システムのためのキーデバイスのひとつとして、光ファイバブラッググレーティング(Fiber Bragg Grating: FBG)が挙げられる。Ge をドープした石英ガラス光ファイバのコアに紫外光を照射すると、光誘起屈折率変化(Photosensitivity)によりその屈折率が変化し、照射を止めた後も持続する。光ファイバグレーティングは、光ファイバのコアに位相マスク等により紫外光の干渉縞を形成して周期的な屈折率変化を書き込んだもので、回折格子(グレーティング)として、波長選択デバイスとしての機能をもたせることができる。干渉縞の周期は約 500nm 程度である。グレーティングが光ファイバ中に非破壊的に直接形成できるため、低損失・小型・高信頼性・偏波無依存・伝送用光ファイバとの整合性、などの多くの利点をもっている。

光ファイバグレーティングのなかでも特に WDM 伝送に適しているのが、スーパーストラクチャ光ファイバグレーティング(Super Structure Fiber Bragg Grating: SSFBG)と呼ばれるものである。これは、短いグレーティングを等間隔で離散的に作製することにより、くし(コム)形の反射フィルタを形

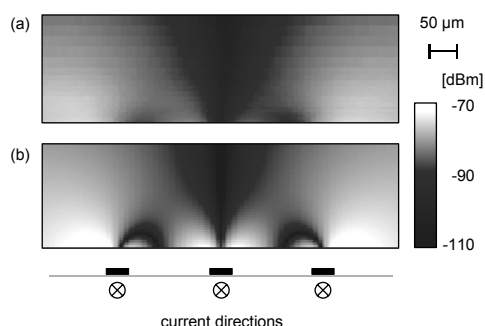


図 11 磁気光学プローブによる RF 磁界分布のマッピング

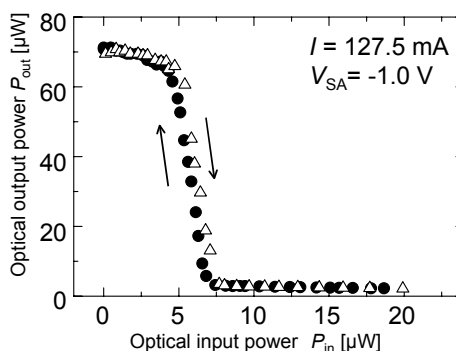


図 12 全光インバータの入出力特性

成できるものである。しかしながら、この SSFBG を大容量化する高密度 WDM 光ネットワークに合わせて広帯域化・高密度化するためには、数十 cm 以上という非常に長い SSFBG 長が必要となる。このような長い SSFBG は安定性の面で問題があり、またグレーティングが書き込まれていない部分が多くなるため光ファイバ自体の利用効率も低く、さらに長い SSFBG の作製も位相マスクを用いる従来の方法では困難であった。これを解決するために、本研究ではグレーティングが書き込まれていない部分に一樣な紫外光を照射して多点位相シフト(Multiple Phase Shift, MPS)を与えることにより、数 cm の長さのままで SSFBG を高密度化する画期的な技術(図 13)を開発した。

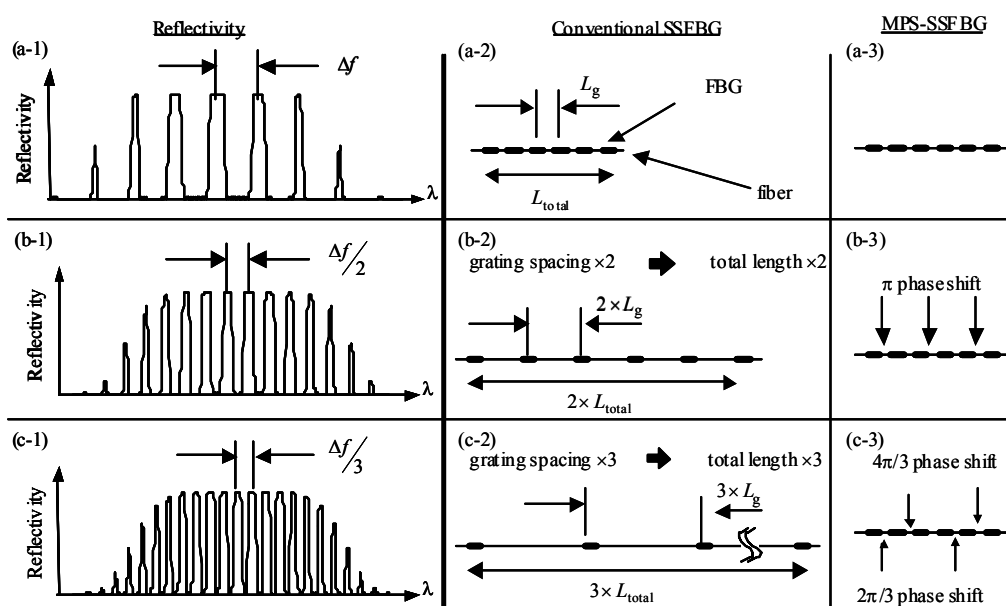


図 13 位相シフト法による SSFBG の高密度化の原理

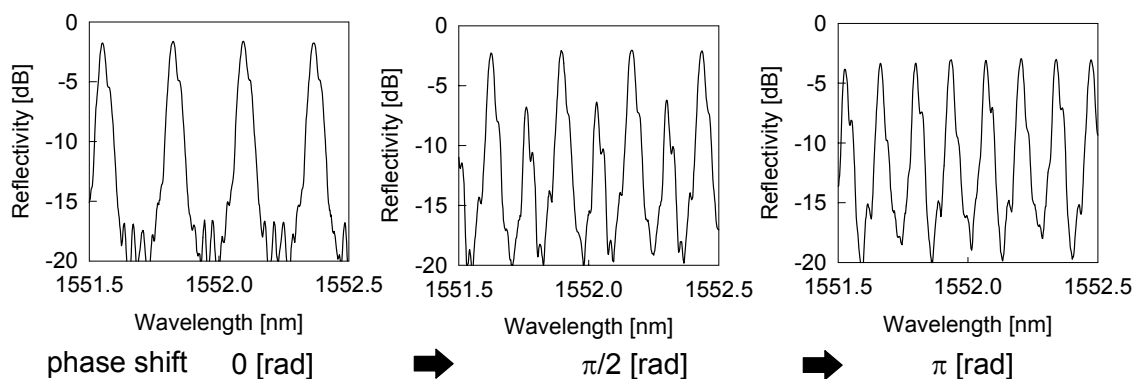


図 14 位相シフト法による 2 倍の高密度化

本研究テーマでは、この多点位相シフト法をシミュレーションおよび実験で実証した(図 14)。さらに、単純な SSFBG であるサンプルド光ファイバグレーティングだけではなく、アポダイスやチャープなど複雑な SSFBG にも多点位相シフト法が適用可能であることをシミュレーションおよび実験で実証した。また、SSFBG を長尺化する方法として、位相マスクを走査しながら FBG を形成し、その後 FBG 間の位相調整を行う位相マスク走査法を提案した。これをシミュレーションおよび実験で実証した。

## (2) 全光型半導体再生中継器

将来の WDM 光ネットワークで重要な全光型信号処理デバイスとして、新しい全光型再生中継器を提案している。これは半導体 DFB レーザの注入同期を利用して波形が劣化した強度変調光を波形が等化された周波数変調光に変換し、さらに狭帯域光フィルタにより波形が等化された強度変調光を得るものである。速度の限界は緩和振動により決定されるが、バイアス光の注入によりかなり回避できることを示した。さらに、緩和振動が抑圧でき、かつ光フィルタリングが容易なサイドモード注入同期法により、2.5Gb/s の信号をエラーフリーで再生することに成功した。

さらに高速化を狙うために、2 サイドモード注入同期法を提案した。これは、図 15 のように、信号光とは別の CW プロブ光を半導体 DFB レーザのサイドモードに入れる方法で、理論的検討の結果、さらなる緩和振動の抑圧が期待されることがわかった。実験により、5Gb/s のランダムパターン信号の波形整形に成功した(図 16)。

## 3. 研究実施体制

### (1) 中野グループ

- ① グループ長: 中野義昭 東京大学工学系研究科、教授
- ② 研究項目: 人工光物性に基づくデジタル光デバイスの研究

### (2) 霜垣グループ

- ① グループ長: 霜垣幸浩 東京大学工学系研究科、助教授

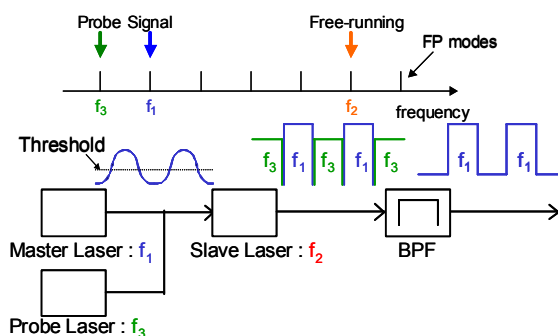


図 15 LD の 2 サイドモード注入同期による波形整形

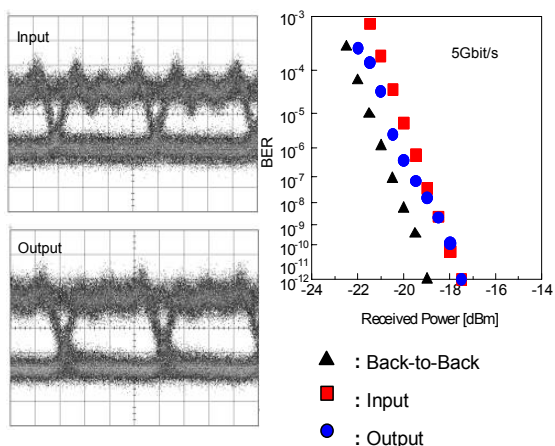


図 16 2 サイドモード注入同期による波形整形実験結果

- ② 研究項目:単原子層 MOVPE/集積プロセス技術の研究
- (3) 田中グループ
- ① グループ長:田中雅明 東京大学工学系研究科、助教授
- ② 研究項目:人工光磁性体材料/スピン機能光デバイスの研究
- (4) 土屋グループ
- ① グループ長:土屋昌弘 東京大学工学系研究科、助教授
- ② 研究項目:光物理と光システムの研究
- (5) 山下グループ
- ① グループ長:山下真司 東京大学新領域創成科学研究科、助教授
- ② 研究項目:ファイバハイブリッドデジタル光デバイスの研究

#### 4. 研究成果の発表

##### (1) 論文発表(公開)

- 清水大雅、宮村信、田中雅明, "MnAs ナノクラスターと GaAs/AlAs 半導体 DBR からなる多層膜における磁気光学効果の増大", 日本応用磁気学会誌 Vol.25 No.4-2, pp.655-658 (2001).
- H. Shimizu and M. Tanaka, "Magneto-Optical Properties of Semiconductor-Based Superlattices having GaAs with MnAs Nanoclusters", J. Appl. Phys. 89, pp. 7281-7283 (2001).
- S. Sugahara and M. Tanaka, "Atomic-Scale Surface Morphology of Epitaxial Ferromagnetic MnAs Thin Films on Vicinal GaAs(111)B Substrates", J. Appl. Phys. 89, pp. 6677-6679 (2001).
- H. Saito, W. Zaets, Y. Mishima, M. Tanaka, R. Akimoto and K. Ando, "Magnetic and transport properties of a new III-V diluted magnetic semiconductor Ga<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>As", J. Appl. Phys. 89, pp.7392-7394 (2001).
- J. Okabayashi, A. Kimura, O. Rader, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Hayashi, and M. Tanaka, "Electronic Structure of GaMnAs Studied by Angle-resolved Photoemission Spectroscopy", Physica E10, pp.192-195 (2001).
- H. Shimizu, M. Miyamura, and M. Tanaka, "Magneto-optical effect in a Semiconductor-based Magnetic Microcavity", Proc. of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors, Osaka 2000 (Eds. N. Miura and T. Ando, Springer), pp.1711-1712 (2001).
- J. Okabayashi, A. Kimura, O. Rader, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Hayashi, and M. Tanaka, "Electronic structure of Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As studied by photoemission spectroscopy", Proc. of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors, Osaka 2000 (Eds. N. Miura and T. Ando, Springer), pp.262-263 (2001).

- M. Tanaka, H. Shimizu, and M. Miyamura (Invited paper), “Enhancement of Magneto-optical Effect in a GaAs:MnAs Hybrid Structure Sandwiched by GaAs/AlAs Distributed Bragg Reflectors: Epitaxial Semiconductor-based Magneto-photonic Crystal”, *J. Cryst. Growth*, 227/228, pp.839–846 (2001).
- M. Tanaka and K. Takahashi, “Ferromagnet (MnAs)/semiconductor (GaAs, AlAs, InAs)/ferromagnet (MnAs) trilayer heterostructures: Epitaxial growth and magnetotransport properties”, *J. Cryst. Growth*, 227/228, pp.847–851 (2001).
- M. Tanaka and Y. Mishima, “Low Temperature Molecular Beam Epitaxy Growth and Properties of (Ga,Er)As”, *J. Cryst. Growth*, 227/228, pp.857–861 (2001).
- Ahsan M. Nazmul, A. G. Banskchikov, H. Shimizu, and M. Tanaka, “MBE growth process of ferromagnetic MnAs on Si(111) substrates”, *J. Cryst. Growth*, 227/228, pp.874–881 (2001).
- J. Okabayashi, A. Kimura, O. Rader, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Hayashi and M. Tanaka, “Angle-Resolved Photoemission Study of Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As”, *Phys. Rev. B* 64, pp.125304/1–4 (2001).
- S. Ohya, H. Shimizu, Y. Higo, J. M. Sun and M. Tanaka, “Growth and properties of quaternary alloy magnetic semiconductor (InGaMn)As”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 41, L24–L27 (2002). <http://arXiv.org/pdf/cond-mat/0111163> (2001).
- A.M. Nazmul, S. Sugahara, and M. Tanaka, “Transport Properties of Mn delta-doped GaAs and the effect of selective doping”, *Appl. Phys. Lett.* 80, pp.3120–3122 (2002).
- M. Tanaka (Invited paper), “Ferromagnet (MnAs) / III-V Semiconductor Hybrid Structures”, Special Issue on Semiconductor Spintronics, *Semiconductor Science and Technology* 17, No.4, pp. 327–341 (2002).
- 田中雅明, “半導体スピノエレクトロニクス”, 日本応用磁気学会第121回研究会「スピノエレクトロニクスの現状と将来展望」研究会資料 121-2, pp.5-10 (2001).
- 清水大雅、田中雅明, “III-V 族半導体中に形成された MnAs ナノクラスター構造の磁気光学効果と半導体導波路型光アイソレータへの応用”, 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-02-30, pp.11-15, (2002).
- アーサン M. ナズムル、菅原聡、田中雅明, “Mn デルタドープ GaAs をベースとした半導体ヘテロ構造の物性と高い強磁性転移温度 (~170K)”, 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-02-31, pp.17-21, (2002).
- Masumi Saitoh, Mitsuru Takenaka, Byongjin Ma, and Yoshiaki Nakano, “All-optical wavelength conversion using a Fabry-Perot semiconductor optical amplifier”, *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E84-C, no. 12, pp. 1975–1978, December 2001.
- T. Yoshida, T. Hoshida, Y. Nasu, M. Kishi and M. Tsuchiya: Experimental Investigation on Carrier Dynamics in SCH-MQW Waveguide Saturable Absorber of Passively Mode-locked Monolithic Laser Diode, *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 33, Issue 7/10, pp. 735–743

(July 2001).

- M. Tsuchiya, K. Igarashi, R. Yatsu, K. Taira, K. Y. Koay and M. Kishi: Sub-100 fs SDPF optical soliton compressor for diode laser pulses, *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 33, Issue 7/10, pp. 751-766 (July 2001).
- K. Igarashi, M. Kishi and M. Tsuchiya: Higher-Order Soliton Compression of Optical Pulses from 5 ps to 20 fs by a 15.1 m-long Single-Stage Step-like Dispersion Profiled Fiber, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 40, Part 1, No. 11, pp. 6426-6429 (November 2001).
- M. Tsuchiya, K. Igarashi, S. Saito and M. Kishi: Sub-100 fs higher order soliton compression in dispersion-flattened fibers, *IEICE TRANSACTIONS on Electronics*, Vol.E 85-C, No.1, pp.141-149 (January 2002).
- E. Yamazaki, S. Wakana, M. Kishi and M. Tsuchiya: 10 GHz-Class Magneto-Optic Field Sensing with BiRIG Rotation Magnetization Employed, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.41, Part 1, No.2A, pp.904-907 (February 2002).
- Y. Takita, Y. Ozeki, M. Kishi and M. Tsuchiya: Compact All-Optical Inverter of Extremely Abrupt Switching Characteristics with Dual-Mode Semiconductor Laser Employed, *Electronics Letters*, Vol.37, No.25, pp.1544-1545 (December 2001).
- K. Igarashi, S. Saito, M. Kishi and M. Tsuchiya: Broadband and extremely flat super-continuum generation via optical parametric gain extended spectrally by fourth-order dispersion in anomalous-dispersion-flattened fibers, Special issue on Nonlinear Optics of *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, accepted for publication.
- 神谷武志, 土屋昌弘: 超高速フォトニクス, *応用物理*, Vol. 70, No.11, pp. 1271-1280 (November 2001).
- 土屋昌弘, 山崎悦史, 若菜伸一, 岸 真人: 光ファイバ端磁気光学(FEMO)プローブによる微小領域マイクロ波帯磁界分布測定, *日本応用磁気学会誌*, Vol.26, No.3, pp.128-134 (March 2002).
- K. Hsu and S. Yamashita, "Single-polarization generation in fiber Fabry-Perot laser by self-injection locking in short feedback cavity," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol.19, no.4, pp.520-526, Apr. 2001.
- S. Yamashita and T. Baba, "Spacing-tunable multiwavelength fiber laser," *IEE Electronics Letters*, vol.37, no.16, pp.1015-1017, Aug. 2001.
- S. Yamashita and K. Hsu, "Active mode-locking of miniature fiber Fabry-Perot laser (FFPL) in a ring cavity," *IEE Electronics Letters*, vol.37, no.18, pp.1115-1116, Aug. 2001.
- Y. Nasu and S. Yamashita, "Multiple-phase-shift superstructure fiber Bragg grating for DWDM systems," *IEE Electronics Letters*, vol.37, no.24, pp.1471-1472, Nov. 2001.

(2) 特許出願

国内 3 件、外国 2 件