

「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 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

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、デジタルフォト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。

平成14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を含む半導体導波路型光アイソレータの提案と解析、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カー効果の増大、四元混晶強磁性半導体(InGaMn)Asにおける強磁性転移温度の高温化、AlN/GaN多重量子井戸のMOVPE成長と1.6 $\mu$ m帯サブバンド間遷移光吸収の実現、InGaAsP歪超格子のパルスYAGレーザ誘起無秩序化を利用した発振波長トリミング、方向性結合双安定レーザによる全光フリップフロップ、光ファイバ内パラメトリック過程の極限性能の解明、光ファイバ無線システムにおける新たな光変調器駆動技術、光ファイバ型可変光波機能回路、高効率光ファイバ波長変換器とその応用、多波長モード同期光ファイバレーザ、高密度光ファイバグレーティング(FBG)、および全光型半導体再生中継器の研究を行って、3項に詳述する成果を挙げた。

今後は、MOVPE選択成長集積化のためのTCAD技術開発と応用、原子層レベル界面制御技術の窒化物系材料への拡張、GaN/AlNサブバンド間遷移全光スイッチの作製、結合量子井戸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、半導体光アンプを基にした光フリップフロップ等デジタル光デバイスの試作・高速化、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(光アイソレータ)、高度ファイバブラッグ格子デバイスの研究を行うとともに、これらの開発デバイスを応用したサブシステム実証実験に重心を移して行く予定である。

## 2. 研究実施内容

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、デジタルフォトニクス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。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れ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。

平成14年度は前年度に引き続き、InP、GaAs成長における選択成長において、V族原料ガスの種類と濃度の影響を考察し、製膜種の付着確率に及ぼす影響を検討した。また、InGaAsなど、3元系の検討も行った。実験は基板(InP、GaAs)上にSiO<sub>2</sub>膜をスパッタリングを用いて形成してマスクとし、その上にInP、GaAsの成長を行った。成長した膜の成長速度分布は、表面形状プロファイラ及びAFMを用いて測定した。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。その結果、InP、GaAs成長において、V族原料ガスにTBAs、TBPなどの有機原料を用いるとAsH<sub>3</sub>、PH<sub>3</sub>を用いた通常のMOVPE成長に比べ、In製膜種とGa製膜種の付着確率の差が小さくなるという効果を観測できた。このことは、有機V族原料を用いると、In/Ga比が成長領域において変化しにくくなるということを意味しており、モノリシック集積回路作製により適した反応系であることが分かった。また、InGaAsなどの3元系結晶成長を行い、選択成長領域のIn/Ga比分布をEPMAを用いて観測した。測定結果とInP成長から求めたIn製膜種付着確率、GaAs成長から求めたGa製膜種付着確率を元に行ったシミュレーション結果とは良く一致する結果

を得た。このことから、FEMLABなどの3次元シミュレーションツールを用いてモノリシック光集積回路作製のマスクパターンを論理的に設計できるTCADツールの構築に見通しが立った。平成15年度以降も引き続き付着確率の面方位依存性などを検討し、光集積回路作製ツールとしての選択成長技術のより一層の高度化に努める予定である。

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

InGaP/GaAsはHEMTなどの高速電子デバイスとして応用開発が急速に進展している材料系であるが、V族原子が異なる材料系であるため、V族原子の相互拡散による界面急峻性劣化が問題となる。MOVPEによるヘテロ界面形成では、ガス供給切り替えシーケンスが急峻性確保において重要な役割を果たすが、本研究では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効果を検証している。その結果、InGaP成長からGaAs成長に切り替える際には表面にIn過剰層が存在し、InがGaAs内に拡散、表面偏析することを見出し、ガス切り替え時にGa原料であるTMGaを余分に流すシーケンスを採用して改善効果を得ることができた。

平成14年度はInGaP成長中におけるIn表面過剰層とInGaP自然超格子の制御を目指した検討を行った。まず、1000nm程度のInGaP厚膜成長を行い、XPSおよびArイオンスパッタによる深さ方向分析を行った結果、表面から100nm程度までIn過剰な層が形成されていたことがわかった。また、最表面にはGaがほとんど検出されず、InPとなっていることも確認できた。前年度の検討結果においてもIn過剰層は成長膜厚の10%程度存在するという結果を得ており、InGaP成長では常にIn過剰な表面層が存在することが示唆される。また、その過剰層の厚みが成長に伴って厚くなることから、固体基板とガス相との間に液体のような凝縮層が介在し、気相から凝縮層へのIn取り込み確率と凝縮層から固相への取り込み確率が異なるために表面のIn組成が過剰になっていくものと考えられる。このような考察のもと、InGaP連続成長中にInおよびP原料の供給をon/offするシーケンスを採用してIn過剰層の生成を抑制することを試みた結果、欠陥の多い結晶成長となってしまった。他にも、GaPやInさらにはInPの単独供給などをおこなったが、表面偏析の抑制・低減には繋がらなかった。InおよびGa原料をon/offする、すなわち、P原料のみを流している時間を間歇的に設けることによって、InGaPの表面過剰層の形成を抑え、かつ良質なエピタキシャル成長を実現することができた。このことは、最表面のInをPにより終端することによって表面偏析を抑制することができたためではないかと考えている。平成15年度以降も引き続き検討を行う予定である。

#### ☆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を含む半導体導波路型光アイソレータの提案と解析

半導体/磁性体複合構造を用いた光アイソレータへの応用として、MnAsクラスターの横磁気カー効果を用いた損失補償型の導波路型光アイソレータの提案と解析を行った。損失補償型の導波路型光アイソレータは、磁気光学層を含む半導体光増幅器における磁気光学効果による非相反な損失/利得を利用したものである。GaAs/AlAsなど非磁性III-V族ヘテロ構造との整合性に優れるというMnAsクラスター構造の特長を活かして、MnAsクラスター

を含む磁気光学導波路の非相反屈折率変化を利用した光アイソレータの設計を行い、Maxwell方程式による解析の結果、TMモード光に対して120dB/cmの消光比が得られることを明らかにした。また従来の損失補償型の導波路型光アイソレータではTEモードに対して動作しないことが問題の一つになっていたが、本研究ではTEモード光に対してもアイソレータ動作が実現可能なデバイス構造を提案し、理論計算によりTEモード光に対して36dB/cmの消光比が得られることを明らかにし、TEモードとTMモードに対して同時にアイソレータ動作を実現することにより、偏波無依存型の導波路型光アイソレータを実現できると予測した。MnAsクラスターは良質な半導体ヘテロ構造の再成長が可能であることから、より柔軟な磁気光学デバイス構造の設計が可能であり、本研究で提案した導波路型光アイソレータの特長を理論的に示した。

(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カー効果の増大

半導体レーザや光導波路など光エレクトロニクス・デバイスの主材料であるIII-V族半導体GaAsをベースとした磁性層GaAs:MnAsナノクラスター材料を作製し、その両端をGaAsおよびAlAsから成る分布ブラッグ反射鏡(DBR, Distributed Bragg Reflector)で両端を挟み込むことによって、半導体ベース材料でありながら反射において大きな磁気光学効果を有する多層構造の設計と作製を行った。設計と理論計算に基づき分子線エピタキシーにより作製したDBR/GaAs:MnAs/DBRからなる多層構造は、室温で所望の波長においてIII-V族半導体ベース材料としては最大級(約700mdeg)の磁気光学効果(カー効果)を示した。磁性層GaAs:MnAs層は比較的大きな消光係数を持つために、磁気光学効果の増大に伴い、その反射率は減少する傾向にあるが、非相反屈折率変化を用いた半導体導波路型光アイソレータなど、光の損失を電流注入によって補償することができる半導体デバイスとの融合により、従来型の磁気光学デバイスとは異なるユニークな応用可能性が期待できる。

(3) 四元混晶強磁性半導体(InGaMn)Asにおける強磁性転移温度の高温化

前年度の研究で、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ていたが、本研究では強磁性転移温度を20-30K程度から130Kまで飛躍的に上げることができた。これは、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の材料である。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。Mn濃度を21%、In/Ga組成が53%/47%、膜厚が20nm以下の時、強磁性転移温度  $T_c$  が最高で130 Kを示した。この温度はInAs、InGaAs系磁性半導体としては最高値である。また、 $T_c$ 以下で極めて大きな磁気光学効果(カー効果)を観測した。スペクトル形状から、バンド構造がzinc blende型であることを明らかにした。

☆人工光物性に基づくデジタル光デバイスの研究

(1) AlN/GaN多重量子井戸のMOVPE成長と1.6  $\mu$ m帯サブバンド間遷移光吸収の実現

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光子制御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多重量子井戸構造を用いてこれを行うことを当初から計画しており、平成13年度までに結晶成長条件を最適化して、クラックフリーの多重量子井戸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を得た。平成14年度には、サブバンド間遷移(ISBT)光吸収を得ることに成功し、MOVPE成長窒化物系量子井戸におけるISBT光吸収波長の世界記録(2.9  $\mu\text{m}$ )を大幅に塗り替える世界最短波長(1.68  $\mu\text{m}$ )を達成した。成功の鍵は、結晶の品質を保つため、一定周期毎にGaN層間膜を挿入したことである。成長試料において吸収スペクトルを測定した例を図1に示す。GaN/AlN多重量子井戸において、1.68  $\mu\text{m}$ での光吸収が確認される。特筆すべきはその吸収半値幅の狭さで、従来のMBE成長窒化物ISBT構造のそれに比べ格段に狭く(28meV)、世界で初めてISBT本来の急峻なスペクトルが得られたものと考えている。これより、本研究においてこれまで開発してきた界面制御技術の優秀性が示された。また、成長温度、成長圧力、成長種など、MBEとMOVPEの成長条件の違いによるところも大きいと考えられる。平成15年度は、上記の成長メカニズムについて研究を進めると同時に、光通信波長である1.55  $\mu\text{m}$ でのISBTの実現に注力し、それを用いた全光スイッチデバイスの試作に研究を展開して行く。

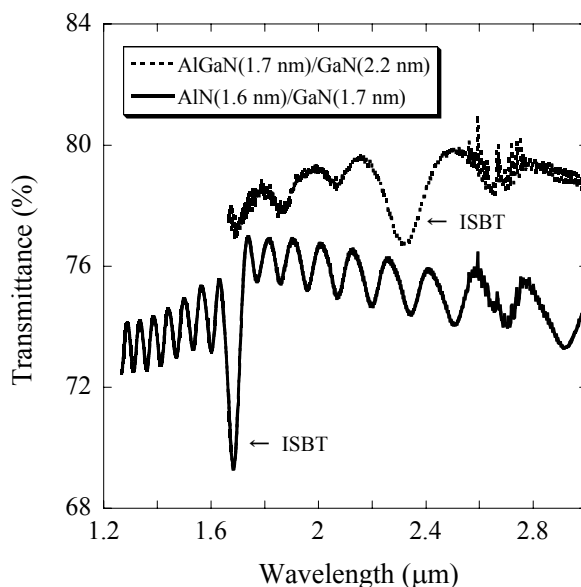


図1 GaN/Al(Ga)N多重量子井戸の光透過スペクトル

## (2) InGaAsP歪超格子のパルスYAGレーザー誘起無秩序化を利用した発振波長トリミング

平成14年度成果のハイライトの一つは、InGaAsP歪超格子のパルスYAGレーザー照射による無秩序化を利用して、5波長利得結合(GC)分布帰還型(DFB)半導体レーザーアレイの発振波長トリミングに成功したことである。InGaAsP圧縮歪超格子の屈折率は、無秩序化により大きく上昇する。このような屈折率調整層をDFBレーザーの活性層近傍に設け、外部からレーザー光照射により適切な量だけ無秩序化を生じさせれば、発振波長をレーザー作製後に微調節

することが可能となる(発振波長トリミング)。ここでは、 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯InGaAsP GC DFBレーザにInGaAsP歪超格子トリミング層を導入した5波長アレイを作製し、パルスYAGレーザーによるトリミングを施して、作製直後のWDM波長チャンネル間隔誤差を消去することができることを世界で初めて実証した(図2)。

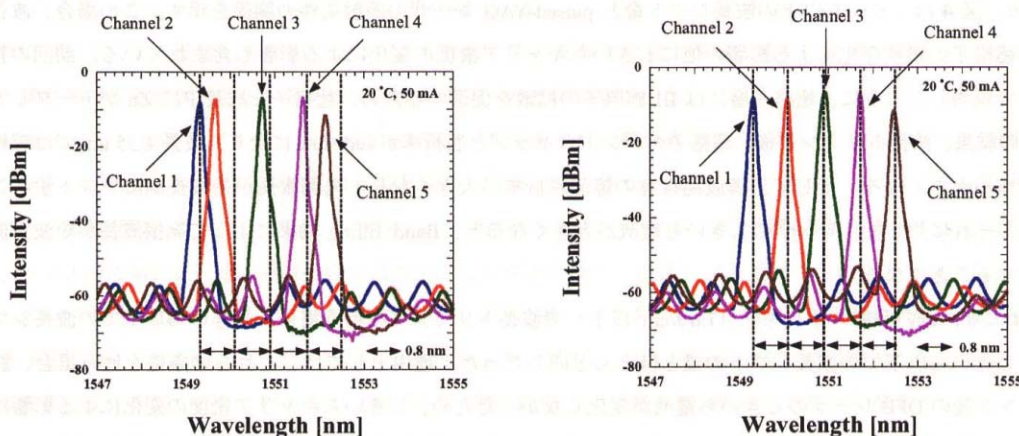


図2 5波長GC DFBレーザアレイの波長トリミング前後の発振スペクトル

### (3) 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14年度までに、方向性結合双安定半導体レーザ構造による全光フリップ・フロップの提案、動作特性解析および試作プロセスの準備を行った。平成14年度はこれらを受けて、全光フリップフロップデバイスの試作を実際に行った。図3に素子の構造概念図を示す。前年度に開発した電極分離プロセスを適用し、主共振器部とリセットポートとを独立に電流バイアスできるようになっている。また、可飽和吸収部も独立バイアス可能な構造とした。活性層は圧縮歪InGaAsP多重量子井戸である。試作素子の上面チップ写真を図4に示す。

試作素子において、全光フリップフロップ動作静特性を測定評価した。その結果を図5に示す。前年度までに理論で予測した通りの全光セットリセットフリップフロップ動作が確認された。制御に必要な光パワーもセット時6dBm、リセット時-3dBmと小さく、これらは数dB程度の結合損失を含んでいる値なので、実際に必要な光パワーはこれよりさらに小さい。平成15年度は、素子の超小型化、低消費電力化、動作速度向上を目指して、研究を進めて行く。

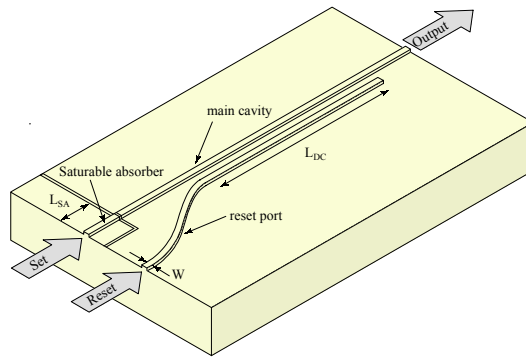


図3 試作した全光フリップフロップの構造概念図

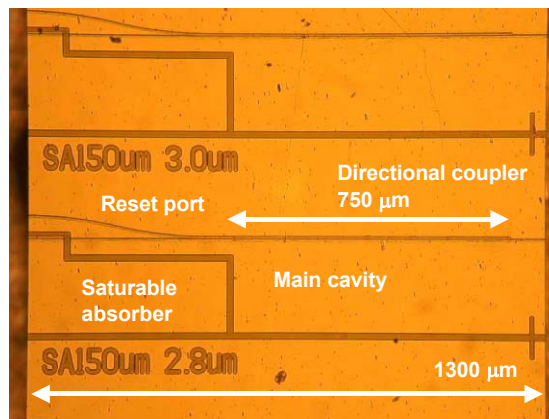


図4 チップ上面の光学顕微鏡写真

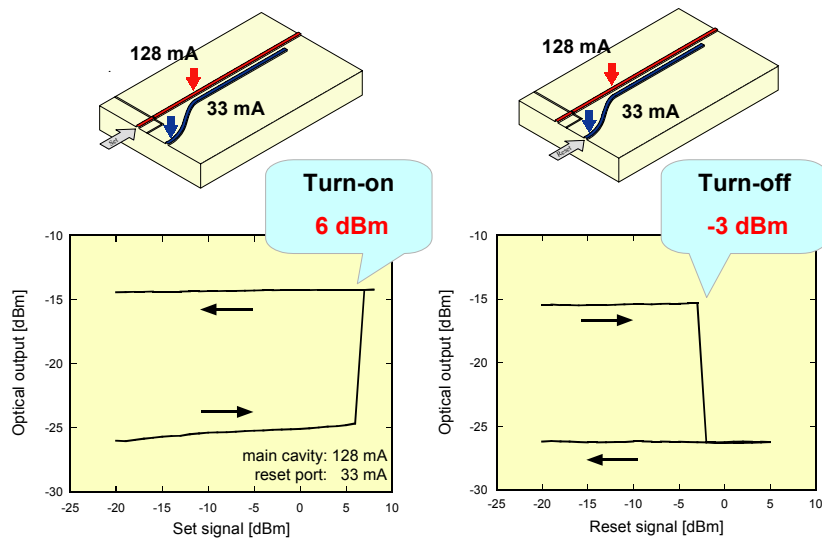


図5 全光フリップフロップ動作実証

☆光物理と光システム

中野チームにおける研究計画の全体像を熟慮し、その中心的部分であるデジタルフォ

トニクスに係わるシステムと構成コンポーネントに対する先導的役割を分担するグループとして、次に記すようなデジタルフォトニクスの適用対象を守備範囲とする研究を実施した。即ち、将来のフォトニックネットワークに含まれ得るシステムやデバイスに注目し、これらの一部をその研究対象候補と位置付け、他グループで行なわれているデバイス試作研究や物性研究に対して、システム応用的見地から指針を与えることを目的とする研究である。

第一に、光ファイバ内のパラメトリック過程に着目し、その極限的性能を解明する研究を行なった。一般に、パラメトリック過程によって生ずる利得は波長変換や量子論的光信号処理を行なう際に活用されるもので、フォトニックネットワークの将来形を論ずる上で極めて重要な物理プロセスと位置付けることが可能である。しかしながら、従来、光ファイバパラメトリック利得は励起光の極近傍においてのみ発生するものと認識され、その狭帯域性が問題視されていた。

これに対して、当研究グループではロチェスター大学によって指摘されていた「分散平坦化光ファイバにおける異常分散特性とその四次分散によりもたらされる」広帯域パラメトリック利得に従来より注目していた。更には、ここ2、3年の研究によりその効果を実証することに成功している。平成14年度は、この超広帯域パラメトリック利得を利用する最初のデバイスとして、光パラメトリック発振器を構築し、その広帯域動作を実証した。より具体的には、半導体レーザパルスを用いたEDFA増幅した励起光を用い、10mWの分散平坦化光ファイバと光バンド透過フィルタおよびWDMカプラから成るリング共振器に対して光発振を駆動した。その結果、1400～1700nmという従来常識では考えられない超広帯域動作を実現することができ、本枠組みの有効性が検証された。この成果は、フォトニックネットワークにおけるノードを構成する際の光源技術に一石を投ずるものであり、パラメトリック信号処理全般に対する適用が期待される効果であるため、今後の展開が待たれるところである。

第二に、フォトニックネットワークシステムの一画を占めると予想されるファイバ無線に関する研究を行なった。フォトニックネットワークの中でも最も利用者に近い光ファイバを用いるファイバ無線技術では、最近、デジタル光通信網に対しての融合や住み分けという考え方がその重要度を増している。そのような中で、光ファイバ中光周波数資源の有効利用という観点と、光技術によりワイヤレス通信技術の革新を図るという考え方から、 $\text{LiNbO}_3$ -集積MZ型光変調デバイスの新たな駆動方法を提案し、その原理を確認する実験研究を行なった。従来、MZ型光変調器に対しては、受光後RF周波数が逡倍されるDSB-SC型変調方式と被変調光信号が光単側波帯構成となるOSSB型変調方式が別個にあり、それらの融合は不可能とされていた。これに対して、当研究グループでは、LN-集積MZ型変調器の入力回路構成と光バイアスを調整することによって、上述の2機能（周波数2逡倍機能と光単側波帯信号発生機能）を同時に実現できることを見出し、これを実験的手法によって確認した。実際、これを60GHz帯光ミリ波信号発生に適用し、156Mb/s 2チャンネルのQPSK信号を光変調器入力とし、受光後の復調により検出したところ、良好なI/Qダイアグラムが描か



れることを確認した。光ミリ波QPSK信号を周波数通倍作用を介して発生させた前例はなく、初めての実証として論文投稿中である。この成果には最近の進展が著しい集積MZ型光変調器の新駆動方法として一角を占めるとい位置付けが期待されるばかりか、光電波融合技術の最前線を形成するものとして今後の動向・展開が注目される。

#### ☆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

本年度は、光ファイバ型可変光波機能回路、高効率光ファイバ波長変換器とその応用、多波長モード同期光ファイバレーザ、高密度光ファイバグレーティング(FBG)、および全光型半導体再生中継器の研究を進めた。

光ファイバ型可変光波機能回路に関しては、遅延として偏波維持光ファイバ(PMF)の偏波モード間の遅延を利用し、分岐重み付けとしてPMFの側圧誘起偏波モード結合を利用した、可変かつ高機能な光トランスバーサルフィルタを提案した。ピエゾ素子を用いた荷重負荷装置を開発し、モード結合を2または3ヶ所誘起することによって、フラットトップな特性を持ち、かつチャンネル間隔可変なインターリーブフィルタを実現した。

高効率光ファイバ波長変換器に関しては、我々が提案した同期位相変調法を中間点スペクトル反転(MSSI)法による光ファイバの波長分散補償に用いたシステム実験を行った。従来方式に比べて変換効率が向上した分だけ雑音特性も向上することを示した。これにより、10Gb/sで200km以上の単一モード光ファイバ(SMF)伝送に成功した。また、位相変調器を2個使用していたのを、FBGによる反射型構成で1個にすることにより、更なる高効率化と変換器の簡素化にも成功した。

多波長モード同期光ファイバレーザについては、16チャンネルのAWGを片端のレーザミラーとしてもつ多波長モード同期光ファイバレーザを実現し、16チャンネルの全てから10GHz能動モード同期光パルスを得ることができた。

高密度FBGに関しては、我々が提案した多点位相シフト(Multiple phase shift, MPS)法によるサンプルFBGのチャンネル高密度化を、熱光学効果を利用することにより可変にする研究を行った。直径20mmのタングステン線を光ファイバのFBGが描かれていない部分に1回巻き、タングステン線に電流を流すことによりファイバに熱を与えた。電流を個々に制御することにより、2倍および3倍のチャンネル高密度化を実現できた。

全光型半導体再生中継器に関しては、従来我々が提案してきた注入同期法では緩和振動により動作速度に限界があった。そこで、高速化のためにCWプローブ光を半導体FPレーザのサイドモードに入れる2サイドモード注入同期法を提案した。実験により、波長分散により波形が歪んだSMF50km伝送後の10Gb/s信号の波形整形に成功した。

### 3. 研究実施体制

#### 中野グループ

① 研究分担グループ長：中野 義昭（東京大学 先端科学技術研究センター・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

#### 霜垣グループ

① 研究分担グループ長：霜垣 幸浩（東京大学 工学系研究科・助教授）

② 研究項目：単原子層MOVPE／集積プロセス技術の研究

田中グループ

① 研究分担グループ長：田中 雅明（東京大学 工学系研究科・助教授）

② 研究項目：人工光磁性材料／スピン機能光デバイスの研究

土屋グループ

① 研究分担グループ長：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

山下グループ

① 研究分担グループ長：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とシステム応用

#### 4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

##### (1) 論文（原著論文）発表

○ 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).

○ H. Shimizu and M. Tanaka, "Quantum size effect and ferromagnetic ordering in ultrathin GaMnAs/AlAs heterostructures", J. Appl. Phys. 91, pp. 7487-7489 (2002).

○ H. Shimizu and M. Tanaka, "Magneto-optical properties of a Si-doped GaAs:MnAs based magneto-phonic crystal operating at 1.55 micron", Physica E13, pp. 597-601 (2002).

○ A. M. Nazmul, S. Sugahara, and M. Tanaka, "Transport Properties and High Curie Temperature (172 K) of Mn-delta-doped GaAs with Selective p-type Doping", eprint <http://xxx.lanl.gov/pdf/cond-mat/0208299> (August 2002).

○ H. Shimizu and M. Tanaka, "Design of semiconductor-waveguide-type optical isolators using the non-reciprocal loss/gain in the magneto-optical waveguides having MnAs nanoclusters", Appl. Phys. Lett. 81, pp. 5246-5248 (2002).

○ H. Shimizu and M. Tanaka, "Design of semiconductor-waveguide-type optical isolators using the non-reciprocal loss/gain in the magneto-optical waveguides having MnAs nanoclusters", Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology, January 6, 2003., <http://www.vjnano.org/>

- G. Mahieu, P. Condet, B. Grandidier, J.P. Nys, G. Allan, D. Stievenard, Ph. Evert, H. Shimizu and M. Tanaka, "Compensation Mechanisms in Low-temperature Grown GaMnAs Investigated by Scanning Tunneling Microscopy", Appl. Phys. Lett. 82, pp.712-714 (2003)
- Ichitaro Waki, Chaiyasit Kumtornkittikul, Kentaro Sato, Yukihiro Shimogaki, and Yoshiaki Nakano, "Characterization of crack-free AlN/GaN multiple quantum wells grown by metalorganic vapor phase epitaxy using H<sub>2</sub> as a carrier gas", Physica Status Solidi (b), vol. 234, no. 3, pp. 961-964, December 2002.
- 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, Vol. 8, No. 3, pp. 521-526 (May / June 2002).
- E. Yamazaki, H. Park, S. Wakana, M. Kishi and M. Tsuchiya: Implementation of Magneto-Optic Probe with > 10 GHz Bandwidth, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.41, Part 2, No.7B, pp. L864 - L866 (July 2002).
- S. Saito, M. Kishi and M. Tsuchiya: Dispersion-flattened-fibre optical parametric oscillator for wideband wavelength-tunable ps pulse generation, Electronics Letters, vol. 39, No. 1, pp. 86-88 (January 2003).
- Y. Nasu and S. Yamashita, "Fabrication of long superstructure fiber Bragg gratings (SSFBG's) using a novel scanning phase-mask technique," Japanese Journal of Applied Physics (JJAP), vol. 41, part I, no.7B, pp.4790-4793, Jul. 2002.

(2) 特許出願

H14年度特許出願件数 : 1件 (研究期間累積件数 : 11件)