

「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

(東京大学先端科学技術研究センター 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15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。

### 2. 研究実施内容

#### ☆単原子層MOVPE／集積プロセス技術の研究

有機金属気相エピタキシャル成長(MOVPE)は、分子線エピタキシー法(MOCVD)と比較すると、原料を気体として導入するためにバレル型のように複雑な構造の反応器を用いて数十枚のウェハを一括して処理でき、量産性に優れたプロセスを構築できる。しかし、気相での原料ガスの分解、生成する中間体による表面反応など、その素過程は十分に解明されておらず、試行錯誤的な装置開発、プロセス最適化が行われているのが現状である。本

研究では、MOVPEの表面反応機構を理解し、単原子層レベルでの界面制御や選択成長を活用した光集積回路の一段合成などを実現することを目標としている。

平成15年度は前年度に引き続き、選択MOVPEプロセスの解析と選択成長マスクレイアウトの論理的設計を可能とするCADツールの構築、および、ヘテロ界面急峻性確保を目指したガス供給シーケンスの最適化を目指した検討を行った。

#### (1) InGaAsP系選択MOVPE成長解析

SiO<sub>2</sub>などの材料をマスクとしてMOVPE成長を化合物半導体基板上进行うと、マスク上には成長が起こらず、成長領域にはマスク側から薄膜成長物質が横方向に気相拡散ならびに表面拡散によって流入するため、マスクがない場合よりも成長速度が向上する。このとき、成長速度は成長領域周りのマスク面積を増大すれば加速されるので、マスク形状によって局所的に膜厚の異なるエピタキシャル成長層を得ることができる。量子井戸形成に応用すれば局所的に物性の異なるものを作りこむことが可能となる。従って、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。また、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など、反応機構解析手法としても活用できる。

平成15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、製膜種の付着確率の面方位依存性などを検討した。また、3次元シミュレーションが可能なFEMLABを用いて、光集積回路の微細化を目指したマスクパターンの最適化などを検討した。さらに、In系材料において顕著に観測されるマスク端での異常成長に対し、表面拡散の寄与を考慮した解析を行った。

付着確率の結晶面方位依存性に関しては有意な差があるものと思われるが、再現性を含めて詳細を継続検討中である。面方位を適切に選ぶことによって、InとGaの付着確率が制御でき、結果としてエピタキシャル成長層のIn/Ga比精密制御など、光集積回路作製技術の精度向上が期待できる。また、FEMLABを用いた3次元シミュレーションでは気相拡散のみを考慮したシミュレーションを行い、矩形パターンよりは逆三角形型のパターンを用いたほうが直線導波路における組成変化距離を短くでき、光集積回路を縮小・高集積化できることを示した。Inによる異常成長に関しては、上記シミュレーション技術をもとに、マスク上の製膜種濃度を一定に保ちつつ、マスク幅を系統的に変化させることが可能なパターンを考案し、マスク上の表面拡散の影響を実験的に探索を行っている。これらの検討はいずれも継続中であり、平成16年度に成果を取りまとめるべく、実験を計画している。

#### (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。前年度までの検討により、MOVPE成長最表面にはInなどの元素がエピタキシャル層を形成する以前の液体のように考えることのできる層 (サブサーフェイス) が存

在するものと考えに至り、この層の定量的把握と界面形成、表面偏析などへの影響を考察した。

III族原料ガスの間歇的な供給を行い、成長膜厚変化を考察した。III族供給時間を固定し、III族供給停止時間を系統的に変化させた場合には、成長膜厚はIII族供給停止時間(off時間)が長くなるとともに増加し、極大値を取った後に減少する傾向を見せた。これは、成長最表面にサブサーフェイスが存在し、off時間中にも継続的に薄膜成長に寄与する結果であると考えられる。また、off時間を長くすると成長膜厚が減少する傾向を示すのは、サブサーフェイスにより形成された最表面層の再蒸発も起こっていることを示している。また、サブサーフェイスの量は0.5ML相当程度であることが分かった。これらの知見をもとに、ヘテロ界面形成シーケンスの最適化、InGaPなどの偏析が顕著に起こる系の偏析抑制などに活用する予定である。

#### ☆人工光磁性材料／スピン機能光デバイスの研究

III-V化合物半導体中に直径数ナノメートルの強磁性金属MnAs微粒子が埋め込まれた構造をもつ薄膜(III-V:MnAsグラニューラー薄膜)を形成し、その光学特性および磁気光学特性を実験的・理論的に明らかにした。いくつかの理論モデルに基づき、透過、反射、ファラデーおよびカースペクトルを計算し、実験で得られたスペクトルと比較検討することにより、この系における磁気光学効果の起源を考察した。GaAs:MnAsグラニューラー薄膜は、室温で超常磁性または強磁性的振る舞いを示し、また、単位膜厚あたりの磁気光学効果も従来のガーネット系やCdMnHgTeに比べて大きいという利点を有している。しかし、その磁気光学特性の物理的起源については不明な点ばかりである。

我々はグラニューラー構造のホスト材料となる半導体を $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  ( $0 < y < 0.4$ ) およびInGaAsとしたIII-V:MnAsグラニューラー薄膜(III-V=AlGaAs, InGaAs)を作製し、強磁性MnAsナノクラスターが分散したグラニューラー薄膜におけるホスト材料の変化が磁気光学特性に与える影響を反射磁気円二色性(MCD)測定を用いて調べた。半絶縁性GaAs(001)基板上に低温MBE成長法によって膜厚300nmの $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{MnAs}$ 薄膜( $0 < y < 0.4$ , Mn濃度5.6 at.%)を成長し、その後 $\text{As}_4$ 雰囲気中において600°Cで5分間アニール処理を行った。

作製した試料の反射MCDスペクトルを図1に示す。ホスト材料の半導体をGaAsから $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ に変化させることによりMCDピークの分離と高エネルギー側へのシフトが観測された。高エネルギー側のMCDのピーク位置はホスト材料の半導体 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ のエネルギーギャップ付近(約1.6~1.9eV)に観測された。これは、過去のGaAs:MnAsグラニューラー薄膜の報告と一致する。さらに、ホスト材料の半導体をInGaAsに変えたInGaAs:MnAsグラニューラー薄膜ではMCDのピーク位置はGaAs:MnAsグラニューラー薄膜の場合より低エネルギー側にシフトすることが分かった。以上の結果から、グラニューラー構造のMCDスペクトルはホスト材料のバンドギャップに大きく依存することを示した。

さらに、誘電率を体積分率だけ重み付けした近似(Superpositional approximation; SA)と有効媒質近似(Effective-medium approximation; EMA)を用いGaAs:MnAsグラニ

ユラー構造の誘電率テンソルのモデル計算を行い、反射率スペクトルおよび磁気Kerr効果スペクトルの実験結果はSA近似を用いて説明できることを示した。透過率スペクトル、および、Faraday効果を測定し、既存のモデルで説明が可能であるかをどうか検討した。透過率スペクトルは、GaAsバンドギャップ（およそ1.4 eV）以上のエネルギーを有する光に対し、計算結果から大きくずれ減少する結果が得られた。透過MCDスペクトルについても、計算結果と異なるスペクトルが得られた。以上の結果から、GaAs:MnAsグラニューラー構造の光学特性、および、磁気光学特性は既存のモデルでは完全に説明することはできず、既存のモデルでは考慮されていない効果、例えばクラスター間の多重反射などが影響している可能性がある。

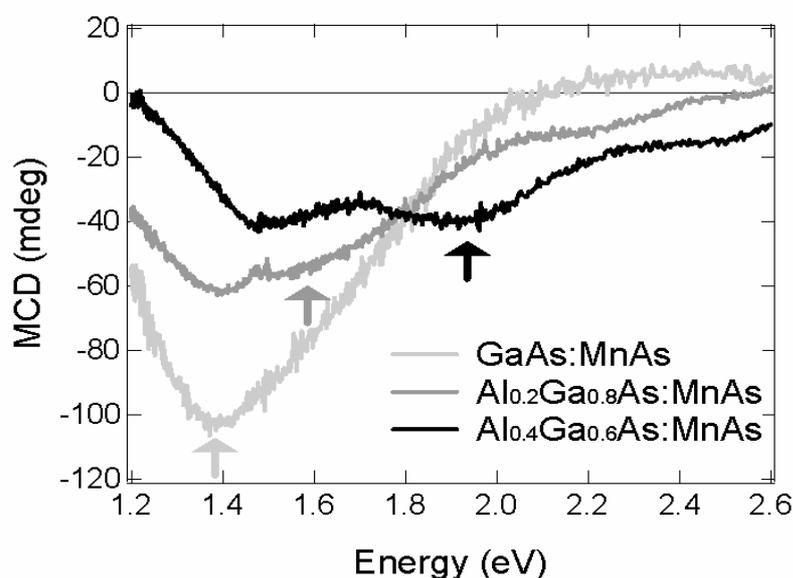


図1. 作製したAlGaAs:MnAsグラニューラー薄膜の反射MCDスペクトル  
(測定温度は室温、印加磁場は膜面に垂直方向に1Tである)

#### ☆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成長とドライエッチング光導波路の作製

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を達成した。平成15年度は、全光スイッチ作製

へのステップとして、GaN/Al(Ga)N多層積層構造のハイメサ導波路化を目指し、初期の成果を得た。

GaN系材料は極めて硬い材料系であるため、アスペクト比の高いハイメサエッチングやスムーズなエッチング側壁を得ることは一般に困難である。ここでは、誘導結合プラズマ(ICP)反応性イオンエッチングを用いることによって、GaN/Al(Ga)N多層構造の高アスペクト比、高速エッチングに成功した。エッチャントには塩素を用いたが、バイアス電力を上げかつArを付加的に導入することで垂直性の向上することが分かった。塩素流量8sccm、アルゴン流量2sccm、エッチング圧力7Pa、プラズマ源電力300W、バイアス電力175Wの時、垂直性、平滑性、エッチングレートのバランスが最も良くなることがわかり、その際のレートは152nm/分と比較的高速であった。図2に作製されたGaN/Al(Ga)N多重量子井戸ハイメサ導波路(幅4 $\mu$ m、高さ4.6 $\mu$ m)の断面電子顕微鏡写真を示す。平滑かつ垂直な側壁の得られていることがわかる。試作された導波路に波長1.55 $\mu$ mの光を導波させた結果を同図に示した。誘電体光導波路として良好な特性を有することが確認された。

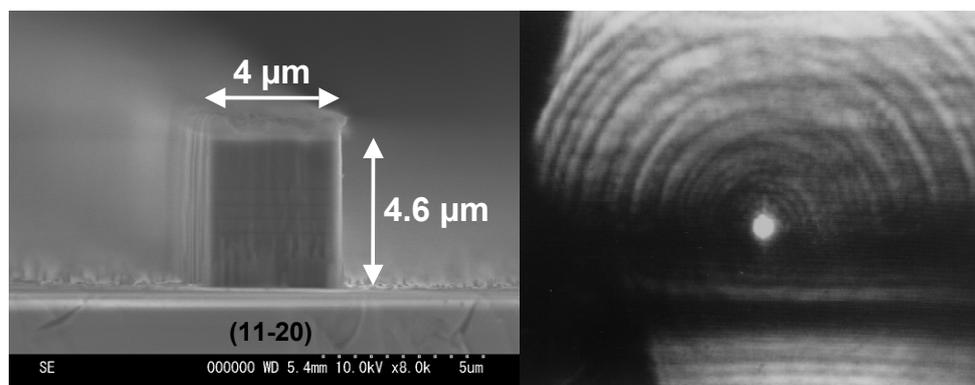


図2. GaN/Al(Ga)N多重量子井戸ハイメサ導波路断面電子顕微鏡写真と1.55 $\mu$ m導波光出射近視野像

## (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、特性評価を行った。平成15年度はこれらを受けて、小型化、動作電力低減化の試みを行った。

図3に新たに設計した素子のマスクデザインを示す。導波路間隔を1 $\mu$ mに狭めることにより、方向性結合器長を200 $\mu$ mまで短縮した。またセット・リセット制御光入射ポート間隔を20 $\mu$ mに狭めて導入部S字導波路長を250 $\mu$ mに短縮した。その結果、全素子長は1.3mmから500 $\mu$ mに小型化された。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。試作された改良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。動作電流は59mAと前年度に比べ半分に、また制御に必要な光パワーもセット時-3dBm、リセット時-9dBmと、それぞれ前年度の1/4に低減することに成功した。素子の小型化に伴い、動作速度は2倍に向上すると予測される。

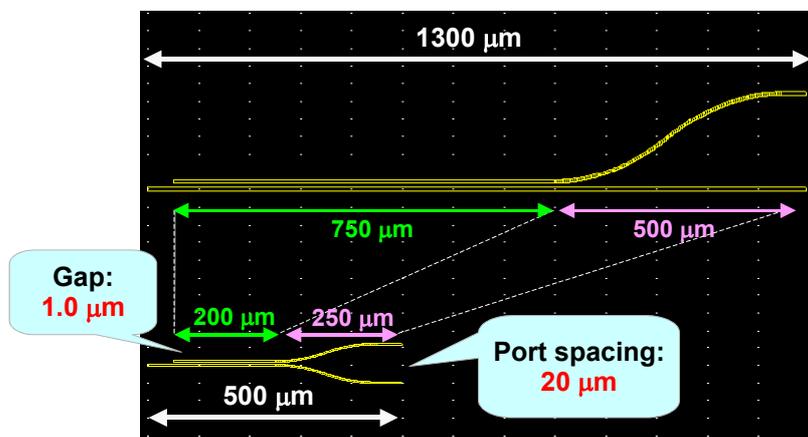
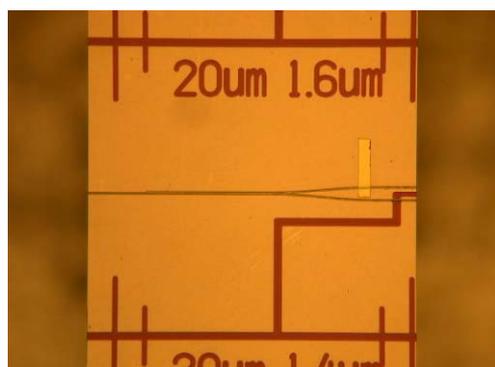


図3. 15年度試作方向性結合全光フリップフロップの改良マスクパターン



$$L_{\text{Total}} = 500 \mu\text{m}$$

$$L_{\text{DC}} = 200 \mu\text{m}$$

$$L_{\text{SA}} = 20 \mu\text{m}$$

図4. 改良チップ上面の光学顕微鏡写真

### (3) 多モード干渉結合器型双安定レーザによる全光フリップフロップ

前記の方向性結合器構造の全光フリップフロップよりも高速な動作が期待される、多モード干渉結合器双安定レーザ構造(MMI-BLD)の全光フリップ・フロップを研究した。図5に素子の概念図を示す。2×2のMMIレーザに可飽和吸収部を集積化した構造である。前出の全光フリップフロップに比べセット状態、リセット状態間でのキャリア密度分布の変化が小さいため、動作速度は40Gbpsを越えるものと予測される。InGaAsP圧縮歪み多重量子井戸を活性層に持つ同素子を、MOVPEその他の技術を駆使して試作した。試作チップの上面顕微鏡写真を図6に示す。

同素子において、全光セットリセットフリップフロップ動作検証を行った結果を、図7に示す。消光比10dB以上でかつ良好な立ち上がり、立ち下がりのセットおよびリセットラッチング出力の得られていることがわかる。現在、同素子の縦続接続を可能にする新たな

端面構造を研究中である。

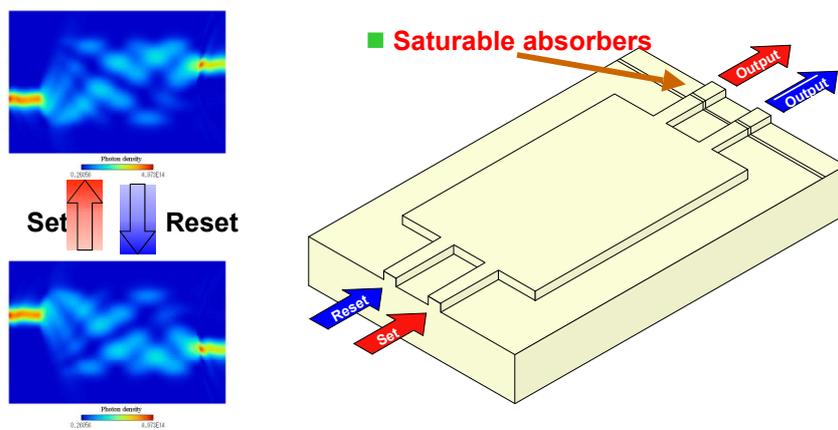


図5. MMI-BLD型全光フリップフロップの概念図

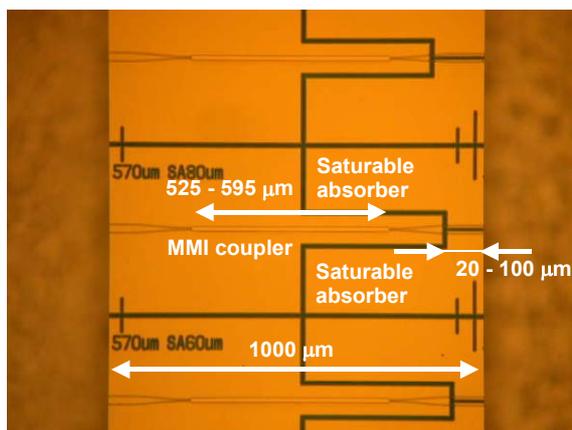


図6. MMI-BLDチップ上面の光学顕微鏡写真

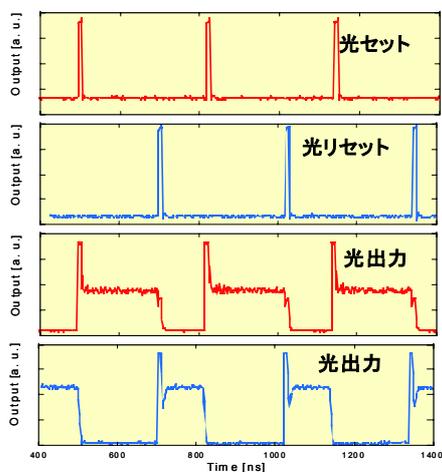


図7. MMI-BLD全光セットリセットフリップフロップ動作

## ☆光物理と光システム

将来フォトニックネットワークでは、超大容量幹線系のネットワーク技術だけではなく、利用者に近いネットワークでの小型軽量ルーティング技術が重要になるものと予測される。しかしながら、現在、このような要求に堪えうる基盤技術は存在しない。ハイエンドを目指す技術は多々あるものの、コスト的潜在力を熟慮した上でのデバイス研究は不十分である。

このような場面では、従来技術の延長線にある技術だけではなく、全く新しい観点からの革新的技術に着目すべきであると我々は考えた。シリコンフォトニクスはこの要請に応え得る可能性を秘めると思われる。集積回路におけるシリコンの優れた特性は周知のところであるが、これがフォトニクス分野にも適用されれば性能とコストとでの要求を両立できるフォトニクス技術が創成され得るであろう。

シリコンフォトニクスにおける重要課題のひとつは、光電子相互作用の拡充である。本質的に、シリコンは間接遷移型半導体であるため、フォトニクスデバイス素材としてこれを利用する際、種々の制約が生ずる。これに対しては、ポーラスシリコン、SiGe、Er添加シリコンなど様々な試みが行われているが、我々は、現在、鉄シリサイドβ相の光デバイス応用可能性に着目して研究を行っている。

鉄シリサイドβ相は、実際、LEDに適用されるなど、有望な材料の代表格である。しかしながら、β相鉄シリサイドを生成するためには数百度以上の高温プロセスが、しかも、長時間必要である。これは、光デバイスと他のデバイスとの集積させる技術において障害となり得る特性で、改善が強く望まれる。

これに対して、我々は、先行研究においてβ-FeSi<sub>2</sub>起因ラマン信号が377°C以下低温アニール処理した室温PLD（パルスレーザー法）試料に対して検出されることを発見している。ナノ寸法を含むドロップレットを注意深く分析したところ、β相特有のラマンシフトが確認されたのである。

平成15年度は、これを更に進展させ、ドロップレットの結晶構造と生成過程とを解明するために、断面TEM観察を行った。その結果、ドロップレット内部にβ-FeSi結晶構造（格子イメージ）が散見された他、興味深い知見が得られた。

Si(100)基板上に、FeSi合金(Fe:Si=1:2)ターゲットを用いて室温PLD堆積した。更に窒素雰囲気中にて600°C、2時間のアニール処理を施した。アニール温度をやや高めに設定しているが、今後は低温アニール試料に分析を拡張させる予定である。当該試料上に存在するドロップレットの中で、β-FeSi<sub>2</sub>ラマン信号が強く現れたもの(直径2.5μm、高さ1μm)に注目し、まさにそのドロップレットに対して断面TEM観察を行った。

図8がその結果である。図中のTEM像には次の特徴が明示されている：(1)ドロップレット内部はほぼ均質の連続体、(2)ドメインと境界の存在が確認される、(3)基板との界面は平坦、(4)結晶形成を示す格子像がTEM像内に確認される、(5)当該回折像の解析では、β相に近い格子乗数が算出された、(6)上記微細結晶の方位に着目したところ、シリコン基板とのエピタキシャル関係は認められない。

比較のためにアニールを施さないドロップレットに対して同様の観察を行ったところ、結晶構造は観測されなかった。また、 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>起因ラマン信号も検出されなかった。これらの結果から、アニールされたドロップレットには確かに $\beta$ 相が形成されているものと結論することができる。

今回はアニール温度がやや高めの600°Cを対象としたが、ラマン信号との対応から、400°C以下のアニールに対してもほぼ同様の内部構造が推察される。よって、低温PLD法が少なくとも低温 $\beta$ 相形成のためには有効な手法である旨、導かれる。

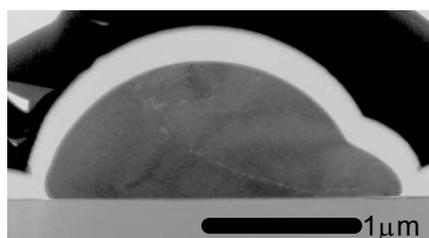


図8. PLDで堆積したドロップレットの断面透過電子顕微鏡像

#### ☆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

平成15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。 piezoelectric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。

本年度は、UV光照射による高機能石英系光導波路の作製、波長多重方式通信システムのための機能光ファイバブラッググレーティングの作製、リング上ファイバブラッググレーティングの変形を用いた可変分散補償器、非線形効果に基づく多波長光ファイバレーザ、および全光型半導体再生中継器の研究を進めた。

石英ガラススラブ導波路にUV光を照射することにより、機能性導波路の実現を目指した。まず、ブラッググレーティングと導波路の同時作製を行ない、TE/TMモードそれぞれに対して30%程度の反射率を持つ10mm長のブラッググレーティングを内包した導波路を実現した。また、長周期グレーティング導波路をUV光照射による導波路作製技術のみによって作製し、その応用として光合波器を実現した。

群遅延特性と楕型反射スペクトルをもつチャープサンプルFBGは多チャンネル分散補償デバイスへの応用が期待されるが、パラメータのバランスがとりにくいだけでなく、長さや屈折率変化の制限があるため高密度化も困難である。そこで、我々はシミュレーションを用いて、最適なパラメータを探し、その結果を利用しチャープサンプルFBGの作製に成功した。さらに、多点位相シフト法によって、チャープサンプルFBGの高密度化にも成功した。

リングをたわませたときに周上に生じる歪みを利用してFBGに変形を加えることにより、1つの補償器で異なるファイバの分散を補償できる可変分散補償器を実現した。この補償器は、リングのたわみ幅に比例した歪み分布が生じることを利用して、たわみ幅を制御することで異なる量の分散スロープに対応でき、また、FBGを曲げ配置することによって、あらゆる形状の波長分散に比較的容易に対応することができるという利点がある。実験により、リングのたわみ幅を変えることで歪み量を制御して双方の波長分散量に対応する分散スロープをFBGに生じさせ、これによって単一のFBG分散補償器による可変分散補償を実現した。

エルビウムドープファイバ増幅器と高非線形ファイバをリング共振器内に挿入することにより、波長域40nmにわたり10GHz間隔で488波長、100GHz間隔で51波長を常温で多波長発振させることに成功した。また、利得が均一であるにもかかわらず常温で多波長発振が実現できているのは、高非線形ファイバ中で起こる四光波混合が原因であることを、実験的・理論的に検証した。

全光型半導体再生中継器に関しては、光ファイバブラッググレーティング (FBG) を利用して、ファブリペロー半導体レーザ (FP-LD) の自己注入同期によって波形再生の研究を行った。信号波長1558.36nm、反射率約12%のFBGを用いて自己注入同期ファブリペロー半導体レーザによる波形再生の100kmシングルモードファイバ伝送を実現した。

### 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（東京大学大学院 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（東京大学大学院 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（東京大学大学院 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（東京大学大学院 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) 論文発表

- K. Torii and S. Yamashita, "Efficiency improvement of optical fiber wavelength converter without spectral spread using synchronous phase/frequency modulations," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol.21, no.4, pp.1039-1045, Apr. 2003.
- S. Yamashita and R. Hayashi, "Measurement of fiber chromatic dispersion using a mode-locked fiber laser," IEICE Transactions on Electronics, vol.E86-C, no.5, pp.838-841, May 2003
- Ichitaro Waki, Chaiyasit Kumtornkittikul, Yukihiro Shimogaki, and Yoshiaki Nakano, "Shortest intersubband transition wavelength (1.68  $\mu\text{m}$ ) achieved in AlN/GaN multiple quantum wells by metalorganic vapor phase epitaxy", Applied Physics Letters, vol. 82, no. 25, pp. 4465-4467, June 23, 2003.
- S. Nakadai, K. Higuma, S. Oikawa, M. Kishi and M. Tsuchiya: Generation of 60 GHz Dual-Mode Optical BPSK Signal Pair for Cross-Talk-Free QPSK Photo-Detection by Optical Modulation Scheme with Double RF Inputs and

Suppressed Carrier Feature, IEICE TRANSACTIONS on Electronics, vol. E 86-C, No. 7, pp.1245-1250 (July 2003)

- E. Yamazaki, S. Wakana, M. Kishi and M. Tsuchiya (Invited): High Frequency Magneto-Optic Probe Based on BiRIG Rotation Magnetization, IEICE TRANSACTIONS on Electronics, vol. E 86-C, No. 7, pp.1338-1344 (July 2003)
- S. Yamashita and K. Torii, "Polarization-independent, highly-efficient optical fiber wavelength converter without spectral spread using synchronous phase/frequency modulations," IEICE Transactions on Electronics, vol.E86-C, no.7, pp.1370-1373, July 2003.
- Mitsuru Takenaka and Yoshiaki Nakano, "Multimode interference bistable laser diode", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 15, no. 8, pp. 1035-1037, August 2003.
- 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).
- A. M. Nazmul, S. Sugahara, and M. Tanaka, "Structural and Transport Properties of Mn-delta-doped GaAs", J. Cryst. Growth 251, pp.303-310 (2003).
- M. Tanaka (Invited paper), "Spin-polarized Tunneling in Fully Epitaxial Semiconductor-based Magnetic Tunnel Junctions", Journal of Superconductivity; Incorporating Novel Magnetism 16, pp.241-248 (2003).
- S. Ohya, H. Yamaguchi, and M. Tanaka, "Properties of Quaternary Alloy Magnetic Semiconductor (InGaMn)As Grown on InP", Journal of Superconductivity; Incorporating Novel Magnetism 16, pp.139-142 (2003).
- A.M. Nazmul, S. Sugahara, and M. Tanaka, "Ferromagnetism and High Curie Temperature in Semiconductor Heterostructures with Mn-delta-doped GaAs and p-type Selective Doping", Phys. Rev. B67, pp.241308(R) 1-4 (2003).
- K. Ueda, H. Shimizu, and M. Tanaka, "Magneto-Optical Kerr Effect of Semiconductor-based Multilayer Structures Containing a GaAs:MnAs Granular Thin Film", Jpn. J. Appl. Phys. 42, L914-L917 (2003).
- S. Ohya, H. Kobayashi, and M. Tanaka, "Magnetic properties of heavily Mn-doped quaternary alloy magnetic semiconductor (InGaMn)As grown on InP", Appl. Phys. Lett. 83, pp.2175-2177 (2003).
- 上田和彦, 清水大雅, 田中雅明, "GaAs/AlAs DBRとMnAsナノクラスターを含む半導体積層構造の設計及び磁気光学物性", 日本応用磁気学会誌 27, pp.273-276 (2003).

- K. Ueda, H. Shimizu, and M. Tanaka, "Design, fabrication, and magneto-optical properties of multilayers containing GaAs/AlAs DBR and MnAs nano clusters", *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 27, pp.273-276 (2003).
- 田中雅明, アーサンナズムル, 菅原聡, 「磁性元素を含むIII-V族半導体ヘテロ接合: 磁気輸送特性と強磁性制御」, *マテリアルインテグレーション*2003年9月号 (特集: スピントロニクス), Vol. 16, No.9, pp.5-10 (2003).
- M. Tanaka, A. M. Nazmul, S. Sugahara, "III-V semiconductor heterostructures containing magnetic dopants: Magnetotransport properties and control of ferromagnetism", *Material Integration, Special Issue on Spintronics*, Vol. 16, No.9, pp.5-10 (2003).
- J. Okabayashi, M. Mizuguchi, M. Oshima, H. Shimizu, M. Tanaka, M. Yuri, and C.T. Chen, "Electronic and magnetic properties of MnAs nanoclusters studied by x-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism", *Appl. Phys. Lett.* 83, pp.5485-5487 (2003).
- Ho-Jin Oh, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano, and Yukihiro Shimogaki, "Surface reaction kinetics in metalorganic vapor phase epitaxy of GaAs through analyses of growth rate profile in wide-gap selective-area growth", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 42, part 1, no. 10, pp. 6284-6291, October 2003.
- Ho-Jin Oh, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano, and Yukihiro Shimogaki, "Comparison of organic and hydride group V precursors in terms of surface kinetics in wide-gap selective area metalorganic vapor phase epitaxy", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 42, part 2, no. 10A, pp. L1195-L1197, October 1, 2003.
- N. Haneji, G. Segami, T. Ide, T. Suzuki, T. Arakawa, K. Tada, Y. Shimogaki, and Y. Nakano, "Electron cyclotron resonance-reactive ion etching of III-V semiconductors by cyclic injection of CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar and O<sub>2</sub> with constant Ar flow", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42, 3958-3961 (2003).
- H.J. Oh, M. Sugiyama, Y. Nakano, and Y. Shimogaki, "Factors determining the generation of polycrystalline growth over masks in selective-area metalorganic vapor phase epitaxy: Gas-phase concentration analysis", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42, L359-L361 (2003).
- A. Kuramoto and S. Yamashita, "All optical regeneration using a side-mode injection-locked semiconductor laser," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Special Issue on Semiconductor Lasers, vol.9, no.5, pp.1283- 1287, Oct. 2003.

- R. Hayashi, S. Yamashita and T. Saida, "16-wavelength, 10GHz, actively mode-locked fiber laser with demultiplexed outputs anchored on the ITU-T grid," IEEE Photonics Technology Letters, vol.15, no.12, pp.1692-1694, Dec. 2003.
- Mitsuru Takenaka and Yoshiaki Nakano, "Realization of all-optical flip-flop using directionally-coupled bistable laser diode", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 16, no. 1, pp. 45-47, January 2004.
- I.T. Im, H.J. Oh, M. Sugiyama, Y. Nakano, and Y. Shimogaki, "Fundamental kinetics determining growth rate profiles of In and GaAs in MOCVD with horizontal reactor", J. Crystal Growth, 261, 214-224 (2004).
- M. Sugiyama, H.J. Oh, Y. Nakano, and Y. Shimogaki, "Polycrystals growth on dielectric masks during InP/GaAs selective MOVPE", J. Crystal Growth, 261, 411-418 (2004).
- H.J. Oh, M. Sugiyama, Y. Nakano, and Y. Shimogaki, "The effect of group V precursor on selective area MOVPE of InP/GaAs-related materials", J. Crystal Growth, 261, 419-426 (2004).
- A. M. Nazmul, S. Kobayashi, S. Sugahara and M. Tanaka, "Electrical and optical control of ferromagnetism in III-V semiconductor heterostructures at high temperature ( $\sim 100$  K)", Jpn. J. Appl. Phys. 43, pp.L233 - L236 (2004).
- A. M. Nazmul, S. Kobayashi, S. Sugahara, and M. Tanaka, "Control of Ferromagnetism in Mn Delta-doped GaAs-based Heterostructures", Physica E21, pp.937-942 (2004).
- S. Ohya, H. Kobayashi, and M. Tanaka, "Magnetic Properties and Curie Temperature ( $\sim 130$ K) of Heavily Mn-doped Quaternary Alloy Ferromagnetic Semiconductor (InGaMn)As Grown on InP", Physica E21, pp.975-977 (2004).
- T. Ogawa, Y. Shuto, K. Ueda, and M. Tanaka, "Photo-induced anomalous Hall effect in GaAs:MnAs granular films", Physica E21, pp.1041-1045 (2004).
- O. Rader, C. Pampuch, A. M. Shikin, W. Gudat, J. Okabayashi, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Hayashi, M. Tanaka, A. Tanaka, A. Kimura, "Resonant photoemission of Ga $_{1-x}$ Mn $_x$ As at the Mn L edge", Phys. Rev. B69, pp. 075202/1-7 (2004).

(2) 特許出願

H15年度特許出願件数：0件（CREST研究期間累積件数：11件）