

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名 「人工光物性に基づく新しい光子制御デバイス」
2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）

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）

主たる共同研究者

霜垣 幸浩（東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻 助教授）

田中 雅明（東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻 教授）

土屋 昌弘（情報通信研究機構基礎先端部門 主任研究員）

山下 真司（東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻 助教授）

3. 研究内容及び成果

本研究では、半導体材料のマクロな光物性を一原子層単位で設計・制御されたマイクロな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、広義の光非線形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、デジタル波長変換器、光 3R 中継器、光ロジック、光バッファメモリ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た。

上記目的を達成するために、本プロジェクトでは五つの研究グループを編成して研究を実施した。第一のグループ(霜垣グループ)は、「単原子層 MOVPE / 集積プロセス技術の研究」を担当した。有機金属気相エピタキシャル成長(MOVPE)による化合物半導体結晶成長において、ヘテロ界面の急峻性は最も重要なプロセス制御因子である。ここでは分光エリプソメトリを用いた表面その場観察や、作製したヘテロ構造の X 線光電子分光(XPS)、二次イオン質量分析(SIMS)などによる組成分析、透過型電子顕微鏡(TEM)による構造解析などからヘテロ界面形成ガス切替シーケンスの最適化を行った。また、MOVPE 成長層最表面のサブサーフェイスを考慮した界面形成モデルを構築した。一方シリコン酸化膜をマスクとして用いる面積選択 MOVPE 成長技術に関しても研究を行い、広幅選択成長の成長速度分布を解析して表面反応速度に関する情報を抽出した、さらに反応器内のマクロな成長速度分布から製膜分子種の拡散係数に関する情報を得、これらの解析から得た速度定数を基にして、面積選択成長における組成・膜厚のマスクパターン依存性を精密に予測することに成功し、本手法による光集積回路作製用計算機支援設計(TCAD)システム構築が可能であることを示した。

第二のグループ(田中グループ)は、「人工光磁性材料とスピン機能光デバイスの研究」を担当した。主な成果は、InP 基板上に III-V 族ベース四元混晶磁性半導体[(InGa)Mn]As をエピタキシャル成長することに成功し、それがきわめて大きな磁気光学効果をもつ (MCD ~ 400 mdeg) こと、キュリー温度は 130 K に達することを示したことである。また、GaAs:MnAs ナノクラスター構造とその多層膜の関連では、GaAs 中に MnAs ナノクラスターが埋め込まれた構造を形成し、その構造や物性制御に成功し、III-V 族半導体ヘテロ構造との整合性がきわめて良好であることを示したこと、MnAs 微粒子サイズが 10nm 以下では室温では超常磁性、10nm 以上では強磁性的振る舞いを示すことを明らかにしたこと、室温で大きな磁気光学効果 (ファラデー回転角 0.4 - 0.8 deg/  $\mu\text{m}$ ) を得たこと、GaAs:MnAs ナノクラスターと GaAs/AlAs 多層膜分布ブラッグ反射鏡(DBR)を組み合わせた多層膜を形成し、所望の波長の光を GaAs:MnAs 磁性層に閉じこめることによって、透過で磁気光学効果がきわめて大きくなることを示したこと、GaAs:MnAs クラスターを用いた半導体導波路型光アイソレータの提案、解析を行ったことも重要な成果として挙げられる。

第三のグループ(中野グループ)は、「人工光物性に基づくデジタル光デバイスの研究」を担当した。具体的には、量子井戸電界吸収光非線形性を利用した全光制御デバイス、MOVPE による AlN/GaN 多重量子井戸サブバンド間遷移全光スイッチ、量子構造を利用した半導体レーザの制御、全光論理ゲートの試作開発、全光フリップフロップの試作開発、半導体能動導波路型光アイソ

レータの提案と試作、の各項目につき研究を行った。その結果得られた主要な成果は、MOVPE 窒化物サブバンド間遷移で世界最短波長(2.3  $\mu\text{m}$ )を得たこと、ICP エッチングによる低損失なハイメサ光導波路の作製に成功したこと、半導体光アンブ(SOA)集積マッハツェンダー干渉計型全光論理ゲートに関連して、一回のMOVPE 選択成長による作製に成功したこと、試作素子において消光比 20dB の全光スイッチ動作を得たこと、スイッチングウィンドウ 28ps の高速動作特性を実証したことである。さらに、方向性結合器(DC)および多モード干渉結合器(MMI)双安定半導体レーザ型全光フリップフロップに関連して、全光セトリセットフリップフロップ動作に成功したこと、-10~0dBm の低エネルギー動作が得られたこと、同素子を用いて 10ns から 200ns へのビット長変換動作実証を行ったこと、が挙げられる。また、半導体能動導波路型光アイソレータに関連して、半導体導波路における非相反損失シフトの観測に成功したこと、光アイソレータプロトタイプの試作を行い  $\pm 1\text{kG}$  の磁場印加で 9.3dB/mm の非相反損失を得たこと、が特筆すべき成果と言える。

第四のグループ(土屋グループ)は、「光物理と光システムの研究」を旨とし、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した。具体的には、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、モード同期半導体レーザの物理と応用、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、光ファイバ内パラメトリック過程の解明と応用、光ファイバ無線技術、シリコンフォトリクス、の各項目について研究を行い所期の成果を得ている。

第五のグループ(山下グループ)は、「光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」を担当した。高効率・広帯域光ファイバ波長変換器を研究し、信号光にも励起光と同期した変調をかける同期位相変調法という新しい波長変換技術を発明した。また、ファイバーブラッググレーティング(FBG)を用いて1つの位相変調器を双方向で使う新しい構成を提案した。超広帯域・高密度光ファイバグレーティングの研究では、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(UV)光を照射して多点位相シフト(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を開発した。さらに、UV 光照射の代わりに熱光学効果を利用することにより可変にする研究も行った。他方、全光型半導体再生中継器に関しては、半導体レーザの注入同期現象の閾値を調節することにより、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ことに成功した。また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、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。多波長光ファイバレーザに関しては、波長間隔が可変な多波長  $\text{Er}$  ドープ光ファイバレーザを開発した。また短パルス発生のためにモード同期技術と多波長技術とを組み合わせ、多波長モード同期光ファイバレーザを実証した。最後に、カーボンナノチューブ(CNT)を用いたモード同期光ファイバレーザの研究を行い、利得が非常に高い光ファイバ(長さ 2cm)と、高反射光ファイバミラーとの組み合わせにより、高繰り返し周波数( $\sim 5\text{GHz}$ )受動モード同期光ファイバレーザを実現した。

本プロジェクト全体を通じて、スケーラブルなフォトリックネットワークを構築するために必須のデジタル光デバイス、即ち光論理ゲート、光フリップフロップ、集積化光アイソレータの開発に目途が立ち、デジタルフォトリクスの基礎が固められたと言える。

#### 4. 事後評価結果

4 - 1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況  
論文発表は英文103件、和文11件、そのうち招待されたものが夫々5件、1件、口頭発表(ポスター発表含む)は国際会議258件、国内会議256件、そのうち招待されたものが夫々43件、11件、特許出願は国内11件、海外5件など国際的評価の高い学会誌や国際会議に多くの優れた研究成果が発表されており、下記は其中でも特筆すべきもので、いずれも世界で初めて報告された独創的な成果である。

人工光物性を実現するための単原子層MOVPE技術や集積プロセス技術及びTCADの作成

MnAsをGaAs中に分散させた磁性半導体の研究とスピン光機能デバイスの研究

光デジタルエレクトロニクスの基本デバイスである全光論理ゲート、全光フリップフロップ、半

導体光アイソレータを実現

4次の光非線形性を用いて超短光パルスの発生、超高帯域パラメトリック利得の実現

高効率・広帯域光ファイバ波長変換器、超高帯域高密度光ファイバグレーティング等の実現

#### 4 - 2 . 成果の戦略目標・科学技術への貢献

本研究チーム成果の戦略目標「人工光物性に基づく新しい光子制御デバイス」及び科学技術への貢献は下記の4点に要約することができる。

MOVPEにおけるマスクの影響の実験的検証と結晶成長モデルの作成により、MOVPE技術の発展に大きな貢献をし、更に多層構造作成の際の界面急峻性を改善するMOVPE法の確立による技術的インパクト大。

III-V族強磁性半導体(InGaMn)Asを創成し、III-V族半導体とその多層膜中にMnAs強磁性ナノ粒子を析出させそれによる磁気光学特性を示した研究の科学的技術インパクト大。

全光論理デバイス、全光フリップフロップ、光アイソレータの3基本デバイスの実現による技術的インパクト大。

オプティカルファイバの特性を生かした増幅器、フィルタ、レーザの実現等の技術的インパクト大。

#### 4 - 3 . その他の特記事項(受賞歴など)

人工光物性としてはIII-V族半導体のband-structure engineeringだけでなく磁性半導体や光ファイバ、カーボンナノチューブも含めて多様な特性を対象として全光論理ゲート、全光フリップフロップ、光アイソレータ等デジタル光エレクトロニクスの基本デバイスの他、パラメトリック増幅器やフィルタを実現しており、所期の計画を達成し国際水準を越える研究成果をいくつも上げた。スピン機能デバイス、非線形光学素子などのデジタルフォトニクスへの応用はこれからの課題で、大きな発展が予測され、カーボンナノチューブを使用した短光パルスの発生等光ファイバを利用した新技術は企業化が期待できる。

本研究はデジタル光ネットワークの実現のため光デジタルデバイスの研究であるから、常にシステム構成上、デバイス特性に要求される条件を勘案しながら、デバイスの研究を進めていく事は当然であるが、一方全く新規なデバイスの発明により、現在想定されているデジタル光ネットワークとは全く異なるネットワーク構成の可能性探求も等閑視してはならない。

デジタルフォトニクスの実現は、所謂ITバブルの崩壊で産業界での研究開発がやや低調な状況の中で、大学が将来に向けた基礎的研究を続ける意義は大きい。

受賞に関しては以下の通りである。

・応用物理学会講演奨励賞、2001年3月、清水大雅[清水大雅、田中雅明、安藤功児「半導体ベース1次元磁性フォトニック結晶における磁気光学特性の改善」2000年9月秋季第61回応用物理学会]

・日本応用磁気学会・学術奨励賞(武井賞)、2001年9月、清水大雅[清水大雅、宮村信、田中雅明「半導体ベース磁性フォトニック結晶」、2000年9月日本応用磁気学会第24回学術講演会「ナノメゾスコピック磁性体の構造と機能」シンポジウム]

・丸文研究奨励賞(丸文研究交流財団)、2002年3月、田中雅明、「半導体スピンエレクトロニクスに向けた複合エピタキシャルヘテロ構造の創製」に関する研究業績。

・応用物理学会講演奨励賞、2003年3月、竹中充[竹中充、中野義昭「方向性結合器双安定レーザ構造を有する半導体全光フリップ・フロップの実現」、2002年9月秋季第63回応用物理学会]

・第17回「日本IBM科学賞」、2003年11月、田中雅明、「磁性体/半導体ヘテロ構造のエピタキシャル成長とスピンエレクトロニクスへの展開に関する研究業績

・応用物理学会講演奨励賞、2004年3月、C. カントゥーンキッティクル[チャイヤシットカントゥーンキッティクル、脇一太郎、霜垣幸浩、中野義昭「MOVPE成長AIN/GaN多重量子井戸における1.55 μmサブバンド間吸収の観測」、2003年8月秋季第64回応用物理学会]

・リボンアワード(米Materials Research Society), 2004年12月, 清水大雅

H.Shimizu and Y.Nakano, "Fabrication of a TE mode semiconductor-waveguide-type optical

isolator based on the nonreciprocal loss shift", Abstracts, MRS Fall Meeting, J4.7, p. 276, Boston, Massachusetts, November 29-December 3, 2004.