

「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 助教授)

## 「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。

これまでに、有機金属気相エピタキシにおけるInGaAsP混晶半導体成長のモデル化とシミュレーション、ポテンシャル制御量子井戸構造による電界吸収型光変調器の偏光無依存・負チャープ化、強磁性体/半導体複合多層膜構造による磁気光学効果の増大、新たな非縮退四光波混合デバイスの提案と原理検証実験、結合光共振器構造によるサブpJ全光スイッチング動作検証、半導体レーザを利用したデジタル波形整形器の研究、などを行って、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の構造制御技術、半導体レーザを用いたサブ20フェムト秒光パルス発生などの基礎技術を研究するとともに、電界吸収型光変調器を光非線型媒質に用いた新しい全光スイッチ、強磁性体/半導体複合多層膜構造を用いた光アイソレーション機能をもつ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

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

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、赤外分光 (IR) 分光エリプソメトリを用いた反応進捗状況のその場観察を行い、気相反応、表面反応機構および各反応速度を得て、反応器内の成長速度、組成などを予測可能にする技術を確立した。また、SiO<sub>2</sub>をマスクとして用いる選択成長技術に関しても、気相および表面での拡散と反応を考慮したシミュレーションにより、成長速度のマスク幅依存性を説明することに成功した。これを基に現在、デジタル光デバイス試作に必要な受動素子と能動素子の同時一括形成を試みている。今後は、これらの結晶成長カイネティクスの知見を基に、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のMOVPE構造制御技術を確立するとともに、微細素子作製に必須のドライエッチング技術についても研究し、光デバイス試作に応用してゆく。

#### 人工光物性に基づくデジタル光デバイスの研究

半導体量子構造のエンジニアリングを通じて半導体媒質の光物性を変革し、それを利用して光デバイスの性能を飛躍的に高めることにつき、研究を行っている。

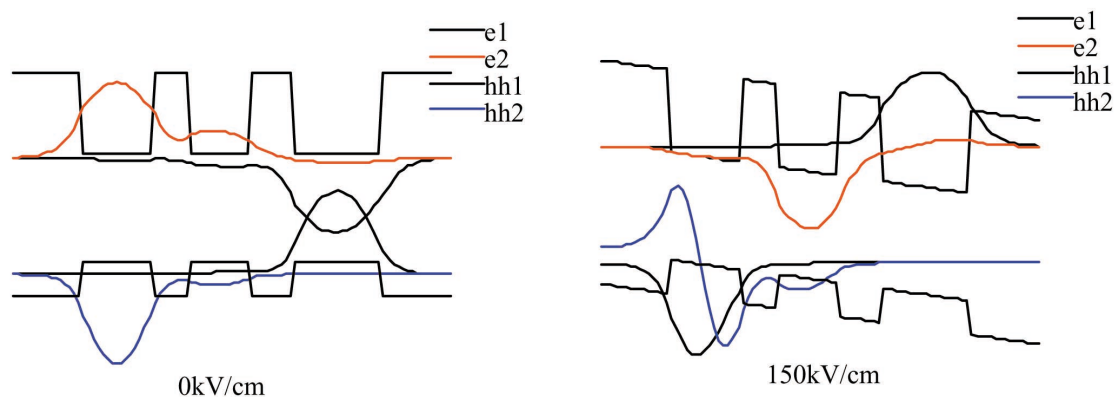


図1 巨大電界屈折率変化を生じる非対称3重結合量子井戸構造

平成11年度は特に、プリバイアス量子井戸を用いた電界吸収型光変調器の偏光無依存化、非対称結合3重量子井戸による電界吸収型光変調器の負チャープ化、応力補償プリバイアス量子井戸による偏光無依存性と負チャープ性の両立、非対称3重結合量子井戸による巨大電界屈折率効果の発現に関し研究を実施した。図1および2に、本研究で提唱する1.55  $\mu\text{m}$ 帯InGaAs/InAlAs/InP非対称3重結合量子井戸構造と、対応する吸収スペクトル、屈折率変化スペクトルを示す。量子井戸へのわずかな電界印加により、電子と正孔の結合状態から非結合状態への急峻な

遷移が発生し(図1)、それとともなって広い波長範囲に渡る吸収係数の低下が生じる。その結果、吸収端の外の使用波長1.55  $\mu\text{m}$ においても、極めて大きな負の屈折率変化を得ることができると予測される(図2)。現在、この効果の実験的検証を進めている。

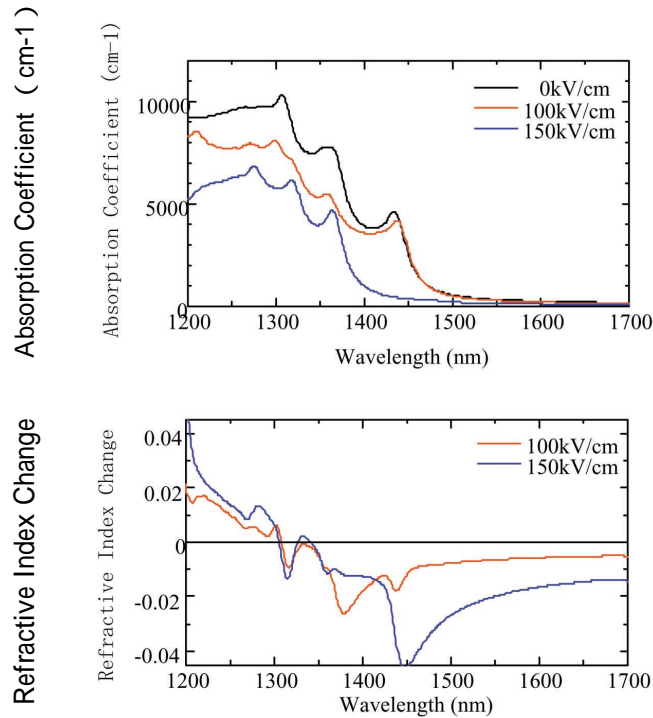
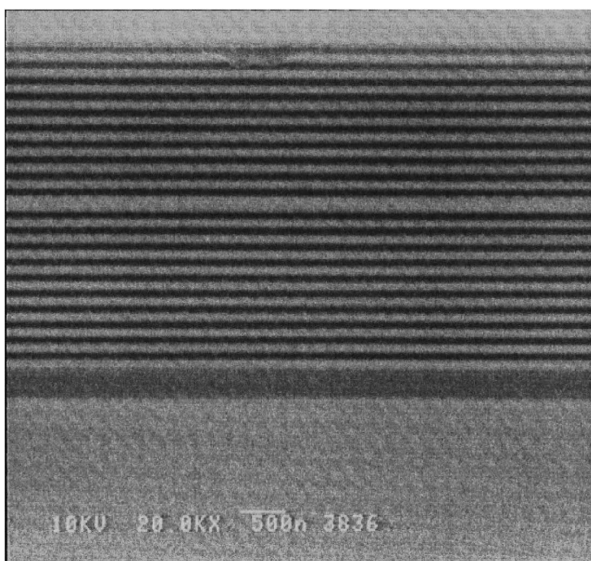


図2 吸収係数と屈折率スペクトルの印加電界依存

### 人工光磁性材料 / スピン機能光デバイスの研究

エピタキシャル成長技術を駆使することによって、これまで作製することが不



AIAs ( /4n) / GaAs ( /4n)  
DBR半導体多層膜

磁性層 ( /2n)  
GaAs/MnAsナノクラスタ

AIAs ( /4n) / GaAs ( /4n)  
DBR半導体多層膜

GaAs (001) 基板

図3 磁気光学効果を増大させるための強磁性体 / 半導体複合多層膜構造の断面走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真。

可能であった様々な新人工物質、即ち異種物質から成るヘテロ構造、磁性混晶半導体とその量子ヘテロ構造、磁性体 / 半導体融合構造などを実現し、その光・電子・磁気（スピン）物性を明らかにせんとしている。平成11年度は、Ⅲ-Ⅴ族をベースとした半導体多層構造を形成し、磁性層への光の閉じ込めによって室温で磁気光学効果を増大させることに成功した。分子線エピタキシャル成長技術を駆使することにより、磁性半導体（GaMnAs）またはそれをアニールして形成される半導体（GaAs） / 強磁性金属（MnAs）ナノ複合材料の薄膜と、その上下に形成した非磁性半導体（GaAs/AlAs）多層ブラッグ反射鏡から成る多層膜構造を作製した（図3）。透過で磁気光学効果を調べたところ、ほぼ設計された波長で、室温において磁気光学効果が数倍大きくなることを観測した。この多層構造は、動作波長が広い範囲で制御可能で設計自由度が大きいこと、半導体光デバイス・光回路との集積化が容易なことなど、従来の磁気光学材料・デバイスにない優れた特長を有している。

#### 光物理と光システム

これまでに、(1)光ファイバ非線形効果の物理と応用、(2)半導体光マイクロ共振器構造における非線形現象の物理と応用、(3)顕微ラマン分光法による光半導体デバイス材料の物性評価、(4)高速EO/MO計測技術による回路及び実装技術の高度化、について研究を実施した。(1)については半導体レーザを光源とする20fs級光パルス発生に成功しており（世界最短記録）、サブ20フェムト秒という未開拓領域に足を踏み出そうとしている。(2)については、非縮退四光波混合デバイスの提案と原理検証実験、結合光共振器構造の提案とサブpJ全光スイッチング動作検証、などが成果として挙げられる。(3)については、高感度・高空間分解能の顕微ラマン分光システムによる半導体レーザの出射端面温度計測に成功した。(4)については、世界最高感度（サブmV）の電気光学測定系を構築し、RF-PBG回路等の新規RF回路の設計・評価に適用した。また、高周波電流計測においては5GHzの帯域を実現した。

#### 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

将来の全光型の光ファイバネットワークでは、信号光の波形整形やリタイミングなどの機能を持つ全光型信号処理デバイスが重要である。平成11年度に研究した全光型再生中継器は、図4に示すように、分布帰還型（DFB）半導体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。まず、50MHzの正弦波状の入力信号に対して方形波状の出力が得られることにより波形整形の原理を示した。さらに、高速化の制限要因がDFBレーザの緩和振動であることを見いだした。その回避手法として入力信号の変調度を変

化させる方法を提案した。これにより、1.8Gb/sのランダムパターン信号の波形整形に成功した。図5(a)のように光ファイバ増幅器の雑音により劣化した入力信号に対して、図5(b)のように雑音の小さい再生信号を得る事に成功した。

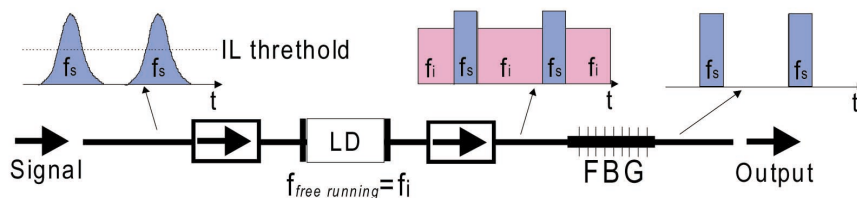


図4 波形整形の原理

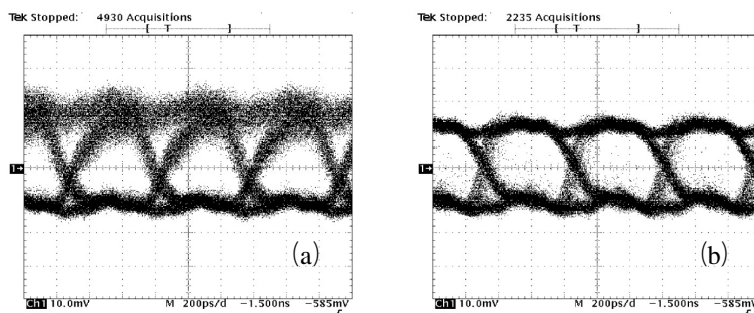


図5 1.8Gbit/sアイパターン (a)入力信号 (b)再生信号

### 3. 主な研究成果の発表 (論文発表)

Drew N. Maywar, Govind P. Agrawal, and Yoshiaki Nakano, "Robust optical control of an optical-amplifier-based flip-flop", OSA Optics Express, vol. 6, no. 3, pp. 75-80, January 31, 2000.

Byongjin Ma, Masumi Saitoh, and Yoshiaki Nakano, "Analysis and fabrication of an all-optical wavelength converter based on directionally-coupled semiconductor optical amplifiers", IEICE Transactions on Electronics, vol. E83-C, no. 2, pp. 248-254, February 2000.