

「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

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。

平成12年度は、有機金属気相エピタキシによるInGaP/GaAsヘテロ界面の単原子層レベルの急峻性確保、ポテンシャル制御量子井戸構造による低電圧光スイッチに向けたデバイス設計と試作プロセスの確立、電界吸収型光変調器に基づく全光スイッチ回路の提案、磁性金属/半導体複合多層膜構造における磁性層への光の閉じ込めによる室温磁気光学効果の増大、光ファイバ中の超短光パルス伝搬に高次分散効果を与える影響の解析、顕微ラマン分光法による半導体光デバイスの局所的な組成分布のその場観察技術の開発、集積型モード同期半導体レーザに基づく光インバータの提案、光ファイバ中四光波混合を利用した全光波長変換器の高効率化、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構造制御技術の窒化物系材料への拡張、電界吸収型光変調器に基づく全光スイッチ回路の試作実証、半導体レーザを用いた光論理素子の研究を行うとともに、磁性金属/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。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

光制御デバイスに重要なInGaP/GaAsヘテロ界面を有機金属気相エピタキシ (MOVPE) にて作製する際には、図 1 に示すガス切り替えシーケンスが一般的に用いられる。例えば、GaAs 成長からInGaP成長に切り替えるには、III族原料のTMGa供給を停止し、GaAs成長を終了させ、V族原料であるTBAsをしばらく流した後に、TBAs供給も止める。次にInGaP用V族原料であるTBP供給を開始し、しばらくしてからTMGaとTMInを供給してInGaP成長を開始する。図中に示した②の時間は表面でGaが過剰に存在してGaドロップレットを形成しないようにするための時間であり、③はガスの混在を防ぐための時間、④はInGaP成長においてInやGaが確実にPと化合するようPを予備供給しておく意味がある。このとき、②の時間中に過剰に供給されるAsは表面に残存して後から成長する結晶中に混在し、また、④の時間中に予備供給されるPは先に成長したGaAs結晶内へ拡散する。これらのV族原子の振る舞いは、As-P置換を引き起こして界面組成の急峻性を損なう原因となる。本研究では、MOVPE成長において分光エリプソメトリを用いたその場観察により、ガス切り替え手順の最適化を行った。この界面形成の問題点(難しさ)は下記の2点に集約される。

- 1) GaAs成長中には表面に過剰なAsが存在し、このAsは脱離しにくい。そのため、InGaP成長にAsが取り込まれやすい。
- 2) PはAsよりも小さいために、GaAs内に簡単

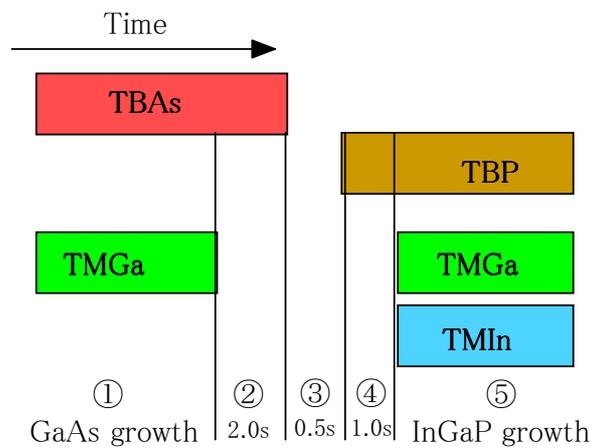


図 1 GaAs/InGaP切り替えシーケンス

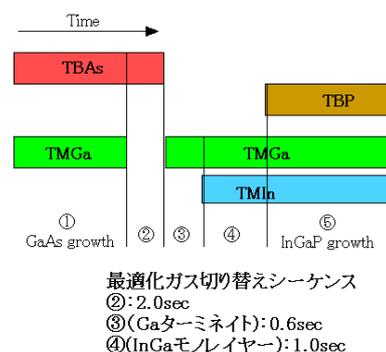


図 2 最適化シーケンス

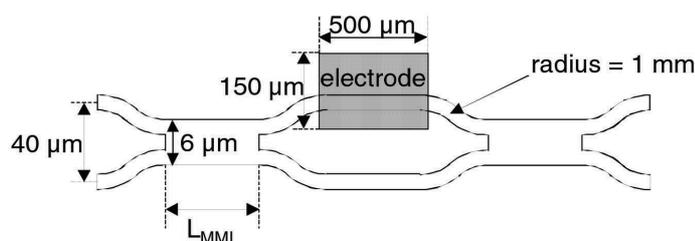
に拡散侵入し、GaPを形成する。

本研究では、これらの問題に対処するため、図2に示す新たなシーケンスを考案した(特許申請済み)。過剰なAsに対しては、TMGaを追加供給することによってターミネートし、PのGaAs内への拡散に対しては最初にInGaレイヤーを作製することによってPの拡散バリアとすることを意図している。また、これらの切り替え時間は分光エリプソメトリによりV族原子の吸着・脱離に伴う変化を観測して決定した。最適化シーケンスを用いて作製したサンプルを高分解能X線回折(HR-XRD)および透過電子顕微鏡(TEM)を用いて観測した結果、界面急峻性の飛躍的改善を確認することができた。

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。平成12年度は、平成11年度に提

案した非対称3重結合量子井戸による巨大電界屈折率効果を光スイッチに応用すべく、マッハツェンダー干渉計型光スイッチの試作プロセスの確立を行った。図3に試作した素子の構造概念図を示す。第一次試作では、位相変調領域



$$L_{\text{MMI}} = 101 \mu\text{m}, 106 \mu\text{m}, 111 \mu\text{m}, 116 \mu\text{m}$$

図3 マッハツェンダー光スイッチの構成

の媒質はフォトルミネッセンス波長1.41 μmのバルクInGaAsPとした。多モード干渉(MMI)カプラの小型化と、変調電界と光導波モードの重なりを大きくする目的で、導波路はポリイミド埋め込みハイメサ構造としている。その形成には、前年度に開発済みのメタン水素/酸素サイクリック反応性イオンビームエッチングを利用した。位相変調領域の導波路断面走査電子顕微鏡写真を図4に示す。また図5は、試作素子の光スイッチング特性を波長1.55 μmのTEモードに対し測定評価した結果である。スイッチング電圧は3Vと、バルク光スイッチのそれとしては大変小さな値が得られた。これより位相変調部の長さとしスイッチ電圧の積を計算すると1.5V・mmとなり、従来報告されている中で最小値と思われる。偏光依存性、波長依存性も小さく、光スイッチ構造として極めて優れていることが分かった。平成13年度は、この光スイッチに非対称3重結合量子井戸を導入して、究極の光スイッチ特性を狙う。

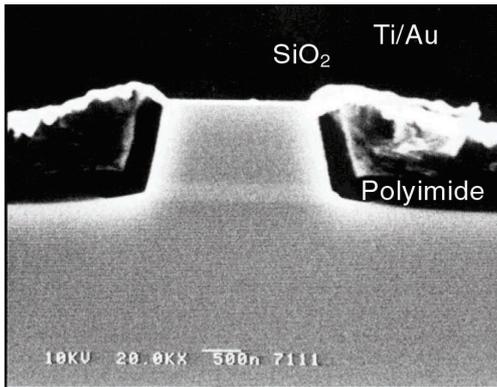


図4 ポリイミド埋め込みハイメ
サ導波路断面写真

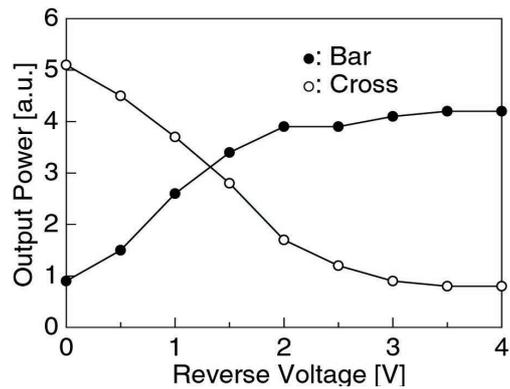


図5 光スイッチング特性
の測定結果

一方、全光処理に向けて、量子井戸電界吸収光変調器(EAM)を光非線型媒質として用いるマッシュエンダー干渉計型光スイッチを提案した(図6、特許申請済み)。現在、この構造による全光スイッチの試作実証を進めている。

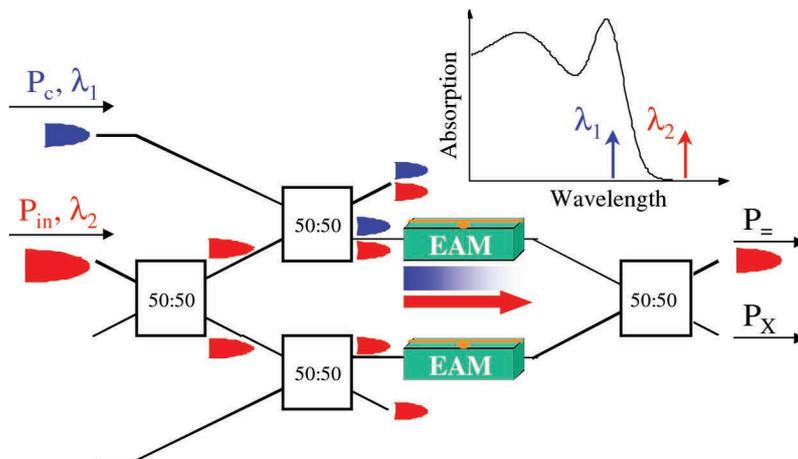


図6 EAMに基づく全光スイッチの概念図

人工光磁性材料/スピン機能光デバイスの研究

III-V族をベースとした磁性金属と半導体から成る複合多層構造を形成し、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。エピタキシャル成長技術を駆逐することにより、磁性半導体(GaMnAs)を熱処理して形成した半導体(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)多層反射膜から成る多層膜構造を作製した(図7)。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(図8)。これは半導体ベースの1次元磁気光学結

晶ともいふべき構造であり、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。

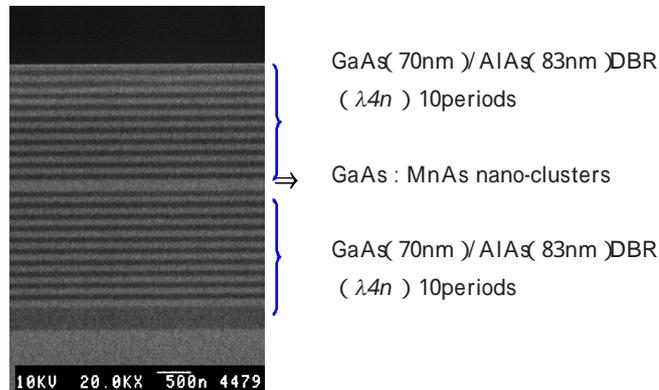


図7 磁気光学効果を増大させるための強磁性体/半導体複合多層膜構造の断面走査型電子顕微鏡(SEM)写真

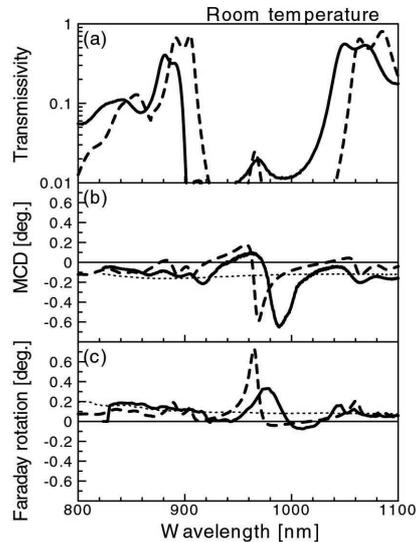


図8 上記の構造について室温で測定した(a)透過光スペクトルと(b)ファラデー楕円率(透過MCD)および(c)ファラデー回転角スペクトル。実線は測定値、太い破線は理論計算を表し、(b)(c)における点線は比較のためDBR構造のないGaAs:MnAsナノクラスタ構造単層膜の測定値を示したものの

光物理と光システム

- (A) 超短光パルスの発生とDWDM通信への応用：ここでは、世に先駆けて光パルス計測法、光パルス発生法、高感度光非線形デバイスの開発、などの研究を実施している。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分析した。フェムト秒領域の光信号処理・光伝送技術に対して光ファイバ内非線形特性は様々な効果・影響を及ぼすが、光ファイバ内非線形性発現の必要条件は光波伝搬方向に沿った長い相互作用長である。そのために位相整合条件のマネジメントは重要技術となる。特に、フェムト秒光パルスはその光スペクトル広がりが大きく、波長分散効果はより大きい。今回、サブ100フェムト秒光パルスのファイバ伝搬に着目し、光ファイバ内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た。特に、分散平坦化光ファイバに注目し、光パルス時間波形(パルス幅)およびスペクトル形状に留意しつつ、光パルス伝搬形態を詳細分析した。ここで対象とした分散平坦化光ファイバの特色は、有限値および有限帯域幅を有する異常分散領域が存在すること、三次分散値が零となる波長が存在すること、有限の四次分散を有すること、などである。これらの特色を丁寧に考慮し、モデル化と数値計算を進めたところ、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。
- (B) 顕微ラマン分光法による光通信用光素子の動作解析：光ファイバ増幅器の励起レーザ、光スイッチ、光変調器、フォトダイオードなどの高パワー耐性が重要技術課題と認識されている。そこでは、光パワー上昇がもたらす光電子デバイス信頼性劣化の原因解明と対策が重要である。そのために、デバイス動作状態を正確にその場測定できる計測技術は極めて有効である。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の詳細分析に適用する方法を開発した。信頼性向上のために有用と考えられる動作温度や組成変化に関する情報を動作中の素子に対してその場で得る手法を確立することが最終目標である。平成12年度は、昨期構築の高感度顕微ラマン分光システムを利用し、光電子デバイス端面の材料分析、構造分析、動作分析について、それぞれに新手法を確立した。特に、微動ステージ導入により空間分解能1ミクロンを以って局所的な温度や組成の二次元マッピングが可能となった。CD用・DVD用半導体レーザを対象としてその有効性確認と高精度化手法の開発を実施した。
- (C) モード同期半導体レーザの物理と応用：従来の光ファイバ通信技術では遠距離2点間のリンク構成が基本である。一方で、光技術をネットワーク技術に導入するフォトニックネットワーク技術への期待が高まっている。ここでは、機

能光デバイスとして集積型モード同期半導体レーザに着目し、その新規利用法として光インバータの開発を実施した。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。その動作の安定化・高速化が課題である。

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

将来の全光型の光ファイバネットワークでは、波長多重(WDM)化された信号光の波長を一括して変換することが波長変換器が重要である。本研究では、光ファイバ中での4光波混合(FWM)を利用した波長変換器の効率を高めることを目的とした。高効率化のためにポンプ光にスペクトル拡散を施すと、変換信号光のスペクトルは過剰な広がりを持ってしまう。そこでこの問題を解決すべく、図1に示すようにポンプ光と信号光に同期的にスペクトル拡散を行う新しい波長変換技術を提案した。この技術を適用した波長変換器を構成し、高非線形光ファイバを用いて実験を行い、60nmの変換帯域幅と-0.3dBの変換効率を得た。また10Gb/sの波長変換・伝送実験を行い良好な結果を得た。直交偏波2波長励起の構成も可能であると確認された。本技術は偏波ダイバーシティ構成にも適用できる。

あわせて、全光型半導体レーザ再生中継器、WDM光ファイバレーザ、モード同期光ファイバレーザおよび光ファイバグレーティングの研究を進めた。

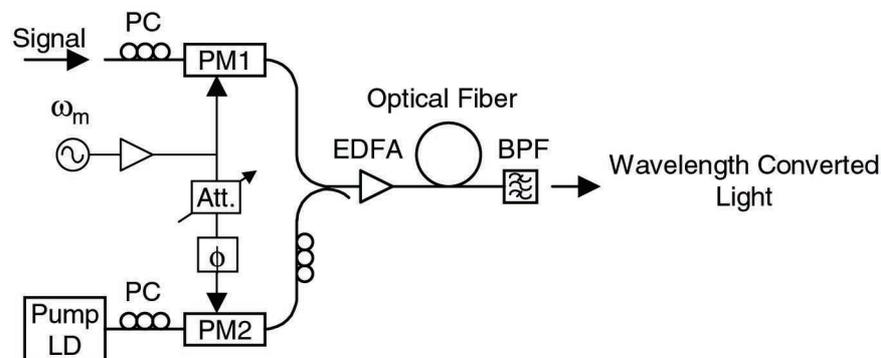


図9 同期スペクトル拡散によるスペクトル広がりのない高効率光ファイバ波長変換器

3. 主な研究成果の発表（論文発表）

Masakazu Sugiyama, Olivier Feron, Shinya Sudo, Yoshiaki Nakano, Kunio Tada, Hiroshi Komiyama, and Yukihiro Shimogaki, "Kinetics of GaAs metalorganic chemical vapor deposition studied by numerical analysis based on experimental reaction data", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 39,

part 1 , no. 4A , pp. 1642-1649 , April 2000.

Masaki Kato , Yoshiaki Nakano , "60 nm Wavelength Range Polarization-Insensitive 1.55 μ m Electroabsorption Modulator Using Tensile-Strained Pre-Biased Multiple Quantum Well" , IEICE Transactions on Electronics , Vol. E83-C , No. 6 , pp. 928-935 , June 2000.

Olivier Feron , Masakazu Sugiyama , Weerachai Asawamethapant , Naoki Futakuchi , Y. Feurprier , Yoshiaki Nakano , and Yukihiko Shimogaki , "MOCVD of InGaAsP , InGaAs and InGaP over InP and GaAs substrates : distribution of composition and growth rate in a horizontal reactor" , Applied Surface Science , vol. 159-160 , Issue 1-4 , pp. 318-327 , June 2000.

Masao Tabuchi , Ryuzo Takahashi , Munetaka Araki , Keisuke Hirayama , Naoki Futakuchi , Yukihiko Shimogaki , Yoshiaki Nakano , and Yoshikazu Takeda , "X-ray CTR scattering measurement of InP/InGaAs/InP interface structures fabricated by different growth processes" , Applied Surface Science , vol. 159-160 , Issue 1-4 , pp. 250-255 , June 2000.

Drew N. Maywar , Yoshiaki Nakano , and Govind P. Agrawal , "1.31-to-1.55 μ m wavelength conversion by optically pumping a distributed feedback amplifier" , IEEE Photonics Technology Letters , vol. 12 , no. 7 , pp. 858-860 , July 2000.

Masumi Saitoh , Byongjin Ma , and Yoshiaki Nakano , "Static and Dynamic Characteristics Analysis of All-Optical Wavelength Conversion Using Directionally Coupled Semiconductor Optical Amplifiers" , IEEE Journal of Quantum Electronics , Vol. 36 , No. 8 , pp. 984-990 August 2000.

Masumi Saitoh , Byongjin Ma , and Yoshiaki Nakano , "Static and Dynamic Characteristics Analysis of All-Optical Wavelength Conversion Using Directionally Coupled Semiconductor Optical Amplifiers" , IEEE Journal of Quantum Electronics , Vol. 36 , No. 8 , pp. 984-990 August 2000.

土屋昌弘 , 小関泰之 , "光マイクロ波融合デバイス (光電子デバイスからのアプローチ) , Optical microwave device from optical view" , エレクトロニクス , Vol. 45 , No. 9 , pp. 52-56 , 2000年9月.

Byongjin Ma , Masumi Saitoh , and Yoshiaki Nakano , "Photon-induced waveguides for all-optical switching and wavelength conversion" , IEICE Transactions on Electronics , vol. E83-C , no. 10 , pp. 1683-1686 , October 2000.

S. Yamashita and D. Matsumoto , "Waveform reshaping based on injection locking of a distributed-feedback semiconductor laser , " IEEE Photonics Technology Letters , vol.12 , no.10 , pp.1388-1390 , Oct. 2000.

S. Yamashita and K. Torii , "Cancellation of spectral spread in highly efficient optical fiber wavelength converters , " IEE Electronics Letters , vol.36 , no.24 , pp.1997-1998 , Nov. 2000.

S. Wakana , T. Ohara , M. Abe , E. Yamazaki , M. Kishi and M. Tsuchiya "Fiber edge electro/magneto-optic probe for spectral domain analysis of electromagnetic field" , IEEE Transaction of MTT , Vol. 48 , No. 12 , pp. 2611-2616 , December 2000.

Olivier Feron , Yoshiaki Nakano , and Yukihiro Shimogaki , "Kinetic study of P and As desorption from binary and ternary III/V semiconductor surface by in-situ ellipsometry" , Journal of Crystal Growth , 221 (2000) , pp. 129-135 , December 2000.

Takayuki Nakano , Yoshiaki Nakano , and Yukihiro Shimogaki , "Kinetic ellipsometry measurement of InGaP/GaAs hetero-interface formation in MOVPE" , Journal of Crystal Growth , 221(2000) , pp. 136-141 , December 2000.

A. M. Nazmul , H. Shimizu and M. Tanaka , "Magneto-optical Spectra of Epitaxial Ferromagnetic MnAs films Grown on Si and GaAs Substrates" , J. Appl. Phys. 87 , pp.6791-6793(2000)

M. Tanaka(invited paper) , "Ferromagnetic Semiconductor Heterostructures Based on(GaMn)As" , J. Vac. Sci. & Technol. A18 , pp.1247-1253(2000)

H. Shimizu , M. Miyamura , and M. Tanaka , "Enhanced Magneto-Optical Effect in a GaAs:MnAs Nanoscale Hybrid Structure Combined with GaAs/AlAs Distributed Bragg Reflectors" , J. Vac. Sci. & Technol. B18 , pp.2063-2065(2000)

田中雅明 , "半導体スピン機能素子技術の現状と展望(invited paper)" , FED ジャーナル Vol.11 , No.3 , pp.67-75(2000)

M. Tanaka , "Semiconductor Spintronic Materials and Devices: Current Status and Future Prospects"(Japanese) , Future Electron Device Journal , Vol.11 , No.3 , pp.67-75(2000)

B. Grandidier , J.P. Nys , C. Delerue , D. Stievenard , Y. Higo , and M. Tanaka , "Atomic-Scale Study of GaMnAs/GaAs Layers" , Appl. Phys. Lett. 77 , pp.4001-4003(2000)

T. Kamiya , M. Tsuchiya , M. Miyamoto , J. Lee , T. Tanaka , and S. Sasaki "New approach of semiconductor laser related technologies for ultrafast photonics" , Optical and Quantum Electronics , Vol. 32 , pp. 443-435(2000)

H. Shimizu , M. Miyamura , and M. Tanaka , "Magneto-optical Properties of a

GaAs:MnAs Hybrid Structure Sandwiched by GaAs/AlAs Distributed Bragg Reflectors: Enhanced Magneto-optical Effect and Theoretical Analysis" , Appl. Phys. Lett. 78 , pp.1523-1525(2001)

S. Yamashita and M. Nishihara , "Widely tunable erbium-doped fiber ring laser covering both C-band and L-band , " IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics , Special Issue on Fiber Amplifiers and Lasers , Feb. 2001.

S. Yamashita and M. Nishihara , "L-band erbium-doped fiber amplifier incorporating an inline fiber grating laser , " IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics , Special Issue on Fiber Amplifiers and Lasers , Feb. 2001.

R. Hainberger , Y. Komai , Y. Ozeki , M. Tsuchiya , K. Kodate , and T. Kamiya "Experimental Studies of Switching Characteristics for All-optical Demultiplexer Module" , IEICE Transactions on Electronics , Vol. E84-C , No.3 , pp. 358-363 , March 2001.