

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656046

研究課題名(和文) プラズモン導波路を用いる光配線用超小型光検出器の研究

研究課題名(英文) Ultra-compact photodetector based on plasmonic waveguide for optical wiring

研究代表者

荒井 滋久 (Arai, Shigehisa)

東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス研究センター・教授

研究者番号：30151137

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)： 半導体導波路型光デバイスにプラズモニクスの概念を融合することによって、高速性と微細性を兼ね備える導波路型フォトディテクタおよび変調器に関する研究を行った。

プラズモン受光器については、有限要素法解析を用いて500nm幅の細線導波路への結合効率および伝搬損失を求めると共に、実際に構造を試作した。電界吸収型プラズモン変調器について、キャリア解析および有限要素法を用いたモード解析の結果、バイアス印加時の変調効率4.5 dB/micronmeter、無バイアス時の損失は1.5 dB/micronmeterが得られ、性能指数としては世界の他のプラズモン変調器に比べて2-3倍程度良い値が得られた。

研究成果の概要(英文)： Ultra-compact and high-speed waveguide type photodetector and optical modulator by introducing the concept of plasmonics into conventional semiconductor optical devices have been investigated for on-chip optical wiring.

As for the photodetector using plasmonic waveguide, the coupling efficiency to 500-nm wide waveguide and the propagation loss were calculated by FEM (finite element method) analysis and the device structure was fabricated. As for the electro-absorption type plasmonic modulator, a mode analysis combining carrier density and FEM revealed that the modulation efficiency was 4.5 dB/micronmeter which corresponds to 2-3 times better value than that previously reported for plasmonic modulators.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：フォトディテクタ 光配線 光エレクトロニクス プラズモニクス

1. 研究開始当初の背景

光を用いた超高速伝送は、電気配線における回路遅延・伝送損失・電磁波干渉(EMI)などの問題を回避することができる上、波長多重化による大容量伝送も可能になることから、次世代の配線技術として有望視されている。一説では、光配線は従来のCu配線に比べてデータ容量は1000倍にもなり、低消費電力下で2倍以上の速度(30-60 Gb/s)を出すことができるともいわれている。光配線時、理想的には「光源」「光変調素子」「光伝送素子」「受光素子」の一連の光コンポーネントをLSI上に配置する必要があるが、従来のCMOSプロセスと互換性が必須であることを鑑みて、光デバイス側もSiを主体にしたものが採用される傾向が強い(Siフォトニクス)。しかし光源に関しては、Siが間接遷移半導体であることから実現が容易ではないため、個々に作製されたSiおよびIII-V族化合物半導体デバイスをハイブリッド集積する方法が採用されている。

Siを主体としたデバイス群はオンチップ光通信への可能性を大きく広げるものであるが、一方で“サイズ”と“感度”という二つの大きな課題を抱えている。光素子におけるサイズとは回折限界と同義であり、既存のCMOSデバイスと比較して大きい(> 200 nm: Si系光素子の場合)ことが集積化に当たって課題となる。

本研究では、このような問題を克服し、更なる素子の小型化・感度上昇を行うことが出来る物理現象として表面プラズモンに焦点を当てる。現行のオンチップ光通信の研究は、前述したようにほぼ全てSiをベースとしたものであるが、世界の研究機関の中には、更にその先を見据えた形でプラズモニクスを利用しようとする動きがある。その最大のメリットは回折限界を超えることが出来る点にある。LSI上に配置した光デバイスの小型化・高感度化を実現するには、いかに効率よく光を局在させエネルギー密度を高められるかが重要となるが、光エネルギーの局在化と増強効果という大きな特徴を持つ表面プラズモンポラリトン(Surface Plasmon Polariton: SPP)がこの問題に適した現象であることは想像に難くない。オンチッププラズモニクスを構成するキーコンポーネントとしては、(1)信号発生源であるレーザ、(2)電気信号を光信号に変換する変調素子、(3)光伝送路、(4)信号検出のための受光素子の4つが挙げられる。そこで本申請研究では、上記の中でレーザ以外の素子群(2)-(4)までを集積一体化することを目指す。具体的には、化合物半導体をベースとした受光素子と変調素子に、プラズモン導波路構造を導入することによって、回折限界を超えるスケールで「導波路型プラズモンディテ

クタ」および「導波路型プラズモン変調器」を実現することを目指す。

2. 研究の目的

申請期間の2年間で前述した「導波路型ナノスケールフォトディテクタ」および「導波路型ナノスケール変調器」の実現を行う。

「導波路型ナノスケールフォトディテクタ」については、細線導波路および微小受光領域を低屈折率材料(Al_2O_3)を介して金属で挟んだ構造を採用する。金属導波路構造を用いることで、回折限界を超えたナノ空間に形成されている化合物半導体吸収層に光を閉じ込めることが可能となり、従来の素子に比べて高感度かつ高速な素子を実現することが可能となる。

「導波路型ナノスケール変調器」については、細線ギャップ導波路を低屈折率材料(Al_2O_3)および酸化インジウムスズ(Indium Tin Oxide: ITO)薄膜を介して金属で挟んだ構造を採用する。

両素子ともに、SPPを利用することにより素子サイズとして数マイクロメートルオーダーのデバイスを実現することができ、また導波路構造ベースであることから、モノリシックな光集積という面でも優れた性能を発揮する。

3. 研究の方法

本研究は、(1)フォトニクスとしての先端的な半導体光素子の研究と、(2)ナノスケール光学としてのプラズモニクス(本研究では金属導波路構造)とを融合することにより、オンチッププラズモニクスにおける基幹素子群として、超小型受光素子および超小型変調器を実現する試みである。

研究期間内では、受光器については以下の項目(A1)および(A2)を設定し、変調器については以下の項目(B1)および(B2)を設定することで、研究を推進した。

【受光器側の目標】

- A1. 側面金属層を有するテーパ導波路と細線導波路を組み合わせたパッシブ素子の理論解析および作製・評価実験を行う。これにより、ナノスケール受光器前段のプラズモン導波路について、損失を含む詳細なデータの取得を試みる。
- A2. 上記素子の後部に受光素子を配置することで、実際に導波路型ナノスケールフォトディテクタの開発に移り、高速伝送および感度評価実験を行う。

【変調器側の目標】

- B1. 有限要素法による光モード解析と半導体デバイスシミュレータを用いたキャリア解析を行うことで、実際に提案した変調器が、どの程度の性能をもつのかを見積もる。

B2. 上記設計に基づいて、実際に提案したデバイスの開発に移り、変調評価実験を行う。

4. 研究成果

研究成果としては、受光器の項目についてはA1まで、変調器の項目についてはB1まで終了している段階にある。以下、それぞれについて詳細を述べる。

【プラズモン受光器について】

本研究では、プラズモン受光デバイスの前段素子として100 nmオーダーの受光領域に集光させる導波路構造の作製・評価を行った。

素子構造は、InP系細線状導波路をSiO₂薄膜を介して金属で挟んだMetal-Insulator-Semiconductor-Insulator-Metal (MISIM)構造であり、コア層は150 nmのGaInAsP ($\lambda_g=1.22 \mu\text{m}$)、上下クラッドは700 nm以上とした。素子設計にはCOMSOLによる有限要素法(FEM)解析を用いた。細線導波路幅およびハイメサ導波路を覆うSiO₂層の膜厚を変化させることで、デバイス特性を計算した。その結果、SiO₂層の膜厚100nm、導波路幅500 nm時において伝搬損失は0.048 dB/ μm と見積もられた。テーパ長については、3次元有限要素解析からテーパ長20 μm で通常のハイメサ導波路から細線導波路へ最大25%の結合効率が得られることがわかった。

作製した素子は「通常のハイメサ導波路」と「側面金属層を有するテーパと細線導波路」を集積した構造とした。電子ビーム描画と反応性イオンエッチングにより素子構造全体を作製した後、プラズマ化学気相成長でSiO₂を素子全面に100 nm積層し、金属斜め蒸着とlift offプロセスによりテーパ領域と細線状導波路にのみ金属側壁層(Ti:10 nm、Au:170 nm)を形成した。

素子の測定を行ったところ、導波路幅500 nmでは伝搬損失が0.25dB/ μm と、設計値0.048 dB/ μm に対し5倍ほど高い結果がでた。また、リファレンスとして幅850 nmの導波路において金属層がない場合、導波しないことを確かめた。

以上のように金属層を設けることによって回折限界以下の領域に光が閉じ込められることを確認した。

【プラズモン変調器について】

提案する電界吸収型プラズモン変調器は、i-GaInAsP ($\lambda_g=1.22 \mu\text{m}$)の上下を、i-InPとn-InPで挟んだ形となっている。コア層の両側にサイドエッチを入れたハイメサ導波路をITO薄膜およびAl₂O₃薄膜を介して金属(Ti/Au)で挟むことで、ギャップSPPモードが励振されるようにした。これによりコア層近傍に回折限界を超えた光の閉じ込めを得ること

ができる。伝搬光の偏光状態は光集積回路において標準偏波であるTEモードとなっており、他のプラズモン変調器のTMモード動作に比べて優位性がある。

本素子における光の強度変調は、ITO層の光学特性を変化させ、ギャッププラズモンモードの状態を変えることで行う。素子上部から順バイアス電圧を印加し、Al₂O₃絶縁膜直下のITO層にキャリアを誘起する(下部n-InPからキャリアを引っ張る)ことで、ITO層の光学特性を制御できる。

半導体デバイスシミュレータ(TCAD)によるキャリア解析および有限要素法を用いたモード解析によって素子特性を計算した結果、ITOキャリア濃度による1.55 μm 帯における複素屈折率の大幅な変化を利用することで、バイアス印加時に4.5 dB/ μm の変調効率を得られることが示された。また、無バイアス時の損失は1.5 dB/ μm という値を示しており、性能指数としては世界の他のプラズモン変調器に比べて2-3倍程度良い値を示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

1. T. Amemiya, A. Ishikawa, Y. Shoji, P. N. Hai, M. Tanaka, T. Mizumoto, T. Tanaka, and S. Arai, "Three-dimensional Nanostructuring in YIG Ferrite with Femtosecond Laser," *Optics Lett.*, Vol. 39, No. 2, pp. 212-215, Jan. 2014. (査読有)
(DOI: 10.1364/OL.39.000212)
2. 雨宮智宏、荒井滋久:「【解説】オンチップ光通信に向けたプラズモニクス ~世界の今とこれから~」、光アライアンス(日本工業出版), Vol. 24, No. 9, pp. 42-48, Sept. 2013. (査読無)

〔学会発表〕(計16件)

1. T. Amemiya, A. Ishikawa, Y. Shoji, P.N. Hai, M. Tanaka, T. Mizumoto, T. Tanaka, and S. Arai, "Three-dimensional Nanostructuring in YIG Ferrite with Femtosecond Laser," The Conference on Lasers and Electro-Optics 2014 (CLEO 2014), San Jose, USA, STh1J.5, 12th June, 2014 (to be presented).
2. Z. Gu, T. Amemiya, A. Ishikawa, Y. Atsumi, J. Kang, Y. Hayashi, J. Suzuki, E. Murai, T. Hiratani, N. Nishiyama, T. Tanaka, and S. Arai, "Investigation of Optical Interconnection using Photonic Wire Bonding," The 15th Int'l Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM 2014), Vilnius, Lithuania, 18th June, 2014

- (to be presented).
3. A. Ishikawa, T. Amemiya, Y. Shoji, P. N. Hai, M. Tanaka, T. Mizumoto, S. Arai, and T. Tanaka, "Optical and magnetic microstructures in YIG ferrite fabricated by femtosecond laser," [Invited] The 15th Int'l Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM 2014), Vilnius, Lithuania, 20th June, 2014 (to be presented).
 4. T. Amemiya, T. Kanazawa, A. Ishikawa, J. Kang, N. Nishiyama, Y. Miyamoto, T. Tanaka, and S. Arai, "Permeability control in InP-based photonic platforms," [Invited] The Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2014, Seoul, Korea, 24th June, 2014 (to be presented).
 5. T. Amemiya, M. Taki, T. Kanazawa, and S. Arai, "Asymmetric Invisibility Cloaking Theory Based on the Concept of Effective Electromagnetic Fields for Photons," *APS March Meeting 2014*, Denver, USA, Z50.00014, 6th Mar., 2014.
 6. T. Amemiya, "Photonic metamaterials for InP-based optical communication devices," *3rd International Conference on Nanotek and Expo (Nanotek 2013)*, Las Vegas, USA, 5-2, 4th Dec., 2013.
 7. T. Amemiya, T. Kanazawa, A. Ishikawa, S. Myoga, J. Kang, N. Nishiyama, Y. Miyamoto, T. Tanaka, and S. Arai, "Photonic metamaterials in semiconductor optical devices," [Invited] *2013 EMN Open Access Week*, Chengdu, China, 21st Oct., 2013.
 8. S. Arai, N. Nishiyama, T. Amemiya, T. Shindo, J. Lee, M. Futami, K. Doi, and T. Hiratani "Semiconductor Membrane Photonic Devices for Ultra-low Power Consumption Operation," [Invited] *IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series 2013*, Hawaii, USA, WA1.1, 10th July, 2013.
 9. S. Arai, N. Nishiyama, T. Amemiya, T. Shindo, M. Futami, and K. Doi, "Lateral Current Injection Type Membrane DFB Lasers," [Invited] *The Int.10th Conf. on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013)*, Kyoto, Japan, ThK2-1, 4th July, 2013.
 10. T. Amemiya, T. Kanazawa, A. Ishikawa, S. Myoga, E. Murai, T. Shindo, J. Kang, N. Nishiyama, Y. Miyamoto, T. Tanaka, and S. Arai, "Electrically-driven Permeability-controlled Optical Modulator using Mach-Zehnder Interferometer with Metamaterial," *The Conference on Lasers and Electro-Optics 2013 (CLEO 2013)*, San Jose, USA, QM1A.6, 10th June, 2013.
 11. 村井英淳、雨宮智宏、顧 之琛、西山伸彦、荒井滋久 :「ギャッププラスモンとITOを利用したGaInAsP/InP GSPP変調器の特性解析」, 第61回春季応用物理学会学術講演会、相模原、20p-F8-5、2014年3月20日
 12. 荒井滋久 :「シリコン CMOS との融合集積を目指した III-V 族光電子デバイスの現状と展望」, 電子情報通信学会 2014 年総合大会、新潟、CK-1、エレクトロニクスソサイエティプレナリー講演 2、2014年3月19日
 13. 雨宮智宏、石川 篤、庄司雄哉、P. N. Hai、田中雅明、水本哲弥、田中拓男、荒井滋久 :「フェムト秒レーザーによるYIGフェライト3次元光造形」, 第61回春季応用物理学会学術講演会、相模原、19p-F8-14、2014年3月19日
 14. 雨宮智宏、瀧 雅人、金澤 徹、荒井滋久 :「光子における有効電磁場を使った非対称光学迷彩」, 第61回春季応用物理学会学術講演会、相模原、18p-E16-6、2014年3月18日
 15. 石川 篤、雨宮智宏、庄司雄哉、P. N. Hai、田中雅明、水本哲弥、田中拓男、荒井滋久 :「フェムト秒レーザーを用いたCe:YIGへの3次元光ナノ加工」, 第61回春季応用物理学会学術講演会、相模原、18p-PA5-7、2014年3月18日
 16. 顧 之琛、雨宮智宏、石川 篤、鈴木純一、村井英淳、姜 峻炫、平谷拓生、渥美裕樹、西山伸彦、田中拓男、荒井滋久 :「フォトリックワイヤーボンディングを用いたSi光回路間の伝搬特性解析」, 第61回春季応用物理学会学術講演会、相模原、17p-PA2-18、2014年3月17日
- 〔その他〕
ホームページ :
<http://www.pe.titech.ac.jp/AraiLab/index.html>
- 6 . 研究組織
(1)研究代表者
荒井 滋久 (Arai, Shigehisa)
東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス研究センター・教授
- 研究者番号 : 30151137
- (2)研究分担者
なし
- (3)連携研究者
雨宮 智宏 (Amemiya, Tomohiro)
東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス研究センター・助教
- 研究者番号 : 80551275