

## 科学研究費助成事業(科学研究費補助金)研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21310082

研究課題名（和文） プラズモン導波構造によるナノ光の制御

研究課題名（英文） control of nano-size light with plasmonic waveguide structure

## 研究代表者

原口 雅宣 (HARAGUCHI MASANOBU)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：20198906

## 研究成果の概要（和文）：

プラズモン導波路を利用した高密度集積回路実現に向け、ギャップ型とV溝型のプラズモン導波路を中心に、2波分波構造、共振器、干渉計、方向性結合器、変調器の試作と、プラズモンと通常の空間伝搬光の光結合方法の改善を行った。特に共振器に関して設置面積が小さくQ値が高い構造を実現できた。プラズモン伝搬距離の制限や構造の作製精度は素子性能を大きく左右し、素子設計にあたってそれらの考慮が必要であることを示した。

## 研究成果の概要（英文）：

We have studied on the plasmonic devices, eg, splitters, resonators, interferometers and modulators, and improvement of the coupling coefficient between plasmon wave and light propagating in bulk. Especially, we demonstrated tiny plasmonic resonator with high Q factor. We have also presented that we should design the plasmon devices to prevent degradation of device performance owing to the propagation length of plasmon and unintentional imperfection of the device structure.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	10,400,000	3,120,000	13,520,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学，マイクロ・ナノデバイス

キーワード：プラズモン導波路，90度曲げ，光共振器，グレーティング，光変調

## 1. 研究開始当初の背景

金属と誘電体界面には、光と電子の集団運動が結合した表面プラズモンポラリトンや局在プラズモンが存在することが知られている。(以下プラズモンと呼ぶ。) プラズモンは、薄膜、ストライプ、溝やドット列といった nm サイズの構造を持つ金属微細構造にそって伝搬させることが可能である[1-7]。光エネルギーは金属表面付近サブ波長以下の領

域に局在するため、導波路幅の狭いプラズモン導波路(以下PWG)をサブ $\mu\text{m}$ 間隔で高密度配線した光集積回路実現への期待が高まった。2000年頃までの可視域の励起光を用いた報告[3-5]では、伝搬距離が $10\mu\text{m}$ 程度以下と短かったが、海外のグループが通信波長帯域にてサブmmオーダーのプラズモン伝搬を実証[6]し、注目を集めた。これに対して国内では、優れた先駆的成果を示したグル

ープがあった[1-4]ものの、PWGでの伝搬の実証を行っていた国内の研究グループは非常に少なく、その取り組み時期の早さや、理論的研究水準の高さに比べ実証実験の分野は遅れをとっていた。

[1] M. Fukui et al., Phys. Stat. Solidi (b), 91 (1979) K61. [2] J. Takahara et al., Opt. Lett. 22 (1997) 475. [3] T. Yatsui et al., Appl. Phys. Lett. 79 (2001) 4583. [4] K. Tanaka et al., Appl. Phys. Lett. 82 (2003) 1158. [5] J. R. Krenn et al., Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 362 (2004) 739. [6] S. Bozhevolnyi et al., Phys. Rev. Lett., 95 (2005) 046802. [7] S. Maier et al., Appl. Phys. Lett., 86 (2005) 071103.

サブ $\mu\text{m}$ 幅の導波路として、フォトニック結晶の欠陥導波路やシリコンによる半導体高屈折率導波路がある。しかし、前者は光閉じ込めにブラッグ反射を利用しているため、高密度光配線は難しい。また大面積にわたるnmスケール精度での周期構造の微細加工は、実用化に際しての困難が予想される。一方の半導体高屈折率導波路は、半導体表面の平滑性を導波路構造全体にわたり保つ課題が残っているほか、導波路幅は200nm程度が限界となる。どちらの導波路も、100nmを切るような大きさのナノサイズ光デバイスや光機能性分子へ直接的に高効率光注入を行うことは容易ではない。

これに対して、PWGは、回折限界を超えて光が微細構造部分に局在しているため間隔がサブミクロン以下となる高密度配線や、数十nm程度以下の領域への光集光が可能である。さらにプラズモンの光強度増強効果による非線形光学効果や、電子デバイスとの組み合わせも可能である特徴を持っている。

本研究グループは、以前からプラズモンおよびプラズモン導波路に関する様々な知識や技術の蓄積があった。しかし、研究開始当時は、光回路を構成する分波器や合波器、方向性結合器や干渉計、共振器といった基本的デバイスさえも確立した構造がなく、我々を含めその当時報告されていたプラズモン導波路デバイスの多くは、誘電体光導波路構造を流用しており、プラズモンの特性を生かした共振器構造や変調器構造等はなかった。

我々はPWGのスタブ構造を用いると、小面積の共振器が構築可能であることを数値計算により示した。この構造を基本として様々な導波路デバイスができると予測し、本研究提案に至った。

## 2. 研究の目的

本研究はPWGを利用した基本的各種デバイスの原型となる構造を作製しその光学特性を明らかにしようとするもので、PWGを用いた高集積度の光集積回路実現の可能性を明

らかにする研究である。

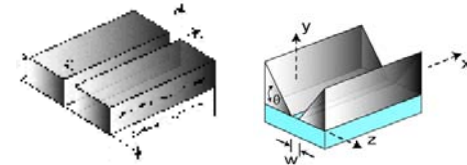
PWGによる光集積回路構築にむけ、下記事項について取り組むことを目的とした。

- 1) 10nm程度のギャップ幅の変動や欠陥等による導波損失やモード変換特性の解明
- 2) 損失の少ない2波分波構造の提案
- 3) 共振器の試作と特性評価
- 4) 干渉計や方向性結合器の試作と特性評価
- 5) 電気光学効果等を用いた変調器の試作と特性評価
- 6) プラズモンと通常的空間伝搬光の高効率光結合方法の提案

## 3. 研究の方法

まず、数値計算シミュレーションを用いて、図1のような金属と金属の空隙が100nm~200nmのギャップ型および対向ウエッジ型PWGに組み込む、分波、共振器、干渉計等各種の基本的な構造の設計をおこなった。設計にあたって、素子がコンパクトかつ作りやすいよう、直角曲げや図2のようなスタブ構造を利用する方針を採用し、有限差分時間領域法によって素子特性を評価した。

上記の結果に基づき、ガラス基板やSi基板上に銀薄膜を作製し、そこに集束イオンビームやAFMプローブによる加工を行い、導波路構造やデバイス構造を作製した。各種構造は、波長可変レーザー等の光源による偏光光を用いて共焦点顕微鏡にてプラズモンを励起し、Si-CCD、InGaAs-CCDを用いて画像解析を行い、シミュレーションと比較することで有用な情報を得た。



(a) ギャップ型 (b) 対向ウエッジ型  
図1 プラズモン導波路の例

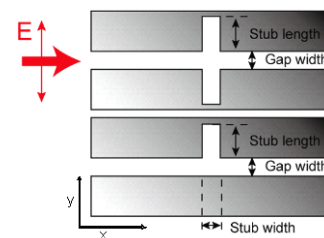


図2 プラズモン導波路のスタブ構造  
灰色部分は金属。上側がスタブを対向させ配置した例、下側はスタブを導波路の片側に1つ配置した例。

#### 4. 研究成果

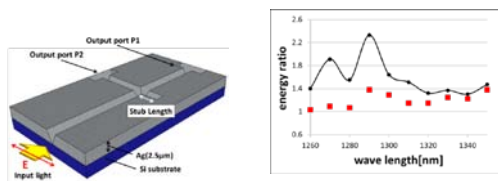
各目的に対して、以下のような研究成果が得られた。

(1) 10nm 程度のギャップ幅の変動や欠陥等による導波損失やモード変換特性の解明

ギャップ型, V 溝型, 対向ウェッジ型 PWG について近赤外から通信波長帯域において, シミュレーションおよび作製した構造の評価に基づく検討を行ったところ, 前者2つに関しては, 高さ方向への閉じ込めが行われる構造(周囲の誘電体が空気である場合は, 目安として1.5波長程度の高さ)であれば, 現有の設備による作製で生ずる10nm程度のギャップ幅の変動や欠陥等による導波損失は15%程度以下の影響であることが分かった。また, ギャップ型PWGでは, 散乱の結果表面側や基板側に存在するモードに結合し, さらにそれが散乱されることによって, 損失が大きくなることが分かった。その一方, 対向ウェッジ型PWGでは凹凸によって光が散乱し, 空間伝搬光や閉じ込めのない平面型のプラズモンと結合してしまい, 大きな影響があることが明らかとなった。従って, 高密度配線を行う際には, ギャップ型やV溝型PWG構造が損失の観点では有利と思われる。

(2) 損失の少ない2波分波構造の提案

スタブを利用した2波分波構造(図1(a))とスタブの無い2波分波構造を作製し, 直進側出力ポート1とまげ側ポート2の出力強度比スペクトル(図1(b))を求めた。その結果スタブがなければ一定であった強度比が, スタブを利用することで変化するようになり, 設置面積が小さい波長選択性のある2波分波構造ができるようになることが実証された。一方, 単純な分岐では, 反射による挿入損失が数%程度存在するが, 図1の構造により波長選択性を持たせた場合は, 50%程度の反射損失が存在しており, 今後改善の余地があることが明らかになった。

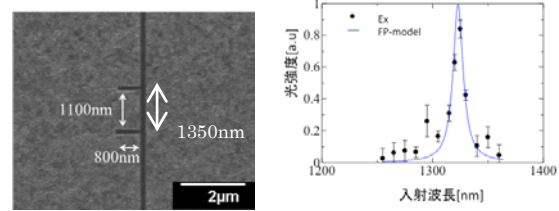


(a) 基本構造 (b) 出力比スペクトル  
図1 スタブを利用した2波長分波構造

(3) 共振器の試作と特性評価

スタブ構造を反射器として利用し, 2つのスタブを一定の間隔をあけて設置したカスケード型の共振器構造を提案した。この構造では共振器がコンパクトになり, 通信波長帯域ではそのQ値のプラズモンの伝搬距離によ

って制限され, 金属として銀を用いた場合上限が700程度であることを明らかにした。図2(a)に示すような構造をV溝型PWGに作製し, 1.3 $\mu\text{m}$ 帯の波長可変レーザにて特性の実証実験を行った。素子面積1.5 $\mu\text{m}^2$ の大きさでQ値100の共振器の作製に成功した。



(a) SEM像 (b) 透過スペクトル  
図2 スタブカスケード型共振器構造

実際に作製した共振器構造のQ値とQ値上限とのずれは, シミュレーションおよび光散乱像の解析により, スタブと導波路の接合部における構造の乱れによる散乱損失と, スタブ終端の散乱損失, 2つのスタブの長さの設計値とのずれによる反射損失に由来することが分かった。上記の損失は, 作製手法の最適化により低減された。なお, 利用する光としてより長波長領域を利用すると, プラズモンの伝搬距離と構造の波長に対する精度を改善させることができるため, よりQ値が高い共振器を得ることが容易となる。

(4) 干渉計や方向性結合器の試作と特性評価

まず, 90度直角曲げの構造についてその透過・反射特性の見積もりを行った。その結果, 金属膜の厚さが波長の1.5倍で, 波長の1/5程度の空隙を有するギャップ型PWGでは, 曲げ損失は5%以下であると見積もられた。シミュレーションとの比較により, この場合の損失の原因は, 理想的形状からの構造の乱れであることが分かった。

干渉計については, マッハチェンダー型構造を作製し, 動作確認を行うことはできたが, 分岐部分の構造の精度が不十分で, あらかじめ設計した性能を得ることが難しく, 素子作製手法の確立が急務であることが分かった。

方向性結合器については, 図1のような基板に対して垂直に加工してPWGを形成する方法での素子作製は困難であった。方向性結合器では, 2つの導波路を伝わるプラズモンがエバネットの電磁界を介して結合する構造としなければならない。しかしプラズモン電磁界のしみ出しは小さく, 波長の数倍の長さにわたって導波路間隔を1/10程度に保つ必要があるためである。そこで層構造の方向性結合器を作製し, 動作を確認することができた。層構造の場合は導波路間隔の精密制御は容易であるが, 他素子構造との組み合わせに

工夫が必要であるので、今後は前者の素子構造について再度検討を行う予定である。

#### (5) 電気光学効果等を用いた変調器の試作と特性評価

電気光学効果を有する基板上にスラブ型 PWG を作製し、グレーティングカップル法やプリズムカップル法によりプラズモンを励起し、電気信号による変調を行った。集積化が容易なグレーティングカップル法では、変調電圧 10V 程度で ON/OFF 比で 20% を得ることができた。一方、ギャップ型等のチャンネル型の PWG 構造については、3) で述べた波長 1.3  $\mu\text{m}$  帯または 1.55  $\mu\text{m}$  帯にて 700 の Q 値を持つ共振器において、共振器内部で屈折率変化が 0.03 程度あれば、ON/OFF 比で 2 を得られることがシミュレーションにより得られた。この屈折率変化の大きさは光熱効果でなければ得にくいものである。共振器長を長くした場合、同じ ON/OFF 比を得るに必要な屈折率変化を見積もったが、伝搬距離による Q 値の制限のため屈折率変化として  $10^{-3}$  オーダが必要であった。現在知られているそのような屈折率変化を生ずる材料は、応答時間としてマイクロ秒以上必要であるので、動作原理として共振器内屈折率変化による共振特性のずれを利用する形式では、MHz オーダの高速変調が可能な変調素子作製は困難であると分かった。

#### (6) プラズモンと通常の空間伝搬光の高効率光結合方法の提案

ギャップ型 PWG 終端に端面励起法によるプラズモン励起に関しては、端面の凹凸を微細加工法により取り除くことで、伝搬確認実験時の SN 比を 10 倍以上高めることができた。シミュレーションによれば、励起エネルギー効率は 1% 未満であったものが、数%程度に向上したと見積もられる。

一方、顕微鏡下のような垂直入射に対しては、PWG 端に垂直入射光が PWG 端へ反射する構造の入出力ポートを形成することで比較的高い SN 比が得られることが明らかになった。数値計算によればエネルギー効率で 5% 程度と見積もられるが、この値に関してはより詳細な検討が必要である。

グレーティング結合法は、スラブ型 PWG に対しては有効であったが、導波路幅がサブ波長となるチャンネル型 PWG に対しては必ずしも有効ではなく、現在のところその効率は数%以下である。

以上をまとめると、本研究では、プラズモン導波路を用いた集積回路実現に向け、PWG の導波損失やモード変換特性の解明、損失の少ない 2 波分波構造の提案、小型共振器の提案、干渉計と方向性結合器の試作、電気光学

効果等を用いた変調器の試作、プラズモンと通常の空間伝搬光の簡便な光結合方法の実現を行った。設置面積を考慮すると世界最高水準の高い Q 値の超小型共振器を作製するなど、総じて目標を達成できた。また、プラズモンの伝搬距離の制限は、誘電体導波素子と同様の発想による設計では、各種素子実現に向けて大きな障害となることを示した。方向性結合器と変調器に関しては、新たな素子構造を含め今後も改善の余地が大きい。また、光結合方法については効率を高くすることはできたが、実用的水準を達成するには新たな構造提案が必要である。

#### 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 14 件)

- ① S. Tanabe, Y. Nakagawa, T. Okamoto, M. Haraguchi, T. Isu, G. Shinomiya, Fabrication and evaluation of photonic metamaterial crystal, Applied Physics A, 査読有, Vol. 111, 2013, DOI:10.1007/s00339-013-7774-4
- ② 省略
- ③ H. Okamoto, S. Onishi, M. Kataoka, K. Yamaguchi, M. Haraguchi, T. Okamoto, Characteristics of double-plasmonic-racetrack resonator to increase quality factor, Optical Review, 査読有, Vol. 20, 2013 pp 26-30 doi:10.1007/s10043-013-0005-6
- ④ H. Okamoto, K. Yamaguchi, M. Haraguchi, T. Okamoto, Development of plasmonic racetrack resonators with a trench structure, Proc. of SPIE, 査読有, vol. 8457, 2012, 845723. doi:10.1117/12.929373
- ⑤ 省略
- ⑥ M. Flockert, M. Haraguchi and T. Okamoto: Characteristics of Coupled Plasmon Modes in Asymmetric Layered System, OPTICAL REVIEW, 査読有, Vol.18, No.4, 2011, pp.311-316. DOI: 10.1007/s10043-011-0061-8
- ⑦ H. Okamoto, K. Yamaguchi, M. Haraguchi, T. Okamoto, and C. Sun: Design of Plasmonic Racetrack Resonators with a Trench Structure, Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, Vol. 50, 2011, 092201 (4 pages) DOI: 10.1143/JJAP.50.092201
- ⑧ T. Nakada, Y. Nakagawa, M. Haraguchi, T. Okamoto, M. Flockert, T. Isu, G. Shinomiya, Surface Plasmon Polariton

- Excitation by a Phase Shift Grating, World Academy of Science, Engineering and Technology, 査読有, Vol 50, 2011, pp. 690-694. <http://www.waset.org/journals/waset/v50/v50-131.pdf>
- ⑨ 原口雅宣, 福井萬壽夫, 岡本敏弘, プラズモニク・デバイスの現状と将来展望, 光学, 査読無, Vol. 40, 2010, 68-76. [http://osj-jsap.jp/publication/koga\\_ku\\_40\\_2.html](http://osj-jsap.jp/publication/koga_ku_40_2.html)
- ⑩ 省略
- ⑪ 省略
- ⑫ M. Haraguchi, H. Sokabe, T. Okuno, T. Okamoto, Masuo Fukui, Optical resonator in gap plasmon waveguide, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 7757, 2010, 775720. (6pages). doi:10.1117/12.861131
- ⑬ M. Haraguchi, K. Iuchi, H. Sokabe, T. Okuno, T. Okamoto, M. Fukui, K. Okamoto and S. Tagawa, Gap plasmon waveguide with a stub: structure for a wavelength selective device, Proceedings of SPIE, 査読有, Vol. 7395, 2009, 73950U (6pages). doi:10.1117/12.825789
- ⑭ 省略
- [学会発表] (計 61 件)
- ① 宮田 亨, プラズモン導波路に設置した連結スタブ共振器の作製法改善, 2013. 03. 29, 第 60 回応用物理学関係連合講演会講演会, 神奈川工科大学 (厚木市)
- ② 岡出浩俊, V 字溝型構造を用いた小型波長分波器の開発, 2013. 03. 29, 第 60 回応用物理学関係連合講演会講演会, 神奈川工科大学 (厚木市)
- ③ 省略
- ④ S. El-Zohary, Development of a Sensing Device for Detecting Refractive Index Changes by Using a Plasmonic Resonator, 2012. 12. 07, 1st International Conference on Innovative Engineering, Helnan Palestine Hotel (Egypt)
- ⑤ M. Haraguchi, Stub structures in channel plasmonic waveguides, 2012. 11. 21, The Second Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (招待講演), 徳島大学 (徳島市)
- ⑥ S. Tanabe, Surface Plasmon Polariton grating coupler on the Ti diffused LiNbO3 channel waveguide, 2012. 11. 14, International Conference on Nanotechnology, Optoelectronics and Photonics, NH Laguna Palace (Italy)
- ⑦ 省略
- ⑧ S. Tanabe, Surface Plasmon Polariton Grating Coupler on Piezoelectric Material Bonded with Conductive Si (100) Substrate, 2012. 09. 03, 12-th international Conference on Near-field Optics nanophotonics and Related Techniques, Kursaal Conference Center (Spain)
- ⑨ M. Haraguchi, High Q resonator in a V-groove waveguide, 2012. 09. 03, 12-th international Conference on Near-field Optics nanophotonics and Related Techniques, Kursaal Conference Center (Spain)
- ⑩ H. Okamoto, Development of plasmonic racetrack resonators with a trench structure, 2012. 08. 15, SPIE Optics & Photonics, San Diego Convention Center (United States)
- ⑪~⑬省略
- ⑭ 岡本 浩行, ダブルレーストラック共振器構造の評価, 2012. 3. 16, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学 (新宿区)
- ⑮ M. Haraguchi, Compact plasmonic resonators, 2012. 1. 11, Taiwan-Japan Nanophotonics and Plasmonic Metamaterials Workshop (Invited), 台湾大学 (台湾)
- ⑯ 省略
- ⑰ 田邊 新平, 楕円型回折格子による表面プラズモンポラリトン励起, 2011. 11. 29, Optics & Photonics Japan 2011, 大阪大学 (吹田市)
- ⑱ 省略
- ⑲ M. Haraguchi, Compact Resonators in Gap Plasmon Waveguide, 2011. 10. 26, BIT's 1st Annual World Congress of Nano-S&T-2011 (Invited), World EXPO Center in Dalian (China)
- ⑳-㉓省略
- ㉔ Tanabe, S., Chirped grating coupler for surface plasmon polariton excitation fabricated by scanning probe microscope lithography, 2011. 8. 25, 8th Asia-Pacific Workshop on Nanophotonics and Near-Field Optics, Serafino McLaren Vale (Australia)
- ㉕-㉙省略
- ㉚ Flockert, M, 2D-gap mode plasmonic crystal on photonic fiber end face, 2011. 5. 17, 5th Int'l Conference on Surface Plasmon Photonics, BEXCO (Busan, KOREA)



- ③① 原口 雅宣, 機能性プラズモニック導波路, 2011.3.24, 第58回応用物理学関係連合講演, 神奈川工科大学(厚木市)
- ③③-③⑥ 省略
- ③⑦ 加門 直洋, 連結スタブ構造によるプラズモン変調素子の特性, 2010.11.10日, 日本光学会年次学術講演会, 中央大学(千代田区)
- ③⑧ M. Haraguchi, Gap plasmon waveguide, 2010.9.26, 3rd German-Japanese Seminar on Nanophotonics (Invited), Technische Universitat Ilmenau (Germany)
- ③⑨ 岡本 浩行, プラズモニックレスタラック型共振器における結合長の影響, 2010.9.17, 第71回応用物理学学会学術講演会, 長崎大学(長崎市)
- ④① T. Nakada, Modulator for Surface Plasmon Polariton Using LiNbO<sub>3</sub>: Ti Plasmon Waveguide, 2010.8.29, 11th International Conference on Near-field Nano Optics, Nanophotonics & Related Techniques, Peking Univ. (China)
- ④② M. Haraguchi, Compact wavelength selective filter in Gap plasmon waveguide, 2010.8.29, 11th International Conference on Near-field Nano Optics, Nanophotonics & Related Techniques, Peking Univ. (China)
- ④③ H. Okamoto, Characteristics of Racetrack Shape Resonators Using Surface Plasmon Polaritons, 2010.8.29, 11th International Conference on Near-field Nano Optics, Nanophotonics & Related Techniques, Peking Univ. (China)
- ④④ M. Haraguchi, Simple coupler for the gap plasmon waveguide, 2010.6.1, International Conference on Nanophotonics 2010, Epcoc Tsukuba (つくば市)
- ④④-④⑤ 省略
- ④⑥ M. Flockert, Gap Plasmon Modes of Infinite High Gaps Measured in layered silver structures by ATR, 2010.4.19, 7th International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication, Pacifico Yokohama (横浜市)
- ④⑦ 原口 雅宣, 高周波伝送路設計を利用したプラズモン導波路素子設計(II), 2010.3.17, 第57回応用物理学関係連合講演会, 東海大学(平塚市)
- ④⑧-⑤① 省略
- ⑤② T. Nakada, Fabrication of a grating coupler in surface plasmon polariton

- waveguide by scanning probe microscope lithography, 2009.11.26, 7th Asia-Pacific Conference on Near-field Optics, Jeju Int. Convention Center (Korea)
- ⑤③ T. Okuno, Wavelength selective filter and optical branching filter with a cascade stub structure, 2009.11.26, 7th Asia-Pacific Conference on Near-field Optics, Jeju Int. Convention Center (Korea)
- ⑤④ M. Haraguchi, Characteristics of nonlinear Fabry-Perot resonator in a MDM plasmonic waveguide, 2009.11.25, 7th Asia-Pacific Conference on Near-field Optics, Jeju Int. Convention Center (Korea)
- ⑤⑤-⑤⑨ 省略
- ⑥① M. Haraguchi, Gap plasmon waveguide with a stub: structure for a wavelength selective device, 2009.8.4, SPIE Optics & Photonics, San Diego Convention center (United States)
- ⑥② 省略

〔図書〕(計3件)

- ① 原口 雅宣, 岡本 敏弘, NTS出版, プラズモニクス ~光・電子デバイス開発最前線~, 2011年8月, 55-67
- ② 原口 雅宣, 岡本 敏弘, (株)情報機構, プラズモン 基礎理解の徹底と応用展開, 2011年4月, 1-39 および 327-332
- ③ 岡本 敏弘, 原口 雅宣, 福井 萬壽夫, 株式会社 シーエムシー出版, プラズモンナノ材料の最新技術, 2009年6月, 271-282

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原口雅宣 (HARAGUCHI MASANOBU)  
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授  
研究者番号: 20198906

(2) 研究分担者

岡本敏弘 (OKAMOTO TOSHIHIRO)  
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・助教  
研究者番号: 60274263

(3) 連携研究者

( )  
研究者番号: