

# プラズモン・ポラリトンナノ光回路

八井 崇\*・野村 航\*\*・大津 元一\*,\*\*

著者紹介

## Plasmon-Polariton Nanophotonic Integrated Circuits

Takashi YATSUI, Wataru NOMURA and Motoichi OHTSU

Optical transmission systems require increased integration of photonic switching devices. To support this increase, it is estimated that the size of photonic matrix switching devices should be reduced to less than 100 nm by the year 2015. To couple these photonic devices with external conventional diffraction-limited photonic devices, it is required convert from propagating far-field light to optical near-field. As a far-field and near-field converter, we fabricated a plasmon condenser with a nano-dot coupler. Efficient excitation of a plasmon-polariton mode along the chains of closely spaced metal nanoparticles was observed.

**Key words:** optical near-field, plasmon condenser, nano-dot coupler, plasmon-polariton

### 1. 開発の現状と高効率化のために

情報通信の高速化・大容量化により、光通信における光集積回路は微小化が必要不可欠であり、光産業技術振興会により取りまとめられた光通信ロードマップ (<http://www.oitda.or.jp/index.html>) によると、2015年にはこれらを構成する光機能素子のサイズは100 nm以下になると予想される。しかしながら、伝搬光を用いた素子では、光の回折限界により波長以下の微小化は不可能である。この問題を解決する有効な手段として、筆者らは、量子ドットにより構成され、近接場光によって動作するナノフォトニック集積回路を提案している<sup>1)</sup>。この集積回路を実現するためには、外部の光素子の情報伝送媒体である伝搬光をナノフォトニックスイッチに用いられる近接場光に変換する必要がある。

この変換素子として、ナノメートルサイズの光伝送路が必要となる。このように微小な光伝送路として、カットオフの存在しない金属コア導波路<sup>2,3)</sup>が提案されている。筆者らは、この金属コア導波路に高効率でプラズモンモードを励起し近接場光を発生させる素子として、金属薄膜が成膜された楔型シリコン構造によるプラズモン導波路（図1(a)～(c))を開発した。その導波部において、幅150 nm・

伝搬長2.5 μm（波長830 nm）の一次元プラズモンモードの伝搬を確認している（図1(d))<sup>4)</sup>。

さらなる近接場発生効率向上を目指し、筆者らは図2に示す伝搬光・近接場光素子を提案している。この構造は、入力される表面プラズモン・ポラリトン (surface plasmon-polariton: SPP) を複数の散乱体により集光する集光器部分と、集光されたエネルギーをナノメートルサイズの光デバイスに導くナノドットカップラーから構成されている。本稿では、図2の素子の詳細について述べる。

### 2. プラズモン集光器

プラズモン集光器は、複数の金属突起によって構成され、フェーズドアレイ (phased array) としてSPPを集光させる。図3(a)に、円周上に配置された突起によって構成されたプラズモン集光器の電子顕微鏡(SEM)像を示す。散乱体の作製には、10 μm厚のSi基板を用い、収束イオンビーム装置(focused ion beam: FIB)によりカーボン突起(600 nmϕ)を堆積後、スパッタリングによりAuを120 nm蒸着することで行った。

プラズモン集光器におけるSPPの集光の様子を、近接場光学顕微鏡(near-field optical microscope: NOM)で測定した。SPPの励起にはグレーティング結合を用い<sup>5)</sup>、50

\*科学技術振興事業団ERATO大津局在フォトンプロジェクト†(〒194-0004 町田市鶴間687-1) E-mail: yatsui@ohtsu.jst.go.jp

†現 科学技術振興機構SORST

\*\*東京工業大学大学院総合理工学研究科(〒225-8502 横浜市緑区長津田町4259)

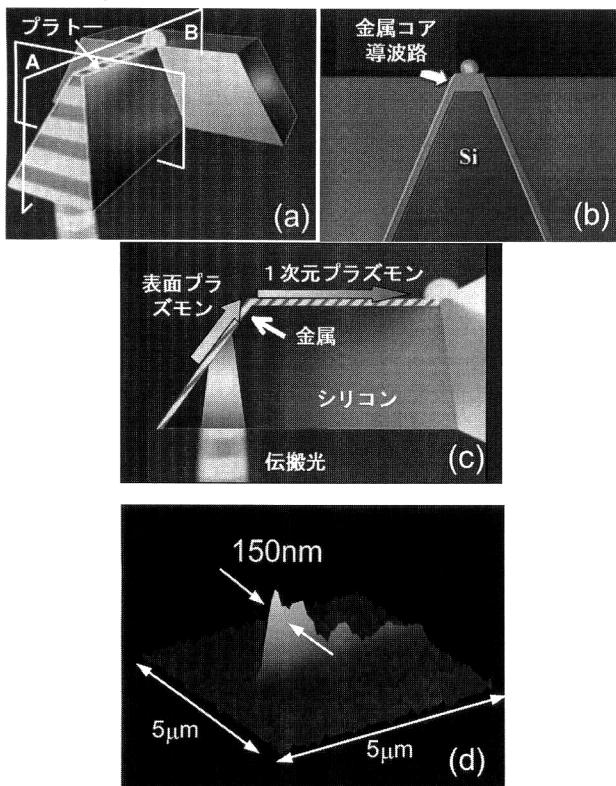


図1 (a) プラズモン導波路の鳥瞰図。(b) 図(a)のAにおける断面図。(c) 図(a)のBにおける断面図。(d) プラト部におけるNOM像。

$\mu\text{m}$ 伝搬した後、集光器に入射される実験配置を行った。光源には785 nmの半導体レーザーを用いた。測定には先鋭化金属コート(Au: 30 nm)ファイバーを用いた。

図3(b)および3(c)に、この集光器のシアフォース像およびNOM像を示す。また、図3(c)の点線に沿った光強度の断面プロファイルを図3(d)に示す。紙面左方より入射されたSPPが突起により散乱して集光され、焦点におけるスポットとして半値全幅400 nmが得られている。

### 3. ナノドットカップラー

ナノ光伝送路として、近年、金属微粒子列によるナノドットカップラーが注目されている<sup>5,6)</sup>。これは、同一寸法の金属微粒子が等間隔で配列することにより、各微粒子間を近接場光の相互作用によりプラズモン・ポラリトンが伝送するものである。この構造は、金属コア導波路と比較して、金属中の伝送部が短いため、伝送損失が小さいと期待される<sup>7)</sup>。

ナノドットカップラーは、プラズモン集光器の焦点を入力点として、集光器同様、FIBによるカーボン突起(230 nm $\phi$ 、間隔70 nm)の堆積とスパッタリングによる金(膜厚120 nm)の堆積により作製した。また、比較として、同様のプロセスにより同じ幅をもつ金属コア導波路も作製し

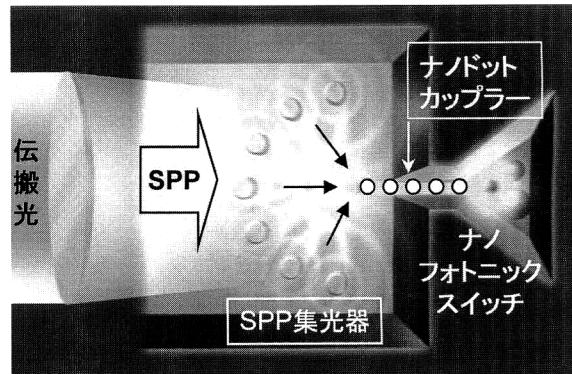


図2 伝搬光・近接場光変換素子の概念図。

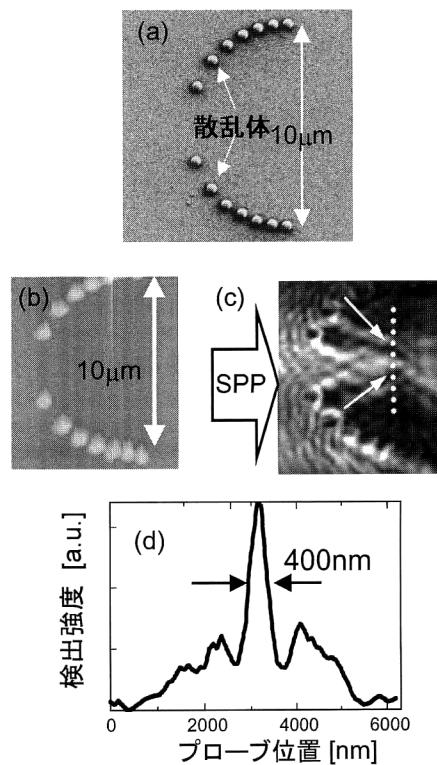


図3 (a) プラズモン集光器のSEM像。(b) 図(a)のシアフォース像。(c) 図(b)におけるNOM像。(d) 図(c)の白点線上の断面図。

た。集光器および作製した試料のSEM像を図4(a), 4(b)に示す。伝送路部分の各NOM像を図4(c), 4(d)に、伝送路の中心を通る白破線部分の断面プロファイルを図4(e)に示す。この結果から、金属コア導波路の場合(図4(e)における破線)はSPPの焦点である入力部分より1  $\mu\text{m}$ 程度伝搬すると光強度が10分の1に減衰するのに対し、ナノドットカップラーの場合(図4(e)における実線)は4  $\mu\text{m}$ 先までプラズモン・ポラリトンが伝送しており、ナノドットカップラーの優位性が実験的にはじめて観測された。

また、突起型伝送路の近接場光分布幅は250 nmと、ナノドットカップラーを構成するドット径とほぼ同等であつ

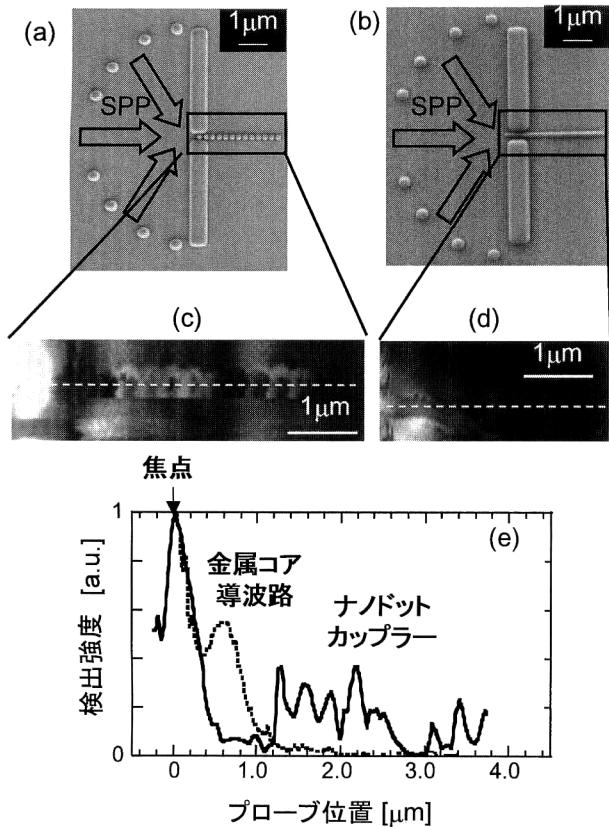


図 4 (a) プラズモン集光器およびナノドットカップラーの SEM 像. (b) プラズモン集光器および金属コア導波路の SEM 像. (c) ナノドットカップラー (図 (a) 黒四角部) 上における NOM 像. (d) 金属コア導波路 (図 (b) 黒四角部) 上における NOM 像. (e) 図 (c) および (d) における白破線上の断面図.

た。これは現状の作製プロセスにおいて、突起物のサイズが作製に用いた FIB の分解能に制限されているためであり、電子ビーム描画装置等を用いることで数十 nm の伝送路が実現可能である。

特にナノドットカップラーについては、今後の伝送効率向上のためには粒径制御が必要であるが、筆者らが開発した「物質寸法依存の近接場光共鳴吸収による脱離法」<sup>8,9)</sup>,

により実現可能であると期待される。また、金属微粒子間は近接場光により結合されるため、ナノドットカップラーを並列化した際の干渉は小さいと考えられ、プラズモン集光器を用いた周波数多重による超並列化が期待される。

## 文 献

- 1) M. Ohtsu, K. Kobayashi, T. Kawazoe, S. Sangu and T. Yatsui: "Nanophotonics: Design, fabrication, and operation of nanometric devices using optical near fields," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **8** (2002) 839–862.
- 2) J. Takahara, S. Yamagishi, H. Taki, A. Morimoto and T. Kobayashi: "Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 475–477.
- 3) B. Lamprecht, J. R. Krenn, G. Schider, H. Ditlbacher, M. Salerno, N. Felidj, A. Leitner, F. R. Aussenegg and J. C. Weeber: "Surface plasmon propagation in microscale metal stripes," *Appl. Phys. Lett.*, **79** (2001) 51–53.
- 4) T. Yatsui, M. Kourogi and M. Ohtsu: "Plasmon waveguide for optical far/near-field conversion," *Appl. Phys. Lett.*, **79** (2001) 4583–4585.
- 5) S. A. Maier, P. G. Kik, H. A. Atwater, S. Meltzer, E. Harel, B. E. Koel and A. G. Requicha: "Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides," *Nat. Mater.*, **2** (2003) 229–232.
- 6) J. R. Krenn, A. Dereux, J. C. Weeber, E. Bourillot, Y. Lacroute, J. P. Goudonnet, G. Schider, W. Gotschy, A. Leitner, F. R. Aussenegg and G. Girard: "Squeezing the optical near-field zone by plasmon coupling of metallic nanoparticles," *Phys. Rev. Lett.*, **82** (1999) 2590–2593.
- 7) M. Quinten, A. Leitner, J. R. Krenn and F. R. Aussenegg: "Electromagnetic energy transport via linear chains of silver nanoparticles," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 1331–1333.
- 8) 野村 航, 八井 崇, 興梠元伸, 大津元一：“金属ナノ微粒子堆積の光制御”, 第 50 回春季応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3 (2003) p. 1110.
- 9) T. Yatsui, S. Takubo, J. Lim, W. Nomura, M. Kourogi and M. Ohtsu: "Regulating the size and position of deposited Zn nanoparticles by optical near-field desorption using size-dependent resonance," *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 1716–1718.

(2003 年 10 月 9 日受理)