

# プラズモニクス・フォトリクス融合ハイブリッド通信デバイスのためのカプラ開発

代表研究者

岡本 浩行

阿南工業高等専門学校 創造技術工学科 准教授

## 1 はじめに

情報通信技術(ICT)機器の発展, モノのインターネットなどの新たな情報サービスの提供, 日常生活に必要な情報の収集など ICT は日常生活に不可欠なものとなっている. 2015 年度の総ダウンロードトラフィックは推定で 5.4Tbps と 2014 年度と比較すると 52.8%増加しており [1], 通信トラフィックは年々増加している. これに対応するため, ネットワークの大容量化が進められており, 光を利用した波長多重通信システムなどが導入されている. しかし光の回折限界により光デバイスのサイズは光の波長程度に制限され, 電子デバイスと比較すると桁違いに大きくなる. そのため光デバイスだけではシステムを構成できず, 電子デバイスと組み合わせたシステムとなっている [2]. 光だけでシステムを構築することでさらなる大容量化が可能であるため, 光エネルギーから変換可能で, 回折限界のない表面プラズモンポラリトン (SPP) を通信に利用する方法が検討されている [2]. SPP をキャリアとして動作するデバイス (プラズモニックデバイス) は数多く報告されており, 研究は活発に進められている [3-10]. しかし, プラズモニックデバイスと光デバイスを融合したハイブリッド光デバイスについての報告は少なく, プラズモニックデバイスにはグレーティングやエンドファイヤーカップリングなどを用いて光から表面プラズモンポラリトンに結合している. これらのカップリング方法はプラズモニックデバイス単体の評価には有効に利用できるが, 光デバイスとの親和性は低くなるため, 光デバイスとプラズモニックデバイスを融合することは難しい. これまでに報告されたプラズモニックカプラは結合効率が低いことやカプラ構造のサイズが大きいあるいはカプラ構造が複雑など光導波路を伝搬する導波光から表面プラズモンポラリトンに結合できる適切なカプラが存在しないことが原因と考えられる. 本研究は光導波路を伝搬する導波光から表面プラズモンポラリトンに結合できるカプラ構造を考案した. 考案したカプラ構造は光導波路の一部にプラズモニックデバイスを組み込んだ構造であり, プラズモニックデバイスの入出力ポートとして光導波路を利用する. カプラ構造の数値解析により, 光導波路とプラズモニック導波路の実効屈折率が近い値になるよう最適化することで, 結合時の損失を減らすよう設計した. また, 光導波路の一部に金属を蒸着することでプラズモニックデバイスを組み込む構造を適用する. これらにより考案したカプラ構造は高い結合効率を有し, 単純かつ小さいサイズでカプラ構造の開発が可能である. このカプラを実現することにより, 表面プラズモンポラリトン (プラズモニクス) と光 (フォトリクス) を融合したハイブリッド光デバイスの実現が可能となる.

本研究では考案した構造の設計及び構造を作製し, その評価を行うことを目的とする. 設計した構造は数値シミュレーションにより評価を行う. 考案した構造は電子線リソグラフィにより作製して, 通信波長帯の光を用いて評価する.

## 2 カプラ構造設計

図 1 に本研究で開発するカプラ構造を示す. 光導波路はコアにシリコン, クラッドは空気, 基板をシリカとした. またプラズモニック導波路のコアはシリコン, 金属は金, 基板をシリカとした. 構造は光導波路の一部を金属で蒸着してプラズモニック導波路とする. 図 1 の構造はカプラ構造単体となっているが, プラズモニックデバイスを付加する場合は導波路のコアであるシリコンにプラズモニックデバイスの構造を作製しておくことで, 金属を蒸着すればカプラ構造と組み合わされたプラズモニックデバイスとなる. まず表面プラズモンポラリトンと光を融合したカプラ開発のために図 1 の構造において, 損失を減らすためにプラズモニック導波路と光導波路の実効屈折率が近い値になる構

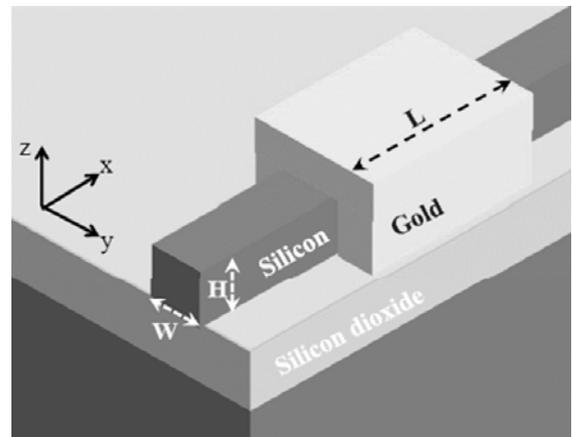


図 1 カプラ構造

造の設計を行った。

図2に数値解析により求めた図1に示す光導波路とプラズモニック導波路構造の実効屈折率と高さ(H)と幅(W)の関係を示す。プラズモニック導波路はopen circle, 光導波路はclosed circleで示す。この図より、幅500 nm, 高さ300 nmにおいてプラズモニック導波路の実効屈折率は3.07, 光導波路の実効屈折率が2.46となり、最も実効屈折率の差が小さくなる。よってカブラ構造の幅及び高さをそれぞれ500 nmと300 nmとする。

次に幅500 nm, 高さ300 nmのカブラ構造について光導波路単体の場合とプラズモニック導波路を付加した場合の透過特性を時間領域差分(FDTD)法により評価を行った。評価結果を図3に示す。実線がプラズモニック導波路を付加した場合、破線が光導波路単体のときの透過特性を示す。透過光の強度が入射光強度と同じ場合に0 dBとなる。この結果より、考案したカブラ構造は波長特性を有することが明らかになった。波長が1530 nm付近ではプラズモニック導波路を付加した構造と光導波路単体の透過光強度がほぼ等しい値となっており、一度光導波路の導波光から表面プラズモンポラリトンにカップリングして、プラズモニック導波路を伝搬した後、表面プラズモンポラリトンから光導波路の導波光にデカップリングしても損失は0.3 dB程度であり、提案したカブラ構造は大幅に損失を低減できることが分かった。ただし、図3の評価結果からは金を蒸着する領域の長さ(L)により透過光強度は影響を受けるため、幅及び高さだけでなく、高効率なカブラとするためには蒸着する部分の最適な長さを求める必要がある。

図4にLの長さを1200-1400 nmの範囲で変化させた時の透過特性を示す。Lの値により透過光強度は大きく変化する。Lの長さが1300 nmの場合に波長1483 nm付近で透過光強度は-19 dBまで低下し、波長1530 nmの場合に透過光強度は-9 dBとなる。この原因について調査するためにそれぞれの波長における電界強度分布をFDTD法により求めた。求めた結果を図5に示す。図5(a)は波長1483 nmの光を入射した場合、図5(b)は波長1530 nmの光を入射した場合である。波長1483 nmを入射した場合はプラズモニック導波路内で表面プラズモンポ

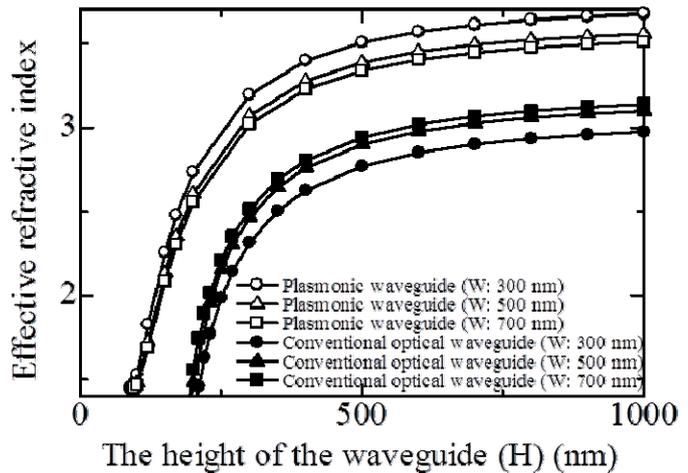


図2 光導波路及びプラズモニック導波路の実効屈折率

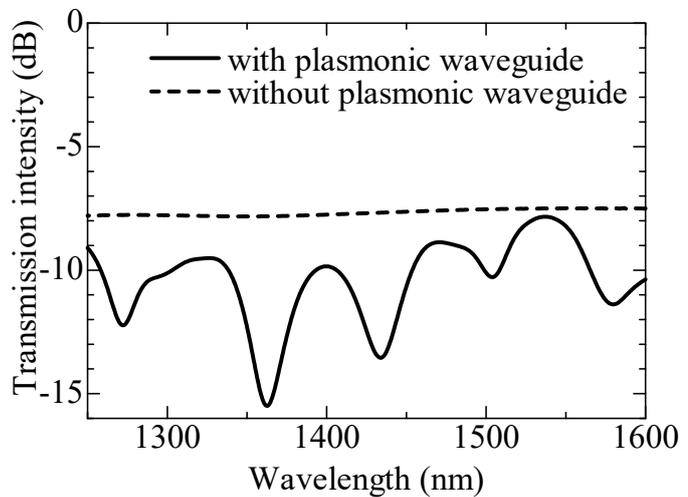


図3 光導波路単体の場合とプラズモニック導波路を付加した場合の透過特性

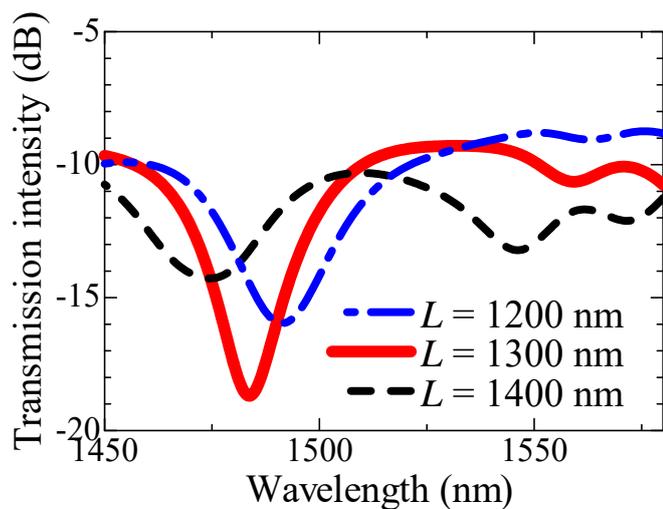


図4 プラズモニック導波路の長さ(L)と出力の関係

ラリトンが共振して、プラズモニック導波路内の電界強度が高くなっており、プラズモニック導波路から透過ポート側の光導波路の境界において表面プラズモンポラリトンは反射していることが分かる。そのため透過ポートの光導波路側に伝搬する光強度は低くなっている。一方、波長 1530 nm の光を入射した場合はプラズモニック導波路を伝搬する表面プラズモンポラリトンは透過ポート側の光導波路の導波光へスムーズにデカップリングしていることが分かる。この場合はプラズモニック導波路を付加しない構造と同じ程度の透過光強度となる。よって提案するカプラ構造は波長 1500 nm 付近では透過光強度が大きくなる L の長さ(1300 nm)に設定する必要がある。

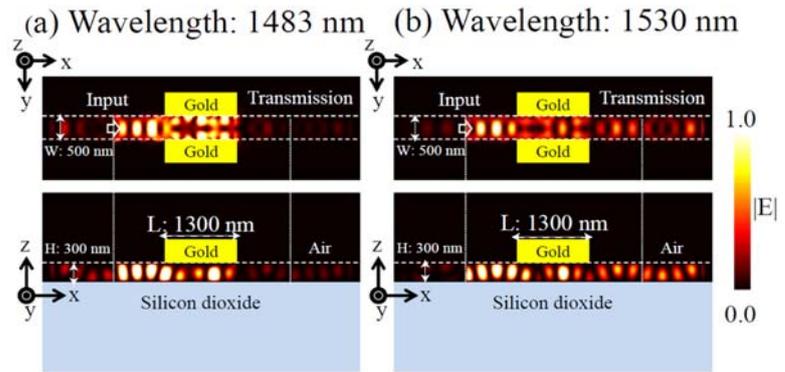


図 5 時間領域差分法による評価結果

### 3 構造の作製

#### 3-1 作製プロセス

設計した構造について電子線リソグラフィによる作製が可能であることを確認するため、図 6 に示す作製プロセスを用いて構造の作製を行った。作製プロセスについては次の通りである。まず基板の上に電子線のレジストをスピコートする。次に電子線露光及び現像を行い、導波路構造作製の準備をする。Ni を 100 nm の厚さでスパッタにより成膜する。反応性イオンエッチングにより導波路部分を作製する。Ni 選択エッチングにより Ni を取り除く。再び電子線レジストをスピコートする。電子線露光及び現像を行い、プラズモニック導波路の金を蒸着するための準備をする。金を光導波路の一部に 100 nm の厚さで蒸着し、プラズモニック導波路を光導波路の一部に組み合わせた構造の作製を行う。

図 7 に図 6 の作製プロセスにより作製したカプラ構造の断面を示す。図 7 よりコアがシリコン、クラッドが空気の導波路と金属が金のトレンチ型のプラズモニック導波路を組み合わせた構造がほぼ設計した通りのパラメータで作製できていることが分かる。図 7 で作製した構造は光導波路への入射に用いるテーパ構造など持たないため、光導波路への入射は難しい。そのため作製した構造の評価を容易に行うために、光導波路に光を入射するためのテーパ構造を付加した構造の作製を行った。図 8 にテーパを付加したカプラ構造を示す。まず入力ポートには入射された光が導波路方向に反射するようにミラー構造を作製した。入力ポートは  $5 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  のサイズとした。また透過ポートはテーパから伝搬した光が入射方向に反射するように入力ポートと同じミラー構造を作製した。透過ポートのサイズは入力ポー

#### 作製プロセス

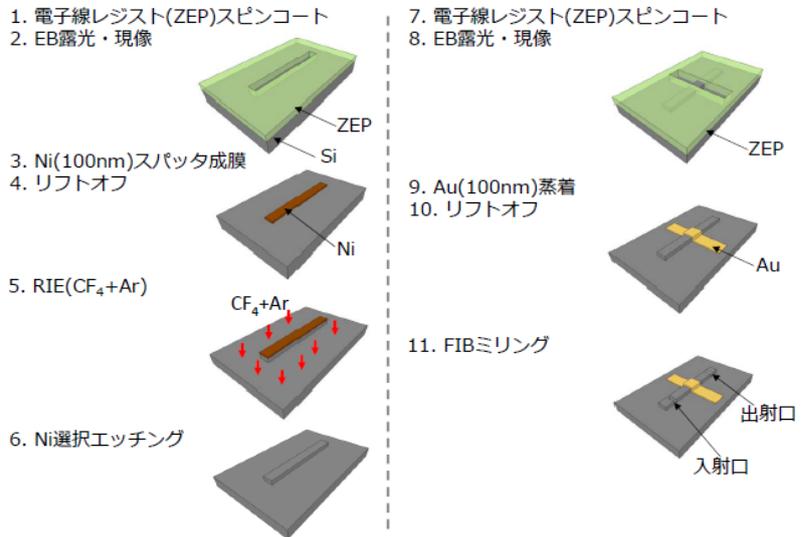


図 6 作製プロセス

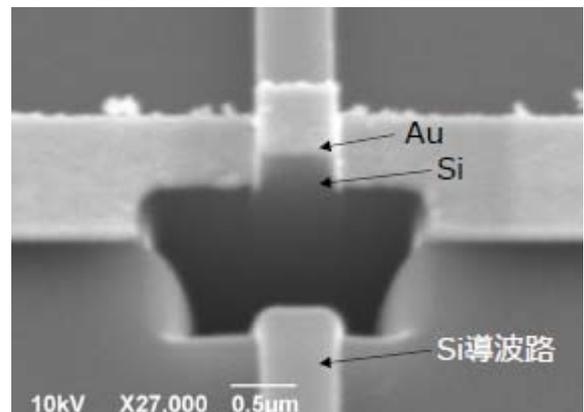


図 7 作製したカプラ構造

トと同じ  $5\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  とした．入力及び透過ポートをミラー構造とすることで上方から対物レンズなどで集光した光を入射しても導波路側に反射され，また透過ポートではテーパを伝搬してきた光が上方に反射されることで評価の実施が容易になる．テーパ構造は  $5\ \mu\text{m}$  の幅から  $500\ \text{nm}$  の幅になるまで  $20\ \mu\text{m}$  の長さとした．また光導波路とプラズモニック導波路を組み合わせた構造の長さは  $5\ \mu\text{m}$  として，透過ポートにも同じテーパ構造を付加した．図 9 に作製したテーパ構造を付加したカプラ構造を示す．ただし，図 9 ではプラズモニック導波路の部分に金属は蒸着されていない状態であるため，光導波路単体の構造となっている．

### 3-2 作製した構造の評価

3-1 節で作製した図 9 の構造について入射ポートから透過ポートまで入射した光が伝搬することを確認するために，まず評価を行うのが容易な波長  $650\ \text{nm}$  の光を用いて評価を実施した．評価に用いたセットアップを図 10 に示す．評価のためのセットアップは半導体レーザーからのレーザー光を対物レンズにより入力ポートのテーパに入射する．入射された光が透過ポートまで到達すると対物レンズ方向に反射するようにミラー構造を作製しているため，入射方向に透過光は反射される．よって透過ポートから反射される光を観測することで入力ポートから透過ポートまで光が伝搬したことを確認できる．まず波長  $650\ \text{nm}$  の光を入射したときの結果を図 11 に示す．入力ポートに入射された光はテーパ構造を伝搬し，透過ポートにおいて透過光を確認できる．よって波長  $650\ \text{nm}$  の光において，作製した構造は入力側のテーパから幅が  $500\ \text{nm}$  の導波路部分，さらに透過ポート側のテーパを伝搬し，透過ポートまで伝搬していることを確認できた．次に本研究の目的である通信波長域である  $1300\ \text{nm}$  の光において同じ評価を行った．評価の結果を図 12 に示す．波長  $1300\ \text{nm}$  の場合も同様に入力ポートのテーパに入力された光は透過ポートで確認できる．この結果から，波長  $1300\ \text{nm}$  の光においても入力ポート側のテーパ，幅が  $500\ \text{nm}$  の導波路部分，透過ポート側のテーパを伝搬して透過ポートまで伝搬している．これらの結果から作製した構造は通信波長域において入力ポートから透過ポートまで光が伝搬することを確認できた．

## 4 まとめ

本研究は表面プラズモンポラリトン（プラズモニック）と光（フォトンクス）を融合するためのカプラ開発を目的として実施した．考案したカプラ構造はシンプルな構造であり，結合の損失を大幅に低減できることが数値解析により明らかになった．波長  $1530\ \text{nm}$  付近では導波光から表面プラズモンポラリトンにカップリングし，プラズモニック導波路を伝搬し，表面プラズモンポラリトンから導波光にデカップリングした場合の透過光強度は同じ距離を伝搬する通常の光導波路と比較して  $0.3\ \text{dB}$  程度の損失しか発生しない．設計した構造を実際に作製

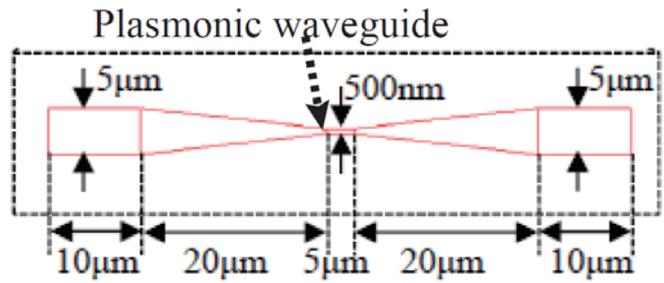


図 8 テーパを付加したカプラ構造

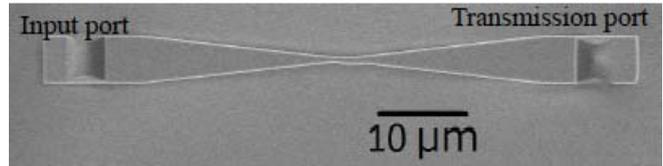


図 9 作製したテーパ付加カプラ構造

3-1 節で作製した図 9 の構造について入射ポートから透過ポートまで入射した光が伝搬することを確認するために，まず評価を行うのが容易な波長  $650\ \text{nm}$  の光を用いて評価を実施した．評価に用いたセットアップを図 10 に示す．評価のためのセットアップは半導体レーザーからのレーザー光を対物レンズにより入力ポートのテーパに入射する．入射された光が透過ポートまで到達すると対物レンズ方向に反射するようにミラー構造を作製しているため，入射方向に透過光は反射される．よって透過ポートから反射される光を観測することで入力ポートから透過ポートまで光が伝搬したことを確認できる．まず波長  $650\ \text{nm}$  の光を入射したときの結果を図 11 に示す．入力ポートに入射された光はテーパ構造を伝搬し，透過ポートにおいて透過光を確認できる．よって波長  $650\ \text{nm}$  の光において，作製した構造は入力側のテーパから幅が  $500\ \text{nm}$  の導波路部分，さらに透過ポート側のテーパを伝搬し，透過ポートまで伝搬していることを確認できた．次に本研究の目的である通信波長域である  $1300\ \text{nm}$  の光において同じ評価を行った．

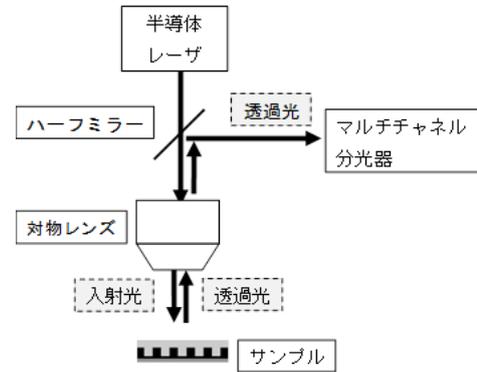


図 10 構造評価のセットアップ

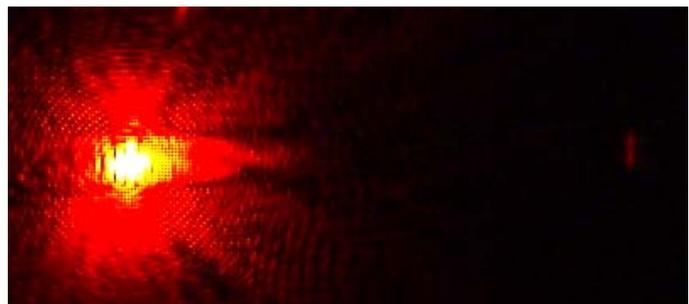


図 11 波長  $650\ \text{nm}$  の光を入射した時の評価結果(光学



図 12 波長  $1300\ \text{nm}$  の光を入射した時の評価結果(光学顕微鏡イメージ)

することで簡単な作製プロセスにより作製可能であることが確認できた。またほぼ設計通りに作製できることについても確認できた。設計した構造について入力ポートから透過ポートまで光を伝搬できることを評価するためにテーパーを付加した構造についての作製を実施した。評価のために作製した構造にプラズモニック導波路の付加はできなかったが、作製したテーパー構造が付加された導波路構造は可視光領域の 650 nm 及び通信波長域の 1300 nm の光を用いて入力ポートから透過ポートまで光が伝搬することを確認した。今後はテーパーを付加した導波路構造に金を蒸着してカプラ構造を作製し、評価を行う予定である。

考案したカプラ構造はカプラ構造の長さにより、透過光強度が変化するため、利用する波長域が限定されるなどの問題がある。しかし、提案した構造はシンプルなカプラ構造であり、簡単な作製プロセスで作製可能であるため、今後プラズモニクスとフォトニクスを融合させるためのカプラとして利用可能であると考えられる。

## 【参考文献】

- [1] 総務省総合通信基盤局, 我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計結果, 平成 28 年.
- [2] H. A. Atwater: "The promise of plasmonics", *Sci. Am.* Vol. 296, pp. 56-63 (2007).
- [3] B. Min, E. Ostby, V. Sorger, E. U.-Avila, L. Yang, X. Zhang, and K. Vahala, " High-Q surface-plasmon-polariton whispering-gallery microcavity", *Nature*, Vol. 457, pp. 455-458 (2009).
- [4] G. Biagi, J. Fiutowski, I. P. Radko, H.-G. Rubahn, K. Pedersen, and S. I. Bozhevolnyi: "Compact wavelength add-drop multiplexers using Bragg gratings in coupled dielectric-loaded plasmonic waveguides", *Opt. Lett.*, Vol. 40, pp. 2429-2432 (2015).
- [5] Y. Xiang, X. Zhang, W. Cai, L. Wang, C. Ying, and J. Xu, "Optical bistability based on Bragg grating resonators in metal-insulator-metal plasmonic waveguides" *AIP Adv.*, Vol. 3, 012106 (2013).
- [6] L. Yi, Y. Liu, and J. Kim, "Characteristics of plasmonic Braggreflectors with insulator width modulated in sawtooth profiles", *Opt. Express* Vol. 18 pp. 11589-11598 (2010).
- [7] C. L. C. Smith, B. Desiatov, I. Goykman, I. F.-Cuesta, U. Levy, A. Kristensen, "Plasmonic V-groove waveguides with Bragg grating filters via nanoimprint lithography", *Opt. Express* Vol. 20, pp. 5696-5706 (2012).
- [8] H. Okamoto, K. Kusaka, K. Yamaguchi, T. Ohtsu, M. Haraguchi, T. Okamoto, "Self-imaging confirmed in plasmonic channel waveguides at visible wavelengths", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 105 221106 (2014).
- [9] Y. Kou, X. Chen, "Multimode interference demultiplexers and splitters in metal-insulator-metal waveguides", *Opt. Express* Vol. 19, pp. 6042-6047 (2011)..

## 〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Trench plasmonic waveguide filter incorporated with silicon waveguide	The 8th international conference on surface plasmon photonics	2017 年 5 月
アクティブプラズモニックデバイスを用いた屈折率計測	第 78 回応用物理学会学術講演会	2017 年 9 月