

# プラズモニクスとフォトニクスのセルフイメージング活用ハイブリッド通信デバイス開発

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 教授

## 1 はじめに

情報通信技術 (ICT) の発展により情報サービスと連携したシステム提供や日常生活の情報収集など ICT は生活に不可欠なものとなっている。2022 年 11 月時点での日本における総ダウンロードトラフィックは推定で約 29.2 Tbps と前年と比較すると 23.7% 増加している [1]。通信トラフィック急増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、光ファイバーを利用して信号を伝送する光伝送技術が導入されている。しかし信号処理については電子回路を利用しており、電子素子の高集積化に伴うチップ内配線の発熱量の増加が問題となっている。そのためチップ内の配線部分に光伝送技術を導入し、低消費電力化が実現可能な光と電子回路を融合した技術の導入が検討されている。さらなる大容量化や低消費電力化には光と電子回路を融合した技術を高機能化する必要がある、これにはデバイスの微小化が必要となる。しかし光の回折限界により光素子のサイズは光の波長程度に制限され、電子素子と比較すると桁違いに大きくなる。そこで光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を利用する方法が検討されている [2]。表面プラズモンポラリトンを利用する場合、金属による吸収損失が問題となる。この問題に対し、必要な部分のみに表面プラズモンポラリトンを利用し、損失低減及びデバイス微小化を実現できるハイブリッドプラズモニクデバイスが検討されている [3, 4]。代表研究者は図 1 に示す導波路とプラズモニク導波路を組み合わせたハイブリッドプラズモニクデバイスを開発し、プラズモニクモードとフォトニックモードによる生じるセルフイメージングをデバイスに利用することで損失の低減及びデバイス微小化が可能であることを明らかにした [5, 6]。本研究では、これまでに明らかになった特性を活用し、ハイブリッドプラズモニクデバイス構造を光伝送技術の素子として重要な役割を担う波長選択を行うハイブリッド通信デバイス開発を目的として実施した。

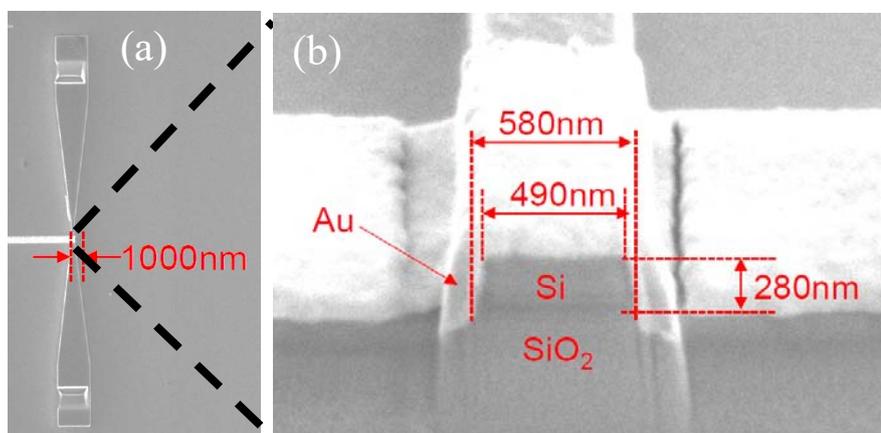


図 1 (a)ハイブリッドプラズモニクデバイス, (b)デバイス断面

## 2 □デバイス構造の設計

### 2-1 □ハイブリッド通信デバイス構造について

図 2 に示す構造で金属の長さ(L)と導波光と表面プラズモンポラリトンのセルフイメージングの状態により、透過あるいは反射する波長の選択が可能となる。SOI 基板上にシリコン光導波路を作製し、作製したシリコン光導波路の一部に金属を蒸着し、ハイブリッドプラズモニック導波路を作製する。作製したハイブリッドプラズモニック導波路内は導波光と表面プラズモンポラリトンが伝搬可能な幅(W)と高さ(H)となるように設計する必要がある。また蒸着する金属については、本研究では金を用いる。蒸着する金の膜厚は 100 nm とした。図 3 に幅 500 nm, 高さ 300 nm の構造において波長 1360 nm 付近の波長を反射するよう設計した構造(L = 1600 nm)の波長特性を示す。図 3 において出力強度が入射光強度と同じ場合に 0 dB とした。実線は透過、破線は反射を示す。図 3 の波長特性からは L を 1600 nm とすることで波長 1360 nm の反射強度は -2.5 dB 程度で極大となり、透過強度は -9.0 dB 程度で極小となることが分かる。

図 4(a)に波長 1300 nm, 図 4(b)に波長 1360 nm の光を入射した場合の有限領域差分法により求めた電界強度分布を示す。図 4 のシミュレーション結果より波長 1300 nm の光はハイブリッド通信デバイスを透過し、出力ポートまで伝搬していることが分かる。一方波長 1360 nm の光はハイブリッド通信デバイスの出力側の端点で反射されて、出力ポートまで伝搬していないことが分かる。このため、L が 1600 nm の構造では波長 1360 nm の光はハイブリッド通信デバイスを透過する光の強度は低下し、反射強度は増加することが分かる。図 4 のハイブリッドプラズモニック導波路内に生じている電界強度分布のイメージが波長により異なることからセルフイメージングの影響であると考えられる。この結果より、図 2 で示す構造を利用し、適切に設計することでハイブリッドプラズモニック導波路内を伝搬する導波光と表面プラズモンポラリトンによるセルフイメージングを活用して、波長を制御できることを確認できた。

## 2-2 作製する構造の設計

開発する構造について、まずシリコン光導波路のサイズについて検討した。図 5 に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の実効屈折率は白丸(W:300 nm), 白三角(W:500 nm), 白四角(W:700 nm), シリコン光導波路の実効屈折率は黒丸(W:300 nm), 黒三角(W:500 nm), 黒四角(W:700 nm)で示す。図 5 より、幅(W)300 nm, 高さ(H)250 nm においてプラズモニック導波路の実効屈折率は 3.2 程度、

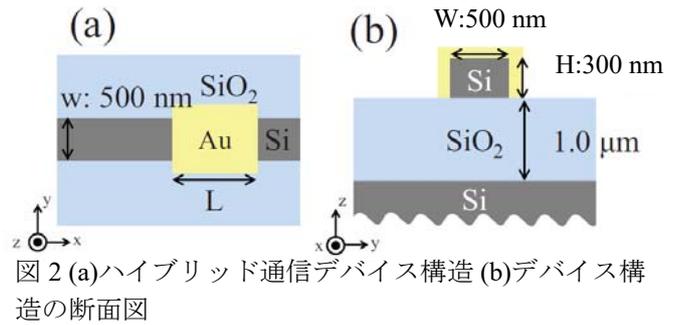


図 2 (a)ハイブリッド通信デバイス構造 (b)デバイス構造の断面図

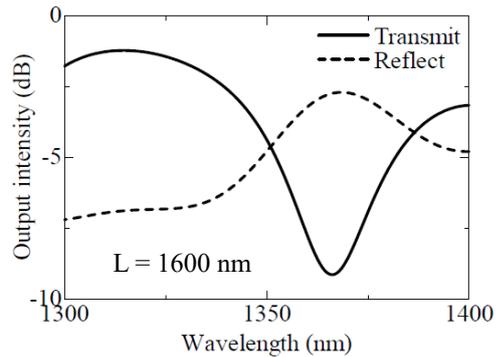


図 3 考案したハイブリッド通信デバイスの波長特性

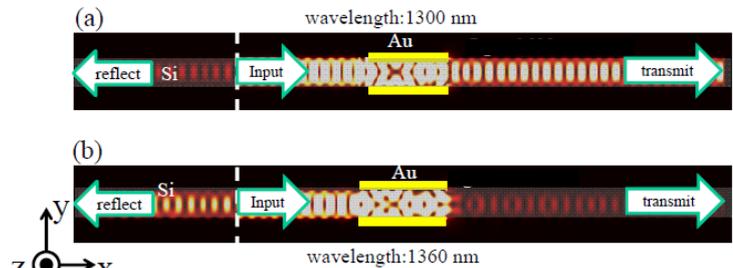


図 4 ハイブリッド通信デバイス構造 (L=1600 nm) の電界強度分布 (a) 波長 1300 nm, (b) 波長 1360 nm

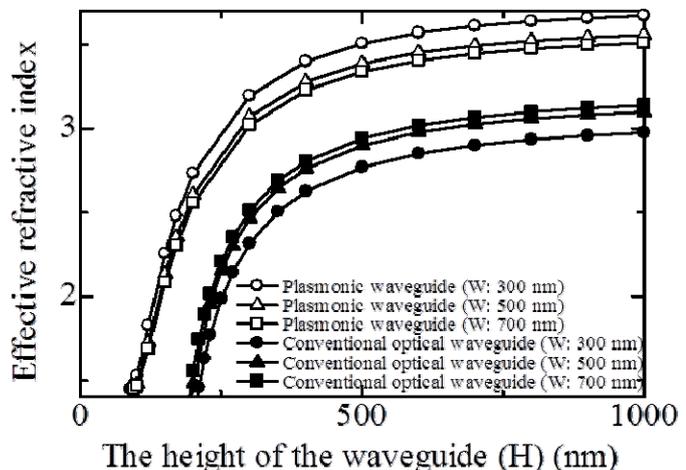


図 5 光導波路及びプラズモニック導波路の実効屈折率

シリコン光導波路の実効屈折率が 2.0 となり、導波光及び表面プラズモンポラリトンが伝搬可能なハイブリッドプラズモニック導波路となる。そのため、本研究ではハイブリッド通信デバイスの幅 (W) 及び高さ (H) をそれぞれ 300 nm と 250 nm とした。次にハイブリッド通信デバイスの透過強度と金を蒸着する長さ (L) の関係を求めた。図 6 にデバイスの透過強度と L の関係を示す。L の範囲は 500 nm から 2000 nm の範囲で求めた。また図 6 において透過強度が出力強度と同じ強度の場合に 0 dB とした。入射光の波長は設計した構造の評価を予定しているため、代表研究者が作製した構造の評価可能な波長である 1300 nm とした。図 6 から L が 500 nm のときに透過強度は -3.0 dB 程度となり 1200 nm のときに透過強度は -7.0 dB 程度で極小となる。それぞれの L の値において、波長 1300 nm の光が入射された場合の電界強度分布について有限領域差分法で求めた結果を図 7 に示す。図 7(a) は L が 500 nm、図 7(b) は L が 1200 nm の電界強度分布である。L が 500 nm の構造ではハイブリッド通信デバイスで反射される光はなく Input ポートに入射された光はハイブリッド通信デバイスを透過して Output ポートまで伝搬している。一方、L が 1200 nm の構造では一部の光が反射されていることが分かる。また、Output ポートまで伝搬する光強度は L が 500 nm の構造と比較すると弱くなっていることが確認できる。これより、図 6 に示す透過強度と L の関係では L が 1200 nm の構造では一部の光がハイブリッド通信デバイスで反射されるため、透過強度が弱くなることを確認できた。L が 500 nm の構造ではハイブリッド通信デバイスで反射されることなく透過することを確認できた。よって作製するハイブリッド通信デバイス構造として L が 500 nm 及び 1200 nm の構造を作製することにした。

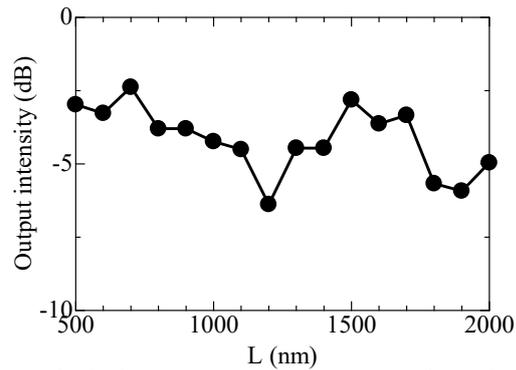


図 6 入射光波長 1300 nm におけるハイブリッド通信デバイスの透過強度と L の関係

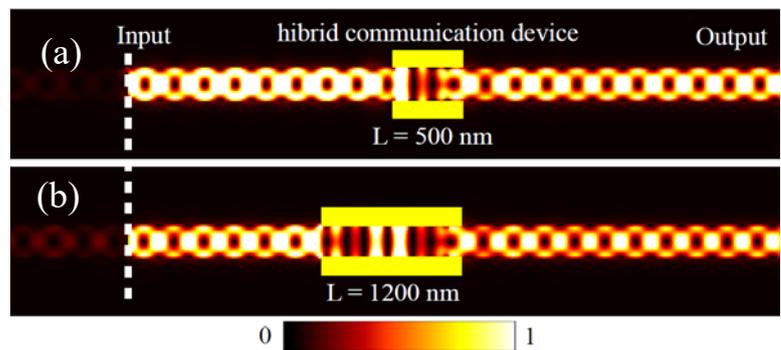


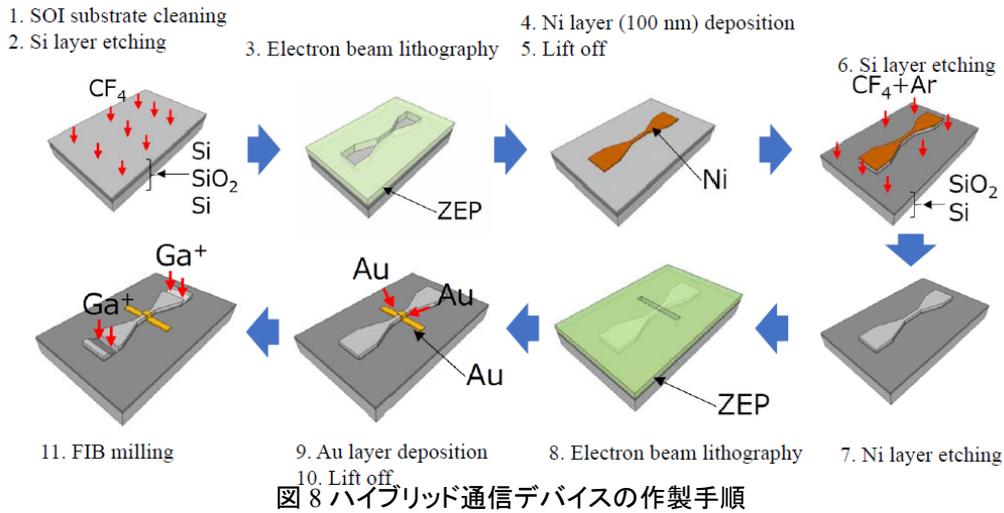
図 7 ハイブリッド通信デバイスの電界強度分布  
入射波長 1300 nm (a) L = 500 nm, (b) L = 1200 nm

### 3 ハイブリッド通信デバイス構造の作製

#### 3-1 作製手順

設計したハイブリッド通信デバイス構造について図 8 に示す手順で作製した。SOI 基板上に電子線のレジストをスピコートする。次に電子線による露光及び現像を行い、シリコン光導波路構造の作製準備を行う。Ni を 100 nm の厚さでスパッタにより成膜し、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して、電子線露光及び現像を行い、ハイブリッドプラズモニック導波路とするために必要となる金の蒸着準備を行う。金をシリコン光導波路の一部に 100 nm の厚さで蒸着し、ハイブリッドプラズモニック導波路構造の作製を行う。ハイブリッドプラズモニック導波路構造の長さ (L) を変えた構造を作製するために蒸着する金の幅を複数変えた構造の作製を行う。また、入出力ポートとしてグレーティング構造を作製した。さらに幅 300 nm、高さ 250 nm のシリコン光導波路に光を入射するためにテーパー構造を作製した。これにより、入力ポートのグレーティングに入射された光はテーパー構造によりシリコン光導波路に低損失で伝搬可能であり、ハイブリッド通信デバイスの入力が可能となる。出力ポートについては、入力ポートと同じようにテーパー構造、グレーティング構造を作製し、グレーティング構造から出力される光強度を確認することで、ハイブリッド通信デバイスを透

過した光強度の確認が可能となる。



### 3-2 作製構造

図9に作製したハイブリッド通信デバイス構造の光学顕微鏡像を示す。図8に示す作製手順に従って作製を行った。Inputポート及びOutputポートのグレーティング構造及びテーパー構造については設計通りに作製できている。またハイブリッド通信デバイスの部分についてはワイヤー状の金を用いて蒸着を行った。図10にハイブリッド通信デバイス構造の走査電子顕微鏡像を示す。Lが500nmの構造を作製したところ、作製した構造のLの値は652nmであり、誤差は150nm程度生じていることを確認した。複数作製した他の構造についても同様の誤差であり、評価を行う場合はLの値について補正が必要であることが分かった。シリコン光導波路については設計した幅300nmにおいて問題となるような誤差は発生していない。

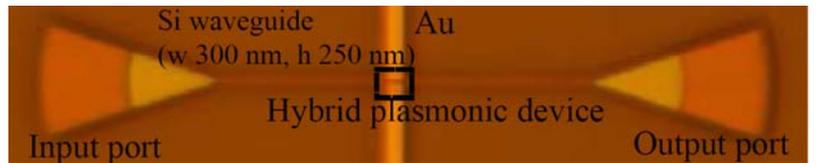


図9 作製したハイブリッド通信デバイスの光学顕微鏡像

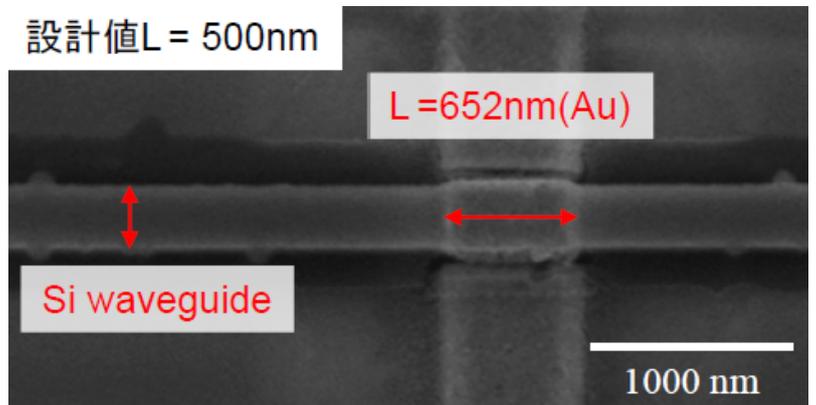


図10 作製したハイブリッド通信デバイスの走査電子顕微鏡像

## 4 ハイブリッド通信デバイスの評価

図11に作製したハイブリッド通信デバイス構造の評価に利用したセットアップを示す。入射光源は波長1300nmの半導体レーザーを用いた。また、作製した構造のグレーティング部分に対物レンズで集光した光を入射した。図12に入力ポートのグレーティングに波長1300nmの光を集光したときの光学顕微鏡像を示す。図12からはInputポートに作製したグレーティング構造に入力光が集光されていることを確認できる。透過強度の確認

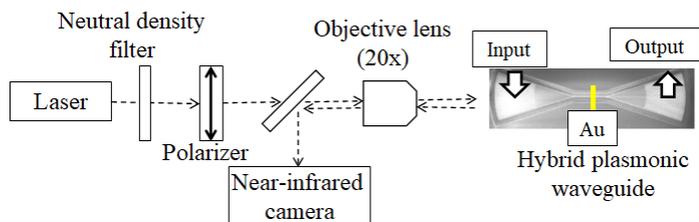


図11 ハイブリッド通信デバイスの評価セットアップ

は Output ポートのグレーティング構造から出力される光強度を確認した. 波長 1300 nm の光を Input ポートに入射した場合, 図 13(a)に L が 500 nm の構造 (作製誤差を考慮した場合 L は 650 nm 程度), 図 13(b)に L が 1000 nm の構造 (作製誤差を考慮した場合 L は 1150 nm 程度) の Output ポートの光学顕微鏡像を示す. 図 13(a)と図 13(b)を比較すると Output ポートのグレーティング構造から出力される光強度は L が 500 nm[図 13(a)]の構造が強く, L が 1000 nm[図 13(b)]の構造が弱い. これは図 6 に示す有限領域差分法により求めたハイブリッド通信デバイスの透過強度と L の関係から得られた結果と同じ傾向を示している. L が 500 nm (作製誤差を考慮した場合 L は 650 nm 程度) の構造ではハイブリッド通信デバイスで反射されずに透過するため Output ポートにおける光強度が強く, L が 1000 nm (作製誤差補正後は L は 1150 nm) の構造ではハイブリッド通信デバイスで光の一部が反射されるため, Output ポートに到達する光強度は弱くなると考えられる. この結果から, 本研究において設計, 作製したハイブリッド通信デバイスは通信波長域においてハイブリッドプラズモニック導波路内を伝搬する導波光と表面プラズモンポラリトンにより生じるセルフイメージングを活用して波長の制御を行うデバイスとして利用できることを確認できた.

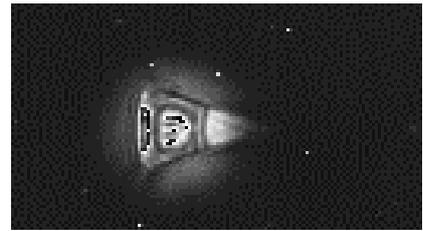


図 12 ハイブリッド通信デバイスの入力ポートの光学顕微鏡像

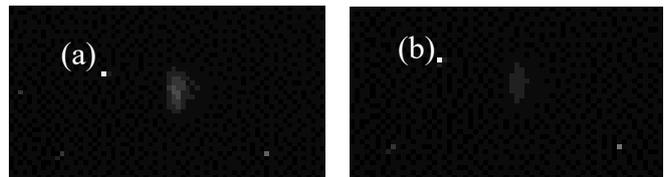


図 13 入射光の波長 1300 nm におけるハイブリッド通信デバイス評価結果 (a) L = 500 nm(作製誤差を考慮した場合は L = 650 nm 程度), (b) L = 1000 nm(作製誤差を考慮した場合は L = 1150 nm 程度)

## 5 まとめ

本研究はシリコン光導波路の一部に金を蒸着することで通信波長域の導波光と表面プラズモンポラリトンが伝搬するハイブリッドプラズモニック導波路を作製し, ハイブリッドプラズモニック導波路内を伝搬する導波光と表面プラズモンポラリトンにより生じるセルフイメージングを活用して, 透過する波長などの制御が可能なハイブリッド通信デバイスを開発した. 設計, 作製を行った構造については作製誤差を含んでいるものの設計した特性を有する構造を作製できた. さらに作製した構造について波長 1300 nm の光を入射して評価を行った結果, 有限領域差分法により明らかにした透過特性と同じ傾向を示すことを確認した.

今後は, ハイブリッドプラズモニック導波路内を伝搬する導波光と表面プラズモンポラリトンにより生じるセルフイメージングを活用して, 新しい特性を有する構造の設計, 作製などを行う予定である.

### 【参考文献】

- [1]. 総務省, 令和 5 年版情報通信白書, (2023).
- [2] Koch, U., Uhl, C., Hettrich, H. et al., “A monolithic bipolar CMOS electronic–plasmonic high-speed transmitter.”, *Nature Electronics*, vol. 3, pp. 338-345 (2020).
- [3] 小野 真証, 納富 雅也, “プラズモニック導波路の光素子応用”*応用物理*, vol. 88, pp. 465-469 (2019).
- [4] M. Fukuda, Y. Tonooka, T. Inoue, M. Ota, “Feasibility of plasmonic circuits for on-chip interconnects”, *Solid-State Electronics*, vol. 156, pp. 33-40, (2019).
- [5] Hiroyuki Okamoto, Shun Kamada, Masanobu Haraguchi, Toshihiro Okamoto, “Design of a hybrid plasmonic waveguide device using a trench structure”, *Journal of Physics Communications*, vol. 4, 095022 (2020).
- [6] Hiroyuki Okamoto, Shun Kamada, Kenzo Yamaguchi, Masanobu Haraguchi, Toshihiro Okamoto, “Experimental confirmation of self-imaging effect between guided light and surface plasmon polaritons in hybrid plasmonic waveguides”, *Scientific Reports*, vol.12, 17943, (2022).

〈発表資料〉

| 題名                      | 掲載誌・学会名等                           | 発表年月    |
|-------------------------|------------------------------------|---------|
| ハイブリッドプラズモニクデバイスの伝搬特性評価 | 2023年 第84回応用物理学会秋季学術講演会, 22p-P04-4 | 2023年9月 |
|                         |                                    |         |
|                         |                                    |         |
|                         |                                    |         |