金属ナノ共振器とシリコン導波路の集積化による光通信用減衰器の製作

金森 義明, 高橋 大洋, 羽根 一博

東北大学大学院 工学研究科ナノメカニクス専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉6-6-01)

Fabrication of Optical Attenuators for Optical Communication Based on Integration of Metal-Nanophotonic Resonators and Silicon Waveguides

Yoshiaki KANAMORI, Taiyo TAKAHASHI, and Kazuhiro HANE

Department of Nanomechanics, Tohoku University, 6-6-01 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579

(Received September 15, 2015)

Plasmonic metamaterials with artificial subwavelength structures are attracting much attention. Metal nano-rods are typical plasmonic metamaterials and function as nanophotonic resonators. At the resonant conditions in the visible and near-infrared regions, the electromagnetic waves at the resonant wavelengths strongly couple with the nano-rods and are absorbed due to Joule and radiative losses. Therefore, ultrasmall wavelength-selective absorbers can be made that consist of metal nano-rods. We fabricated wavelength-selective optical attenuators, which are comprised of Au nano-rods that are integrated with silicon waveguides for optical communications. The nano-rods and silicon waveguide were fabricated on silicon-on-insulator substrates with micromachining technologies. An evanescent wave of a propagating light into the silicon waveguide was coupled with a surface-plasmon-polariton mode of the Au nano-rods at a resonant wavelength and efficiently absorbed. At a wavelength of 1565 nm, we observed optical attenuation of -17.7 dB.

Key Words: Metamaterials, Plasmonics, Micromachining, Silicon photonics, Optical attenuators

1. はじめに

メタマテリアルは、サブ波長構造を単位素子とした人工光学物質である。メタマテリアルは微小な共振器として動作し、共振器に励起された表面プラズモンポラリトン (Surface Plasmon Polariton: SPP) が電磁波に対して電氣的または磁氣的な応答を示すことにより、共振特性に応じて巨視的な誘電率や透磁率の変化、すなわち屈折率を変化させる¹⁻⁴⁾。負の屈折率や巨大群屈折率など自然界に存在しない光学応答や、回折限界を超えたサブ波長空間への電磁場局在を実現でき、これまでの光波操作の範疇を超える新たな技術として期待されている。可視～近赤外波長になると、メタマテリアルを構成する金属 (Au, Ag, Al など) のジュール損失が増大する。従って共振周波数において吸収ピークが生じることから、メタマテリアルを用いた波長選択アブソーバーが実現できる⁵⁻⁷⁾。近赤外波長においては、2011年にZhangらが楕円形の金属ナノディスク構造を基板上にアレイ配置したアブソーバーを試作した⁵⁾。なお、これまでに報告されている多くのメタマテリアル・アブソーバーは自由空間での利用を想定しているため、基板上の広範囲にメタマテリアルがアレイ配置されている⁵⁻¹³⁾。

近年、次世代光集積回路の実現に向けてシリコン (Si) を材料としたシリコンフォトリソグラフィが注目を集めてい

る¹⁴⁾。Siは光通信波長の1550 nm 付近において3.4程度の高い屈折率を持ち、低損失であるため、従来の石英系光回路より小型・集積化に適している。シリコンフォトリソグラフィを実現するための一要素として光減衰器がある。光減衰器は、光通信素子の終端器としての利用や、光波長合分波器・光ファイバアンプに内蔵され利得の制御に用いられている。シリコンフォトリソグラフィ向けに試作された光減衰器に、マッハツェンダー干渉計 (Mach Zehnder Interferometer: MZI) 型¹⁵⁾とキャリア吸収型¹⁶⁾がある。MZI型光減衰器は、方向性結合器を利用し光を光路長の異なる二つの経路へと分岐させ、再び結合させることで位相の異なる二つの光の干渉を起こし、出力光の強度を制御する。文献15)の試作例では、結合器の長さに450 μ mを要する。また、半導体のキャリアによる光の吸収を利用した光減衰器は、Si導波路にPINダイオード構造を作り、キャリアを注入することで光の減衰量を制御する。キャリアによる光吸収は小さいため、文献16)の試作例では、減衰器の長さに1 mm程度を要する。

メタマテリアルを光集積回路に適用した事例として、雨宮らは、InP系光導波路とメタマテリアルを融合した光変調器を試作・評価した¹⁷⁾。メタマテリアルによる大きな屈折率変調を利用することで、素子の小型化・高性能化が期待できる。

本論文では、金属ナノ共振器とSi導波路を集積化した

光減衰器を提案および試作する。共振周波数付近で大きな光吸収特性を有する金属ナノ共振器を利用することで、従来のMZI型やキャリア吸収型光減衰器よりも素子の小型化が期待できる。前述のように、これまでに報告されているメタマテリアル・アブソーバーは、自由空間中の伝搬光とモード結合するものであるが、本論文では、導波路表面に局在するエバネッセント波とモード結合するメタマテリアル・アブソーバーを実現する。

2. 光減衰器の動作原理

Fig. 1に、光減衰器の概念図を示す。Si導波路とAuナノロッドのアレが近接配置されている。光が導波路を伝搬するとき、導波路外周にエバネッセント波が浸み出す。Auナノロッドはナノ共振器として機能し、共振波長の光を効率的に吸収する(ジュール熱や放射光として散逸する)ので、共振波長のエバネッセント波がAuナノロッドのSPPモードと結合するとき、伝搬光は減衰する。

Fig. 2に、Si導波路を伝搬する電磁波モードの計算例を示す。実際の測定に合わせ、シングルモードのTEモードを用いた。なお、TEモードは、電界を E 、磁界を H とすると、(E_x , H_y , H_z)成分を持つ。幅400 nm、厚さ260 nmの矩形断面のSi導波路がSiO₂基板上に形成されている。計算には、有限要素法に基づく市販の電磁界モードソルバ(FemSIM, Synopsys社)を用いた。入射波長は1550 nmとし、Si、SiO₂および空気の屈折率はそれぞれ3.52, 1.44, 1.0とした。Fig. 2(a)より、 E_x 成分のエバネッセント波が導波路外部へ浸み出していることが分かる。Fig. 2(b)は、 H_y 成分のモードを示すが、導波路外部への浸み出しは主に導波路上下方向に対してであり、Auナノロッドを配置する水平方向への浸み出しは少ない。従って、 E_x 成分によって励振されるSPPモードを持つAuナノロッドを導波路の横に配置すれば、効率的に光を吸収できることになる。

Fig. 1 A schematic view of a wavelength-selective optical attenuator.

Fig. 2 Cross sections of calculated (a) electric and (b) magnetic fields of an Si waveguide.

3. 設計

Fig. 3に、提案する光減衰器の計算モデルを示す。SiO₂層上に幅400 nm、厚さ260 nmのSi導波路があり、導

Fig. 3 The calculation model.

波路の側面から100 nm離れてAuナノロッドが配置されている。Auナノロッドは、幅150 nm、厚さ160 nm、長さ L の長方形の形状をユニットとして、それが導波路に沿って周期300 nmで50個配列されている。導波路高さとAuナノロッド高さの中心は一致している。計算は、有限差分時間領域法に基づく市販の電磁界解析ソフト(FullWAVE, Synopsys社)を用いた。入射光としてパルス波を用い、減衰器通過後の伝搬波を離散フーリエ変換することで透過スペクトルを求めた。

Fig. 4に、Auナノロッドの長さ L をパラメータとした透過スペクトルの計算値を示す。Auナノロッドの影響により伝搬光が減衰し、 L を350, 400, 450 nmと長くすることで、減衰ピークの位置が長波長側へシフトすることが分かる。また、長波長側ほど減衰量が大きくなっている。これは、長波長ほどエバネッセント波の浸み出しが長くなることに加え、共振器長も長くなるので、エバネッセント波と相互作用する体積が実質的に増えるためだと考えられる。Auナノロッドの長さにより減衰のピーク波長を制御できることが分かる。例えば、 $L=400$ nmの場合、1525 nmを中心として-26dBの減衰が得られる。

次に、Auナノロッド($L=400$ nm)とAu平板との減衰特性の比較を行った。Figs. 5(a), 5(b)に、それぞれの寸法を示す。Au平板は、幅1 μ m、長さ15 μ mで、厚さ(160 nm)および導波路との間隔(100 nm)はAuナノロッドと同じである。Fig. 5(c)に透過スペクトルを示す。Au平板が導波路に近接していても減衰はほぼ無いことが分かる。

Fig. 6に、Auナノロッドによる減衰のピーク波長である、波長1525 nmの連続波をSi導波路に入力したときの電界(E_x)の分布を示す。エバネッセント波を介してSi導波路とAuナノロッドがモード結合し、Auナノロッドの光吸収特性により電界(E_x)が減衰している様子が分かる。

Auナノロッドの共振モードを調べるため、Fig. 6と同じ条件で計算した磁界(H_y)の分布を示す(Fig. 7)。電界(E_x)のエバネッセント波によりAuナノロッドの自由電子が励起され長手方向に振動し、図中の矢印で示す方向に電流が流れる。このとき、電流の向きは交互に入れ替

Fig. 4 Calculated transmittance spectra for nano-rod lengths of 350, 400, and 450 nm.

Fig. 5 Comparison of calculated transmittance spectra between Au nano-rods and an Au plate. Calculation models of Si waveguides with (a) Au nano-rods and (b) an Au plate.

Fig. 6 A top view of calculated electric field (E_x) of an Si waveguide with Au nano-rods.

Fig. 7 A top view of calculated magnetic field (H_y) of an Si waveguide with Au nano-rods.

わっているため、Auナノロッド間の空間に $\pm y$ 方向の磁界が励振され、隣接するAuナノロッド間で共振器の構造を形成している。

4. 製作

Fig. 8に、製作工程の概要を示す。製作には、Silicon-on-insulator(SOI)基板を用いた(Fig. 8(a))。はじめに、電子線(Electron beam: EB)描画用のAu/Crのアライメントマークを製作する(Fig. 8(b))。製作工程中にEB描

Fig. 8 Process steps.

画を3回行い、各描画パターンを高精度にアライメントする必要があるため、アライメントマークの製作が必要になる。アライメントマークは、EB描画によりレジストパターン形成後、EB蒸着によるAu/Cr成膜およびリフトオフ法により製作する。次に、Si導波路を製作する。EB描画によりSi導波路パターンを描画後、高速原子線(SF₆ガス)エッチングにより上部Si層を加工する(Fig. 8(c))。次に、Si導波路とAuナノロッドの高さを合わせるため、EB描画、SiO₂のEB蒸着、リフトオフ法により、Auナノロッドの土台を形成する(Fig. 8(d))。次に、EB描画、Au/CrのEB蒸着、リフトオフ法により、Auナノロッドを製作する(Fig. 8(e))。最後に、基板裏側よりダイシングソーで溝入れを行い、溝に沿って基板を劈開することで1チップが完成する(Fig. 8(f))。なお、CrはAuと下地との密着層として用いており、厚さ5 nm程度である。

Fig. 9に、製作した減衰器のSEM写真を示す。Si導波路近傍に、Auナノロッドが高精度に製作されていることが分かる。Fig. 9(b)に示した厚さは、別領域に形成した段差評価用パターンを触針式段差計で測定した。Auの厚さは設計値160 nmに対して実測値150 nmとなった。また、Fig. 9(c)に示した寸法は、SEM像から測定した(設計値との誤差をTable 1にまとめた)。

Fig. 9 SEM pictures of fabricated device. (a) Overall perspective view, (b) magnified perspective view of Au nano-rods, and (c) magnified top view of Au nano-rods.

Table 1 Comparison between designed and fabricated dimensions.

	Design	Measurement	Error
Width of waveguide	400 nm	390 nm	-10 nm
Length of nano-rod	400 nm	425 nm	+25 nm
Width of nano-rod	150 nm	140 nm	-10 nm
Gap	100 nm	130 nm	+30 nm

5. 光学測定

Fig. 10に、透過スペクトルの測定結果を示す。Au構造無し、Au平板、Auナノロッドの3種類を製作し、透過スペクトルを比較した。測定した構造のSEM写真を各透過スペクトルの挿入図に示す。Figs. 10(a), 10(b)を比較すると、Au構造無しとAu平板ともに大きな減衰ピークは見られず、両者に大きな差は無いことが分かる。一方、Fig. 10(c)のAuナノロッドがある場合の透過スペクトルは、幾つかの減衰ピークが確認され、波長1565 nmにおいて-17.7dBの大きな減衰(波長1513 nmの透過率と比較)を確認することができた。

Fig. 11に、計算値と測定値の比較を示す。計算モデルは、製作した減衰器の測定寸法を基に構築した(Fig. 11

Fig. 10 Measured transmittance spectra of Si waveguides (a) without Au structures, (b) with an Au plate, and (c) with an Au nano-rods. The SEM pictures of respective devices are shown in insets.

上部に示す). 計算によると, Auナノロッドの共振による減衰により, 波長1587 nmで-25.8dBの大きな減衰(波長1470 nmの透過率と比較)を示すことが分かる. 一方, 測定値は, 波長1465, 1487, 1495, 1565 nmで減衰がみられる. 波長1565 nmの減衰が, Auナノロッドの共振による減衰と考えられ, 計算値と比較すると短波長側にシフトして減衰量も小さいが, これは形状の丸みや表面の荒れに起因する計算モデルと実際の形状の差異によるものと考えられる. 測定値のみに見られる波長1465, 1487, 1495 nmでの小さな減衰が生じる原因を断定するに至っていないが, これも製作のばらつきや表面荒れに起因するものと考えられる.

次に, 透過率の減衰が吸収と反射のどちらに起因するのか, 計算により見積もった. Fig. 11の計算モデルから, Auナノロッドによる反射スペクトルを計算した(Fig. 12). 計算上, 大きな減衰が生じる波長1587 nm付近における反射は0.1%(-20dB)程度となっており, Auナノロッドによる反射は少ない. 従って, Auナノロッドの共振波長において, 導波路を伝搬する光は効率的に吸収されると見積もられる.

6. まとめ

AuナノロッドとSi導波路を集積化した波長選択減衰器を提案および試作した. Auナノロッドは光共振器として機能し, 共振波長の光を効率的に吸収する. 有限差分時間領域法に基づく計算により, 通信波長帯で減衰ピークを持つ減衰器の設計を行った. 幅140 nm, 長さ

Fig. 11 Comparison between measured and calculated transmittance spectra. A calculation model is illustrated on the upper part.

Fig. 12 Calculated reflectance spectra. The calculation model is shown on the upper part in Fig. 11.

425 nmのAuナノロッドを周期300 nmで50個配置した全長15 μm の小型減衰器をSi導波路から130 nm離れた側部に製作できた. 透過スペクトル測定の結果, 波長1565 nmにおいて-17.7dBの大きな減衰を確認することができた.

謝 辞

本研究の一部は, 科研費25109702, 23109503の支援を受け, 製作は東北大学マイクロ・ナノマシニング研究教育センターの設備を用いて行われた.

参考文献

- 1) R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz: Science **292** (2001) 77.
- 2) V. M. Shalaev: Nat. Photon. **1** (2007) 41.
- 3) D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith: Science **314** (2006) 977.
- 4) J. Zhou, Th. Koschny, M. Kafesaki, E. N. Economou, J. B. Pendry, and C. M. Soukoulis: Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 223902.
- 5) B. Zhang, Y. Zhao, Q. Hao, B. Kiraly, I.-C. Khoo, S. Chen, and T. J. Huang: Opt. Express **19** (2011) 15221.
- 6) L. Meng, D. Zhao, Q. Li, and M. Qiu: Opt. Express **21** (2012) A111.
- 7) C. Hu, Z. Zhao, X. Chen, and X. Luo: Opt. Express **17** (2009) 11039.
- 8) X. Liu, T. Starr, A. F. Starr, and W. J. Padilla: Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 207403.
- 9) X. Liu, T. Tyler, T. Starr, A. F. Starr, N. M. Jokerst, and W. J. Padilla: Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 045901.
- 10) H.-T. Chen: Opt. Express **20** (2012) 7165.
- 11) L. Huang, D. R. Chowdhury, S. Ramani, M. T. Reiten, S.-N. Luo, A. J. Taylor, and H.-T. Chen: Opt. Lett. **37** (2012) 154.
- 12) M. P. Hokmabadi, D. S. Wilbert, P. Kung, and S. M. Kim: Terahertz Sci. Technol. **6** (2013) 40.
- 13) H. Tao, N. I. Landy, C. M. Bingham, X. Zhang, R. D. Averitt, and W. J. Padilla: Opt. Express **16** (2008) 7181.
- 14) T. Tsuchizawa, K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, J. Takahashi, M. Takahashi, T. Shoji, E. Tamechika, S. Itabashi, and H. Morita: IEEE J. Select. Topics Quant. Electron. **11** (2005) 232.
- 15) T. Tsuchizawa, K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, S. Uchiyama, and S. Itabashi: Jpn. J. Appl. Phys. **45** (2006) 6658.
- 16) 山田 浩治, 土澤 泰, 渡辺 俊文, 福田 浩, 篠島 弘幸, 板橋 聖一: レーザー研究 **35** (2007) 550.
- 17) T. Amemiya, A. Ishikawa, T. Kanazawa, J. Kang, N. Nishiyama, Y. Miyamoto, T. Tanaka, and S. Arai: Sci. Rep. **5** (2015) 8985.