中赤外光検出器用ナノアンテナ材料の研究

研究代表者 堀川隼世 福井工業高等専門学校 助教

1 はじめに

現在,光通信など様々な領域で近赤外光を利用した技術が実現されている.近年では,自動車の自動運転 化を目指し,周囲の状況を観測するための近赤外レーザーレーダーなどが実用化を目指し研究されている. このように,近赤外光を利用した技術は非常に進んでいるが,レーザーレーダーや自由空間通信においては, 大気中の霧や塵などによる散乱の影響を大きく受けてしまうことが課題となっていた.そこで,赤外線の一 つである中赤外光 (MIR)を用いた,高速な自由空間通信技術が期待されている.近赤外光に比べて波長の長 い MIR は,大気中の霧や塵などによるレイリー散乱の影響を受けにくいことで知られ,3-5 µm は大気の窓と 呼ばれるように大気中での透過率が高いことから,自由空間通信に適しているとされている.また,光源と なる量子カスケードレーザーは,高速な変調も可能であることから,大気中の状態の小さな変化に対しても 微調整が可能である.これらの特色から,自由空間での長距離伝送に優れた MIR の検出器性能向上を目指す 研究が行われている.

2 ナノアンテナ構造を用いた中赤外光検出器

2-1 経緯と背景

すでに高感度な MIR 検出器として, MCT 光起電力素子や InSb 光導電素子などが実用化されている.しかし 現状では,高速性と高感度性の両立を達成することは容易ではない.その理由として, MIR のエネルギーが 低いこと,これらの検出器の検出方法とその構造にある.光検出器は一般的に,「光の受光」と「光のエネル ギーの検出」という2つの機能により光検出を行う.図1 に示すように,従来の光検出器の多くは,「受光 面」に当たった光の粒子(フォトン)のエネルギーを,受光面が持つ物性値の変化により「検出」すること で光の検出を行ってきた.そのため,その2つの機能を単一の構造で実現している.つまり,検出器の受光 面が「受光」と「検出」の両機能を兼用している構造が一般的な光検出器の構造となる.フォトンを受ける 確率を向上させるために受光面を広くすると,検出を担う検出器の面積増加が起こり,それに伴い寄生容量 が増加するため,応答速度が低下する.反対に,検出器を微小化することで応答速度を向上しようと試みる と,同時に受光面積が減少し,フォトンを受光する確率が低下する.これらのジレンマを解決するために, 「受光」の機能をナノスケールのアンテナに,「検出」の機能をアンテナの給電部に設けた極めて微小な検出 器に与えることにより,高速性と高感度性を併せ持つ MIR 検出器の方式が提案・研究されている.



図1 アンテナを用いた光検出器の概念図

2-2 ナノアンテナを用いた光検出器の構成とその評価方法



図3 FTIR と顕微分光装置を用いたナノアンテナ測定系

図2(a) にダイポールアンテナを例とした,光検出器の概念図を示す.受光にはアンテナを用い,給電部 分には検出器が取り付けられている.アンテナを用いて受光部と検出部を分離することにより,図2(b) に 示すように,受光部で受光したエネルギーが検出部で反射される割合は,反射係数 S₁₁で表される.

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_{Load}}{Z_{in} + Z_{Load}}$$

アンテナの種類や検出部の種類を特定しなくても、アンテナの入力インピーダンス(Z_{in})と、検出部のイ ンピーダンス(R_{Load})の反射係数 S₁₁を0に近づけるように入力インピーダンス及び検出器の抵抗値を設定す ることで、等価回路としてはアンテナに入射した光を効率よく検出器に伝達させることが可能になる.この ように、「受光」と「検出」の設計を各々行うことが可能となり、状況に適した検出器の設計が可能になる. これは,電波領域で確立した設計方法を,新たに光領域に展開したものである.さらに,同周波数帯で分布 定数線路等を実現することで、すでに確立したフェーズドアレイアンテナなどの技術を中赤外領域に展開、 レンズを用いない高効率な受光を実現できると考えられる[1].しかし、極めて高い周波数、微細構造である という評価の困難さから、MIR でこのようなナノアンテナと微小検出器の一体化研究はほとんど行われてい なかった.そこで,我々はフーリエ変換赤外分光光度計(FTIR)による測定とシミュレーションを併用した 方法により(図3),約57 THzの金で構成された Z_{in} を約50 Ω と見積もることに成功した[2].この結果をふ まえ,研究協力者と高速・高感度な MIR 光検出器の開発にも取り組んできたが,その過程で MIR 領域の Zaを 設計するためには、複素屈折率や導電率等から求められる表面インピーダンスの評価が重要となることが明 らかとなった. MIR のアンテナは、短軸が 100 nm オーダーと非常に微細な構造となっており、小さな材料の 特性の違いにより、その設計値は大きく変わってしまう、そこで、アンテナ寸法に大きな影響を与える材料 のパラメータを同定し、その指針を確立することで、MIR 領域のアンテナ構造の利用が促進されると考えて おり、MIR 領域の検出器技術向上の重要な課題と考えている.

MIR 領域のアンテナ設計においても、アンテナの入力インピーダンスの評価は光検出器の性能を決定づけ

る重要な値である.しかし, MIR 領域のような超高周波領域 では, 複素表面インピーダンス (*Z*_s)の影響が著しく変化する ため, アンテナの設計には, 構成材料の特性を正確に評価し, 考慮することが必要不可欠である.そこで本研究では, MIR 領 域おけるアンテナを構成する金属材料の変化に伴う入力イン ピーダンスの検討を行う.

3 表面インピーダンス(Z_s)がナノアンテナに与える

影響とその特性

マイクロ波やミリ波などの周波数帯では、金(Au)などの 高い導電性材料であれば、完全導体 (PEC) を用いた理想的な アンテナの設計値を利用することが十分可能である.しかし 中赤外光領域などの超高周波では、Au などの導電率が非常に 高い現実の材料を用いた場合でも、複素表面インピーダンス がアンテナの入力インピーダンスや共振周波数を変化させ る.このことは、理想的なアンテナと同一の周波数で現実の アンテナを共振させるために,完全導体 (PEC) を利用した場 合に比べてアンテナを微細化させる必要があることを意味す る. ダイポールアンテナやスロットアンテナなどのアンテナ は、大きさが波長程度であるため、極めて波長の短い中赤外 光領域(長さ数μm程度)においては、さらなる微細構造が必 要となり、アンテナ作製が容易ではなくなる. そこで、MIR領 域における複素表面インピーダンスと、アンテナの入力イン ピーダンスの関係から、材料特性とアンテナの設計指針の検 討を行った.

まず、PEC 及び Au を用いた場合に材料が与える影響を、ス ロット共振器の反射率特性から比較した. 図4に示すような 構成とし、スロット共振器の長さL = 3.0 μm, 幅 W = 0.2 μm, スロットアンテナの周期は x 方向, y 方向共に 4.0 μm 間隔として配置した. Au の特性(複素屈折率)は真空蒸着法 により成膜した膜厚 200 nm の Au 薄膜を, J.A. woollam 社の 赤外域多入射角分光エリプソメーター (IR-VASE) により測定 したものを利用した. Au 薄膜の複素屈折率を図5に示す. ま た, 基板には単結晶酸化マグネシウム (MgO) を用いている [3]. シミュレーションでは、COMSOL Multiphysics を用い計算を 行った.図6に示すように上面,下面に散乱境界条件,側壁 を周期境界条件と設定した. MgO 基板裏面からの実測による 反射率特性と比較するために MgO 側から入射した.空間及び MgO と散乱境界条件との間には Perfect Matched Layer (PML) を設定している.図7にPEC,Auを用いた場合の反射率特性 の計算結果を示す. PECを用いた場合の共振周波数(fpec)は 約 37 THz, Au を用いた場合の共振周波数 (f₄₀) は約 34 THz であった.シミュレーション結果より、PEC を用いた場合に 比べ、Auを用いた場合に共振周波数の低下が予想され、約3 THz 低下している. そこで, 実際のスロット共振器による共 振周波数(f)を FTIR 及び顕微分光装置にて測定した.スロ ット共振器は、電子線描画装置にてパターニングを行い、







図6 シミュレーション条件



図7 スロット共振器のシミュレーション 結果及び透過率測定結果

Au 複素屈折率を測定するために成膜した Au 薄膜と同様の方法にて約50 nm 成膜,リフトオフにより作製した. 複素屈折率 測定時に比べて膜厚は薄いが,表皮深さδ(ω)よりも十分厚いものとした. FTIR 及び顕微分光装置による測定結果を図7 に示す. 共振周波数は約34 THz で共振が確認された. シミュレーションは実測を非常によく再現しており,アンテナを構成する材料により共振周波数が変化することが確かめられた. そこで,アンテナ設計に必要な特性を検討するために,複素表面インピーダンスをもとに,表面インピーダンス(Z_s)の虚部と実部を変化させ,その入力インピーダンスの変化について調査した.

複素表面インピーダンスの導出のために, 複素屈折率から 複素導電率 $\sigma(\omega)$ の導出を行った[4].また複素表面インピーダ ンスと $\sigma(\omega)$ には以下の関係がある.

$$Z_s = R_s + iX_s = \frac{1}{\delta(\omega)\sigma(\omega)}$$

ただし,表皮深さ $\delta(\omega)$ は複素屈折率 k,光速度 C₀,角周波数 ω として $\delta(\omega) = \frac{C_0}{k\omega}$ である.図 8 に入力インピーダンス

($Z_{in} = R_{in} + iX_{in}$)のシミュレーションを行ったスロットアン テナの構造を示す.スロットアンテナの幅 (W_a)は0.2 μ m, 長さ (L_a)は3.0 μ m,給電部 (port)の幅 (W_R)は0.4 μ m とし、単結晶 MgO 基板上の設定とした.シミュレーションに はSonnet EM Simulatorを用い、Auの複素表面インピーダン ス $Z_s = R_s + iX_s$ の実部 (R_s)を1~5倍に変化させた際の入力 インピーダンスを図 9(a),(b)に示す.Rsの増加に伴い、入 カインピーダンスを図 9(a),(b)に示す.Rsの増加に伴い、入 カインピーダンスを図 10(a),(b)に示す.Rsとの依存性とは 異なり、共振周波数は X_s の増加に伴い低下していることがわ かる.これらのことから、 X_s の増加はアンテナの共振周波数 の低下に寄与していることがわかる.

4 金 (Au), 銀 (Ag), アルミニウム (Al) を用いた

アンテナの入力インピーダンス(Zin)特性

中赤外光領域でのアンテナ設計に対し,導電率は重要なパ ラメータであるが,複素表面インピーダンスも特性に大きな 影響を与えることを確かめるために,比較的導電率の高い[5] 金 (Au),銀 (Ag),アルミニウム (A1)を用いて,スロットア ンテナの入力インピーダンスを計算,共振周波数の調査を行 った.複素屈折率の測定結果のグラフを図11に示す.また, この複素屈折率をもとに計算した表面インピーダンスの虚部 (X_s)をシート抵抗として図12に示す.Auに比べてAg,A1 は X_sが小さいことから,共振周波数がAuに比べて高くなる ことが予想される.そこで,Sonnet EM Simulator により各材 料を用いた場合における入力インピーダンス (Z_{in})の結果を



図8スロットアンテナ構造



図 9 スロットアンテナの Z_{in}の Rs 依存性 (a) 入力インピーダンス実部 (R_{in})

(b) 入力インピーダンス虚部 (X_{in})



図 10 スロットアンテナの Z_{in}の X_s依存性 (a) 入力インピーダンス実部 (R_{in}) (b) 入力インピーダンス虚部 (X_{in})



図 13(a), (b)に示す.各材料において,入力インピーダンスの虚部 (X_{in}) が0になる共振周波数 f は,Auの場合 (f_{Au})約58 THz,Agの場合 (f_{Ag})約59 THz,Alの場合 (f_{Al})約60 THz であった.高い導電材料においても複素表面インピーダンスの虚部 (X_s)により共振周波数を低下させ,スロットアンテナの長さが3 μ m,幅0.2 μ mの場合において,AuはAgに比べ約1 THzの低下,Alに比べて約2 THzの共振周波数の低下を引き起こすことが明らかにした.

5 まとめ

本研究では、中赤外領域(約60 THz)における長さ3.0 μmにおけるスロットアンテナの入力インピーダンスの材料依存性についての評価を行った.金(Au)、銀(Ag)、アルミニウム(A1)において、最大で約2 THzの共振周波数の低下を確認、表面インピーダンスの虚部(X_s)の影響を示した.中赤外領域のアンテナを 適切に設計し、高い周波数分解能を持つ光検出器を実現するための材料探索の指針として貢献できる.

【参考文献】

- [1] J. Horikawa, A. Kawakami, M. Hyodo, S.Tanaka, M. Takeda, and H. Shimakage, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **25**, 2301005 (2015).
- [2] J. Horikawa, A. Kawakami, M. Hyodo, S.Tanaka, M. Takeda, and H. Shimakage, Infrared Physics & Technology 67, pp.21-24 (2014).
- [3] R. Stephens and I Malitson, Journal of Research of the National Bureau of Standards **49**, pp. 249-252 (1952).
- [4] D. J. Shelton, T. Sun, J. C. Ginn, K. R. Coffey, and G. D. Boreman, Journal of Applied Physics 104, 103514 (2008).
- [5] T. Echaniz, R. B. Perez-Saex, and M. J. Tello, Journal of Applied Physics 116, 093508 (2014).

| 題名 | 掲載誌・学会名等 | 発表年月 |
|---------------------------|-----------------------|------------|
| 中赤外領域におけるコプレーナ線路の特性 評価 | 第79回応用物理学会秋季学術講演 会 | 2018年9月19日 |

〈発表資料〉