



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Gigahertz acoustic modulation of plasmonic nanostructures [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	今出, 悠太
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13706号
Issue Date	2019-06-28
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74966
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yuta_Imade_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 今出 悠太

審査担当者 主 査 教 授 Wright Oliver Bernard
副 査 教 授 足立 智
副 査 教 授 笹木 敬司 (本学電子科学研究所)

学位論文題名

Gigahertz acoustic modulation of plasmonic nanostructures

(ナノスケールのプラズモニック構造におけるギガヘルツ音響変調)

人類は紀元前より様々な道具を用いて光を利用してきた。自分の姿を見るための鏡や集光や拡大のためのレンズは紀元前より用いられているほか、日本が江戸時代を迎える頃には既に、メガネや望遠鏡、顕微鏡がヨーロッパで開発されていた。学問としての光学も非常に歴史が深く、紀元前3世紀頃の古代ギリシャでは光学の基礎となる反射や散乱、視覚などをまとめた「Catoptrics(カトトリカ)」や「Optics(オプティカ)」といった書籍が刊行されている。そして光科学の中でも2000年頃から盛んに研究が行われている分野がプラズモニクスである。プラズモニクスは表面プラズモンを応用した光科学技術であり、既知の光学の常識にとらわれない現象が確認されている。表面プラズモンの効果によって、その光学的特性を発現させている金属構造をプラズモニック構造といい、可視～近赤外光の範囲の光波に対して機能するプラズモニック構造は数百 nm オーダーの単位構造から構成されている。プラズモニック構造では可視光や電波は透過し、近赤外光は反射するといった人間にとって都合のいい光学特性を作り出せるため、光学材料として応用が期待されている。こうしたプラズモニック構造の光学特性の自由度の高さは、プラズモニック構造を構成する単位構造の形状やサイズ、周期といった構造のパラメータや、周囲の環境 (eg. 屈折率) に光学特性が依存することに起因する。そのため、単位構造や周囲の環境を外部から制御することでプラズモニック構造の光学特性を能動的に変調することができる。そのため電子デバイスのようなより発展的な応用を目指し、プラズモニック構造の外的制御、アクティブ・プラズモニクスに関する研究が盛んに行われている。この分野における研究では、外的制御の方法として MEMS や相変化材料、液晶といった方法が利用されているが、音響波や音響振動といった音響現象を利用した例は少なく、また複雑な金属ナノ構造中の音響現象が表面プラズモンに与える影響の十分な理解はまだ得られていない。そのため本論文の研究は音響振動とプラズモニクスの融合が秘める可能性を模索するべく、学術的な興味として行ったものである。

本論文では基板上の様々なプラズモニック構造におけるギガヘルツ周波数帯での音響変調に関する研究を、ピコ秒音響法と数値シミュレーションとを用いて行った。具体的には異常光透過を呈する金ナノ周期構造、金スプリットリング共振器構造、金ナノロッド次元鎖構造でギガヘルツ音響変調を行った。共通して用いたピコ秒音響法は超短光パルスを用いたポンププローブ法に基づく実験法で、ポンプ光によりナノ構造中に音響現象を励起し、プローブ光で過渡的光反射 (透過) 率の変化によって構造の振動を観測する方法である。特に、金ナノスプリットリング構造は一般にメタマテリアルと呼ばれる。メタマテリアルにおける音響現象による光学特性の変調を世界で初めて

行った。

本論文は全六章より構成されている。以下、各章の要旨をまとめる。第 1 章では本研究の導入として、研究の背景となる事柄について簡単に述べ、過去に行われてきたアクティブプラズモニクスに関する研究について触れながら本研究の目的をまとめた。第 2 章ではのちの 3 章において共通する次の (1) ~ (5) の原理についてまとめた。(1) 超短光パルスにより金属構造に音響波や音響振動を励起する際の熱弾性的機構、(2) ピコ秒音響法による観測において金属構造の振動に起因しない信号の原因であるブリルアン振動と呼ばれる現象、(3) ~ (5) 金属構造の振動に起因するピコ秒音響法の信号として観測される現象について。第 3 章では、ガラス基板上の金薄膜に正方格子上的周期的正方開口を有するプラズモニック構造における、ナノ振動によるギガヘルツ音響変調について取り扱う。この試料は表面プラズモンの効果により回折限界以下のサイズの開口を光が透過する、異常光透過 (Extraordinary optical transmission, EOT) を呈する構造である。この構造の過渡的透過率変化について、ピコ秒音響法と数値シミュレーションの比較から得られた振動モードやひずみ分布を解析することで、開口の収縮と膨張を繰り返す振動モードがこの試料における音響変調の主要因であると明らかにした。第 4 章では、ガラス基板上に正方格子上に作製した U の字型の金ナノ構造、スプリットリング共振器における、ナノ振動によるギガヘルツ音響変調を取り扱う。この試料は入射光の直線偏光の向きによりプラズモニック共鳴が異なるため、直交する直線偏光を持つプローブ光で観測した過渡的反射率変化を比較することで音響振動によってプラズモニック共鳴が変調されることを明確に示した。またピコ秒音響法と数値シミュレーションにより、振動モード、ひずみ分布を明らかにし、U の字の隙間が開閉する振動モードが音響変調の主要因であると明らかにした。第 5 章では、ガラス基板上に作製した金ナノロッド一次元鎖構造において、基板表面を伝搬する表面弾性波によるギガヘルツ音響変調を取り扱う。この章で取り扱う研究においては、ナノロッドの光学特性の音響変調ではなく、音響変調を介したギガヘルツ表面弾性波の検出を目的として行った。これはアクティブ・プラズモニクスのもう一つの応用であるセンシングのための研究である。表面弾性波の励起源に金ナノワイヤーを用いてピコ秒音響法を行い、伝搬してきた表面弾性波による光学特性の変調の検出に成功した。これはナノスケール to ナノスケールで表面弾性波の励起・検出を、アクティブ・プラズモニクスを用いることで世界で初めて成功した研究である。第 6 章では本論文の総括をする。

これを要するに、著者はギガヘルツ帯の音響振動によって表面プラズモンに由来する金属ナノ構造試料の光学的な性質が変調されることを実験およびシミュレーションで明らかにし、アクティブプラズモニクス分野での新知見を得たものであり、応用物理学に対して貢献すること大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。