

## 金属ナノ構造を用いた赤外域の電場増強と新規光学現象の発現

利用者：<sup>a</sup>東京大学, <sup>b</sup>東京農工大学 芦原聡<sup>a</sup>, 草史野<sup>b</sup>, 竹上明伸<sup>b</sup>  
 研究支援者：東京大学 Eric Lebrasseur, 澤村智紀, 久保田雅則, 三田吉郎

### 【研究目的】

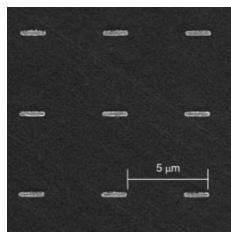
金属ナノ構造による赤外波長域の光電場増強の実現と、それを活用した分光計測法・量子制御法の創出、新規光学現象の発現を目指して研究を進めている。赤外波長域で局在型表面プラズモンの共鳴励起を起こす代表的な構造として、数ミクロンの長さをもつ棒状の金ナノアンテナを作製し、その赤外域光学特性、特に赤外共鳴プラズモンの寿命および電場増強特性を支配する物理を明らかにした。今回、金ナノアンテナによる赤外域の電場増強効果を利用することにより、金属中電子の光電界放出という、新規な光学現象の発現に成功した。国際会議において第一報を行い、原著論文の投稿準備を進めている。

### 【成果】

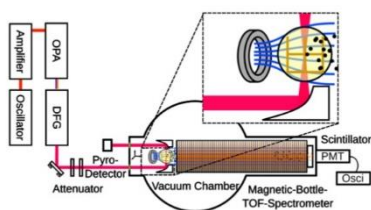
《実験》電子線リソグラフィとリフトオフ法を利用して、ZnS基板の上に長さ1.0 - 2.5 $\mu\text{m}$ の金ナノロッドを縦横5 $\mu\text{m}$ の間隔でアレイ状に形成した (Fig.1)。真空チャンバー内に設置したナノロッドアレイに、中赤外パルス (時間幅100fs, ピーク強度1.8 GW/cm<sup>2</sup>, 中心波長は1-10 $\mu\text{m}$ の間で可変) を照射し、光電子の放出量と運動エネルギースペクトルを計測した (Fig.2)。長さ2 $\mu\text{m}$ のナノロッドの場合に、励起パルスの波長を変えながら電子放出量の光強度依存性を測定した結果をFig.3に示す。挿入図には、ピーク強度が一定 (~2.4 GW/cm<sup>2</sup>) の下で測定した光電子の運動量スペクトルを示す。Fig.4に消衰スペクトル (黒の実線) と電子放出量の励起波長依存性 (マーカー, 励起光ピーク強度は2.4 GW/cm<sup>2</sup>に固定) を示す。以上より、波長9 $\mu\text{m}$ 付近の光で励起した場合にはプラズモン共鳴によって増強された近接場によって顕著な電子放出・加速が起こっていることがわかる。

《学術的意義》中赤外光の光子エネルギーと比べると、金の仕事関数は十分大きいので、いわゆる光電効果は起こらない。電子放出メカニズムは、アンテナ近傍で増強された電場による量子力学的トンネリングと考えられる。光電場による電界放出を起こすためには、通常、高出力パルスレーザーを金属に照射する必要がある。本研究では、数十ナノジュールという比較的弱い赤外パルスによって、金属中電子の引き抜き・加速という強電場現象を発現させた点が特徴的である。ここで、局在型プラズモンによる光電場の増強効果が中赤外波長域で顕著になる性質を利用している。

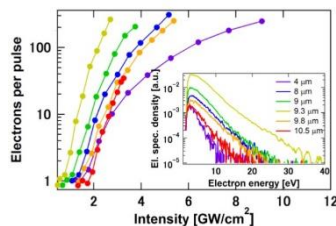
《応用可能性》この光電界放出では、電場振動の半周期の間だけ電子が放出され、電子の運動エネルギーは光電場波形に応じて変化する。そのため、光電界放出は、光周波数でスイッチする超高速エレクトロニクス素子の原理として高い潜在性をもつ。また、小型の電子加速器、時間分解電子顕微鏡の電子源としての応用も期待される。



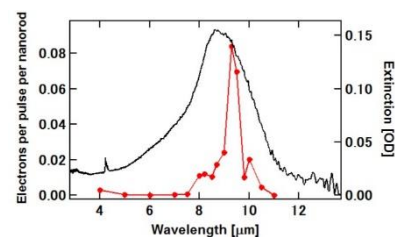
**Fig.1** A scanning electron micrograph of an array of mid-infrared resonant gold nanoantennas.



**Fig.2** Experimental setup for photoemission spectroscopy.



**Fig.3** Intensity dependence of electron yields for different excitation wavelengths.



**Fig.4** The far-field extinction spectrum for 2-micrometer long nanorods (black) and the photoemission yield (red)

### 【支援実施機関からのコメント】

東京大学拠点では、100研究室600名に迫る利用者が、新規半導体材料、素子、システムの研究を日夜行っています。大人数を受け入れる体制をして、所属による差別を一切行わない《完全フラット》な手厚い支援が充実していることが特色です。芦原先生は4月から東京大学に着任されましたが、それ以前の東京農工大准教授('07-'14)、JSTさきがけ研究員('06-'10)、マックスボルン研究所客員研究員(ドイツ, '04-'06)、東京大学生産技術研究所助手('98-'04)の間一貫して東京大学拠点をプラットフォームとして利用することで効果的に成果を得、キャリアを重ねてこられました。このように所属が変わっても研究のスピードを保てる好例としての紹介です。

### 【参考文献等】

- [1] F. Kusa and S. Ashihara, "Spectral Response of Localized Surface Plasmon in Resonance with Mid-Infrared Light" J. Appl. Phys., Vol.16, 153103 (2014).
- [2] F. Kusa, K. Echtenkamp, G. Herink, C. Ropers, S. Ashihara, "Photoelectron Emission from Resonant Nanoantennas Driven by Femtosecond Mid-infrared Pulses" International Conference on Ultrafast Phenomena, 08.Tue.B.4 (Oral Presentation, July 8, 2014).
- [3] 草史野, カタリナ・エヒテルンカンブ, クラウス・ロパス, 芦原聡, "中赤外超短パルスを用いた金ナノロッドからの光電界電子放出" 応用物理学会秋季学術講演会17p-C1-6
- [4] F. Kusa, K. E. Echtenkamp, G. Herink, C. Ropers, S. Ashihara, "Photoelectron Emission from Resonant Gold Nanorod Driven by Femtosecond Mid-infrared Pulses," AIP Advances Vol.5, 077138 (2015). DOI: 10.1063/1.4927151
- [5] 芦原聡, 草史野, "赤外プラズモニック増強場を用いた金属表面における電子放出の直接的操作" OplusE 第438号, pp. 432-437 (2016).