

半導体量子ドットを増感剤とした 高精度プラズモンイメージング手法の開発

Development of Surface Plasmon Imaging Sensitized by Semiconductor Quantum Dots

M20助自49

代表研究者 洪 田 昌 弘 大阪市立大学 工学研究科 准教授
Masahiro Shibuta Associate Professor, Department of Engineering, Osaka City University

Surface plasmon polariton (SPP); a charge oscillation at a dielectric-metal interface, is promising physical phenomenon, which can be utilized in energy conversion, information communication, medical treatment, sensing, and so on. In order to enhance the SPP-combining technologies, so called as “plasmonics”, it is essentially important that visualization of a dark propagating SPP to precisely design and control such plasmonic devices. So far, the SPP propagation has been imaged by a scanning near-field optical microscopy and photoelectron emission microscopy (PEEM) coupled with femtosecond light sources. The PEEM technique, particularly, has advantages for the fast imaging and the precise evaluation of SPP physical properties, although it needs an ultrahigh vacuum condition and specialized skills to operate the very expensive PEEM apparatus.

Here we successfully visualize the SPPs propagating at an interface between a thin film polymer and gold by a conventional optical microscopy in an ambient condition by using a SPP sensitizer. In our original experimental approach, semiconductor quantum dots (QD) are overcoated on the plasmonic model sample as the SPP sensitizer, whose notable optical property enables us to “see” the propagating SPPs through a visible wavelength. The lateral distribution of upconversion luminescence from CdTe QD film obviously reflects the SPPs generated at the metal edge structure, where the characteristic stripe shape patterns appear by an interference between SPPs and light field resulting beat patterns. The excitation wavelength dependence precisely evaluates the wave property of SPPs (e.g. SPP dispersion and phase velocity). In principle, the mechanism of present SPP imaging as the polarization beating is the same with the PEEM method. Therefore, we newly developed the conventional method to visualize and characterize SPPs, which will be widely applicable to evaluate the SPP properties in the practical plasmonic devices.

研究目的

光とプラズモンの結合量子状態である、表面プラズモンポラリトン (SPP) は、金属と誘電体との界面で励起される電子の集団振動であり、光電変換、情報通信、ナノスケール光学、セ

ンシングなどの分野において次世代の高度なエレクトロニクスを支える基盤技術 (プラズモニクス) として応用研究が急速に進んでいる。現在までに SPP の励起効率やその周波数依存性は金属の種類に加えてナノ構造に極めて敏感であることが知られているものの、SPP 励起を発端とし

た光エネルギーの空間発展やそれに伴う他の量子系との相互作用といった機能の本質は未だ十分に理解されていない。とりわけ、金属／誘電体界面を伝搬するSPP(伝搬型SPP)を利用した電子・光学デバイスの設計や高機能化を進めるためには、光励起を起点としたSPPの伝搬・減衰様式を可視化するとともに、その波動特性を明らかにすることが不可欠である。しかし伝搬型SPPは無輻射過程であるため、一般的な手法では観測することが困難であることから、これを簡便かつ高精度で捉える新しいイメージング技術の確立が強く求められている。

本研究では、高い発光量子効率を有する半導体量子ドットをSPP増感剤として活用することで、従来までのSPPの観測原理を光学顕微鏡を用いた観測に発展させ、より汎用性の高いSPP精密評価の方法論を確立することを目的とする。

概 要

光とプラズモンの結合量子状態である表面プラズモンポラリトン(SPP)は、光電変換や情報通信、ナノスケール光学などの分野において次世代の高度なエレクトロニクスを支える基盤技術(プラズモニクス)として応用研究が急速に進んでいる。しかし、SPP励起を発端とした光エネルギーの空間発展やそれに伴う他の量子系との相互作用といったプラズモニクな機能の本質は未だ十分に理解されていない。とりわけ、金属／誘電体界面を伝搬するSPP(伝搬型SPP)を利用したデバイス(プラズモニクデバイス)の設計や高機能化を進めるためには、光励起を起点としたSPPの伝搬・減衰様式を可視化するとともに、その波動特性を明らかにすることにより精密制御の指針を得ることが不可欠である。伝搬型SPPの精密観測はこれまでに、フェムト秒レーザーパルス光源を用いた光電

子顕微鏡により達成されているが、光電子を検出するという性格から、観測に超高真空環境($<1 \times 10^{-7}$ Pa)を必要とすることや観測試料が光電子放出の起こりやすいものに限定されるなど、簡便さや汎用性の点で本質的な課題が残っており応用分野に十分に浸透していない。

このような背景から、本研究では次世代プラズモニクスの発展に不可欠な伝搬型SPPのイメージング技術を従来の手法から大幅に簡素化し、高い光学特性を有する半導体量子ドット(quantum dot: QD)を増感剤として用いることで、大気下での光学顕微鏡を用いた汎用性の高いイメージング手法の確立に取り組んだ。

プラズモニクデバイスの基本構造として、金(Au)基板上に収束イオンビーム加工により伝搬型SPPを励起するエッジ構造を作製し、太陽電池や情報通信回路における活性層や保護層として用いられる誘電体薄膜としてポリマー(XEONEX®)をスピコートした試料を作製した。この試料上にSPP増感剤として水溶性CdTe QD(粒径3 nm)を担持し、近赤外フェムト秒レーザー(750-800 nm, 100 fs)を光源とした自作の光学顕微鏡によりアップコンバージョン蛍光顕微画像を取得したところ、金属エッジ構造に沿った特徴的な縞模様が明瞭に観測された。この縞模様は伝搬型SPPと入射光との干渉の結果生じる分極ビートに対応しており、伝搬型SPPを光学測定により明瞭に観測することに成功した。

さらに、伝搬型SPPの波動物理特性を明らかにするために、分極ビートの励起波長依存性を観測したところ、励起波長が長くなると分極ビートの間隔が長くなることが分かった。この傾向を解析することにより、SPPの分散特性(SPPの波数 k_{spp} と周波数 ω との関係)を正確に評価できることを明らかにした。また、その分散関係からSPPの伝搬速度(位相速度)を光速

の57% ($=1.70 \times 10^{-8}$ m/s) と見積もった。この値は、電磁気学的に計算されたシミュレーション結果と等しく、本手法により伝搬型SPPの波動物理特性が実験的に観測可能であることを示した。この観測原理は、従来まで行われてきた超高真空下での光電子顕微鏡を用いた精密SPPイメージングと同様である。従って本研究は、伝搬型SPPの観測を大幅に簡素化し、大気下でかつ汎用性の高い手法で精密評価しながらプラズモニクデバイスを設計・高度化することを可能にするものであり、当該分野を飛躍的に発展させるための基盤技術を開発したと言える。

－以下割愛－