

単一ナノキャビティのコヒーレント応答による フェムト秒表面プラズモン波束の位相変調

Phase Modulation of Femtosecond Surface Plasmon Wave Packets

Induced by Coherent Response of a Single Nano-Cavity

筑波大物理 ○大竹 祐香, 伊知地 直樹, *久保 敦

Univ. of Tsukuba, °Yuka Otake, Naoki Ichiji, Atsushi Kubo

E-mail: *kubo.atsushi.ka@u.tsukuba.ac.jp

はじめに

メタマテリアル・メタ表面を構成する、ナノキャビティなどの電氣的/磁氣的共鳴を有する微細構造は、各々が共鳴周波数付近での電磁場の変調効果を有し、それらの集積的な効果として天然物質にはない巨視的な電磁氣的特性を発現する[1]。この様な微細単位構造（メタ原子）からなるメタマテリアル・メタ表面による電磁場の制御は、伝搬光のみならず、金属表面を伝搬する表面プラズモンポラリトン(SPP)にも適応される[2]。SPPは次世代型デバイスにおける信号のキャリアとして期待されているため、メタ表面を利用した素子の構成要素となるメタ原子と SPP 波束の相互作用の解明は重要である。

本研究の対象となるメタ原子は、金属-絶縁体-金属積層(MIM)型ナノキャビティと呼ばれる SPP の Fabry-Perot 型共振器である [3,4]。さらに本研究ではMIM型ナノキャビティを構成する3層のうち最上部のM層のみを金属ナノブロック構造とし、他のIM層を連続膜状に作製した。これにより SPP 波束の伝搬する金属層上に MIM 型ナノキャビティを有する配置となり、メタ原子による電磁場の変調過程を2次元平面内に捕捉した構造とみなすことができる。この構造に対し、ポンププローブ法に基づく時間分解2光子蛍光顕微鏡法を行うことで、フェムト秒 SPP 波束とナノキャビティの超高速な相互作用を動的に可視化し、ナノキャビティによる SPP 波束の位相変調の観測を試みた。さらに、FDTD 法、および、キャビティを Lorentz 振動子でモデル化した数値計算により、実験結果の解析を行った。

実験方法

SPP 波束伝搬の動的可視化は、Ti:S レーザー発振器(80 MHz, 500 mW)から出力される 10 fs パルスを、マッハ-ツェンダー干渉計により強度比 1:1、遅延時間 τ のポンプ-プローブパルス対に整形し、試料表面に同軸照射することで行う。この方法では、ポンプパルスにより直線状 Au リッジ部(Light-SPP 結合部)で励起された波束状の SPP 平面波が固有の群速度で Au 表面を伝搬し、 τ だけ遅れて入射するプローブパルスと干渉することで、Au 表面にエバネッセント場のビートパターン(SPP ビート)を形成する。SPP ビートの位置・位相情報は、試料最表面に形成した色素層によって蛍光顕微像として検出する。さらに遅延時間 τ を 10 fs パルス搬送波の 1/4 周期刻み(約 0.7 fs)で変化させ蛍光像

を得ることで、SPP ビートが Au 表面を伝搬し、ナノキャビティとの相互作用を経て再び Au 表面を伝搬する様相を時間分解観察した。

結果と考察

10 fs パルスの波長帯域近傍に共振波長(λ_0 : 665 nm ~ 1000 nm)を持つ 11 のキャビティを観察対象とし、それぞれに対し遅延時間 τ : 0 ~ 130 fs に渡って時間分解観察を行った。さらに SPP 波束の伝搬におけるキャビティ構造の影響を議論するため、キャビティ後方部(Fig.1A 領域)を進行する SPP ビートに注目し、キャビティのない平坦部(Flat: Fig.1 B 領域)を進行する SPP ビートとの位相差($\Delta\phi = \phi_{\text{Cavity}} - \phi_{\text{Flat}}$)を評価した。 $\Delta\phi$ は、10 fs パルスの搬送波波長(λ_{fs} ~ 810 nm)付近に共振波長を持つ($\lambda_0 \sim \lambda_{fs}$)キャビティでは ~ 0 をとり、より短波長側($\lambda_0 < \lambda_{fs}$)では $\Delta\phi < 0$ 、さらに長波長側($\lambda_0 > \lambda_{fs}$)では $\Delta\phi > 0$ となり、キャビティによる SPP 波束の位相変調には明らかな共振波長依存性がみられた。

キャビティによる SPP 波束の位相変調ダイナミクスの解明のため、キャビティの共振現象を Lorentz 振動子モデルとして組み込み、実験条件を再現する数値モデル計算を行った。このとき伝搬に伴う SPP 波束形状の変形は SPP の複素分散より見積もり、またキャビティに到達する SPP 波束のうち共振に寄与する割合を FDTD シミュレーションとの対応から見積もることで、SPP 波束-キャビティ相互作用を再現した。モデル計算結果より得られた SPP ビート位相差 $\Delta\phi$ は明らかな共振波長依存性を示し、その傾向は実験結果を再現した。

講演では、SPP ビートの位相変調度に影響する、共振波長など SPP 波束-キャビティ相互作用に関わる因子についても議論する。

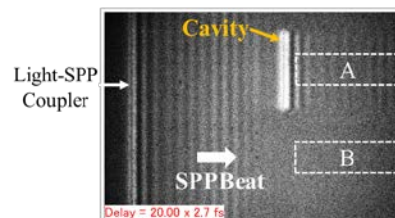


Fig.1 A frame of time-resolved microscopy movie showing a SPP wavepacket launched from a coupler is about to interact with a cavity.

謝辞：本研究は NIMS 宮崎英樹博士、笠谷岳士氏にご助言とご協力を頂いた。試料作製は NIMS 微細加工プラットフォーム、筑波大学微細加工プラットフォームで行った。

[1]N. Meinzer, *et al.*, Nat. Photon., **8**, 889 (2014), [2]A. A. High, *et al.*, Nature, **522**, 192 (2015), [3]Y. Kurokawa, H. T. Miyazaki, PRB, **75**, 035411 (2007), [4]A. Pors, S. Bozhevolnyi, Opt. Exp., **21**, 22 (2013)