フェムト秒レーザー照射による 半導体への表面プラズモンポラリトンの励起

Excitation of Surface Plasmon Polaritons on Semiconductors with an Intense Femtosecond Laser Pulse

H27助自90

代表研究者 宮 地 悟 代 東京農工大学 大学院工学研究院 先端物理工学部門 准教授
Godai Miyaji Associate Professor, Department of Applied Physics, Tokyo University of A & T

Our research group has shown that the periodicity of nanostructures formed on solid surfaces with femtosecond (fs) laser pulses is attributed to the excitation of surface plasmon polaritons (SPPs). To observe the SPPs excited, the incident-angle dependence of reflectivity change on Si grating with a spatial period of 1300 nm was measured with a single shot of the fs laser pulse at the center wavelength of 800 nm. With the p-polarized fs laser pulse at high fluence above the single-shot ablation threshold of Si, we observed the minimum of the reflectivity at the incident angle of 25 degrees, while we did not observe with the s-polarized pulse. This experimental results demonstrate that the SPPs can be excited on Si with the intense fs laser pulse.

研究目的

ナノメートルオーダーの微細加工技術の開発が、次世代の先端科学と持続的な産業発展のための基盤として位置付けられ、その要素技術の一つとして、レーザーによる光プロセスの研究が活発に行われているが、空間分解能は原理的に光の波長程度に制限されてしまう。もし、この限界を克服できれば、汎用性に優れた光ナノ加工技術を実現できる。

約10年前から、研究代表者が所属していた研究グループをはじめ多くの研究者が、出力を精密に制御したフェムト秒 (fs) レーザーを大気中にて固体表面に集光照射するだけで、集光スポット内部全体に波長の1/10 ~ 1/5 (最小10 nm オーダー) のナノ周期構造体が自己組織的に形成されることを観測してきた。研究代表者らは、独自の一連の実験とモデル計算に

よって、未知であったその物理過程が「表面プラズモンポラリトン (SPP) の励起とそれに付随した高強度光近接場によるナノメートルサイズの表面剥離 (アブレーション)」であると結論づけた。

提唱した物理モデルを基に、SPP・近接場の空間分布の制御を試みたところ、GaN基板表面に波長800 nm、パルス幅100 fsのレーザーを大気中で照射するだけで、Line/Spaceが100 nm、深さが600 nmの結晶構造を保ったままのナノ格子を均一に作製することに成功した。さらに、紫外fsレーザーによってLine/Spaceが25 nmのナノ格子を作製することにも成功した。今後、SPPの空間モードを理解し、それを精密に制御することができれば、周期構造だけでなく任意形状加工実現の可能性があるため、次世代の電子デバイス開発に必要な新しい光ナノ加工技術基盤を創出できる。

本技術の実現にはSPPの空間モードの理解と制御が必要不可欠であるが、これまでに空間モードを観測するどころか、半導体に励起されたSPPを実験によって直接観測した報告はない。したがって、本研究の目的は、高強度fsレーザーによってシリコン上にSPPが励起できることを初めて実証することである。

照射したとき、 $\theta=24^\circ$ で反射率が減少し(すなわちディップが観測され)、その変化は計算結果とほぼ一致した。以上の結果により、 ρ 偏光の高強度fsレーザーによってSi表面にSPPが励起されたことを初めて観測することに成功した。

－以下割愛－

概 要

低フルーエンスのフェムト秒(fs)レーザーを固体表面に複数パルス重ねて照射すると、レーザー波長よりも小さい周期サイズ(最小 ~ 10 nm)のナノ周期構造がアブレーションによって形成される。これまでにその周期性の起源は、fsレーザーにより励起された表面プラズモンポラリトン(SPP)であると結論づけ、その空間分布の制御を試みた結果、均一で直線性の良いナノ格子を形成できた。本研究では、励起されたSPPを実験により初めて直接観測するため、回折格子を有するSiターゲットを設計・準備し、その表面にfsレーザーを照射して反射率の角度依存性を調べた。

これまでの実験研究によって、fsレーザーによりSiがアブレーションするとき、電子密度は $N_e \sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ であることを示されている。fsレーザー照射によって入射角 $\theta=24^\circ$ でSPPが励起されるよう、周期間隔 $\Lambda=1300$ nmのSi製回折格子を準備し、ターゲットとした。その表面に、Ti:sapphireレーザーシステムから出力される直線偏光(ρ 偏光または s 偏光)のfsレーザーパルス(100 fs, 800 nm, 10 Hz)を入射角 θ で照射し、反射光の強度をCCDカメラで測定した。

まず、Siの単一パルスアブレーションしきい値($F_{\text{abl}}=400 \text{ mJ/cm}^2$)以下のフルーエンス $F=40 \text{ mJ/cm}^2$ のレーザーパルスを使用したところ、反射率は θ で単調に変化するだけであった。一方、 $F=700 \text{ mJ/cm}^2 > F_{\text{abl}}$ では、 ρ 偏光レーザーを