

光でデザインするテラヘルツデバイス

次世代開拓研究ユニット 岡田 隆典



1) 研究内容の要約

フォトニック結晶やメタマテリアルなどの人工周期構造体は、電磁波を巧みに操作する技術として最も有望であり、主要な光学素子が構築されつつある。その一つに、金属周期構造体は、テラヘルツ (THz) 周波数帯域の電磁波に対する光学素子として期待されている。我々は、リアルタイムで広帯域の THz 周波数領域で動作し、光でデザインする THz デバイスを作製しその特性を調べた。このデバイスは、空間的に位相変調させたフェムト秒パルスレーザーをシリコン半導体表面に照射することによって作製された光誘起平面周期伝導帯構造である。変調周波数は構造体の周期によって制御されるが、照射光のパワーにほとんど影響されない。

Technologies are being developed to manipulate electromagnetic waves using artificially structured materials such as photonic crystals and metamaterials, with the goal of creating primary optical devices. For example, artificial metallic periodic structures show potential for the construction of devices operating in the terahertz frequency regime. Here we demonstrate the fabrication of photo-designed terahertz devices that enable the real-time, wide-range frequency modulation of terahertz electromagnetic waves. These devices are comprised of a photo-induced, planar periodic-conductive structure formed by the irradiation of a silicon surface using a spatially modulated, femtosecond optical pulsed laser. We also show that the modulation frequency can be tuned by the structural periodicity, but is hardly affected by the excitation power of the optical pump pulse.

2) 全体計画

テラヘルツ領域の光の発振方法が確立しつつあり、テラヘルツ領域の特性である周波数が大きさ、指紋スペクトルの豊富さ、透過しやすさなどによって、応用面において、イメージング、センシング、通信、情報処理分野への応用が考えられるようになった。たとえば情報分野で実用化するためには、高速でスイッチングできるバンドパスフィルタが必要となる。しかしテラヘルツ領域では有効なオプティクスがあまり存在していない。熱で励起されたキャリアによる半導体での異常透過現象は報告されているが、通信、情報処理分野での応用ではスイッチングのスピードが問題となる。

本研究ではテラヘルツ領域で機能するアクティブな光学素子を作成するため、近年異常透過現象との関連性から注目を集めている波長以下の周期構造を持つ二次元ホールアレイに着目する。通常、金属周期構造によるテラヘルツバンドパスフィルターを用いるが、能動性を持たせるためにシリコン周期構造体を用いて、光励起キャリアによる能動的素子の実現を目指した。本実験では光によるキャリア密度の制御によって能動的素子を目指す。

3) 平成 23 年度の計画

励起密度を変化させて、金属ホールアレイの性質となる異常透過現象の発生メカニズムを調べるとともに、アクティブバンドパスフィルターとしての機能性を調べる。これは、テラヘルツ波を光によって制御する、オール光素子へと発展すると期待できる。また、超高速性の観点から、電子デバイスに代替する新しい光デバイスへと繋がる。また、異常透過によるピークを利用したセンシング技術への応用を模索する。

励起密度と励起タイミングを変化させた場合の、半導体アクティブバンドパスフィルターにおけるプラズモンを介した異常透過現象によるピークの挙動を調べる。また、幾何学透過率と比較し、周期性・形状依存性の観点からも考察を行う。

4) 平成 23 年度の成果

本研究では、半導体表面に周期的パターン形状にしたフェムト秒(10兆分の1秒)パルスレーザーを照射することでテラヘルツデバイスを作製した。更にこのデバイスを用いて、テラヘルツ光の広帯域変調を実現した。

本研究のテラヘルツデバイスは一種の光誘起構造体であり、空間パターンが周期的な形状をしたフェムト秒パルスレーザーを高抵抗シリコン半導体表面に照射することで作製される。この空間パターンは空間光変調器によって形成され、自由に簡単に形状を変えることができる。テラヘルツ光と呼ばれる新しい光を用いて反射光を観測したところ、特徴的なディップが現れる事が分かった。この結果は、フェムト秒レーザー照射時にはシリコン表面に二次元金属構造体を作製され、レーザー照射を止めるとその金属構造が消滅することを意味する。光のパターンを自由に書く、または消すことで、出現または消滅する構造体を世界で初めて実現した。更に、この構造体を使って広帯域の光変調を実現した。この研究成果は、英国科学電子雑誌サイエンティフィック・リポートに掲載された。フォトリソグラフィやメタマテリアルなど光を操作する人工構造体は、今まで微細加工技術が必要だった。本研究のテラヘルツデバイスは、そのような加工技術や電極接続を一切必要としない新しいタイプの光デバイスである。また、10万分の1秒という短時間でデバイスを作製、変形、消去できるため、リアルタイムに何度も書き換えが可能である。電気を使わず光のみで動作する技術にも繋がる技術である。本研究によって、省エネ、省コストでコンパクトな環境に優しいデバイスの作製技術を実現した。

(別紙) 研究成果

(1) 論文、著書 (すべて査読あり)

1. **T. Okada** and K. Tanaka, *Photo-designed terahertz devices.*, Sci. Rep. (Nature) **1**, 121 (2011).
京都新聞朝刊 25 面に掲載 (2011 年 10 月 19 日)
日経産業新聞 10 面に掲載 (2011 年 11 月 1 日)
科学新聞 2 面に掲載 (2011 年 11 月 4 日)
Selected as a hot paper by Nature Japan
(<http://www.natureasia.com/japan/srep/highlights/srep00121.php>)
2. K. Ooi, **T. Okada**, and K. Tanaka, *Mimicking electromagnetically induced transparency by using spoof surface plasmons.*, Phys. Rev. B **84**, 115405 (2011).
3. **T. Okada** and T. Itoh, *Polaron-induced anti-Stokes photoluminescence under selective excitation in diluted magnetic semiconductors.*, Phys. Rev. B **83**, 155211 (2011).

(2) 国際会議における発表 (すべて査読あり)

1. **T. Okada**, *Optical Properties of Photo-induced Metallic Structure in Terahertz Frequency Region.*, 31st Progress in Electromagnetics Research Symposium (Kuala Lumpur, Malaysia, March 2012).
2. **T. Okada**, S. Tsuji, K. Tanaka, and K. Tanaka, *Photo-generation of metallic subwavelength hole arrays in terahertz frequency regime.*, 1st International Symposium on Terahertz Nanoscience 2011 and 2nd Workshop of International Terahertz Research Network 2011 (Osaka, Japan, November 2011).
3. Y. Nakata, **T. Okada**, T. Nakanishi, and M. Kitano, *A circuit-theoretical method for analyzing coupled modes in metamaterials.*, 1st Korea-Japan Metamaterials Forum 2011 (Seoul, Korea, July 2011).

(3) 特許等

特になし

(4) 外部資金の獲得状況

光科学技術研究振興財団 研究助成, テラヘルツ周波数領域における動的フォトニック結晶の作製とその光学特性, 代表, 平成 23 年, 400 千円.

(5) 受賞

特になし