

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：92704

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600051

研究課題名(和文) グラフェン - 八木・宇田アンテナ

研究課題名(英文) Graphene-Yagi-Uda antenna

研究代表者

鈴木 哲 (Suzuki, Satoru)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・機能物質科学研究部・主任研究員

研究者番号：00393744

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：僅かに物理的に非対称性を導入したグラフェンリボンを適切な間隔で積層することによって、上下のリボンに生成するプラズモンの位相干渉効果が生じ八木・宇田アンテナ様の鋭い光学的指向性がテラヘルツ光に対して得られることをシミュレーションによって明らかにした。またプラズモン生成によるテラヘルツ光の反射、および吸収スペクトルの実験的観測に初めて成功した。グラフェンリボンに閉じ込められたバンド内プラズモンの生成によりバンド間遷移の2.3%/層を大きく上回る5 - 10%/層のテラヘルツ光の吸収が得られることを示した。

研究成果の概要(英文)：Our simulations showed that high optical directivity for THz light was achieved from stacked graphene ribbons when the stacking structure was made slight asymmetric physically. The directivity was found to be due to the phasing effects like in a Yagi-Uda antenna. We also firstly succeeded in experimental observation of reflection and absorption spectra in the THz region of graphene plasmons. Absorption by confined intraband plasmons reached 5-10%/layer, which is considerably larger than the intraband absorption of 2.3%/layer.

研究分野：低次元材料

キーワード：グラフェン プラズモン 反射率 吸収率 指向性

1. 研究開始当初の背景

グラフェンのマイクロパタン内にはテラヘルツ光と結合する長寿命のプラズモンが形成される。このプラズモンの共鳴周波数はゲート電圧で制御できるという応用上重要な特徴を持つ。グラフェンプラズモンの光学素子への応用は多数提案されているが、これらのほとんどは専らシミュレーションによる研究であった。分光実験としては、リボン、円などごく簡単な形状のマイクロパタン内に生成するプラズモンの透過スペクトル測定による観測が報告されていた。しかし透過スペクトルの測定のみでは吸収と反射による光のロスを区別することができない。また吸収や反射と異なり、光の透過はその相反性から八木アンテナなどの光学的指向性を持つデバイスの評価には用いることができないという大きな問題があった。

2. 研究の目的

本研究では、グラフェンを用いた八木アンテナなどの指向性光学デバイスを作製することを目的とした。また指向性を実験的に評価するため、プラズモン生成によるテラヘルツ光の反射、吸収スペクトルの観測やその方向依存性の観測も不可避の実験技術上の課題であった。

3. 研究の方法

グラフェンアンテナの設計を行うため、有限要素法による電磁場解析技術を開発した。グラフェンのように極端に薄い物質とこれより数桁大きい光の波長を同時に扱う困難があったが、グラフェンの上下で物理量の不連続を認める境界条件を課すことでこの問題を克服した。

光学的手法によるプラズモンの観測を容易ならしめるためにはその寿命を延ばすことが重要である。このためグラフェン合成と素子作製技術の改良を進めた。

テラヘルツ領域の光学測定を行うため中赤外用の FTIR 装置に改造を施し、テラヘルツスペクトル測定用とした。またグラフェン素子にゲート電圧を印加しながらスペクトル測定を行うことができるようにした。

4. 研究成果

(1) グラフェンマイクロリボンを上下に適当な間隔を空けて積層した構造において、上下のパタンに物理的非対称性を僅かに取り入れることによって八木アンテナ様の鋭い光学的指向性がテラヘルツ光に対して得られることを電磁場シミュレーションによって明らかにした。具体的には、上下のリボンの幅を僅かに変える、あるいは上下のグラフェンのキャリア濃度を僅かに変えるなどして、上下のパタンの共鳴周波数を僅かにずらせば良い。透過スペクトルはその相反性から方向依存性を示さないが、反射、および吸収スペクトルには大きな異方性が発現する。図1に上下のリボンの幅を変化させたときの反射率の後/前比を示した。上のリボン幅が $2.0 \mu\text{m}$ のとき下のリボン幅が $2.2 \mu\text{m}$ で異方

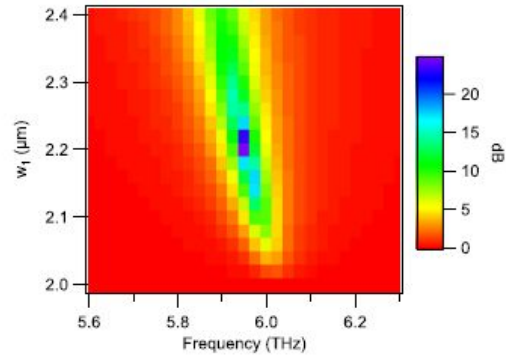


図1 反射率の後/前比の下段のリボン幅依存性。上段のリボン幅は $2.0 \mu\text{m}$ 。グラフェンのフェルミエネルギーは上下段とも 200 meV 。

性が最大となり、このとき 290 倍に及び後/前比が得られた。

これらの光学的異方性は、上下のパタンの位相干渉効果によるもので、八木・宇田アンテナの動作原理と同様なメカニズムに基づいている。通常の八木・宇田アンテナと同様に、アンテナ素子数を増やすことができる。リボンを 3 段にすると更に光学的指向性を増大させることができ、反射率の後/前比 1260 が得られている。

(2) グラフェンマイクロパタンに閉じ込められたプラズモンはこれまでは専ら透過スペクトルの測定によって光学的に観測されていた。本研究で我々は、透過率に加えて反射率測定によるグラフェンプラズモンの観測に初めて成功した。透過率と反射率の両方を測定することにより、プラズモン生成による光の吸収スペクトルを実験的に得ることも可能となった。更に光の透過の相反性によりこれまではスペクトルの方向依存性を観測することができなかったのであるが、反射および吸収測定が可能になったことによりそれらのスペクトルの方向依存性も観測できるようになった。これによって指向性を持

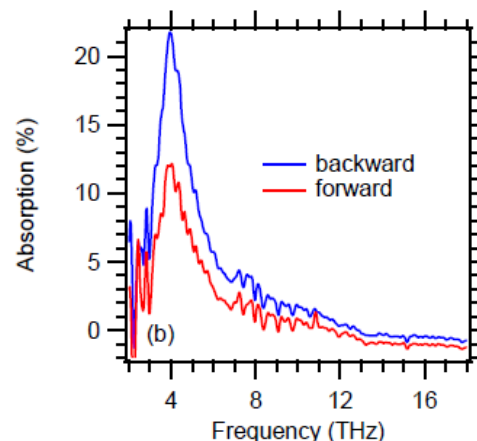


図2 2層グラフェンからなるリボンの前方、および後方入射における吸収スペクトル。

つ光学デバイスの指向特性の実験的観測が初めて可能となった。また本研究期間内に実験はできなかったが、グラフェン光学素子の特性をゲートで変調しながら光学測定を行うことができるように、分光装置や試料保持台の改造を行った。

(3) これらの光学測定技術上の進展、ならびにグラフェン試料の高品質化を組み合わせ、基板上に配置したグラフェンのマイクロリボン試料のテラヘルツ分光測定を行い、以下の結果を得た。作製したグラフェンマイクロリボンのバンド内プラズモン生成によるテラヘルツ光吸収率はグラフェン1層当たり5~10%に達する(図2)。一方、グラフェンのバンド間遷移による1層当たり吸収率は波長に依らず2.3%である。このようにバンド内遷移によるプラズモン生成によって2.3%より大きな吸収率が得られることを明らかにした。またグラフェンリボンによる光吸収率は光学的異方性を有し、光を基板の裏側から入射した方がリボン面から入射した場合に比べて2倍程度に大きくなることを明らかにした。これは基板表面での入射光と反射光の位相効果によるものであることを先に立ち上げたシミュレーション技術を用いて明らかにした。

(4) 分割リング共振器は、負の透磁率を示すメタ材料の基本構成要素として用いられている。グラフェンを用いた分割リング共振器に関して、これまでシミュレーションによる研究は多数報告されているものの実験例は全く存在していなかった。最近我々は図3に示すグラフェンを用いた分割リング共振器を実際に作製し、その透過・反射・吸収スペクトルを初めて報告した。図4に示すように、偏光透過スペクトルに偏光方向依存性が明瞭に観測され、これらはシミュレーション結果と良い一致を示した。本結果はグラフェンを用いて負の透磁率を示し、かつゲートで制御可能なメタ材料を作製できる可能性を示している。

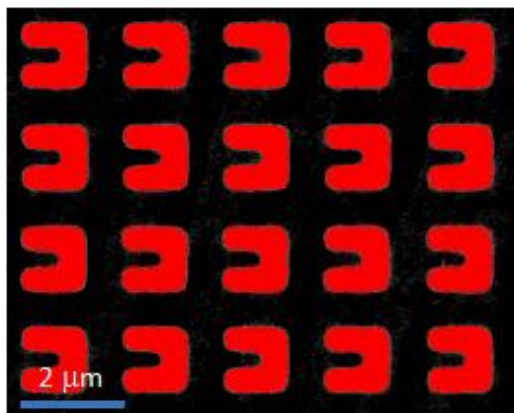


図3 グラフェンからなる分割リング共振器の走査電子顕微鏡像。

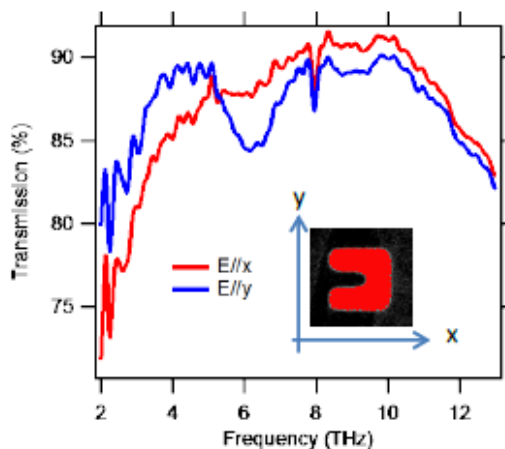


図4 グラフェン分割リング共振器の偏光透過スペクトル。E//xではおよそ2 THz、E//yではおよそ6 THzにプラズモン共鳴に伴う透過率の減少が見られる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

S. Suzuki, M. Takamura, and H. Yamamoto, "Transmission, reflection, and absorption spectroscopy of graphene microribbons in the terahertz region", *Jpn. J. Appl. Phys.* 55, 06GF08-1-4 (2016). 査読有り

S. Suzuki, H. Hibino, "Large optical anisotropy for terahertz light of stacked graphene ribbons with slight asymmetry", *J. Appl. Phys.* 117, 174302-1-7 (2015). 査読有り

[学会発表](計 9 件)

鈴木哲、山本秀樹、「グラフェン - 分割リング共振器」、応用物理学会、2016年3月21日、東京工業大学大岡山キャンパス(東京)。

鈴木哲、「グラフェンと関連二次元材料の成長とキャラクタリゼーション」、応用物理学会薄膜・表面分科会、2015年11月26日、筑波大学東京キャンパス文京校舎(東京)。

S. Suzuki, M. Takamura and H. Yamamoto, "Transmission, Reflection, and Absorption Spectroscopy of Graphene Microribbons in the Terahertz Region", 28th Int. Microprocess & Nanotechnol. Conf., Toyama International Conference Center (Toyama), November 12, 2015.

S. Suzuki, H. Hibino, "Pseudo-Yagi-Uda antenna made of graphene for terahertz light", Italian National Conference on Condensed Matter Physics 2015, Palermo, Italy, Sept. 29, 2015.

鈴木哲、高村真琴、山本秀樹、「グラフェンマイクロリボンの遠赤外透過・反射・吸収スペクトル」、応用物理学会、2015年9月15日、名古屋国際会議場(名古屋市)。

鈴木 哲、日比野 浩樹、「グラフェンによる擬似的八木・宇田アンテナ(1)」, 応用物理学会、2015年3月14日、東海大学(伊勢原市)。

鈴木 哲、日比野 浩樹、「グラフェンによる擬似的八木・宇田アンテナ(2)」, 応用物理学会、2015年3月11日、東海大学(伊勢原市)。

S. Suzuki, H. Hibino, "Directivity of stacked graphene patterns for terahertz light", 7th Int. Symp. Surf. Sci., Shimane Prefectural Convention Center, Kunibiki Messe (Matsue), Nov. 4, 2014.

鈴木 哲、日比野 浩樹、「僅かな対称性の低下により現れるグラフェンリボンスタック構造の光学的異方性」, 表面科学会、2014年11月6日、島根県立産業交流会館(くにびきメッセ)(松江市)。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称：特性可変の光学素子

発明者：鈴木哲、関根佳明、日比野浩樹

権利者：日本電信電話株式会社

種類：特許

番号：特願 2015-008318

出願年月日：2015年1月20日

国内外の別：国内

名称：テラヘルツ帯用アンテナ

発明者：鈴木哲、都甲浩芳、小勝負信建、土居芳行、日比野浩樹

権利者：日本電信電話株式会社

種類：特許

番号：特願 2014-143883

出願年月日：2014年7月14日

国内外の別：国内

取得状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

(日本語)

<http://www.br1.ntt.co.jp/people/ssuzuki/index.html>

(英語)

<http://www.br1.ntt.co.jp/people/ssuzuki/index-e.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 哲 (Suzuki, Satoru)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・機能物質科学研究部・主任研究員

研究者番号：00393744

(2) 研究分担者

日比野 浩樹 (Hibino Hiroki)

関西学院大学・理工学部・教授

研究者番号：60393740

(3) 連携研究者

()

研究者番号：