



令和2年 7月 3日

報道機関 各位

東北大学電気通信研究所

グラフェンの理論限界を超えるテラヘルツ電磁波の増幅 に成功

次世代6G & 7G超高速無線通信の実現に光明

【発表のポイント】

- ✓ 炭素原子の単層シート：グラフェンを使い、室温下で電池駆動によるテラヘルツ電磁波の増幅に成功した。
- ✓ グラフェンの電子がテラヘルツ電磁波と直接相互作用して得られる理論限界を4倍も上回る巨大増幅を実現した。
- ✓ その鍵は、グラフェン内電子集団の電荷振動量子：プラズモンを直流電流で励振して得られる新しい巨大利得増強機構に由来することを発見した。

【概要】

炭素原子の単原子層材料であるグラフェンは、電子有効質量がゼロなどの特異な物性を有することから、従来の技術では困難な室温で動作するテラヘルツ光源・増幅素子を実現し得る夢の材料として注目されている。東北大学電気通信研究所尾辻泰一教授らの国際共同研究チームは、グラフェンを使い、室温で電池駆動によるテラヘルツ電磁波の増幅に成功した。研究グループは、グラフェンをチャンネルとするトランジスタ素子を試作し、グラフェン内電子集団で形成される電荷振動量子：プラズモンを直流電流で励振することにより、グラフェンの電子がテラヘルツ波と直接相互作用して得られる理論限界を4倍も上回る巨大増幅作用を室温下で観測することに成功した。テラヘルツ波を利用する次世代超高速無線通信：6G、7G実現のブレークスルーとなる画期的な成果である。

【論文情報】

S. Boubanga-Tombet (元東北大学電気通信研究所准教授), W. Knap, D. Yadav, A. Satou, D.B. But, V.V. Popov, I.V. Gorbenko, V. Kachorovskii, and T. Otsuji, "Room temperature amplification of terahertz radiation by grating-gate graphene structures," Phys. Rev. X, vol. 10, July 6, 2020. (論文番号とDOIコードは現段階で未定)
<https://journals.aps.org/prx/accepted/52079K1dC0014a02342729a68f281fe27fbfc8908>

【問い合わせ先】

東北大学電気通信研究所
教授 尾辻泰一, 准教授 佐藤昭
電話 022-217-6104,
E-mail otsuji@riec.tohoku.ac.jp

【詳細な説明】

テラヘルツ波は、電波と光波の中間に位置する波長約10マイクロメートル（周波数30テラヘルツ）ないし1ミリメートル（周波数300ギガヘルツ）の電磁波である。このテラヘルツ波の振動周波数は、物質を構成する分子の振動周波数と重なり、ほぼすべての物質の指紋スペクトルが存在するなど、他の電磁波にはないユニークな特徴を有している。そのため、「見えないものを見る」安心・安全のための分光・イメージングや、超高速無線通信などのさまざまな学術・産業分野でテラヘルツ波を利用する技術の開発が急速に進展している。特に、超スマート社会の実現に必須となる情報通信サービスの飛躍的な向上には、テラヘルツ波を利用する次世代超高速無線通信である6Gや7Gの技術開発が必須である。しかしながら、トランジスタをはじめとする電子デバイスも、レーザをはじめとする光デバイスも、テラヘルツ帯での動作は本質的な物理限界のために困難を極めてきた。特に、6Gや7Gの無線信号の送信手段として不可欠な、室温で動作し小型集積化が可能でかつ電池駆動型のテラヘルツ増幅素子やレーザ素子の実現には未だ至っていない。

そのような背景のなかで、従来の半導体材料の限界を大きく超越した優れた物性を有する炭素原子の単層シート：グラフェンが注目されている。グラフェンは炭素原子が蜂の巣格子状に結晶化した単原子層の二次元材料である。グラフェン内の電子は相対論的粒子としてふるまい、その有効質量は消失し、極限的に秀逸な輸送特性を有している。尾辻教授らは、グラフェンの電子と光の相互作用に注目して、テラヘルツ波に対してグラフェンが増幅作用を有すること、さらには、グラフェンを利得媒質としてテラヘルツレーザ発振が実現できることを理論的に発見し、他に先駆けて実験実証に成功している。しかしながら、グラフェンの電子とテラヘルツ波の光子が直接相互作用しても、得られる増幅利得は極めて低く、そのため、レーザ発振動作の実証は液体窒素温度をわずかに上回る摂氏-163度の低温環境でしか得られていなかった。室温で高強度な動作を実現するためには、電子と光子の直接相互作用に伴う動作限界を超えた巨大増幅利得を獲得する必要があった。

電子と光子の相互作用を格段に向上させる手段として、電子集団の電荷振動量子：プラズモンを電子と光子の相互作用に介在させることが古くから知られている。過去40年間にわたり、プラズモンを利用したテラヘルツ波の発光・発振・増幅に関する理論研究が培われ、多くの実験検証がなされてきたが、いずれも、テラヘルツ波に対する優位な増幅作用を実証するには至らなかった。特に、プラズモンを直流電流で励振すると、プラズモンに不安定性と呼ばれる自励発振現象が発現し、増幅素子や発振素子を実現できるという数多くの理論・実験研究がなされてきたが、実際にテラヘルツ波が増幅される現象を観測するには至らなかった。

尾辻教授らは、グラフェンのプラズモンが他の半導体材料に比べてテラヘルツ波光子と相互作用する効率が格段に高いことに着目し、グラフェンプラズモンをテラヘルツ波と効率よく結合できる“二重回折格子ゲート”と呼ばれる独

自のトランジスタ電極構造を導入したグラフェントランジスタを試作した。そして、トランジスタのドレイン端子に印加する直流電圧を変化させながら、テラヘルツパルス波をトランジスタに入射し、グラフェンチャンネル層を透過したテラヘルツパルス波の時間応答波形を測定した。そしてテラヘルツ入射パルス波と比較することにより、グラフェンのテラヘルツ波に対する吸収（損失）スペクトルを測定した（図1）。測定にはフェムト秒の高い時間分解能を有するテラヘルツ時間分解計測装置を用い、全ての実験を室温下で行った。

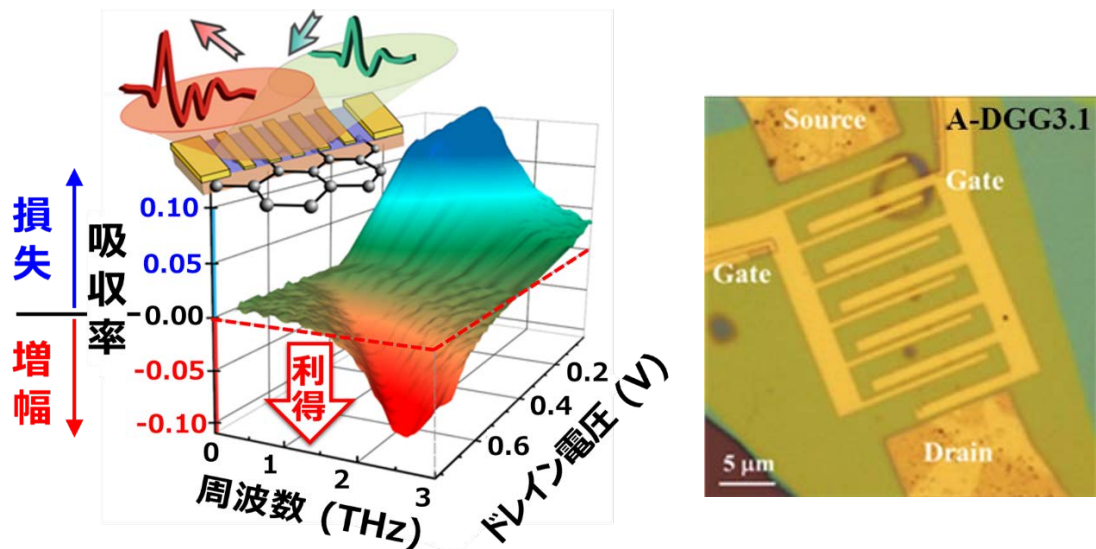


図1 試作したグラフェントランジスタのドレイン電圧を上昇させながらテラヘルツ波パルスを照射し、その透過したパルス波の時間応答波形から、入射パルス波に対するグラフェントランジスタの吸収特性（周波数スペクトル）を求めた。ドレイン電圧がある閾値以上では、吸収率が負値となる増幅特性が得られた。右図は試作した素子の電子顕微鏡写真。楕状の回折格子形状を有するゲート電極を2組用意し、入れ子状に配置した“二重回折格子ゲート”と呼ばれる独自のトランジスタ電極構造を特徴としている。

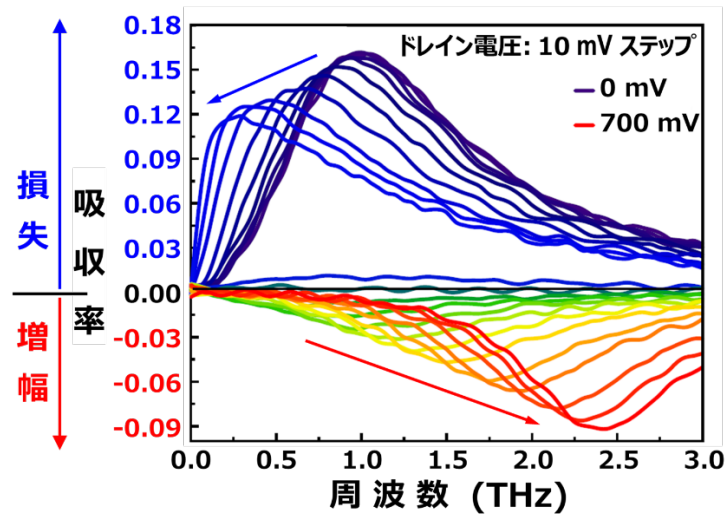


図2 図1の特性の2次元プロット.

測定の結果、ドレインバイアスがある閾値以下では、グラフェンプラズモンの共鳴周波数をピークとする強い吸収スペクトルが得られた。その吸収スペクトルはドレインバイアスの上昇とともに、ピーク周波数が低域側にシフト（レッドシフトと呼ばれる）し、かつ吸収率は低下していった（図2）。そしてドレインバイアスがある閾値を超えると、測定した0～3テラヘルツの範囲内で、グラフェンは完全な透明（吸収ゼロ）状態を示した。さらにドレインバイアスを上昇させると、逆に、透過波の振幅が入射波の振幅を凌駕する増幅特性に転じ、そのスペクトルピーク周波数において得られた最大利得は9%に達した（図2）。また、スペクトルピーク周波数はドレインバイアスの上昇とともに高周波数へとシフト（ブルーシフトと呼ばれる）した。

まず、増幅利得9%の意味するところであるが、単原子層でオングストロームオーダーと極限的に薄いグラフェンにおいては、グラフェンの電子とグラフェンに入射する電磁波の光子が直接相互作用する場合には、光子を吸収する場合も増幅する場合も、吸収係数、増幅係数（利得）はともに最大でも2.3%にとどまることが理論的にも実験的にも明らかになっている。今回得られた増幅利得9%は、それを4倍も上回る巨大増幅利得といえる。今回の研究で、この結果がテラヘルツ波光子とグラフェン電子との相互作用にグラフェンプラズモンを介在させることによって得られたものであることを理論的に明らかにした。

次に、吸収特性を示した低いドレインバイアス領域における吸収スペクトルピーク周波数の変化（レッドシフト）と高ドレインバイアス領域における増幅スペクトルピーク周波数の変化（ブルーシフト）は、グラフェンチャンネル内の電子の移動を救急車の移動に見立てて、プラズモンが振動する波を大気を振動する音波に見立てれば、救急車が移動している時に、接近する時と遠ざかる時にサイレンの音が高くなったり低くなったりするドップラー効果と類似の現象として理解できる。トランジスタ内の電子は、ソース電極からドレイン電極へ

の単一方向にのみ移動し、ドレイン電圧の上昇とともに移動速度は高くなる。つまり、救急車は接近しているだけでその速度が変わるだけである。にもかかわらず、ドレインバイアスに応じて吸収特性を示すときにはピーク周波数が低くなり、増幅特性を示すときには逆に高くなる。すなわち、正常なドップラー効果と逆ドップラー効果とが共存するという極めて興味深い現象が得られた。この現象は、テラヘルツ波の周波数を能動的に変調することが可能であることを意味しており、超高速無線通信で必要となるテラヘルツ波に対する超ブロードバンドな周波数変調制御の実現性を示唆する点において、工学的に重要な成果である。今回の研究で、この「特異なドップラー特性」も、グラフェンプラズモンの理論モデルによって精度よく説明できることを明らかにした。

今回の実験では、グラファイト塊から剥離・転写して得られた最高品質の単層グラフェンを用いたが、工業的な製膜方法によって剥離・転写法と同等の高品質な単結晶グラフェンを層状に多層化して得る技術の開発も進んでいる。このエピタキシャル多層グラフェンを用いれば、グラフェン単層から得られた利得：9%を、2倍、3倍へとグラフェンの層数分だけ向上させることが可能である。室温動作可能で乾電池駆動による高利得テラヘルツ波増幅素子、高強度テラヘルツレーザ素子の実現に向けて大きな一歩となる成果である。

実験研究は東北大学が主導し、理論研究は東北大学とフランス・国立科学研究所(CNRS)ーモンペリエ大学、ロシア科学アカデミー・ヨッフエ研究所(Ioffe Institute)、ロシア科学アカデミー・コテルニコフ無線電子工学研究所、ポーランド国立高圧物理学研究所との国際共同研究による。

本成果は、2020年7月6日公開の、米国物理学会 (American Physics Society) が発行する国際学術論文誌 *Physical Review X* にオンライン掲載されます。

【用語解説】

テラヘルツ 1秒間に10の12乗回（1兆回）振動する周波数。“テラ”は基礎となる単位の10の12乗倍（1兆倍）の量を意味する。