



応用物理学会秋季学術講演会 注目講演プレスリリース

2022年 9月 14日

グラフェン発光素子による高空間分解赤外分光

High spatial resolution infrared spectroscopy with graphene light emitter

奇跡の素材グラフェンで安価・高分解能の赤外分析技術を開発 化学や物理、創薬への応用に新たな道を拓く

慶大理工 (1), 早大材研 (2), 慶大スピントロニクス (3)

中川 鉄馬 (1),(2), 志村 惟 (1), 深澤 佑介 (1), 西崎 亮介 (1), 俣野 眞一郎 (1), 大矢 秀真 (1), 牧 英之 (1),(3)

【発表概要】

- ・ 独自開発の多層グラフェン光源チップにより、回折限界を超えた、高い空間分解能（1 μm ）の赤外分析を実現。
- ・ 100万分の1程度という非常に小さな光源で、従来のFT-IR赤外熱光源と同様の赤外分析が可能に。
- ・ 同技術は、非常に安価でありながら、高い空間分解能を持つ。化学、物理、バイオ、創薬などへの応用が期待される。

慶應義塾大学理工学部物理情報工学科の牧英之と中川鉄馬、同大学院修士課程の志村惟らの研究グループは、多層グラフェンを発光素子として用いた「多層グラフェン光源チップ」を開発し、新たに赤外分光技術を開発した。同技術は、従来のFT-IR（フーリエ変換赤外線分光装置）などの赤外分析において障壁となっていた分解能の理論的限界「回折限界」を超える、非常に高い空間分解能（1 μm ）を実現した。同技術は安価で簡便であることから、化学、物理、バイオ、創薬などへの応用が期待される。

【詳細】

奇跡の素材「グラフェン」で赤外分析を革新する

鉛筆の芯の素材である「グラファイト（黒鉛）」から生まれた新素材「グラフェン」は、非常に薄く、軽く、そして強靭さを併せ持つ、単一の炭素原子が二次元に並んだシート状の物質だ。その特異な物性を利用し、バイオセンサーや発電などへの応用が進められている。またグラフェンは、特徴的な光学特性がもたらされることが報告されている。慶應義塾大学理工学部物理情報工学科の牧グループは、独自開発した多層グラフェン光源チップを発光素子として用いた、革新的な「赤外分析技術」を開発した（図）。

赤外分析とは、対象物に赤外光を照射し、透過・反射した光を分光器を用いて調べることで、構造解析や定量を行う分析手法だ。しかし従来のFT-IRなどの赤外分析は、その分解能に大きな課題があった。顕微鏡などの光学系は、すべからく光の回折（※）による空間分解能の理論的境界「回折限界」によって、測定できる対象が限定される。たとえば、一般的な顕微鏡では、回折限界によって光の波長以下のサイズの対象を正確に観察することができない。

赤外分析においても同様だ。従来のFT-IRなどの赤外分析において光源として用いられるハロゲンランプやセラミック光源は、ミリメートルオーダーのマクロな波長を持つ赤外光源である。したがって回折限界による空間分解能は10 μ m程度という低い値になる。つまり従来の赤外分析は、可視光のような高分解能のイメージングおよび微小・微量分析が困難だった。

「そこで光源である多層グラフェン発光素子が発する『近接場光』を直接活用することで、回折限界を克服しようと考えたのが、この研究の始まりでした」と同研究グループの中川鉄馬氏は話す。

グラフェンで生み出す、安価で高分解能な近接場光

近接場光は、光を、その波長以下のサイズの穴を通したときや、ナノサイズの物質に照射したときに生じる、空間を伝わらないという特殊な性質を持つ光のことだ。近接場光には、一般的な空間を伝わる散乱光とは異なり、回折が存在しないという特徴がある。この特徴を利用することで、光の波長よりも小さな対象を観察する光源として用いることが可能となる。

光源が発する近接場光を直接利用するためには、光源に観察対象を近接させる必要がある。しかし現在の赤外分析で幅広く使われているハロゲンランプやセラミック光源は、いわば“豆電球”のようなものだ。どちらもガラスなどの立体物の中に光源が封入された構造をしている。「立体的な光源は発光部に対し、試料を近接させることができません。一方慶應義塾大学理工学部物理情報工学科の牧グループが開発したグラフェン光源チップ（2018年のNature Communications誌に掲載）は、シリコン基板の上に発光部であるグラフェンを成膜し、その上に電極をつけることで動作する平面構造です。また、最小で500nm角の大きさのグラフェン黒体輻射源を作成可能です。

これらの特徴を活かすことで試料と発光部を近接させることができ、近接場光を利用できるようになるのです」（中川）

回折限界を超え、ナノスケールの極小の対象を観察する手法として、近接場光を活用する試みはこれまでも行われてきた。たとえば「走査型近接場光学顕微鏡(SNOM)」などは赤外領域で高空間分解能を実現する技術として注目されている。しかし、走査型近接場光学顕微鏡は非常に大型で、高価な赤外波長可変レーザーが必要だ。レーザーの取り扱いも非常に難しく、熟練の技術を習得しないと使えないといった問題点がある。「一方の多層グラフェン発光素子による赤外分析は、グラフェン表面に生じる近接場光を直接使うことでイメージングができます。安価で、複雑な技術は不要であるにもかかわらず、分解能の高い赤外分析が実現できることが特徴です」（中川）

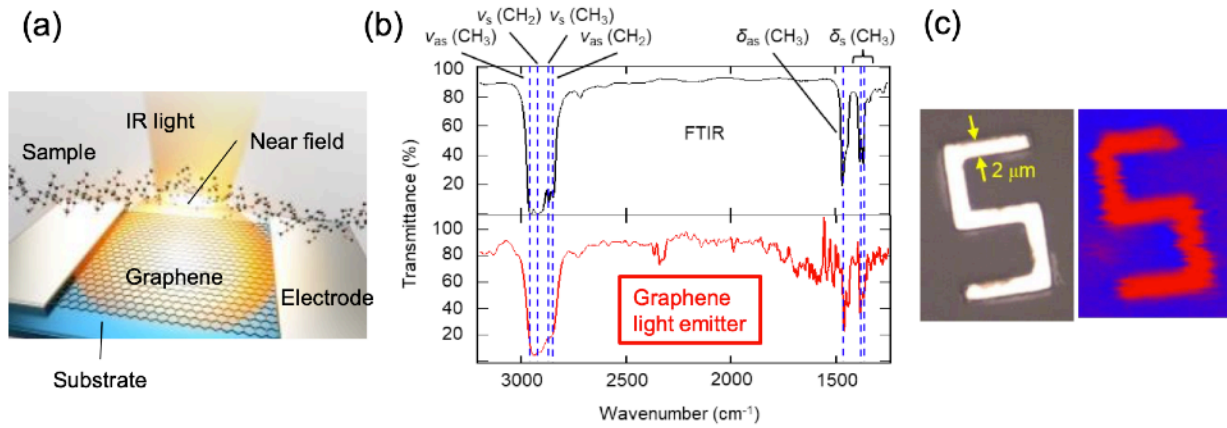
また多層グラフェン光源は、従来のFT-IR赤外熱光源と比較し、数千倍も高速に直接変調が可能だという（1秒間に10万回点滅が可能）。この特徴により、100万分の1程度という非常に小さな光源であるにもかかわらず、従来のFT-IR赤外熱光源と同様の赤外分析が実現できるという。また、その空間分解能は、回折限界を大きく超える1 μm を実現している。

「可視光並みのイメージングや微小・微量分析を、赤外領域においても非常に安価かつ簡便に利用できます。この特徴は、これまで赤外分析ができなかった分野にも導入でき、化学、物理、バイオ、創薬の分野に応用できると考えられます」（中川）

【注釈】

※**光の回折** 光は波の性質を持つが、光が進行方向にある障害物にぶつかると、その後ろへと回り込む。この現象を光の回折という。

【図】



(a) 多層グラフェン光源赤外分析の模式図。グラフェン直上に近接場光が局在する。(b) 従来のFT-IRと多層グラフェン光源赤外分析で測定したポリメチルペンテンのIR透過率スペクトル。(c) 光学顕微鏡、および多層グラフェン光源赤外分析を用いたIRシステムで得られたNiパターンの2次元IR透過画像。可視光に迫る高い空間分解能であることが分かる。