

## グラフェンサンドイッチ型 SiN 導波路を用いた 非線形増強に関する研究

日大生産工(院) ○岡嶋 亮介  
NTT 物性科学基礎研究所 日達 研一 徐 学俊 小栗 克弥  
日大生産工 石澤 淳

### 1. まえがき

パルスレーザー光を物質に入射し、光（電磁波）と物質中の電子との非線形な相互作用を介することで発生される、広い波長・周波数帯域を持つレーザー光をスーパーコンティニューム(SC)光と呼ぶ。SC光の応用は光周波数計測に留まらず、現在秒の定義として用いられているセシウム原子時計の精度を凌駕する時間標準・周波数標準となることが期待される「光時計」、高密度波長分割多重・多値変調による大伝送容量「光通信」、高感度化学物質検出による「化学センサー」等への応用が挙げられる。また、レーザー光の周波数、波長の測定精度の高さから、長さの国家標準としてこの技術が用いられている。物質は、ある特定の波長・周波数の光（電磁波）を吸収または放出する。その吸収された強度や放出される強度は個々の物質特有のものであり、スペクトルの解析によって何の物質であるかや物質の濃度、反応過程の情報が得られる。このように、光を始めとする電磁波のスペクトルを使用して物質の定性的・定量的評価を行う技法の総称が分光法である。大気環境の測定、X線を用いたレントゲン撮影、MRI等に応用されている。

SC光は広い波長・周波数帯域のスペクトルを持つ為、分光用の光源としてSC光を用いることで、多波長を同時に物質に照射でき、各波長で時間的なずれが発生せず、高速な測定が出来る。また、SC光はレーザー光の為、高い強度で精度良く測定が出来る。分光用の光源に赤外線を用いた赤外分光の応用例として、非侵襲血糖値センサーが挙げられる。これは、グルコースが赤外領域に吸収波長を持つことから、赤外線をグルコースに照射し、赤外線の吸収量からその濃度（血糖値）を測定する。ここで用いる赤外線には、帯域1300nm～2500nm程度の広帯域なスペクトルを持つSC光が必要となる。本研究の目的は、将来の大容量光通信、環境計測や化学検出、医療分野で用いられる非侵襲血糖値センサーなどの光センサーへの応用に向け、高い非線形性を持つグラフェンをSiN導波路

に転写し、媒質の非線形性を人工的に制御することでより広帯域な光周波数コム発生プロセスを実証する。

光周波数コムを幅広いアプリケーションで利用するためには、小型で広帯域であることが求められる。我々は、電気光学変調コム(EOコム)とSiフォトリソ技術を用いてこれを実現しようと考えている。EOコムは繰り返し周波数が高いため、低パルスエネルギーでスペクトルを広げる高効率な非線形導波路が必要である。我々はこれまで、Si導波路を用いて帯域拡大を試みたが、Siの二光子吸収による限界があり、新たな材料や構造を持つ導波路の探索が課題となっている。

### 2. 提案手法

本研究では、Si導波路に代わる非線形導波路として、SiN導波路内にグラフェン(Gr)を埋め込む新たな構造(図1a)を提案する。非線形光学特性が高いGrを導波路内部に装荷し、SiN導波路の非線形性を補った。パルス幅74fsのファイバーレーザーを用い、35.6pJの低エネルギーで非線形効果の観測に成功した<sup>5)</sup>。さらに低いパルスエネルギーでの観測を試みたが、偏光状態を制御してレーザー出力パワーを変化させるため、導波路入射前のスペクトル形状が変わる課題があった。これを解決するために、連続可変NDフィルタを用いた新たなセットアップ(図1b)を導入し、短パルス性を維持しつつエネルギーを自在に調整可能にした。また、実験で得られたスペクトル幅をmatlabを用いて数値計算した。

### 3. 実験方法および測定方法

実験結果から、Grを装荷した導波路では、Grを装荷しない導波路に比べて光非線形効果が増強されることが確認された。Fig.2は、Grを装荷していない導波路(Fig.2a)と、光の伝搬方向に150 $\mu$ mの長さでGrを内部に装荷した導波路(Fig.2b)におけるスペクトルのパワー依存性

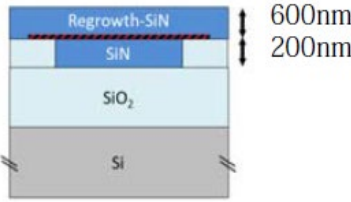
Investigation of Nonlinear Optical Enhancement in Graphene-Sandwiched SiN Waveguides

Ryosuke OKAJIMA, Kenichi HITACHI, Xuejun XU, Katsuya OGURI, and Atsushi ISHIZAWA

を示している。

また, matlab で Gr が  $300\mu\text{m}$  の時のスペクトル幅を再現できた. Fig. 3 は Gr が  $300\mu\text{m}$  の時のスペクトル (Fig. 3) と, 図 3 で得たスペクトル幅を matlab を用いて再現したもの (Fig. 4) である.

(a)



(b)

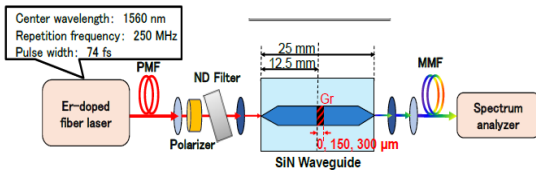


Fig.1

(a) グラフェンサンドイッチ型 SiN 導波路の断面図. (b) 実験配置図.

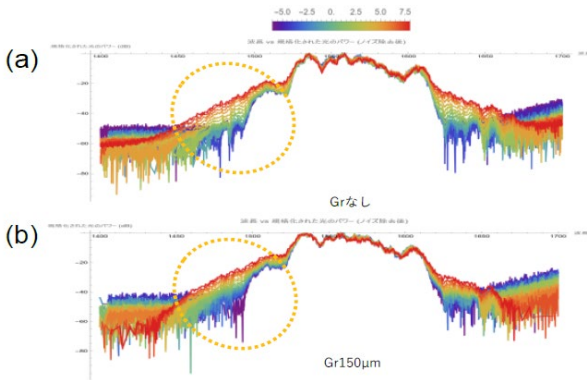


Fig.2

(a) グラフェンサンドイッチ型と (b) グラフェンなしの SiN 導波路を用いた広帯域光スペクトル

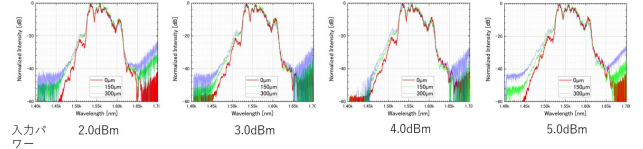


Fig. 3 グラフェン  $300\mu\text{m}$  の時のスペクトル

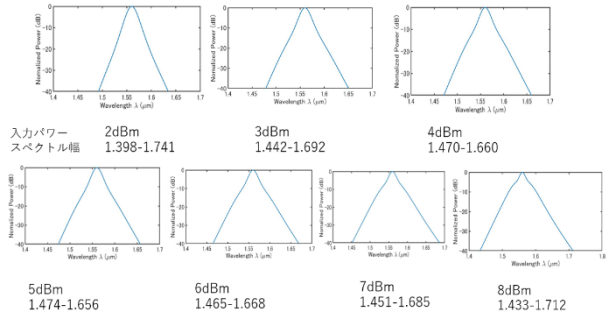


Fig. 4 数値計算によるグラフェン  $300\mu\text{m}$  の時の光スペクトル

#### 4. 実験結果および検討

Gr を装荷していない導波路 (Fig. 2b) ではおよそ  $4\text{pJ}$  (Fig. 2a 緑色の線) 以上でスペクトルの拡大が見られ, これは SiN 導波路の光非線形効果によるものと考えられる. 一方, Gr をサンドイッチした導波路 (図 2a) では,  $1.3\text{pJ}$  (Fig. 2b 青紫色の線) 以上でスペクトルの拡大が確認され, Gr の影響によって光非線形効果がさらに増強されたことが明らかになった.

また, Fig. 4 で図 3 のスペクトル幅を再現することで Gr のパワー依存性が確認できた.

#### 5. まとめ

グラフェンサンドイッチ型 SiN 導波路によって光非線形効果が増強し, 入射パルスエネルギーの低減に成功した. 本結果は非線形導波路の低パルスエネルギー化手法に貢献するものと考えられる. 今後は構造を最適化することで, さらなるスペクトル帯域の拡大を狙う.

#### 参考文献

- 1) S. カンディフ 他, "最も精確なものさし 光コム", 日経サイエンス, 2008 年 7 月号.

- 2) 市村 禎二郎, 「分光法」朝日新聞出版発行  
知恵蔵 (2007).
- 3) S. Camou, et.al., “Simulation tool for  
the prediction of compound dependence of  
CW-photoacoustic-based sensor using dual  
optical excitation”, Sensors and  
Actuators B 189, 224 (2013).
- 4) A. Ishizawa, et al. Scientific Reports,  
“Optical nonlinearity enhancement with  
graphene-decorated silicon waveguides,”  
7, 45520 (2017).
- 5) 堀池拓未 他, 「グラフェン装荷 SiN 導波路に  
よる光非線形効果の増強」第 71 回応用物理  
学会春季学術講演会 [22p-13N-3] (2024).