

グラフェンの超短パルスファイバレーザ応用

山下 真司

東京大学 先端科学技術研究センター (〒153-8904 東京都目黒区駒場4-6-1)

Short-Pulse Fiber Lasers Using Graphene

Shinji YAMASHITA

Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST), The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8904

(Received April 30, 2014)

Graphene, along with carbon nanotube (CNT), has interesting and useful, not only electronic but also photonic, properties. For fiber lasers, they are very attractive passive mode lockers for ultra-short pulse generation, since they have saturable absorption with inherently fast recovery time (< 1 ps). In this paper, we review the photonic properties of graphene and our recent works on fabrications of fiber device and applications to ultra-short pulse mode-locked fiber lasers.

Key Words: Graphene, Saturable absorption, Optical nonlinearity, Fiber laser, Mode locking

1. はじめに

サブピコ秒からフェムト秒領域の超短パルスは、非常に高いエネルギーが短時間に集中するため、理学的・工学的に有用な種々の現象を起こすことができ、産業・医療・計測などの分野で微細加工・分光・計量・レーザー顕微鏡・レーザーイメージングなどに応用されてきている。これまでは超短パルス光源としては、チタンサファイアレーザに代表される固体レーザが用いられてきた¹⁾が、最近の技術の進展により光ファイバレーザでもフェムト秒領域の高強度超短パルスを発生できるようになってきている²⁾。光ファイバレーザは固体レーザに比較して、Wall-plug効率が良くグリーンである、ビーム品質が良い、放熱が良く冷却が不要、コンパクト、ポータブル、低コスト、高信頼性、といった多くの特長がある。短パルス光ファイバレーザで固体レーザを置き換えることができれば、産業・医療・計測などの分野へのインパクトは大である。

フェムト秒領域の短パルス発生には固体レーザでも光ファイバレーザでも、受動モード同期が用いられる。レーザ共振器中にモード同期素子として高速な可飽和吸収素子を置くことで、レーザ共振器の縦モードを同期させることができ、ピコ秒からフェムト秒領域のパルス列(繰り返し周波数は共振器長に反比例)を得ることができる(Fig. 1)。フェムト秒パルス発生のためには、高速(リカバリ時間10 ps以下)かつ飽和強度の低い可飽和吸収素子(SA)が必須である。フェムト秒光ファイバレーザに用いられている可飽和吸収素子としては従来

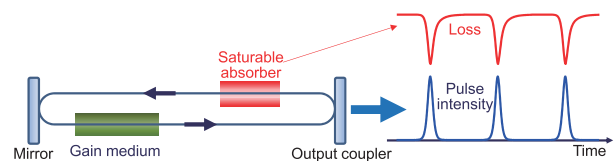


Fig. 1 Passively mode-locked laser using saturable absorber (SA).

から半導体型(半導体可飽和吸収ミラー: SESAM^{1,3)})または光ファイバ型(非線形光ファイバループミラー(NOLM)や非線形偏波回転(NPR))可飽和吸収素子^{2,4)}が用いられてきているが、それぞれ一長一短がある。これに対し、最近、カーボンナノチューブ(CNT)・グラフェンなどのナノカーボン型可飽和吸収素子が超高速かつ小型な可飽和吸収素子として注目されている⁵⁻⁹⁾。特にグラフェンは波長無依存であるという大きな特長をもっている。本稿では、グラフェンを中心にしてその光学特性の基礎、可飽和吸収特性、光デバイス作成法、および受動モード同期光ファイバレーザの研究について我々の研究を中心に現状を報告する。

2. グラフェンの光学特性と可飽和吸収特性

グラフェンは炭素の2次元のナノ構造であり、単層グラフェンは1炭素原子の厚さで炭素原子の sp^2 結合からなる蜂の巣状の六角形格子構造をとる。グラフェンの電気的特性は非常に独特であり、グラフェン π 電子のエネルギーと波数の関係(分散関係)はよく知られているように、

$$E^{\pm}(\mathbf{\kappa}) = \pm \hbar v_F |\mathbf{\kappa}| \quad (1)$$

という線形関係で表される¹⁰⁾。ここで、 $\mathbf{\kappa} = (\kappa_x, \kappa_y)$ はグラフェンのブリルアンゾーンにおけるK点(ディラックポイント)近傍の2次元波数ベクトル、 $v_F \approx 10^6$ m/s ($\sim c/300$)はグラフェン中での π 電子の群速度である。このような線形関係は非常に高速で運動する相対論的粒子に特有な関係である。つまり、グラフェン中の π 電子は通常の状態とは異なり、光速の1/300で運動する質量ゼロのフェルミ粒子(もしくは擬似的な光子)として振舞う。ディラックポイント廻りのバンド構造は、Fig. 2 (a)に示すように線形な分散関係による円錐(ディラックコーン)状の価電子帯と伝導帯がディラックポイントで交わり、それより下を価電子帯、上を伝導帯とするゼロバンドギャップ物質(あるいは半金属)とみなせる。また状態密度もエネルギーに対して同様の線形な関係をもっている。

この線形な分散関係により、グラフェンの光学特性も独特である。単層グラフェンは1原子層厚しかないにもかかわらず価電子帯と伝導帯間での大きな共鳴吸収($\sim 2.3\%$)を持つ。この吸収はFig. 2 (a)に示すように線形なバンド構造での吸収であるため、波長に対してはほぼ無依存であり、また層数に比例して大きくなることが知られている¹¹⁾。

吸収飽和は、高強度の光により媒質が透明化する、つまり吸収が減少する現象であり、このような媒質を可飽和吸収体(Saturable absorber: SA)と呼ぶ。吸収飽和は、 α , α_0 , α_{sat} をそれぞれ吸収係数、可飽和吸収係数、非飽和吸収係数として、

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + I/I_s} + \alpha_{\text{int}} \quad (2)$$

と表すことができる。ここで I は光強度、 I_s は飽和強度である。高速なリカバリ時間をもつSAは前述のようにモード同期による短パルス発生に用いられる。Fig. 1のようにSAをレーザー共振器中に入れることにより、低強度の連続(CW)発振を抑圧して高強度の短パルス発振を促進する(受動モード同期)¹⁻⁴⁾。SAだけでパルスが形成される場合にはSAのリカバリ時間 τ はパルス幅程度に高速である必要があるが、ファイバレーザーの場合のよ

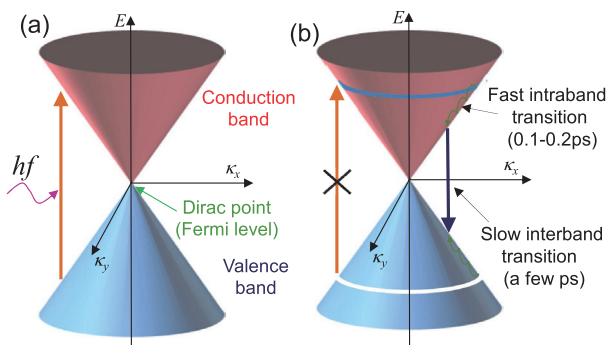


Fig. 2 Linear optical absorption (a) and saturated absorption in graphene.

うに他のパルス形成メカニズム(ソリトンモード同期など)が絡む場合には必ずしもパルス幅より速い必要はない。むしろ遅いリカバリ成分があるほうがセルフスタートに寄与する³⁾。SAはまたQスイッチによる比較的幅の広いパルス生成にも用いられる。飽和強度 I_s はリカバリ時間 τ と吸収断面積 σ により

$$I_s = \frac{\hbar f}{\sigma \tau} = \frac{E_s}{\tau} \quad (3)$$

で与えられる。ここで $\hbar f$ は光子エネルギー、 E_s は飽和フルエンスと呼ばれる。

グラフェンの光吸収はバンド間の共鳴吸収であり、高強度の光により飽和する(Fig. 2 (b))。グラフェンの場合、飽和状態からのリカバリには高速(0.1–0.2 ps)と比較的低速(数ps)なものがあり、それぞれバンド内緩和とバンド間緩和によるものとされている^{12,13)}。Fig. 3に典型的な単層グラフェンの可飽和吸収特性を示す¹²⁾。ここで縦軸 ΔT_{total} はガラス基板上に単層グラフェンがない場合とある場合との透過量の変化として定義されており、ガラス基板での反射を含んでいる。グラフェンを丸めた1次元構造であるCNTでも半導体CNTのバンドギャップによる光吸収と可飽和吸収があり、同様に高速と比較的低速なリカバリからなるが、グラフェンよりはそれぞれ一桁程度大きい(数psと数10 ps)ことが知られている。これらに対し、従来の半導体型(SESAM)のものはさらにそれぞれ一桁程度大きく、また光ファイバ型(NOLM, NPR)のものは光ファイバの非線形干渉を利用しているので非常に高速(~ 10 fs程度)であるが低速のリカバリをもたないという特徴がある。

光ファイバレーザーのためのモード同期素子としてのSAの性能指標としては、リカバリ時間の他に、飽和強度、吸収波長帯域、可飽和・非飽和吸収比、光ダメージしきい値が挙げられ、また実際的な問題としてデバイスの作りやすさと光ファイバとの相性の良さが求められる。CNT(CNT-SA)・グラフェン(G-SA)はSESAMよりは非飽和吸収が大きい、ゲインの大きい光ファイバレー

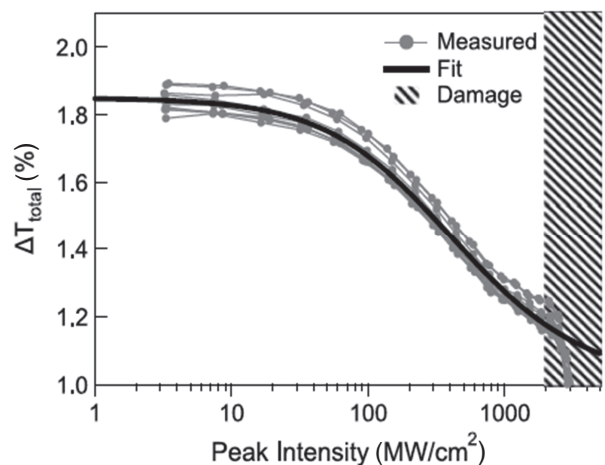


Fig. 3 An example of saturable absorption properties of a single-layer graphene. (Reprint from Ref. ¹²⁾)

ザーではそれほど問題ではなく、後述のように作りやすさと光ファイバとの相性の良さから光ファイバレーザーに向けたSAである。特にG-SAは前述のように吸収波長帯域が光ファイバレーザーで用いられる赤外波長域(1–5 μm)をほぼカバーしているという大きなメリットがある。ただし、G-SAは飽和強度 I_s に波長依存性をもつことが知られている。Fig. 3は波長1.55 μm での飽和特性で、飽和強度 I_s は数100 MW/cm^2 程度となるが、SESAMやCNT-SAでは典型的な飽和強度 I_s は10 MW/cm^2 程度である。波長1 μm ではさらに飽和強度 I_s は高くなり、数 GW/cm^2 となる^{12,13)}。G-SAの飽和強度 I_s の波長($\lambda[\mu\text{m}]$)依存性として

$$I_s = \frac{2.7}{\lambda^6} [\text{GW}/\text{cm}^2] \quad (4)$$

という式が経験則として示されている¹³⁾。Fig. 4に式(4)に基づくG-SAの飽和強度 I_s の波長依存性を示す。G-SAは波長無依存ではなく、波長1 μm や波長1.55 μm 帯ではSESAMやCNT-SAよりも飽和強度が大きくなり、これはモード同期しきい値の上昇につながる。これに対して2 μm 以上の中赤外域では飽和強度がSESAMやCNT-SA並みもしくはそれ以下となり、特にこの波長域で有望であると思われる。Table 1にSESAM, CNT-SA, G-SAの性能の比較を示す。

このような可飽和吸収は、入射する光自身の強度によって損失が変化するといわば自己強度変調であるが、グラフェンでは電流を注入することでフェルミレベルを変化させることで、電気信号による強度変調が可能であることが示されている^{14,15)}。広い波長域で動作できる変調器がミクロンサイズでできる可能性があり、研究が盛んになりつつある。また、グラフェンは大きな非線形屈折率変化をもつことも知られている。これは炭素ネットワーク中の π 電子の非線形分極によるものである。非線形屈折率変化の大きさ n_2 は $10^{-12}(\text{m}^2/\text{W})$ 程度であり、例えば石英ガラスと比較して 10^8 程度大きいことが知られている¹⁶⁾。このような高速応答する非線形屈折率変化は、自己位相変調(SPM)、相互位相変調(XPM)、

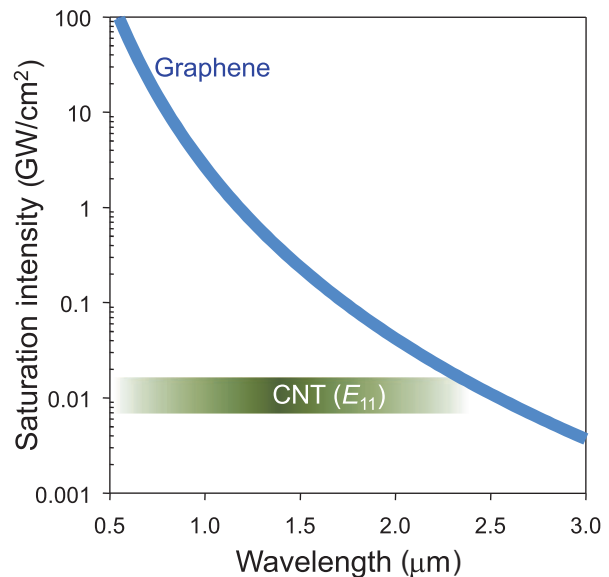


Fig. 4 Empirical fits of wavelength dependence of saturation intensities of graphene and CNT thin film.

四光波混合(FWM)などを利用した光信号処理デバイスの実現のために重要である。我々はグラフェンで光信号のFWMによる波長変換が可能なことを示している¹⁷⁾。

3. グラフェン光デバイス

前節で述べたように、グラフェンは高速な可飽和吸収だけでなく、電流による吸収変化や高い非線形性など有用な光物性をもっている。これはCNTも同様であり、後述のようにSA応用としてはむしろCNTのほうが歴史は古く(2003年頃～)、グラフェンのほうが最近である(2009年頃～)。グラフェンを光デバイスとして用いる場合、何らかの方法でグラフェンと光を相互作用させる必要がある。Fig. 5に示すように、このためには主に2つの方法が考えられる。

A. グラフェン薄膜に対して垂直に光を入射して直接相互作用させる。

Table 1 A comparison of SA properties of SESAM, CNT, and Graphene.

	SESAM	CNT	Graphene
Recovery time	10–30 ps	~1 ps	~0.2 ps
Saturation intensity	~10 MW/cm^2	~10 MW/cm^2 (in case E_{11} is used)	1000–10 MW/cm^2 (depends on wavelength)
Absorption bandwidth	10–30 nm	200–500 nm (depends on diameter distribution)	> 1000 nm (almost wavelength independent)
Ratio of saturable to nonsaturable absorption	> 4	< 1	~1
Damage threshold	~370 GW/cm^2 (peak power)	~50 kW/cm^2 (average power)	~2 GW/cm^2 (peak power)
Fabrication	Complex	Simple	Simple
Fiber compatibility	Not good	Good	Good

B. 導波路や光ファイバのコア上部にグラフェン薄膜を形成して、コアからのエバネッセント光と相互作用させる。

光デバイス応用の場合、グラフェン薄膜は必ずしも連続した単層グラフェンである必要はなく、Fig. 5にあるようにグラフェン小片の集まりでもよく、また単層ではなく数層のものが混じっていてもよい。これはCNT-SAにおいてCNTのカイラリティや方向が揃っている必要はないのと同じである。また、グラフェンをポリマーに閉じ込めたグラフェン-ポリマーコンポジット薄膜が用いられることもある。コンポジット薄膜は扱いやすいという特長がある。

グラフェン薄膜を作る方法はいくつかある(Fig. 6)。最も簡便な方法は、グラファイトから粘着テープを用いて機械的に剥離する方法、いわゆるスコッチテープ法である。グラファイトを粘着テープに挟んで剥離を繰り返すことで、数層もしくは単層のグラフェンを得ることができる。最近ではCVD法で大面積のグラフェンを作ることができるようになってきている。これらで得られた数層もしくは単層のグラフェンは連続した薄膜であり、基板もしくは導波路/光ファイバに移すことで光デバイスとすることができる。ただし、可飽和吸収素子としての応用を考えた場合、前述のように大面積は必要なく小片の集まりで良い。このようなグラフェン薄膜を作る方法としては、CNT薄膜を作るのと同様の方法が用いられてい

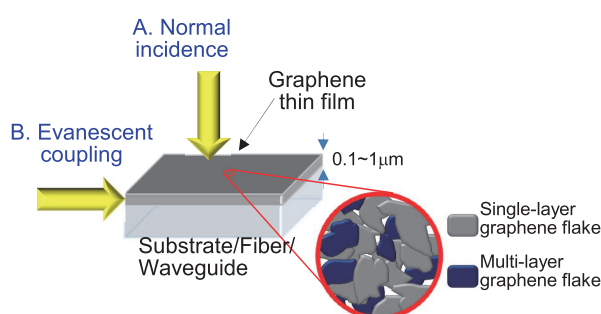


Fig. 5 Interaction between the light and graphene thin film.

る。まずグラファイトを超音波によって液相で機械的剥離(Liquid Phase Exfoliation: LPE)¹⁰⁾し、その後遠心分離により数層・単層グラフェン小片の分散溶液を得る。その分散溶液を基板もしくは導波路/光ファイバにスプレーするスプレー法、分散溶液に光ファイバを浸して端面のコア部分にのみに集める光堆積法、分散溶液をポリマーにより薄膜化したグラフェン-ポリマーコンポジット法がある。ここで光堆積法とは、光ファイバ端面をマイクロサイズの粒子を含む液体に浸して高強度の光をファイバから出射させることで、主に熱泳動(Thermophoresis)により粒子をコア部分にのみ堆積させることができる方法である^{18,19)}。

光ファイバレーザへの応用のためには、グラフェン薄膜をどうやって光ファイバレーザ共振器に取り込むかが最も重要な点となる。最もシンプルな方法としては、光ファイバコネクタなどを用いて光ファイバ端面の間にグラフェン薄膜を挟み込む方法である(Fig. 7(a))。これはFig. 5のAに相当し、光ファイバ型CNT-SAを作る方法として初期から用いられてきたもので、これにより多くのCNT/グラフェンモード同期光ファイバが報告されている⁵⁻⁹⁾。ここで問題となるのは、高強度の光が入射するとCNT/グラフェンが燃えてしまうという光ダメージの問題がある。一般的にはポリマーコンポジット薄膜よりも純粋なグラフェン薄膜のほうが光ダメージしきい値は高い。我々はスコッチテープ法と光堆積法によるグラフェン光ファイバデバイスの光ダメージの比較を行い、スコッチテープ法の方がはるかに光ダメージしきい値が高いことを示している¹⁷⁾。これはスコッチテープ法のほうが欠陥が少ないグラフェンが得られるためだと考えている。また我々はFig. 7(a)の構成を窒素で封止することにより光ダメージしきい値を上げることができることも示している²⁰⁾。光ダメージしきい値を上げるためのもう一つの方法としては、Fig. 5のBのようにグラフェン薄膜に対して垂直に光を入射する代わりに、グラフェン薄膜を導波路の上部に配置して導波路からのエバネッセント波を利用する方法がある。エバネッセント波結合光デバイスとしては、光ファイバを

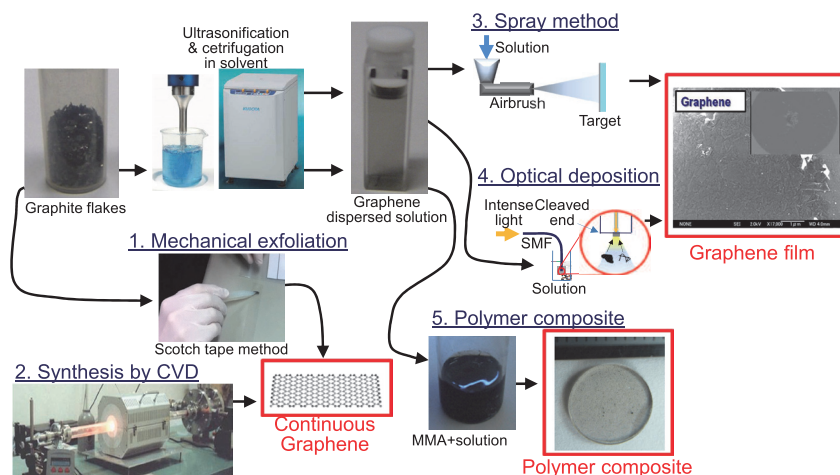


Fig. 6 Methods of producing graphene thin film.

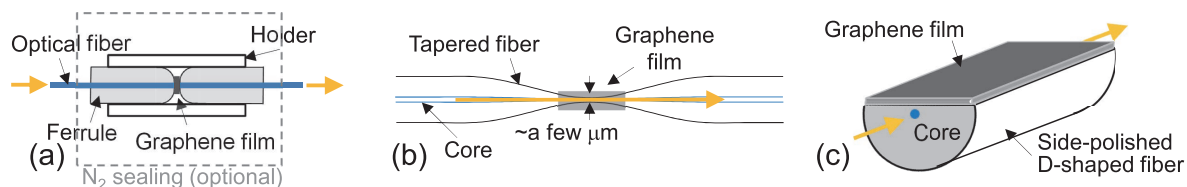


Fig. 7 Fiber-type Graphene-SA devices. (a) Graphene film sandwiched in between fiber connectors (b) A tapered fiber coated with graphene film at the taper waist (c) A side-polished D-shaped fiber with Graphene film on the flat surface.

テーパ状に加工してそのウエスト部分にグラフェン薄膜を形成したもの (Fig. 7 (b)), 光ファイバをコア付近までD型研磨したDシェイプ光ファイバ上にグラフェン薄膜を形成したもの²¹⁾ (Fig. 7 (c)), などがある。なお、前述の照射法による薄膜作製はエバネッセント波でも可能である²²⁾。

4. グラフェンモード同期光ファイバレーザー

CNTをSAとして用いた受動モード同期エルビウムドープ光ファイバレーザーは2003年に初めて報告された²³⁾。一方、グラフェンによるモード同期光ファイバレーザーは2009年に初めて報告された^{10,24)}。CNTはチューブ径により吸収波長が変わる、つまりレーザー波長に応じたCNT径を選ぶ必要があるのに対して、グラフェンはどんな波長でも吸収できるため大きな注目を集め、短期間の間に多数のグループがG-SAを用いたモード同期光ファイバレーザーを報告している。しかしながら、グラフェン自体は波長無依存だが、前述のようにG-SAは飽和強度の面で波長無依存ではない。このため、Table 1にも示したとおり、G-SAのほうが必ずしもCNT-SAより優れているわけではなく、波長や共振器構造による。Fig. 8にG-SAやCNT-SAを用いたモード同期光ファイバレーザーの代表的な構成例を示す。Fig. 8 (a)は最も典型的なリングレーザー構成で、ファイバ型SAがファイバリング共振器中に挿入され、希土類ドープ光ファイバは通常、波長多重(WDM)光ファイバカップラを通して励起される。Fig. 8 (b)は光ファイバファブリペロー(FP)レーザー構成で、小型化に有利である。SAは出力側のミラーに置かれることが多く、励起はWDM光ファイバカップラ、もしくは出力側とは反対側のWDMミラーを通して行われる。

我々は、G-SAとCNT-SAの波長1.55 μm でのモード同期素子としての比較をはじめて報告した²⁵⁾。CNTおよびグラフェンは前述の光堆積法により光ファイバ端面に堆

積させた。このとき、どちらのサンプル共に非飽和吸収量が50%程度になるようにした。可飽和特性の測定の結果、飽和強度はCNTのほうが一桁程度低かった。これはFig. 4の傾向に一致している。これらのサンプルを用いてFig. 8 (a)の構成でエルビウムドープ光ファイバリングレーザーの実験を行った結果、どちらのサンプルでも繰り返し周波数50 MHz程度でパルス幅約0.8 psの安定なモード同期動作をすることがわかったが、モード同期しきい値励起光パワーがCNTでは約20 mWであるのに対し、グラフェンでは約80 mWであった。これは上述の飽和強度の違いに起因するものと考えている。

このような光ファイバリングレーザー構成では通常、共振器が長い(数m以上)ため繰り返し周波数は高くても100 MHz程度である。これに対してGHz以上の繰り返し周波数のパルス光源は光ファイバ通信や光計量・計測に有用である。我々は、G-SAとCNT-SAの小型で光ファイバやミラーと一体化可能という長所を生かし、共振器長を短くした高繰り返しモード同期光ファイバレーザーの研究を進めてきた。GHz以上の高繰り返しモード同期光ファイバレーザーを実現するためには、共振器長を数センチメートル以下にする必要があり、高い利得をもつ利得光ファイバと、小型で高速、しかも低損失な可飽和吸収素子が必要である。CNTやグラフェンは先に述べたように小型で高速であり、低損失で光ファイバデバイス化することができる。我々は先に、Fig. 8 (b)のファイバFPレーザー構成で、利得の高いEr:Ybドープ光ファイバ(長さ2 cm)と高反射(>99%)光ファイバミラーおよびCNT-SAを組み合わせることにより、高繰り返し周波数(~5 GHz)モード同期光ファイバレーザーを実現した²⁶⁾。最近、さらに高利得のリン酸ガラス系Er:Ybドープ光ファイバによる20, 10, 5 GHzモード同期光ファイバレーザーと、それを利用した広帯域スーパーコンティニウム(SC)光発生も実現している²⁷⁾。さらに、CNT-SAの代わりにG-SAを用いた同じ構成での10 GHzモード同期光ファイバレーザーも実現した²⁸⁾。Fig. 10にその出力スペクトル、自己相関波形を示す。繰り返し周波数9.67 GHzでパルス幅865 fs、平均出力パワー2 dBmの安定なパルス列が得られている。ただし、やはりリングレーザーの場合と同様にモード同期しきい値励起光パワーがCNT-SAの場合よりも高く、波長1.55 μm での飽和強度の違いに起因すると思われる。

さらに、高出力光ファイバレーザーへの応用も進められている。通常用いられる異常分散領域でのソリトンモード同期光ファイバレーザーでは高出力化が難しい

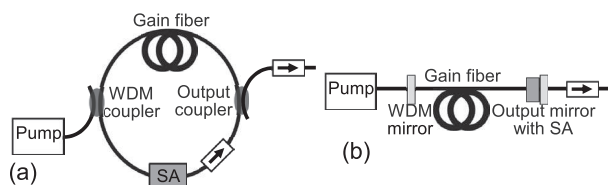


Fig. 8 Typical fiber laser configurations mode-locked by Graphene-SA. (a) Fiber ring laser (b) Fiber Fabry-Perot (FP) laser.

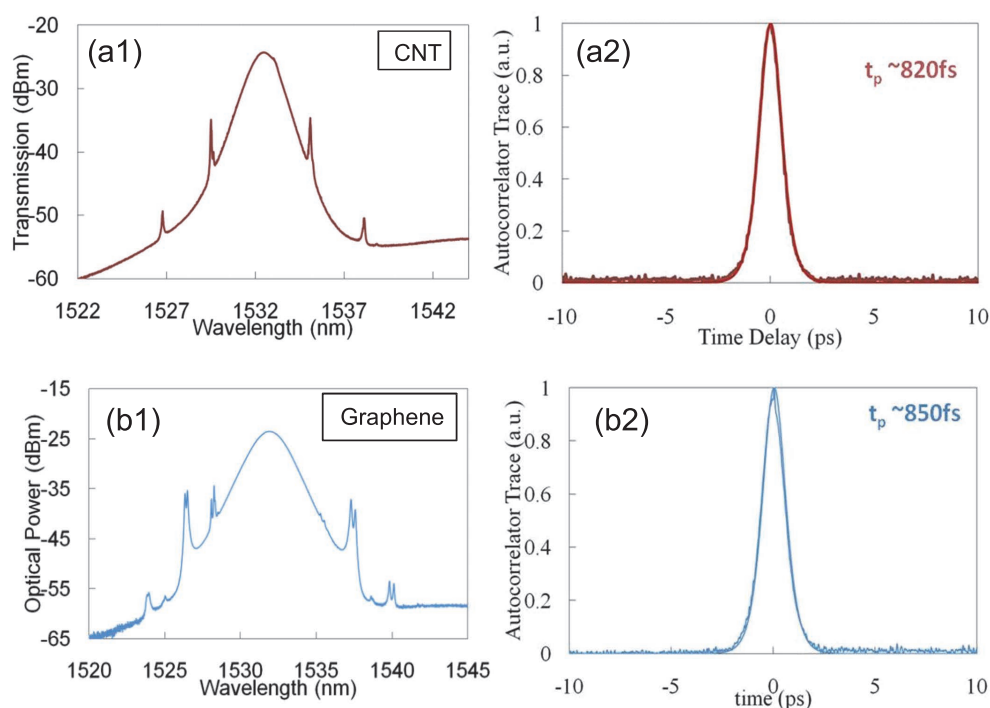


Fig. 9 Soliton fiber ring laser mode-locked by optically deposited (a) CNT and (b) graphene. (1) Lasing spectra (2) Autocorrelation trace.²³⁾

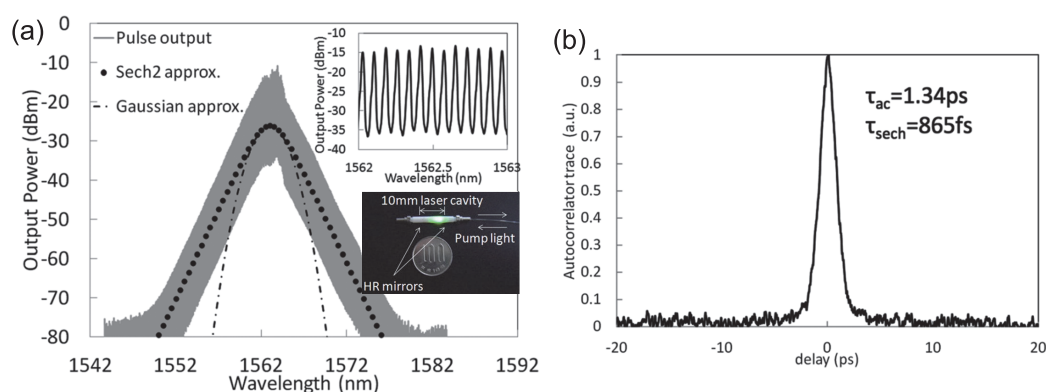


Fig. 10 10 GHz, 1cm-long fiber FP laser mode-locked by Graphene-SA.²⁶⁾ (a) Lasing spectra (b) Autocorrelation trace.

が、最近では正常分散を利用したシミラリトンおよび散逸 (Dissipative) ソリトンモード同期光ファイバレーザーが高出力で安定なチャープパルスを生成する方法として注目されている。このパルスは線形チャープであるため圧縮可能であり、高エネルギー ($> 10\text{ nJ}$) かつ短パルス ($< 100\text{ fs}$) を実現することができる。これらのレーザーでは可飽和吸収素子が通常のソリトンモード同期よりも重要になるが、G-SAとCNT-SAは両者とも使えることが示されている⁶⁾。また、波長帯についてもエルビウムドープ光ファイバの波長 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 帯のみならず、波長 $1\text{ }\mu\text{m}$ 帯および $2\text{ }\mu\text{m}$ 帯でもモード同期が報告されている⁶⁾。特に、G-SAの飽和強度が小さくなる中赤外波長帯 (波長 $2\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$) では特にG-SAが魅力的である。SAモード同期だけでなくQスイッチにも用いることができるため、G-SAをQスイッチ光ファイバレーザーに用いる研

究も多数報告されている。

5. まとめと今後の展望

グラフェンの光学特性の基礎、可飽和吸収特性、光デバイス作成法、および受動モード同期光ファイバレーザー応用について我々の研究を中心に紹介した。前述のようにグラフェンは小型で安定、高速、さらに光ファイバとの整合性が良い、という特長を持つSAであり、光ファイバレーザーに限らず各種のモード同期レーザー、特に $1.5\text{ }\mu\text{m}$ よりも長い波長帯での利用に適しており、通信の分野のみならず計測や加工の分野でも活用されることを期待している。さらに、可飽和吸収のみならず波長変換素子などの非線形デバイスとしての応用も期待できる。

参考文献

- 1) U. Keller: Appl. Phys. B **100** (2010) 15.
- 2) M. E. Fermann and I. Hartl: J. Sel. Top. Quantum Electron. **15** (2009) 191.
- 3) U. Keller: Nature **424** (2003) 831.
- 4) G. P. Agrawal: *Application of Nonlinear Fiber Optics*, Second edition (Academic Press, 2008).
- 5) S. Yamashita, Y. Saito, and J. H. Choi (ed.): *Carbon Nanotube and Graphene Photonics* (Woodhead Publishing, 2013).
- 6) S. Yamashita: Journal of Lightwave Technology **30** (2012) 427.
- 7) A. Martinez, B. Xu, and S. Yamashita: J. Sel. Top. Quantum Electron., to be published.
- 8) S. Yamashita, A. Martinez, and B. Xu: Optical Fiber Technology, to be published.
- 9) A. Martinez and Z. Sun: Nature Photon. **7** (2013) 842.
- 10) F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, and A. C. Ferrari: Nature Photon. **4** (2010) 611.
- 11) R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres, and A. K. Geim: Science **320** (2008) 1308.
- 12) C. -C. Lee, J. M. Miller, and T. R. Schibli: Appl. Phys. B **108** (2012) 129.
- 13) C. -C. Lee, N. Keschl, and T. R. Schibli: *Proc. Ultrafast Optics 2013* (2013) Fr2.1.
- 14) M. Liu, X. Yin, E. Ulin-Avila, B. Geng, T. Zentgraf, L. Ju, F. Wang, and X. Zhang: Nature **474** (2011) 64.
- 15) C.-C. Lee, S. Suzuki, W. Xie, and T. R. Schibli: Opt. Express **20** (2012) 5264.
- 16) E. Hendry, P. J. Hale, J. Moger, A. K. Savchenko, and S. A. Mikhailov, Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 097401.
- 17) B. Xu, A. Martinez, and S. Yamashita: Photon. Tech. Lett. **24** (2012) 1792.
- 18) K. Kashiwagi and S. Yamashita: Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) L988.
- 19) J. W. Nicholson, R. S. Windeler, and D. J. DiGiovanni: Opt. Express **15** (2007) 9176.
- 20) A. Martinez, K. Fuse, and S. Yamashita: Opt. Express **21** (2013) 4665.
- 21) Y. W. Song, S.-Y. Jang, W.-S. Han, and M.-K. Bae: Appl. Phys. Lett. **96** (2010) 051122.
- 22) K. Kashiwagi and S. Yamashita: Opt. Express **17** (2009) 18364.
- 23) S. Y. Set, H. Yaguchi, Y. Tanaka, and M. Jablonski: J. Sel. Top. Quantum Electron. **10** (2004) 137.
- 24) Q. Bao, H. Zhang, Y. Wang, Z. Ni, Y. Yan, Z. X. Shen, K. P. Loh, and D. Y. Tang: Adv. Functional Mat. **19** (2009) 3077.
- 25) A. Martinez, K. Fuse, B. Xu, and S. Yamashita: Opt. Express **18** (2010) 23054.
- 26) S. Yamashita, Y. Inoue, K. Hsu, T. Kotake, H. Yaguchi, D. Tanaka, M. Jablonski, and S. Y. Set: Photon. Tech. Lett. **17** (2005) 750.
- 27) A. Martinez and S. Yamashita: Opt. Express **19** (2011) 6156.
- 28) A. Martinez and S. Yamashita: Appl. Phys. Lett. **101** (2012) 041118.