

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656222

研究課題名(和文)CNT可飽和吸収体と光変調器を併用したハイブリッドモード同期レーザの開発

研究課題名(英文)Development of hybrid mode-locked laser with CNT saturable absorber and optical modulator

研究代表者

吉田 真人 (Yoshida, Masato)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：10333890

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、GHz帯の高繰り返しフェムト秒パルスの生成を目指し、可飽和吸収体と光変調器を併用したハイブリッドモード同期レーザの研究に取り組んだ。可飽和吸収体として、カーボンナノチューブ、グラフェンならびに半導体素子を試作/評価し、これらをソリトンレーザとして最適設計した能動モードレーザ共振器内に挿入することで、繰り返し周波数が約10 GHz、パルス幅が約500 fsのフェムト秒パルス列の生成に成功した。

研究成果の概要(英文)：We developed a hybrid mode-locked laser with a saturable absorber and an optical modulator to generate a femtosecond pulse with a GHz repetition rate. We studied carbon nanotube, graphene, and semiconductor devices as a saturable absorber. Then we inserted these devices into an active mode-locked laser, in which the dispersion and the nonlinearity were optimized for soliton pulse generation. As a result, we have successfully generated a 500 fs pulse with a 10 GHz repetition rate.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：光デバイス・光回路

1. 研究開始当初の背景

カーボンナノチューブ (Carbon Nanotube : CNT) は、広範囲な応用分野が期待されているナノ材料である。特に半導体的性質を示す CNT は、光吸収率が入力光電力に依存して非線形に変化する可飽和吸収特性を有し、光学素子として利用できる。その他、可飽和吸収体としては、グラフェンや多重量子井戸構造を利用した半導体素子が開発されており、これら可飽和吸収体を用いた受動モード同期レーザへの応用研究が注目されている。しかしながら、受動モード同期レーザの繰り返し周波数は共振器長によって一意的に決まるため、一般にその繰り返し周波数は数 10 ~ 100 MHz と低く、このことが可飽和吸収体を用いたフェムト秒レーザの応用範囲を制限していた。

2. 研究の目的

本研究では、CNT を代表とする可飽和吸収体を用いた超短パルスレーザの高繰り返し化を目指し、高調波モード同期レーザ技術を融合した新しいハイブリッドモード同期レーザを開発することを目的とする。ここで、パルスの繰り返し周波数が高くなるほどそのピーク電力が低下する関係にあるため、可飽和吸収効果を得る際に、より高い平均電力の光パルスを可飽和吸収体へ入力する必要がある。そこで本研究では、このような用途に耐えうる、耐損傷性に優れた可飽和吸収体の実現を目指す。また、安定なフェムト秒パルスを得るために、レーザ共振器を構成する光ファイバのもつ波長分散や非線形光学係数を制御し、レーザ共振器をソリトンレーザとして最適設計する。そしてこれら 2 つの要素技術を組み合わせ、GHz 帯の高繰り返しフェムト秒パルスが生成可能なハイブリッドモード同期レーザを実現する。

3. 研究の方法

(1) 可飽和吸収体の開発

CNT を溶かした溶媒を耐熱性の高いポリイミドフィルム上あるいは光ファイバコネクタ端面に塗布し、自然乾燥させるという作業を繰り返すことにより、耐熱性に優れた CNT 可飽和吸収体を実現する。ここで、高電力の光が素子へ入射された際に CNT が燃えることを防ぐために、CNT が直接空気に触れないサンプル構造とするよう工夫する。同様に、グラフェンを用いた可飽和吸収体の作製も実施する。さらに、半導体技術をもったメーカーの協力のもと、耐損傷性の優れた半導体可飽和吸収体の試作も行う。

(2) ハイブリッドモード同期レーザの開発

可飽和吸収体によるパルス狭窄効果と同時に、ソリトン効果によるパルス圧縮効果を利用したハイブリッドモード同期ファイバレーザを設計 / 作製する。まず、共振器を構成する光ファイバ中における非線形光学効果と分散効果、ならびに可飽和吸収体による

非線形な光吸収効果を数値解析し、その解析結果のもとレーザ共振器を最適設計する。つぎに解析した最適条件のもとファイバリング共振器を構成し、そこへ (1) で試作した可飽和吸収体を挿入し短パルス発生実験を行う。そして得られた実験結果をもとに、レーザ共振器構成の見直しならびに可飽和吸収体の改良試作を行う。

4. 研究成果

(1) 可飽和吸収体の開発

最初に、過去に実績のある CNT 材料を用いた可飽和吸収体の耐久性の向上を図った。CNT 可飽和吸収体の作製プロセスを図 1 に示す。まず、導電性ポリマー (P3HT) と CNT をクロロホルム溶媒中で分散させ、CNT/P3HT 複合体を作製する。つぎに、CNT/P3HT が溶けた溶媒を光ファイバコネクタの端面に塗布し、自然乾燥させる。これを複数回繰り返す。最後に、ファイバ端面に塗布した CNT/P3HT 膜を、耐熱性に優れたシロキサンで覆うことにより、CNT が空気と直接触れないような工夫を施した。

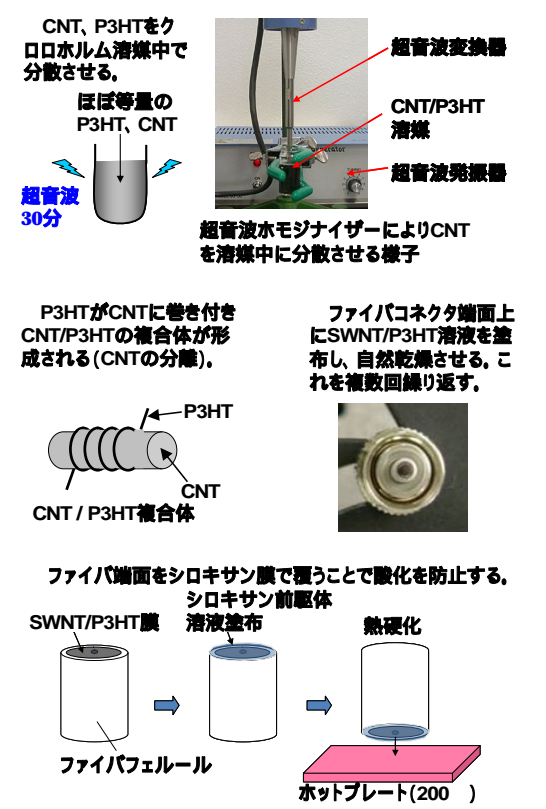


図 1 CNT 可飽和吸収体の作製手順

図 1 の手順で作製した可飽和吸収体を用いた受動モード同期ファイバレーザの構成を図 2(a) に示す。利得媒質にエルビウム添加光ファイバ (EDF) を用いたリング型レーザ共振器を構成した。共振器長は 9.1 m であり、これに対応したパルスの繰り返し周波数は 22 MHz である。ここで、高い平均電力をもつソリトンパルスを出力するために、図 2(b) に示すように共振器内の平均分散値を 10.2

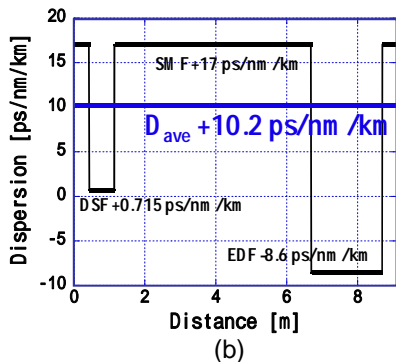
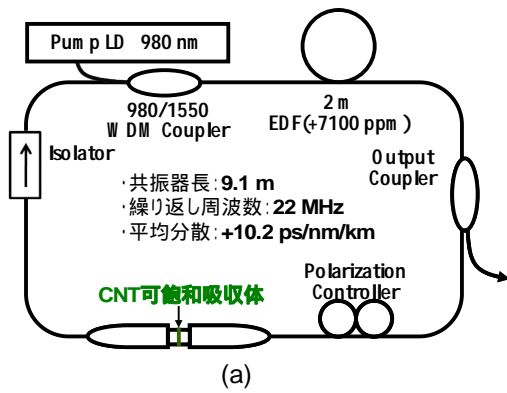


図2 CNT可飽和吸収体を用いた受動モード同期レーザー (a)レーザーの構成, (b)レーザー共振器内の分散マップ

ps/nm/km と高い数値に設定している。

出力カプラの分岐比を 10:90 に設定し、90 %の光をレーザー媒質へ帰還させた場合における、励起電力とレーザー共振器内部のCNT可飽和吸収体へ入射される光電力の関係を図3に示す。図に示すように、従来 30 mW 以下の入力光電力で損傷していたCNT可飽和吸収体の損傷閾値を 50 mW 以上に拡大することに成功した。

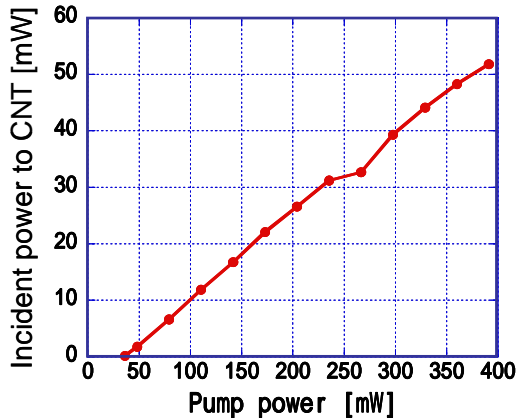


図3 励起電力とCNT素子入射電力の関係

本レーザーの出力パルスの光スペクトル波形および自己相関波形をそれぞれ図4(a), (b)に示す。レーザー出力パルスのスペクトル幅は 9.5 nm (1.18 THz), 時間幅は 280 fs であった。これらの時間バンド幅は 0.33 であることより、本レーザーよりトランスフォームリミットに近い sech 型パルス (ソリトンパルス) が得られていることがわかる。

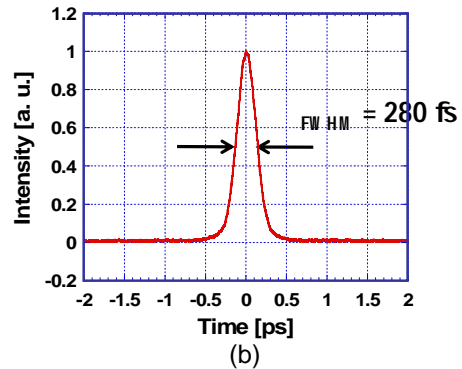
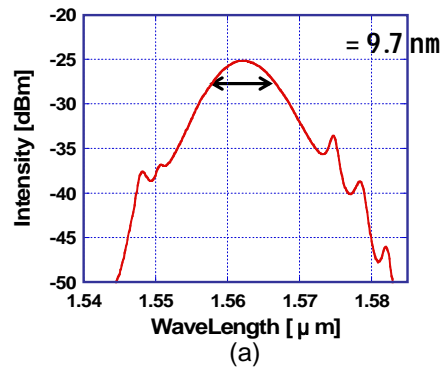


図4 CNT受動モード同期レーザーの出力パルス特性 (a)光スペクトル, (b)自己相関波形

上述したCNT可飽和吸収体の開発と並行して、グラフェンを用いた可飽和吸収体を新たに作製し、それを用いた受動モード同期レーザーの性能評価を行なった。その出力パルス特性の一例を図5に示す。図に示すようにスペ

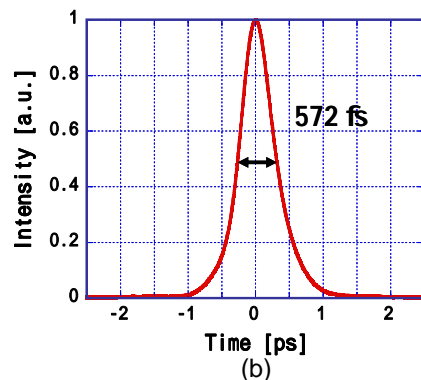
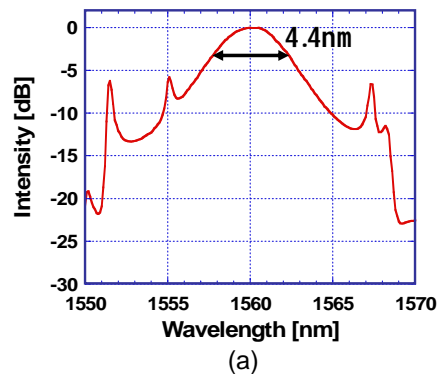


図5 グラフェン受動モード同期レーザーの出力パルス特性 (a)光スペクトル, (b)自己相関波形

クトル幅が 4.4 nm (540 GHz)、時間幅が 572 fs、それらの時間バンド幅積が 0.31 である sech 型パルスが得られた。しかしながら、素子の損傷閾値が 20 mW 以下と低く、その耐損傷性に問題がみられた。

多重量子井戸を用いた半導体可飽和吸収体に関しては、吸収係数ならびに変調指数をパラメータとして複数通りの素子をメーカーの協力のもと試作し、これらの素子をハイブリッドモード同期レーザへ応用した。

## (2) ハイブリッドモード同期レーザの開発

可飽和吸収体と光変調器を併用したハイブリッドモード同期レーザの開発について、そのパルス特性の数値解析を先行して行った。共振器を構成する光ファイバのもつ非線形光学係数ならびに分散値を制御し、ソリトン効果を併用したレーザ共振器を最適設計することで、繰り返し周波数が 10 GHz、パルス幅が 500 fs 以下の高繰り返しフェムト秒パルスを出力できることを明らかにした。

つぎに(1)で試作した可飽和吸収体を用いてハイブリッドモード同期レーザ共振器を構成し、パルス発振実験を行った。レーザ共振器は数値解析結果をもとにソリトンレーザとして最適設計し、高調波モード同期技術を用いてパルスの繰り返し周波数を約 10 GHz に設定した。可飽和吸収体として半導体素子を利用した場合の出力パルス特性の一例を図 6 に示す。図に示すようにスペクトル幅が 5.2 nm (650 GHz)、時間幅が 480 fs、それらの時間バンド幅積が 0.31 である sech 型のソリトンパルスが得られた。また高調波

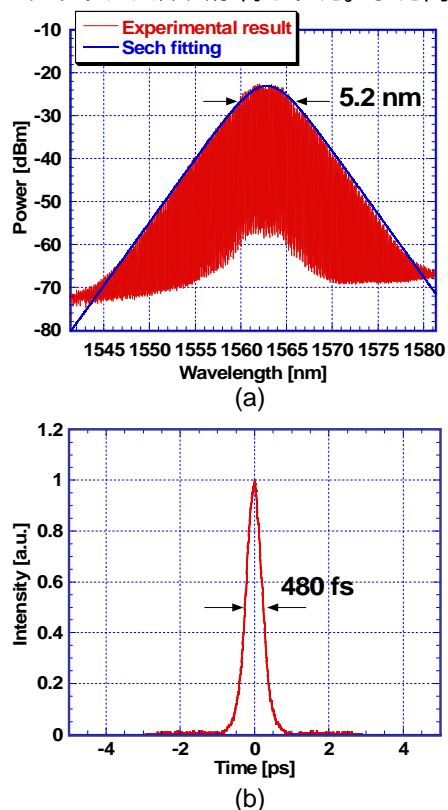


図 6 ハイブリッドモード同期レーザの出力パルス特性 (a)光スペクトル, (b)自己相関波形

モード同期をオフにした受動モード同期動作時には、繰り返し周波数 24 MHz、パルス幅 500 fs のフェムト秒パルスが得られることを確認した。これらの結果より、高調波モード同期の次数を制御することで、繰り返し周波数が数 10 MHz から 10 GHz の範囲で可変のフェムト秒パルスの生成が原理的に可能であることを示した。一方、試作した CNT 可飽和吸収体の損傷閾値は 60 mW であり、目標とする 10 GHz の高繰り返しフェムト秒パルスを生成するために素子に求められる損傷閾値 100 mW を達することができなかった。この結果より、CNT を用いたハイブリッドモード同期レーザにより生成可能なフェムト秒パルス列の繰り返し周波数は 5 GHz 程度に制限されることがわかった。

## 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 1 件)

- [1] T. Ono, Y. Hori, M. Yoshida, T. Hirooka, M. Nakazawa, J. Mata, and J. Tsukamoto, "A 31 mW, 280 fs passively mode-locked fiber soliton laser using a high heat-resistant SWNT/P3HT saturable absorber coated with siloxane," *Optics Express*, vol. 20, pp. 23659-23665 (2012) 査読有.  
DOI: 10.1364/OE.20.023659

[学会発表](計 3 件)

- [1] T. Ono, M. Yoshida, and M. Nakazawa, "A 1.5  $\mu\text{m}$  Passively Mode-locked Fiber Soliton Laser with a Graphene-doped PVA Saturable Absorber", *Tohoku-Section Joint Convention of Institutes of Electrical and Information Engineers*, 2013 年 8 月 22, 23 日, 会津大学
- [2] 小野敬人, 堀雄一郎, 吉田真人, 廣岡俊彦, 中沢正隆, "SWNT を用いた受動モード同期ファイバーレーザの高出力化," 第 73 回応用物理学学会学術講演会, 2012 年 9 月 11-14 日, 愛媛.
- [3] 小野敬人, 堀雄一郎, 吉田真人, 廣岡俊彦, 中沢正隆, 真多淳二, 塚本遵, "SWNT を用いた受動モード同期ファイバーレーザの高出力化," 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会 (LQE), R2012-38, 2012 年 8 月 23, 24 日, 仙台.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]  
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

東北大学電気通信研究所中沢研究室ホームページ

<http://www.nakazawa.riec.tohoku.ac.jp/>

6．研究組織

(1)研究代表者

吉田 真人 (YOSHIDA, MASATO)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：10333890

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし