

カーボンナノチューブを用いた超高速光機能デバイスの研究 (051403009)

Ultrafast photonic functional devices using Carbon nanotubes

研究代表者

山下真司 東京大学

Shinji Yamashita, The University of Tokyo

研究分担者

丸山茂夫[†] セットジヨン^{††} 宋容沅[†] 宮内雄平[†] チャオキンキー[†]

Shigeo Maruyama[†] Sze Y. Set^{††} Yong-Won Song[†] Yuhei Miyauchi[†] Chow Kin Kee[†]

[†]東京大学 ^{††}株式会社アルネアラボラトリ

[†]The University of Tokyo ^{††}Alnair Labs Corporation

研究期間 平成 17 年度～平成 21 年度

概要

本研究では、カーボンナノチューブ(CNT)の光非線形性を利用して、将来の波長多重(WDM)光ファイバネットワーク用の新しい、かつ低コストな全光処理デバイスの研究開発を行う。本研究の具体的な目標は、

- ① 光デバイスに適した高品質・高純度 CNT 作製法
- ② CNT を非線形飽和吸収体として用いた超短パルスモード同期光ファイバレーザ
- ③ CNT の非線形屈折率変化を用いた光スイッチ等の超高速光機能デバイスを実現することである。

Abstract

This project aims at the research and development of novel and low-cost all-optical devices for future wavelength-division-multiplexed (WDM) optical fiber networks based on optical nonlinearity of carbon nanotubes (CNT). Specific targets of the project are as follows.

1. Fabrication methods of high-quality and high-purity CNT for photonic applications
2. Realization of short-pulse mode-locked fiber lasers using nonlinear saturable absorption in CNT
3. Realization of ultrafast functional devices (all-optical switch, etc.) using nonlinear refractive index change in CNT

1. まえがき

光ファイバ通信システム・ネットワークの技術は 1990 年代前半の光ファイバ増幅器の登場と実用化に始まり急速に発展している。ブロードバンドネットワーク、無線 LAN に代表されるユビキタスネットワーク、画像・動画配信さらにはテレビ電話まで可能になった携帯電話ネットワークの最近の進展から判断すると、今後は光ファイバ通信技術の更なる大容量化・高速化が求められると考えられる。しかしながら、現在の光ファイバ通信システムでは、信号処理部分は半導体集積回路・電子デバイスがいまだに主役である。やがては信号処理回路にも光を用いる、いわゆるフォトニックネットワーク技術が必要とされることは間違いない。このようなフォトニックネットワークでは全光処理のできる光デバイスが重要である。これまでの全光処理デバイスは、半導体型のものと光ファイバ型のものとに分類されるが、それぞれに一長一短があり、いまだに実用的な全光処理デバイスは実現されていない。

本研究は、カーボンナノチューブ(CNT)の光非線形性を利用して、将来の波長多重(WDM)光ファイバネットワーク用の新しい、かつ低コストな全光処理デバイスの研究開発を行うものである。

2. 研究内容及び成果

2. 1 光デバイスに適した高品質・高純度 CNT 作製法

光デバイスに適した高品質・高純度単層 CNT 作製に向けて、エタノールを炭素源とするアルコール CVD 法の改善によって高純度の垂直配向膜が合成できるとともに、垂直配向膜の厚さの制御と CNT 直径分布の制御合成が実現した。直径分布の同定や CNT の光吸収の基礎的な検討に

ついてもラマン分光法、近赤外蛍光分光法によって進め、CNT 軸と直交方向に偏光した光の吸収などの重要な知見を得た。特に、単層 CNT の光・電子物性への環境効果について詳細な検証を行った。

また、単層 CNT 膜を光学素子に直接 CVD 合成して光デバイスとすることも可能ではあるが、高温の CVD 条件などを考慮すると一般性が低い。本研究では、石英基板上に合成した垂直配向 CNT 膜を温水に浸すことで極めて容易に剥離させ、これを平滑な面に再付着させる方法を開発した。この方法によって垂直配向の形態が保たれることが分かり、D シェイプ光ファイバ上に付着させるなどの実験を実現した。

垂直配向膜の CNT 直径分布の制御合成については、デップコート法やスピンコート法による触媒金属の調整および様々な CVD 合成条件の両面から検討した。シリコン基板上にデップコートする金属触媒の調整によって CNT の制御ができることから、SiO₂ 酸化膜をパターンニングして SiO₂ 酸化膜部分のみからの垂直配向 SWNT 合成と SAM 膜のパターンニングによってより高分解能の位置制御が可能な CNT 合成を実現した。

また、従来の CNT 光デバイスはガラス基板もしくは光ファイバ端面に CNT 薄膜を形成し、その可飽和吸収性を利用して、本研究所では、光照射により光ファイバ端面上のコア部分のみに選択的に CNT 薄膜を形成する方法を開発した。垂直に切った光ファイバ端を CNT を分散した溶媒に浸け、光を入射するだけで、光ファイバ端面上のコア部分のみに選択的に CNT 薄膜が形成できていることがわかった。この光ファイバ CNT デバイスを用いて、モー

ド同期光ファイバレーザのパルス発振にも成功している。この方法をさらに進展させ、光ファイバ端のみならず、光ファイバや導波路に沿った CNT 形成が可能であることも見いだした。

2. 2 CNT 超短パルスモード同期光ファイバレーザ

可飽和吸収体として CNT を用い、さらに利得が非常に高い Er:Yb 光ファイバ (長さ 2cm) と、高反射 (~99.87%) 光ファイバミラーとの組み合わせにより、高繰り返し周波数 (~5GHz) 受動モード同期光ファイバレーザを実現した。

光照射によるテーパ化マイクロ/ナノ光ファイバ CNT デバイスによるモード同期光ファイバレーザを実現した。また、D シェイプ光ファイバ上に CNT を蒸着した光ファイバ型 CNT デバイスではエバネッセント光と CNT との相互作用を利用していることで高出力光にも耐えられる。実際に高出力光ファイバ増幅器でリングレーザを構成することにより、平均パワーで 0.25W、ピークパワーでは 5.6kW の高出力モード同期光ファイバレーザの実現に成功した。さらに、光ファイバにフェムト秒レーザ照射とフッ素エッチングによりマイクロチャネル/スロットを断面方向に形成して CNT 溶液で満たした新たな CNT デバイスを提案し、モード同期光ファイバレーザを実現した。新しいデバイスとして、CNT ドープポリマーの実現と、その光ファイバ化に成功した。本研究では光ファイバ/導波路化に適したメチルメタクリレート (MMA) をホストとして用い、CNT は液体状の MMA モノマーにパウダーの形で加えることにより CNT ドープポリマーを得た。CNT ドープポリマーファイバ化にも成功している。

また、CNT モード同期光ファイバレーザの応用として、それを光源とした超高速 (>160Gb/s) 光通信信号のための非同同期式光サンプリングシステムを実現した。

2. 3 CNT を用いた超高速光機能デバイス

本研究では、D シェイプ/細径化/テーパ/中空光ファイバ型 CNT デバイスによるスイッチ・波長変換器・波形整形器の研究を進めた。光ファイバの側面をコア部分から数 μm となるように D 型に研磨した 5cm の D シェイプ光ファイバの研磨部分に CNT をスプレーし、光ファイバ型 CNT デバイスとした。これにより、非線形偏波回転および四光波混合 (FWM) に基づく 10Gb/s 光信号波長変換に成功した。さらに、D シェイプ光ファイバ CNT デバイス中の自己位相変調を用いて 10Gb/s で 1.8ps の RZ パルスの波形再生にも成功している。

光ファイバ CNT デバイスのみならず、集積化に有利な導波路型での CNT エバネッセント結合非線形デバイスによるスイッチ・波長変換器の研究を進めた。平面型光導波路 (PLC) を CNT と組み合わせたデバイスでの FWM に基づく 10Gb/s 光信号の波長変換に成功した PLC 型 CNT デバイスは通常の PLC の上部クラッドの部分のエッチングにより除去した構造になっており、この部分に CNT 層をスプレー法により形成し、PLC 型 CNT デバイスとする。波長変換実験系は図 1 のとおりで、PLC 型 CNT デバイスに 10Gb/s で変調された NRZ 光信号と、ハイパワーな CW 励起光を入力する。FWM 効果により、信号光はスペクトル上で励起光の波長に対して信号光と対称な位置に変換される。変換信号の符号誤り率 (BER) 測定の結果、もとの信号に対しておよそ 3dB のパワーペナルティでエラーフリーな伝送が実現できていることがわかる。

3. むすび

本研究で開発した高繰り返し周波数 CNT モード同期光ファイバレーザは光ファイバ通信用の RZ パルス光源、もしくは計測用の光コム光源としての需要が見込まれる。さ

らに、CNT 光ファイバ/導波路型非線形デバイスでは、波長変換のみならず、光スイッチ、波形整形、リタイミング、2R/3R 再生中継器などの全光処理機能が小型で実用化でき、さらに集積化が進めば全光処理ルータの実現につながると期待している。

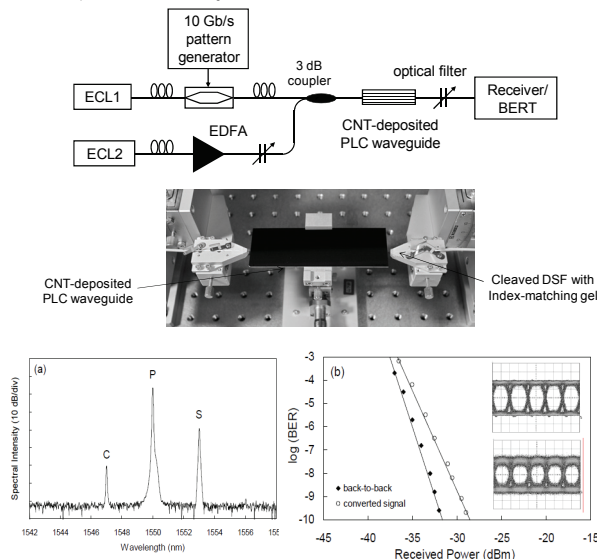


図 1 CNT 導波路光デバイスによる 10Gb/s 光信号波長変換

【誌上発表リスト】

- [1] Y. W. Song, S. Yamashita, and S. Maruyama, "Single-walled carbon nanotubes for high-energy optical pulse formation", Appl. Phys. Lett., vol.92, no.2, pp.021115-1-3, Jan. 2008.
- [2] S. Y. Set, H. Yaguchi, C. S. Goh, D. X. Wang, and S. Yamashita "Non-synchronous optical sampling and data pattern recovery using a repetition-rate-tunable CNT pulsed laser," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 47, no. 8, pp. 6809–6811, Aug. 2008.
- [3] K. K. Chow and S. Yamashita, "Four-wave mixing in a single-walled carbon-nanotube-deposited D-shaped fiber and its application in tunable wavelength conversion," Optics Express, vol.17, no.18, pp.15608-15613, Aug. 2009.

【申請特許リスト】

- [1] 山下真司、柏木謙、セツト ジ イオン、"光デバイス"、日本、特願 2005-258172、2005/09/06
- [2] 山下真司、柏木謙、"光導波路構造体、その製造方法、モード同期光ファイバレーザ装置、微粒子堆積方法および微粒子抽出方法"、日本、特願 2007-010536、2007/01/19
- [3] 丸山 茂夫、項 榮・2 次元的にパターン化されたカーボンナノチューブの製造方法、及び 2 次元的にパターン化されたカーボンナノチューブ、日本、特許出願 2009-46686、2009 年 2 月 27 日

【受賞リスト】

- [1] 柏木謙、"効率的カーボンナノチューブ光デバイス作製法"、第 4 回東京大学学生発明コンテスト奨励賞、2007 年 1 月 24 日。
- [2] 柏木謙、山下真司、平成 18 年度電子情報通信学会学術奨励賞、「カーボンナノチューブ蒸着平面導波路を用いた全光型スイッチング」(2006 年電子情報通信学会総合大会 no.C-3-12)に対して、2007 年 3 月 21 日。
- [3] 宮内雄平、東京大学工学系研究科長賞 (博士) 最優秀、2007 年 3 月 22 日。