

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

研究代表者：山下真司（東京大学）

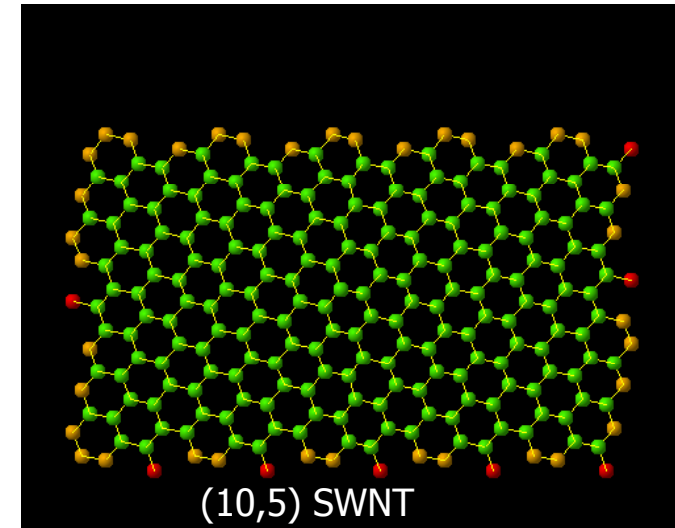
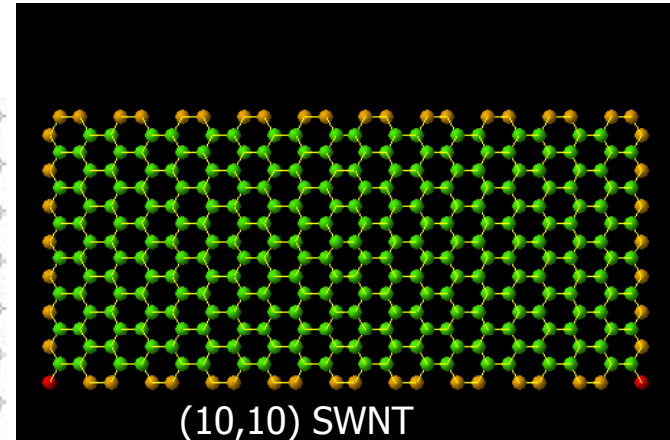
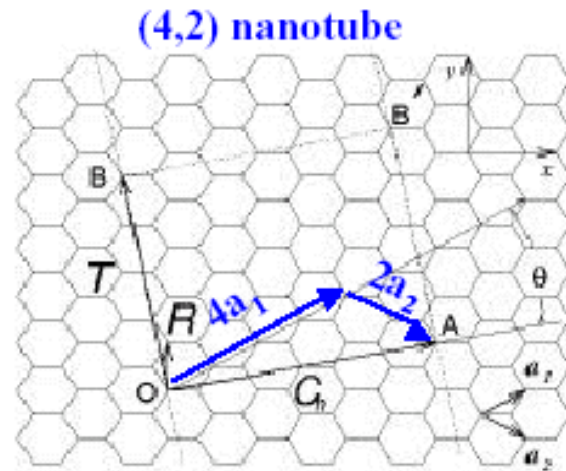
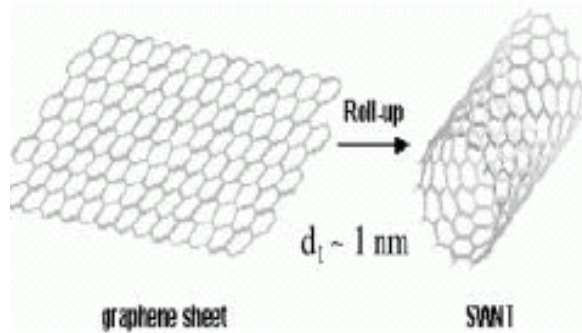
研究分担者：丸山茂夫・宋容沅・宮内雄平・チャオキン
キー（東京大学）

セットジイヨン（アルネアラボラトリ）



カーボンナノチューブ(CNT)の構造

Single Wall Carbon Nanotube



$$\vec{C}_h = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2 \equiv (n, m)$$

$$\begin{cases} d_t = \frac{L}{\pi} = \frac{a}{\pi} \sqrt{n^2 + nm + m^2} \\ \theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}m}{2n + m} \end{cases}$$

(n, m) determines structure completely

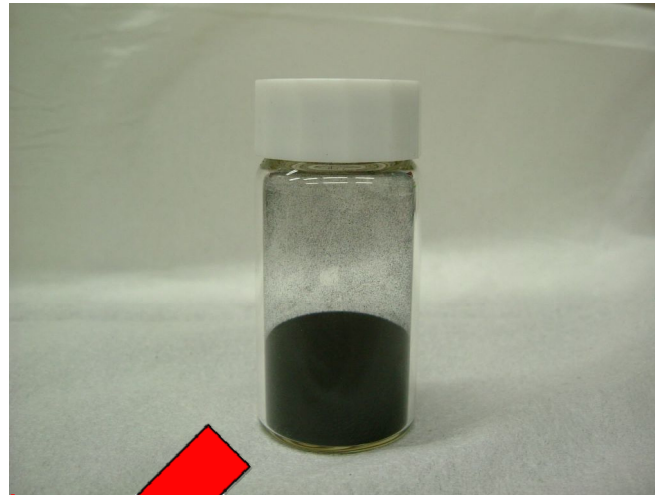
Chiral vector

Typical diameter ~ 1nm

Typical length ~ 1μm

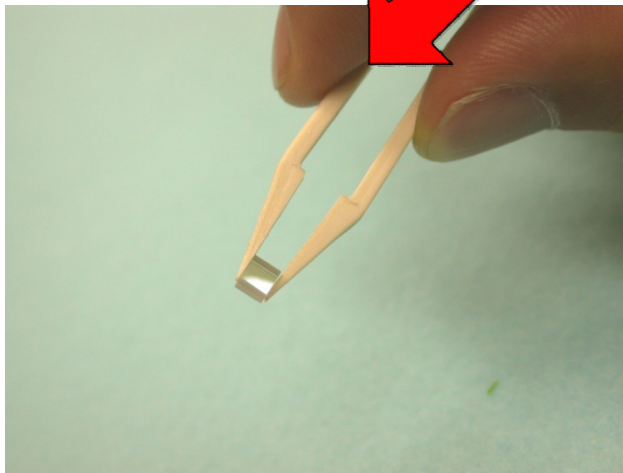
Long 1D material

カーボンナノチューブ(CNT)光デバイス

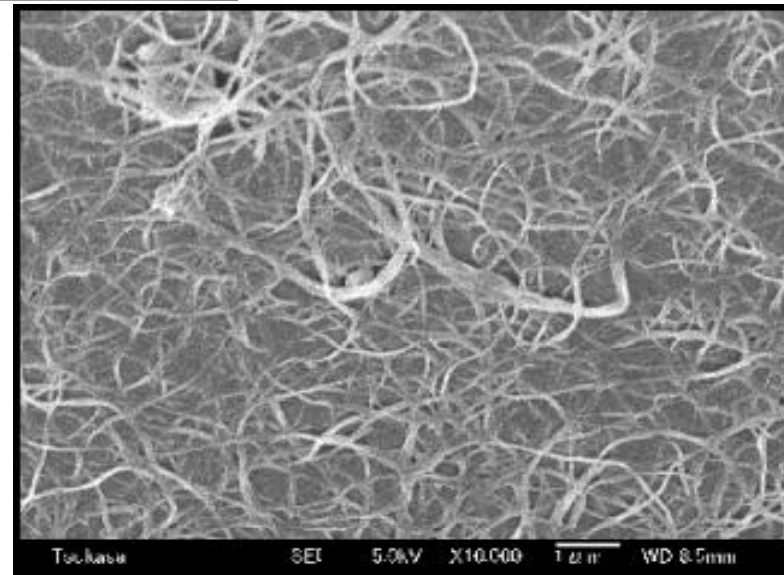


SWNT powder
sample

- Dissolve into a solution
- Spray onto substrate or fiber



Thin film ($\sim 1\mu\text{m}$) SWNT on quartz substrate

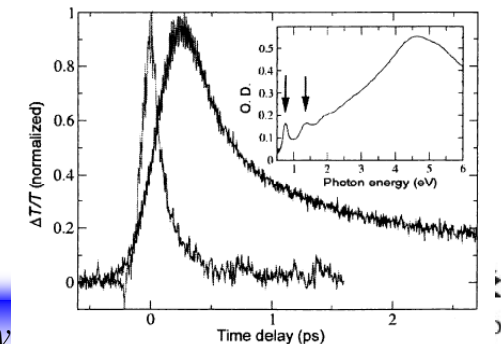
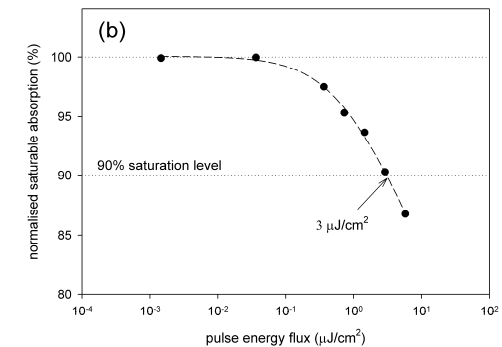
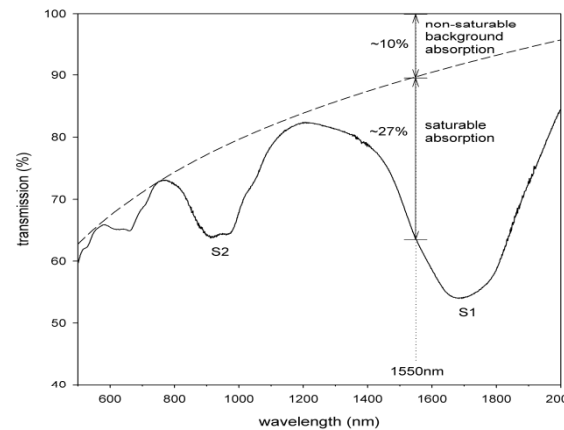
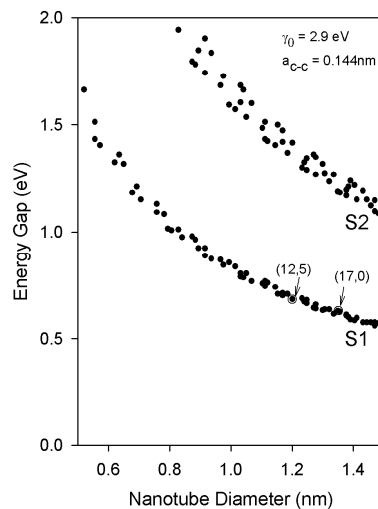
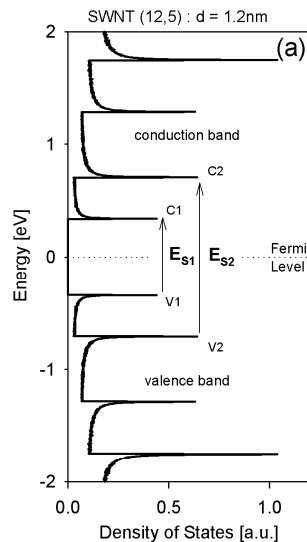


SEM image

カーボンナノチューブ(CNT)の光学特性1

■ 可飽和光吸収特性(SA)

- 半導体型CNTのバンド間共鳴吸収: 強い光により吸収が低下
- CNT径により吸収波長可変($\lambda=1\sim 3\mu\text{m}$)
- バンドルCNTではリカバリ時間が高速(<1ps)



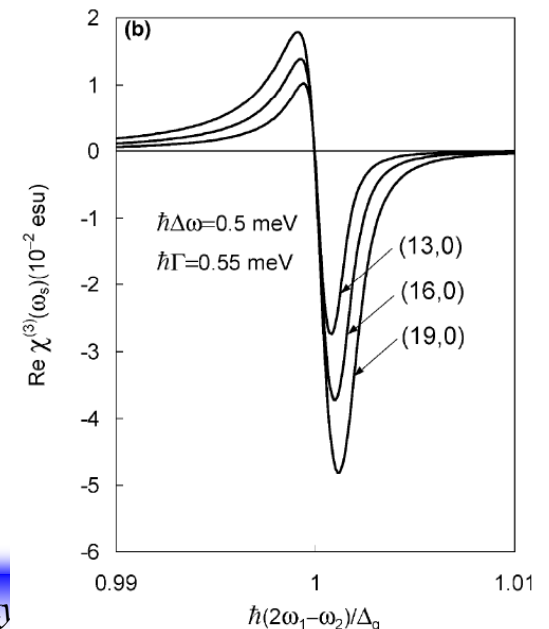
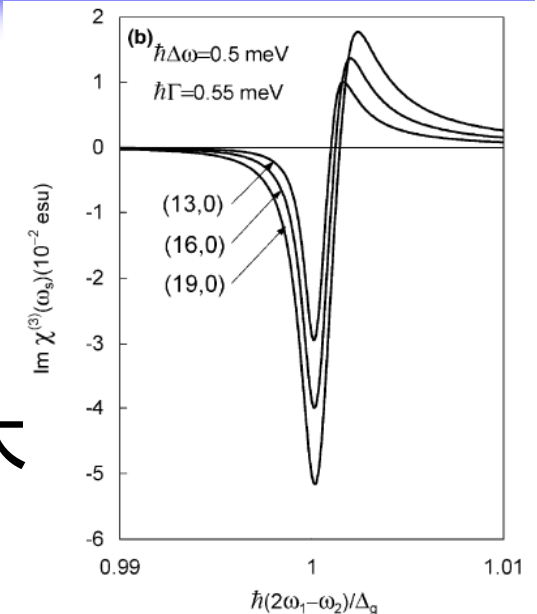
カーボンナノチューブ(CNT)の光学特性2

■ 光学非線形特性

- 大きな2次、3次光学非線形性
- 擬一次元的な π 電子状態に起因
- 励起子効果とバンド間共鳴による増大
- 応答時間が高速(<1ps)

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \left(\chi^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \chi^{(2)} \cdot \mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^{(3)} \cdot \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots \right)$$

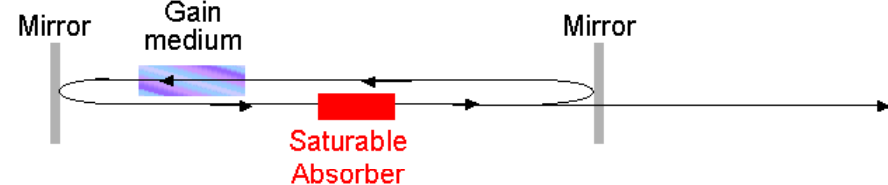
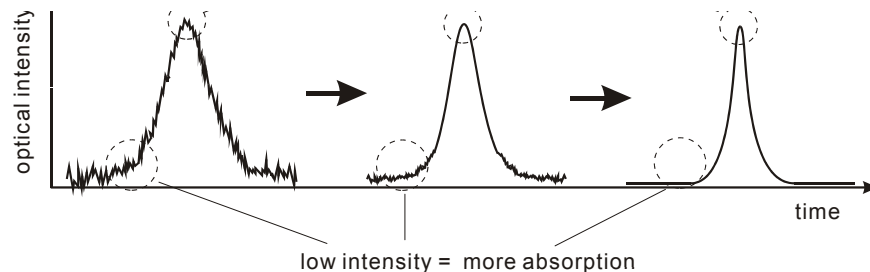
分極 線形 2次非線形 3次非線形



CNT光学特性の有用性

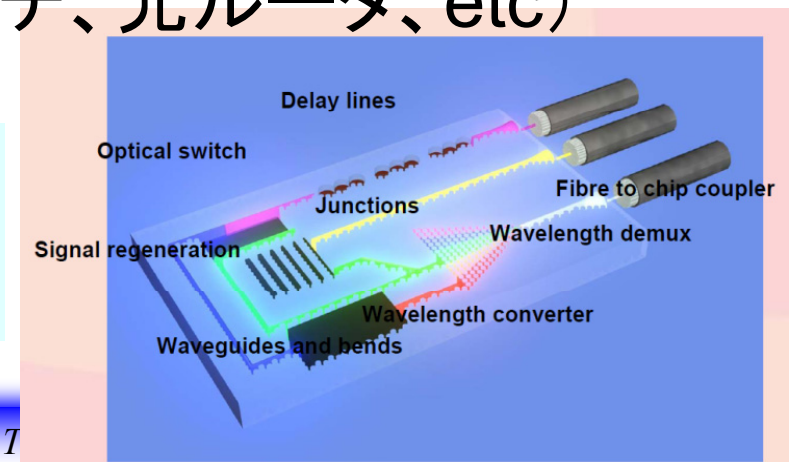
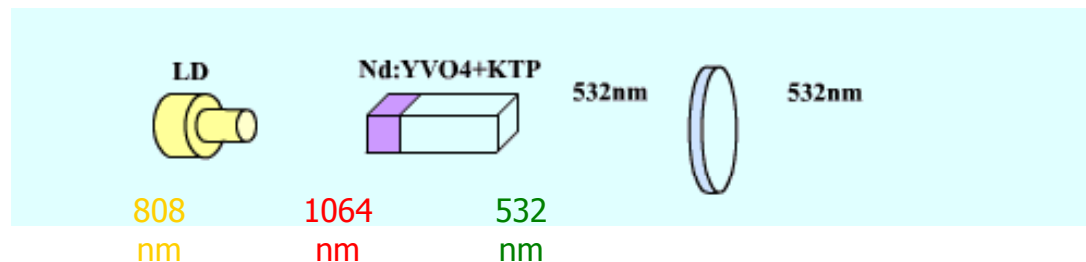
■ 高速可飽和光吸収特性

- 光パルスの雑音低減・SN比改善
- 超短パルス発生(受動モード同期レーザ)



■ 光学非線形特性

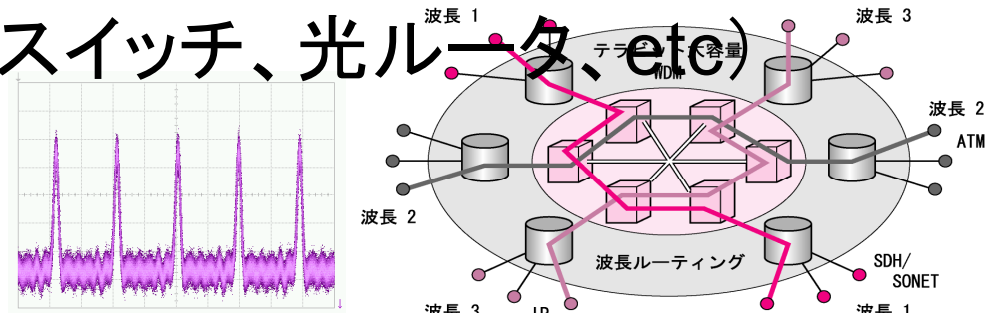
- 波長変換(2次、3次高調波発生、四光波混合)
- 全光信号処理(光-光スイッチ、光ルータ、etc)



期待される応用分野

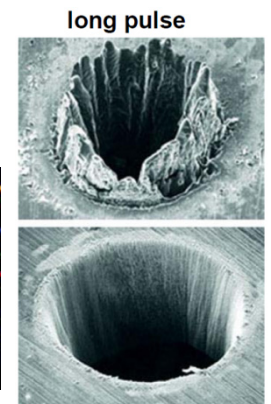
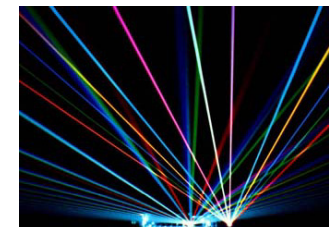
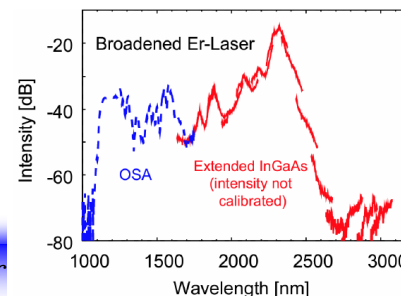
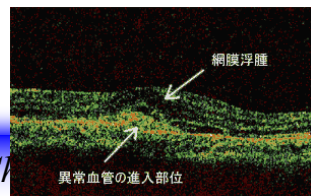
■ 光ファイバ通信

- モード同期ファイバレーザによるデータパルス発生
- 全光信号処理(光-光スイッチ、光ルータ、etc)
- 波長: 1.5 μ m帯



■ 光計測・計量・医療・加工・ディスプレイ

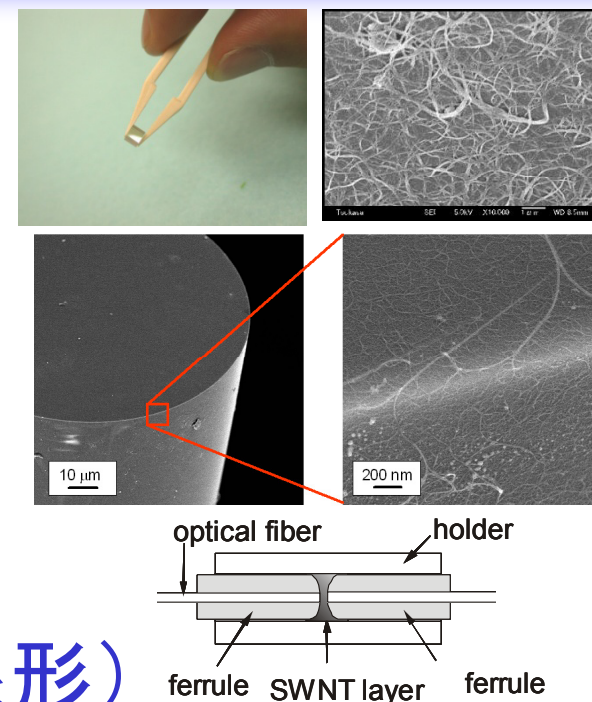
- 超短パルスモード同期レーザを利用した計測・計量
- 光コヒーレンストモグラフィ(OCT)用光源
- 高出力短パルスによる加工・THz発生
- 波長変換によるレーザディスプレイ
- 波長: 可視～遠赤外



光学材料としてのCNT (他技術に対するベンチマーク)

■ モード同期素子として

	半導体型	光ファイバ型	CNT
リカバリ時間(ps)	5-20	~0.01	<1
サイズ	小	大	小(薄膜)
ロス	大	小	小
製造	難	容易	容易
光ダメージ閾値	低	高	高(真空中)
光ファイバとの整合性	×	○	○



■ 光学非線形素子として(3次非線形)

	石英ガラス	カルコゲナイトガラス	ポリジアセチレン	GaAs	Si	CNT
非線形屈折率(m ² /W)	3 × 10 ⁻²⁰	2 × 10 ⁻¹⁸	1 × 10 ⁻¹⁵	1 × 10 ⁻¹⁰	4 × 10 ⁻¹⁸	2 × 10 ⁻¹²
応答速度(ps)	~0.01	~0.01	~0.01	~100	0.01	<1
吸収	なし	なし	なし	あり	なし	あり

$$n = n_0 + n_2 I \quad n_0: \text{線形屈折率、} n_2: \text{非線形屈折率、} I: \text{光強度} \quad n_2 = 3\chi^{(3)} / 4n_0$$

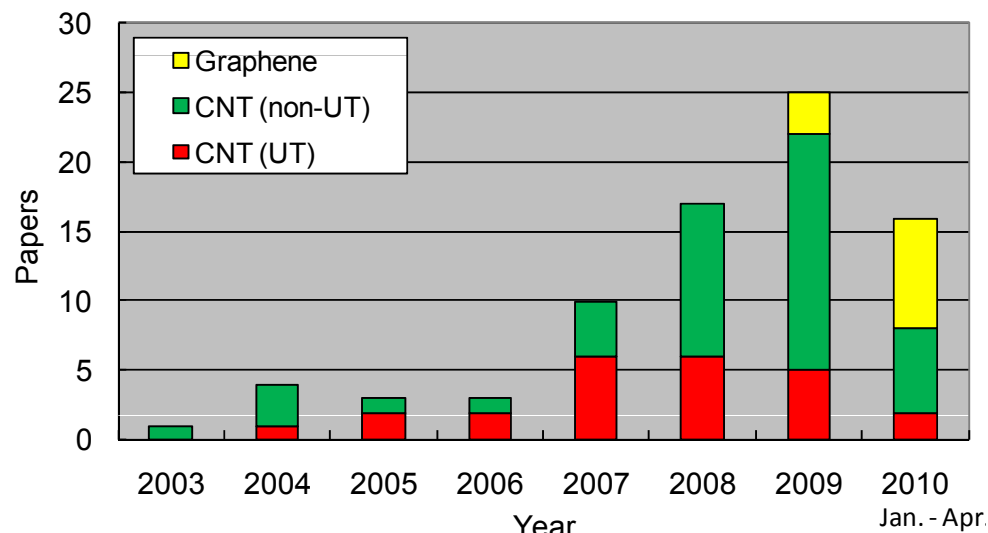
CNTフォトリクス

■ CNTの光学特性を利用した光デバイスの研究

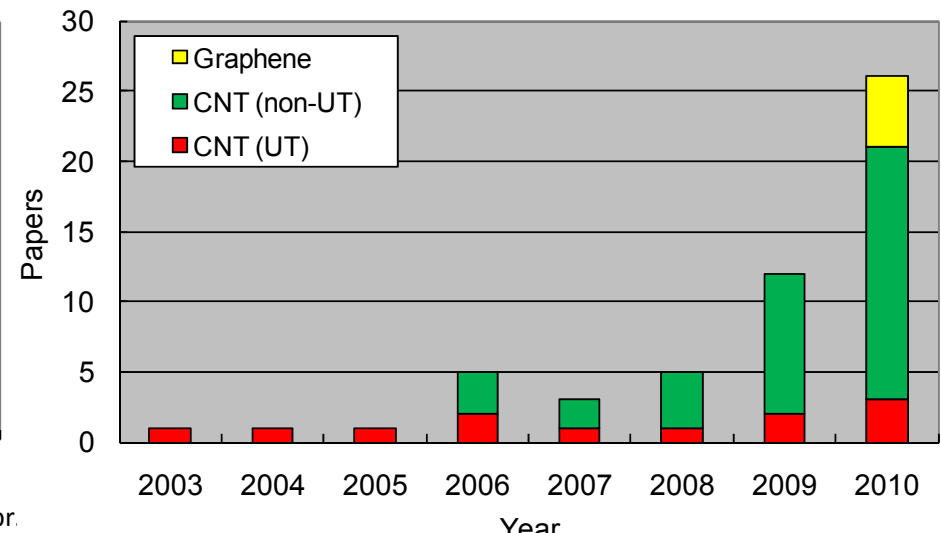
- 主な応用: モード同期レーザ、非線形素子
- 最初の論文: S. Y. Set, et al., OFC'03, PD44.

Papers on CNT and Graphene photonics

Papers on CNT and Graphene photonics at CLEO



Source: Web of Science, Google Scholar



CLEO: Conf. on Lasers and Electro-Optics

主要研究機関: 東大、アルネア、産総研、東北大、大阪大、ケンブリッジ大、コーネル大、アリゾナ大、デンマーク工科大、マックスボルン研究所、ロシア科学アカデミー、OFS

山下らの招待講演: 29件 (CLEO2010を含む)、招待論文: 7件

アルネアラボラトリによるCNTデバイス、CNTモード同期レーザの製品化

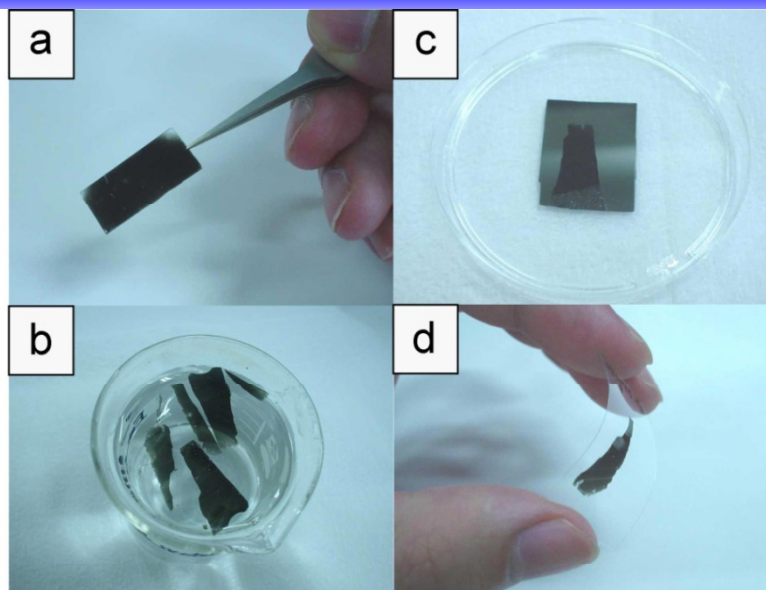
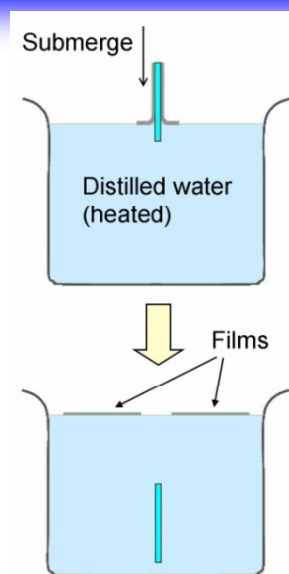


SCOPEプロジェクト

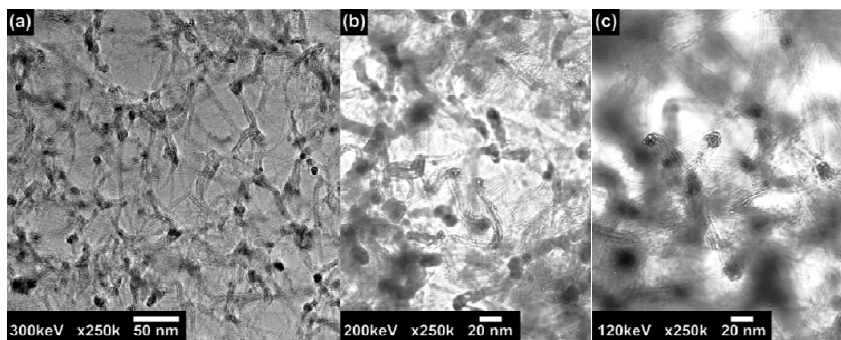
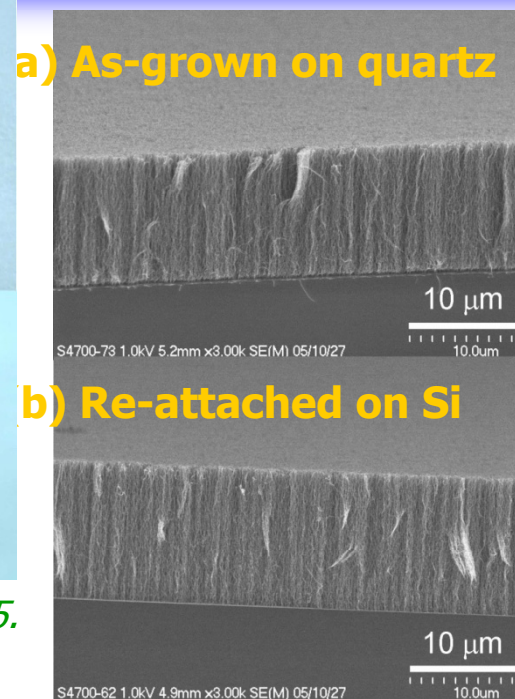
■「カーボンナノチューブを用いた超高速光機能デバイスの研究」

- 総務省 戦略的情報通信研究開発推進制度
- 研究代表者: 山下 研究分担者: 丸山、セツト
- 平成17－21年度、研究費総額: 7,656万円
- 主にCNTの通信応用に関する研究
- 研究項目
 - 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

① 温水を用いたCNT膜の剥離と再付着(丸山)

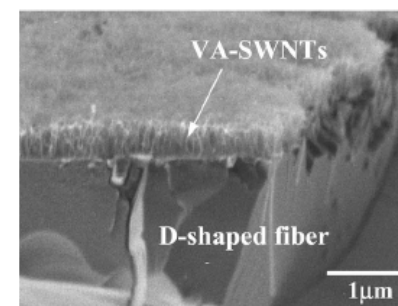


Y. Murakami and S. Maruyama, Chem. Phys. Lett. 422(2006) 575.



垂直配向膜上部からの直接TEM観察

E. Einarsson, et al., J. Phys. Chem. C, 111(2007)17861.

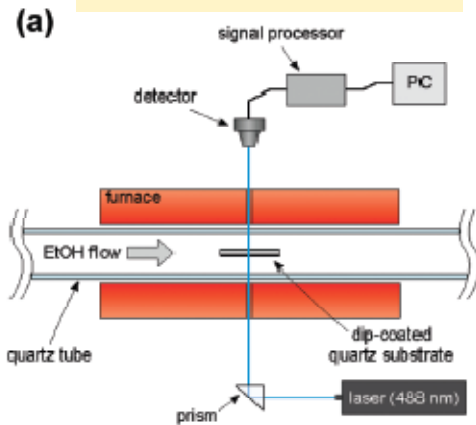


D-Shape光ファイバーへの再付着

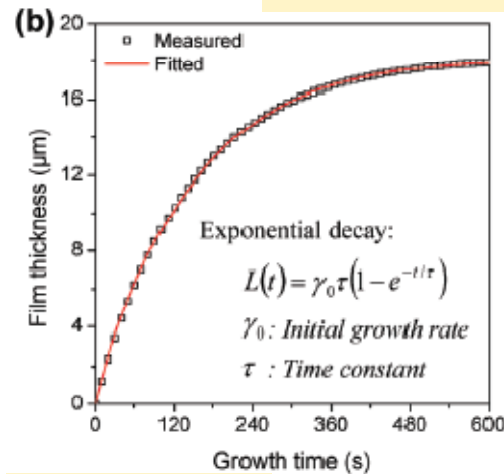
Y.-W. Song, S. Yamashita, S. Maruyama, Appl. Phys. Lett., 92 (2008) 021115.

①CVD合成メカニズムとCVD直径制御(丸山)

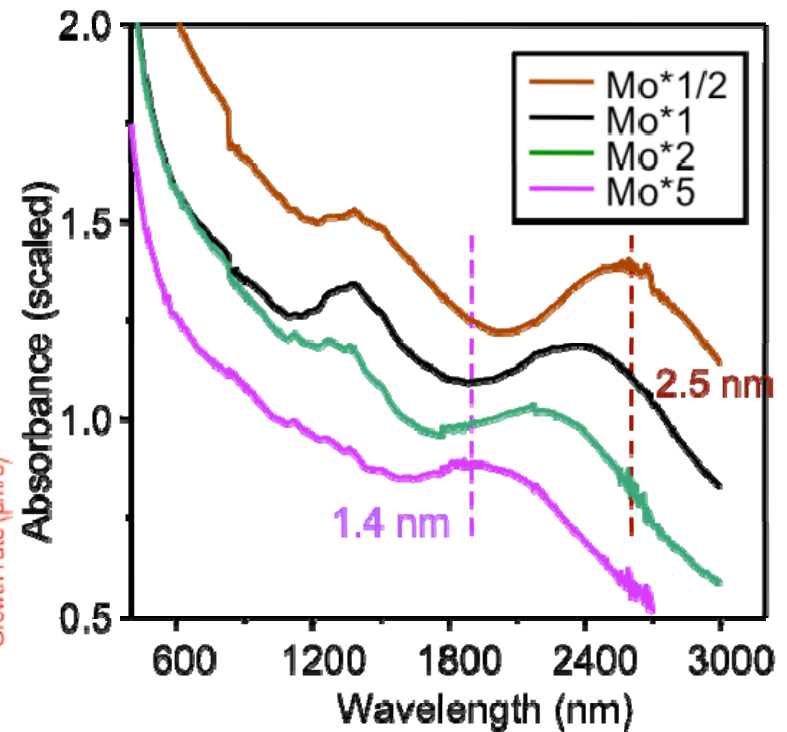
リアルタイム膜厚測定



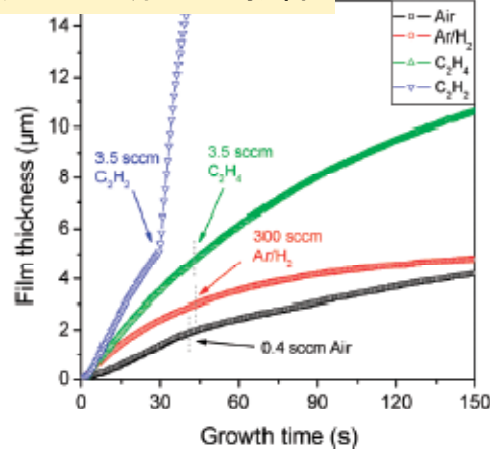
CNT膜厚の時間依存性



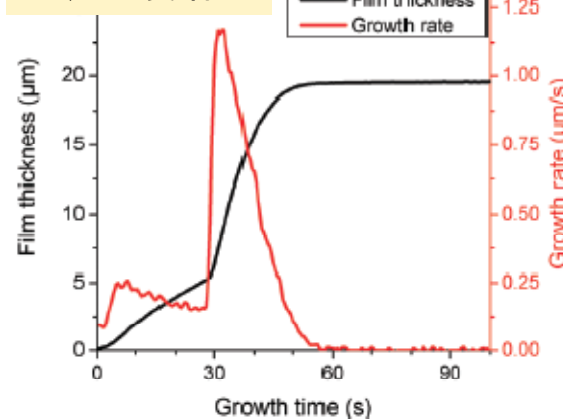
Co/Mo比の減少
 =>CNT直径減少



微量ガス添加の影響



成長速度増大

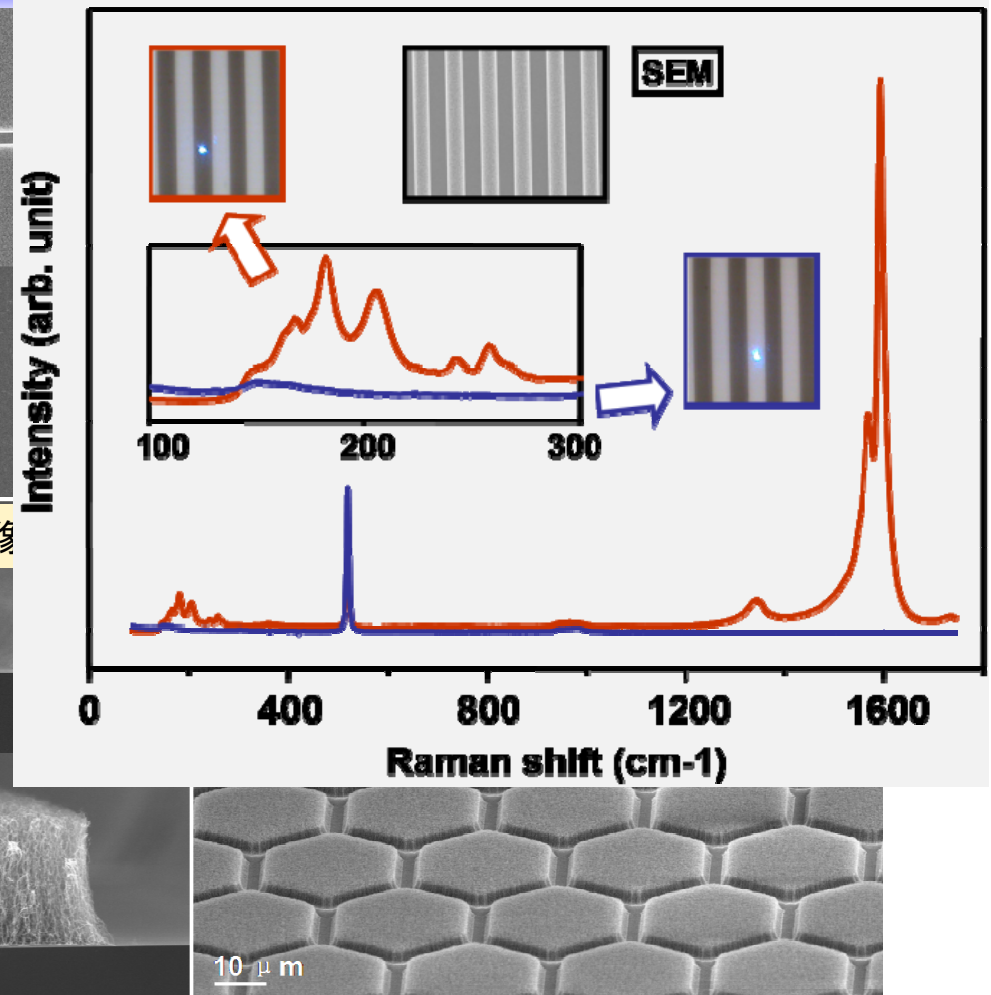
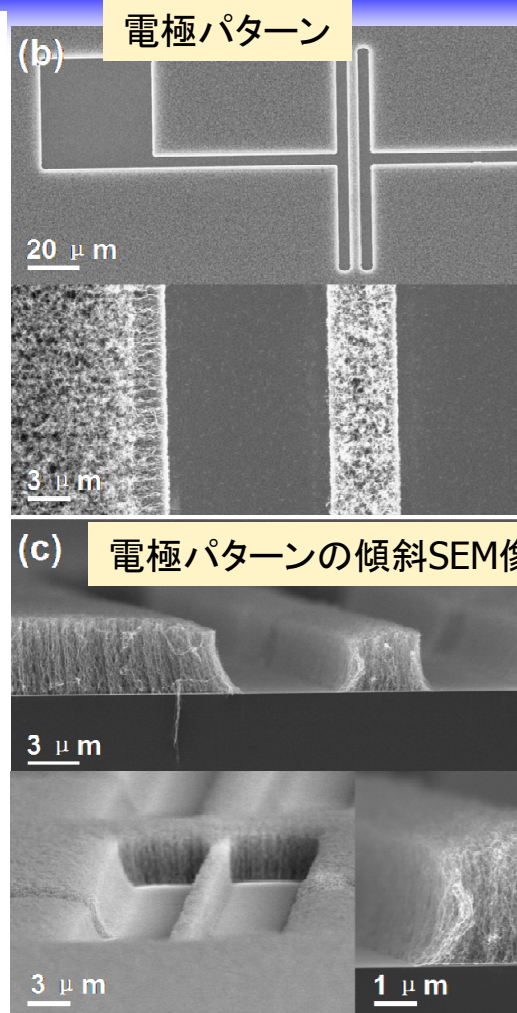
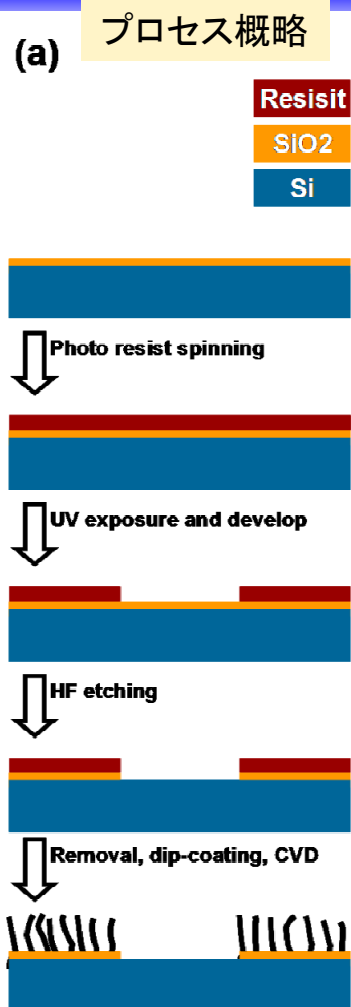


助触媒Moの垂直配向膜の直径分布

アセチレン添加アルコールCVDによる合成速度増大

R. Xiang, E. Einarsson, J. Okawa, Y. Miyauchi, S. Maruyama, J. Phys. Chem. C, 113 (2009) 7511.

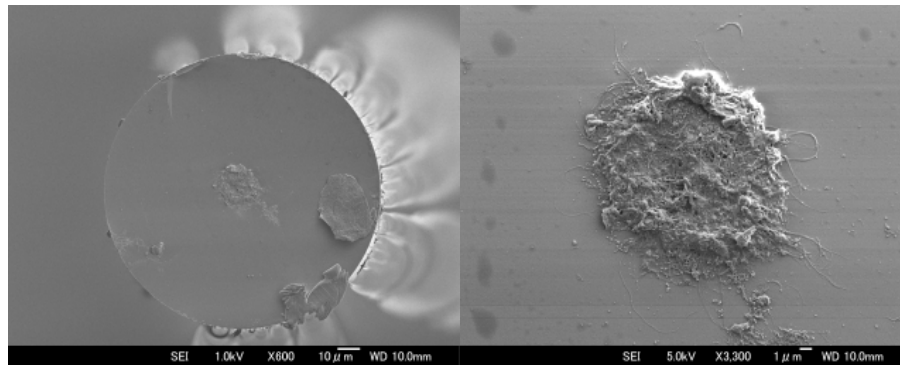
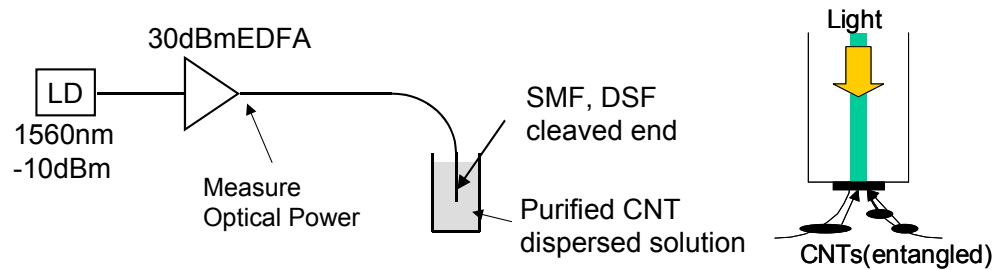
①SiO₂酸化膜によるSWNTパターン合成(丸山)



UV lithography & HF etching
50 nm thick SiO₂ pattern on Si wafer
Dip coat
Alcohol CCVD

*R. Xiang, E. Einarsson, H. Okabe, S. Chiashi, J. Shiomi,
S. Maruyama, Jpn. J. Appl. Phys., 49 (2010) 02BA03.*

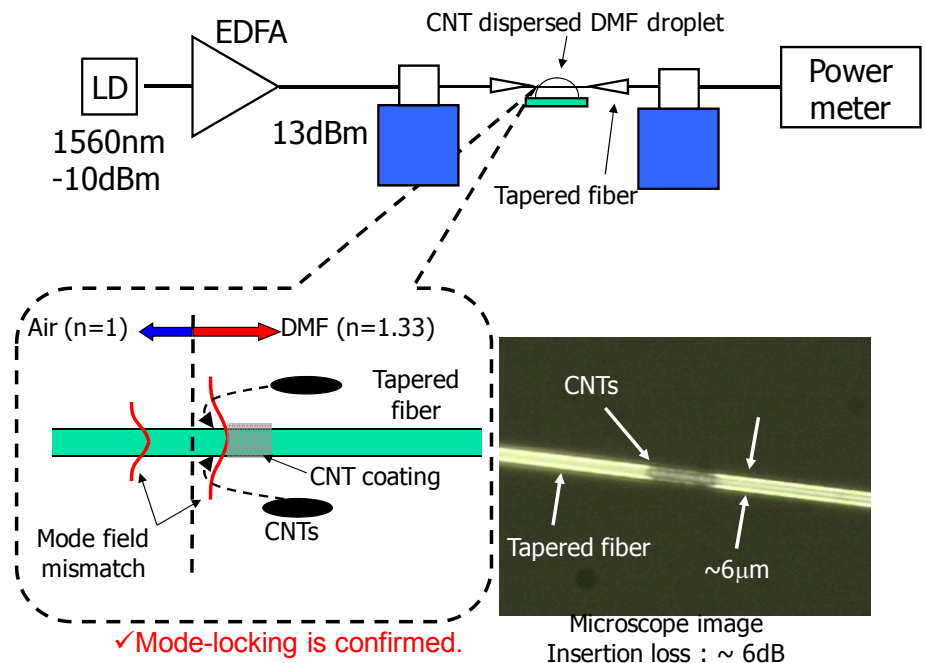
①光照射によるCNT光デバイス作製法(山下)



K. Kashiwagi, et al., SPIE Photonics West, no. 6478-15, Jan. 2007.

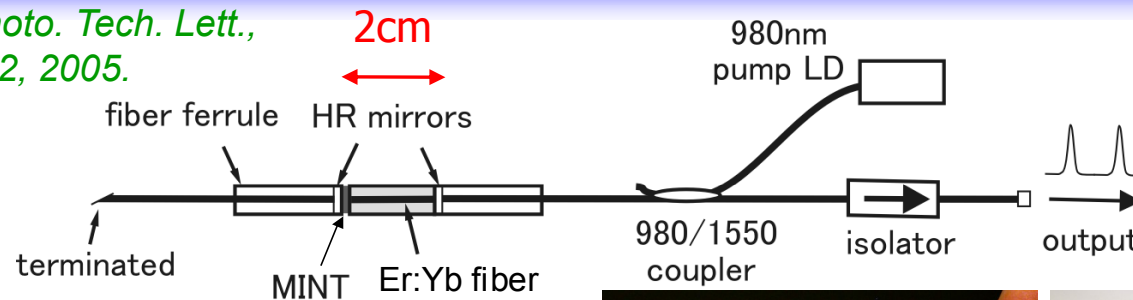
K. Kashiwagi, et al., JJAP, vol. 46, no. 40, pp.L988-L990, Oct. 2007.

K. Kashiwagi, et al., Optics Express, vol.17, no.20, pp.18364-70, Sept.2009.

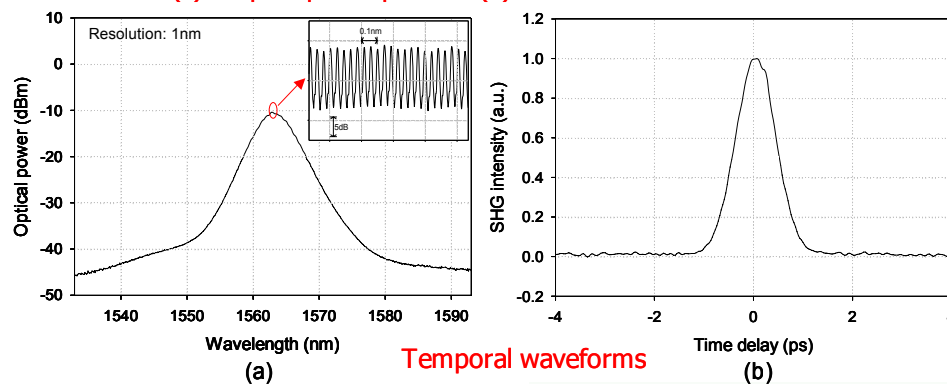


②世界最小の短パルス光ファイバレーザ(山下)

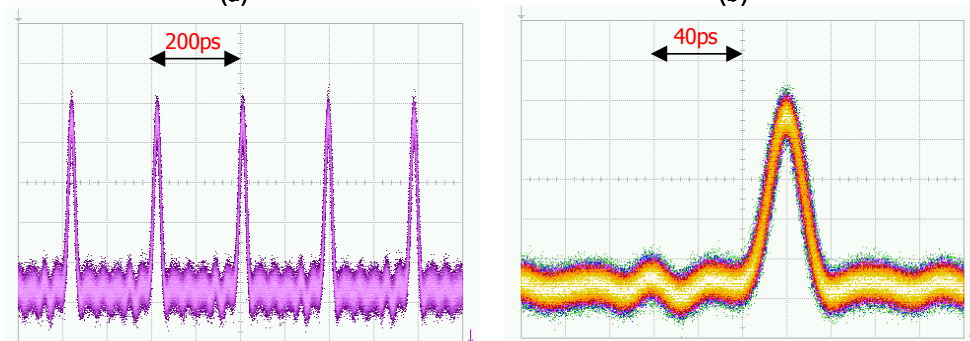
S. Yamashita, et al., Photo. Tech. Lett., vol.17, no.4, pp.750-752, 2005.



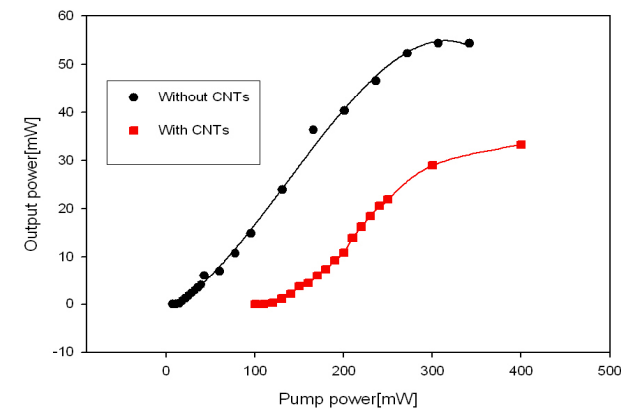
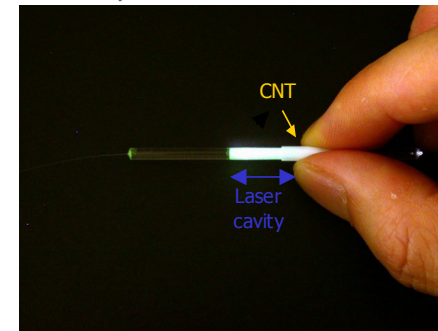
(a) Output optical spectrum (b) SHG autocorrelation trace



Temporal waveforms



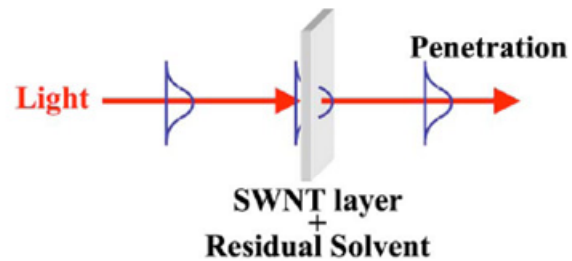
繰り返し周波数 $\sim 5\text{GHz}$



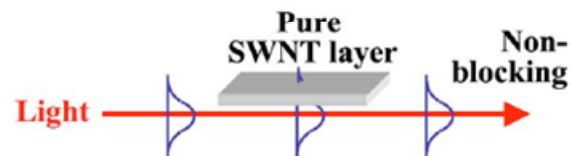
S. Yamashita, et al., SPIE Photonics West, no. 6453-72, Jan. 2007.

②高出力短パルス光ファイバレーザ(山下)

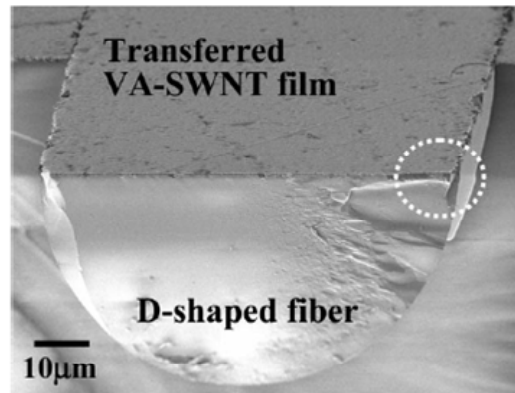
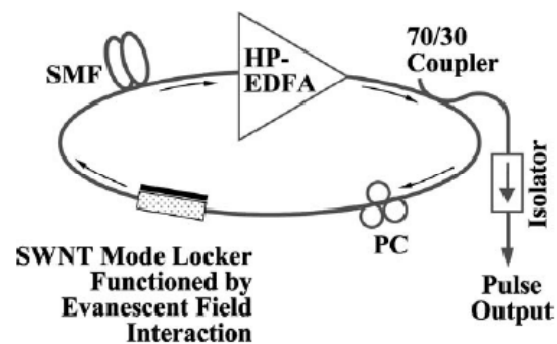
エバネッセント波結合CNTデバイスを用いた高出力モード同期光ファイバレーザ



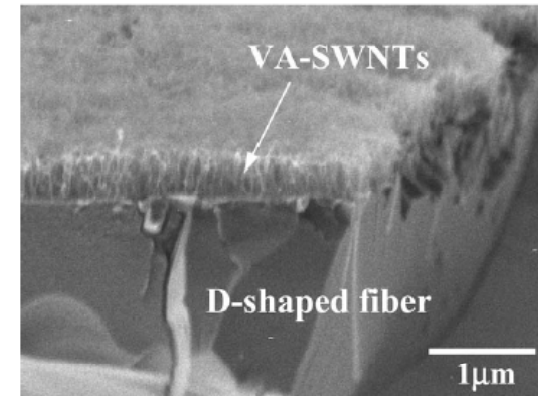
(a)



(b)

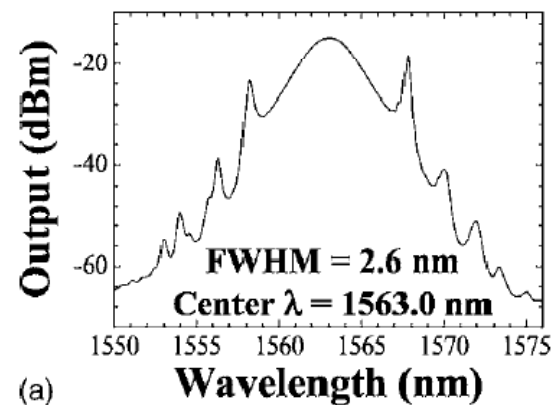


(a)

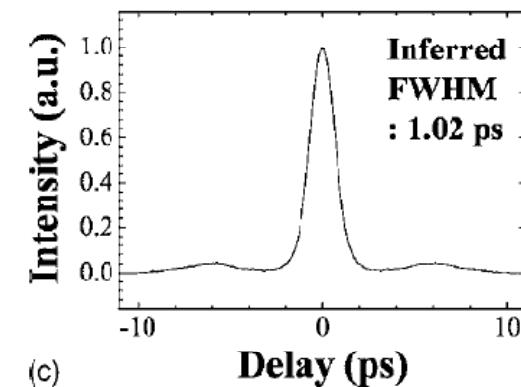


(b)

CNT 堆積D型光ファイバ



(a)



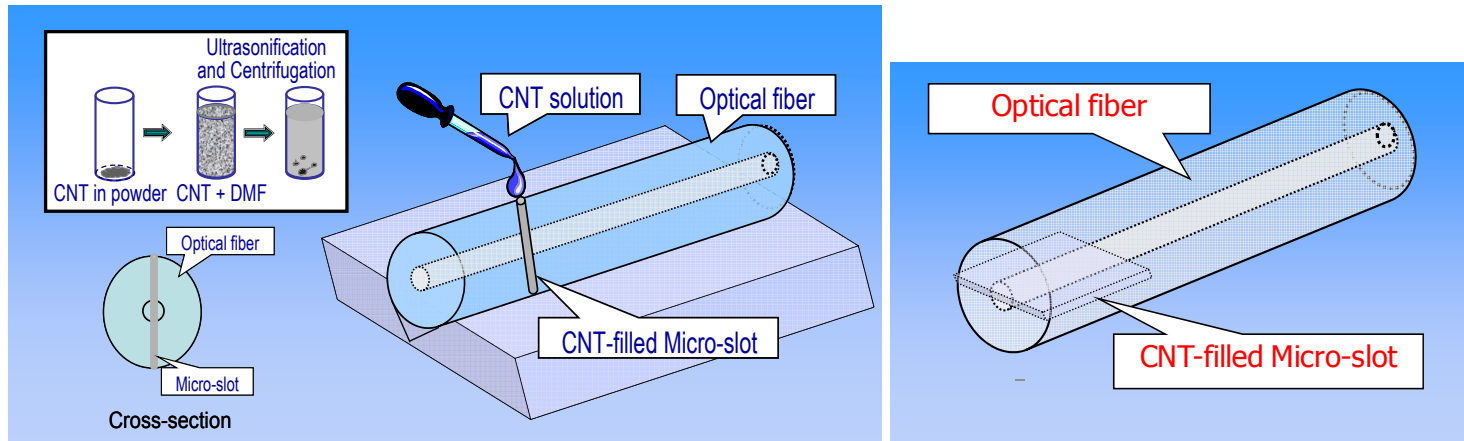
(c)

Average power $\sim$ 250 mW, Pulse peak power $\sim$ 5.6 kW

Y. W. Song, et al., *Appl. Phys. Lett.*, vol.92, no.2, 021115, Jan. 2008.

②新規CNTデバイスによる光ファイバレーザ(山下)

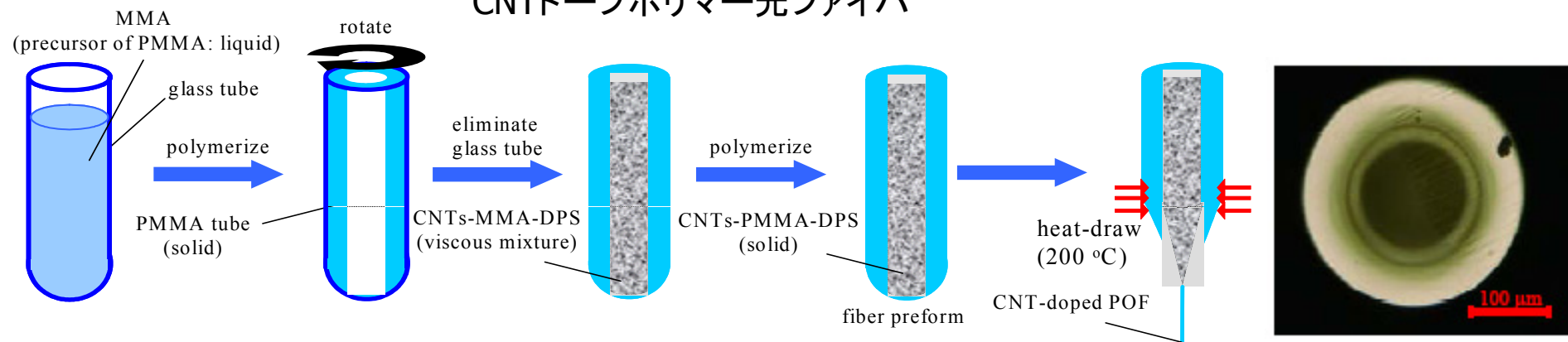
マイクロチャネルによる新しいCNT光ファイバデバイス



*A. Martinez, et al., Optics Express, **16**, 15425-30 (2008)*

*A. Martinez, et al., Optics Express, **18**, 11008-14 (2010)*

CNTドーピングポリマー光ファイバ

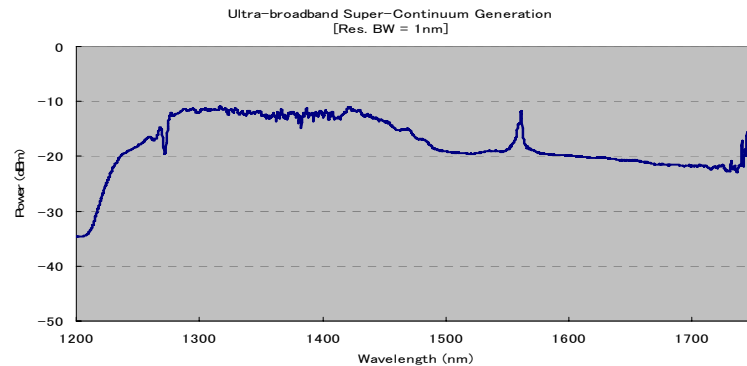


*A. Martinez, et al., Opt. Express, **16**, 11337-11343 (2008)*

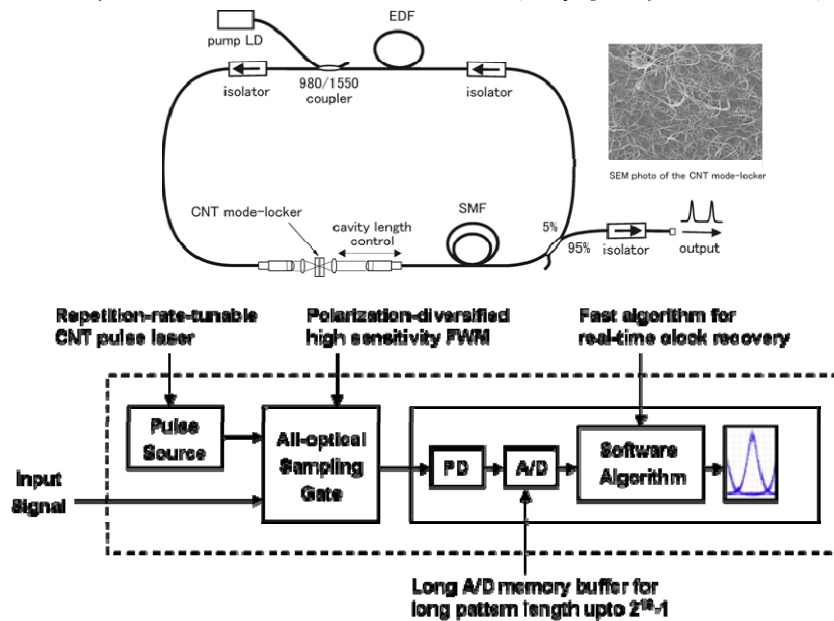
S. Uchida, et al., Optics Letters, vol.34, no.20, pp.3077-3079, Oct. 2009.

②CNT短パルス光ファイバレーザの応用(セット)

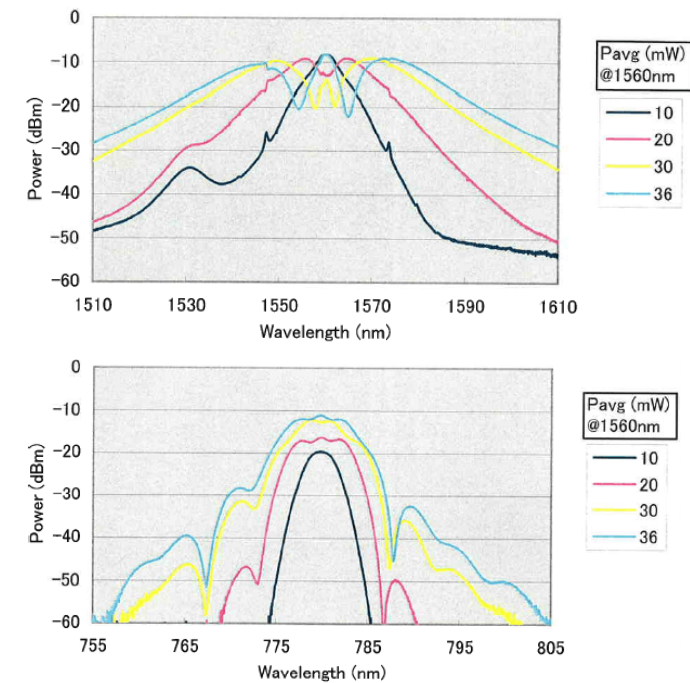
CNT光ファイバレーザによる超広帯域光の発生



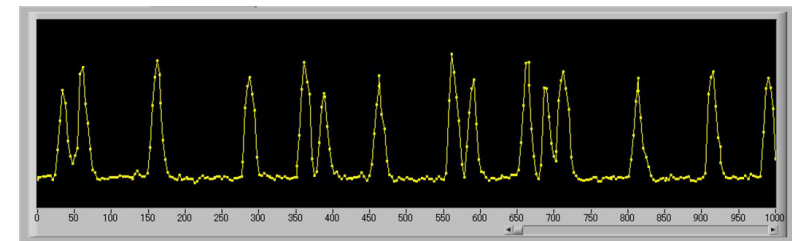
CNT光ファイバレーザによる超高速光サンプリング



CNT光ファイバレーザによる波長変換



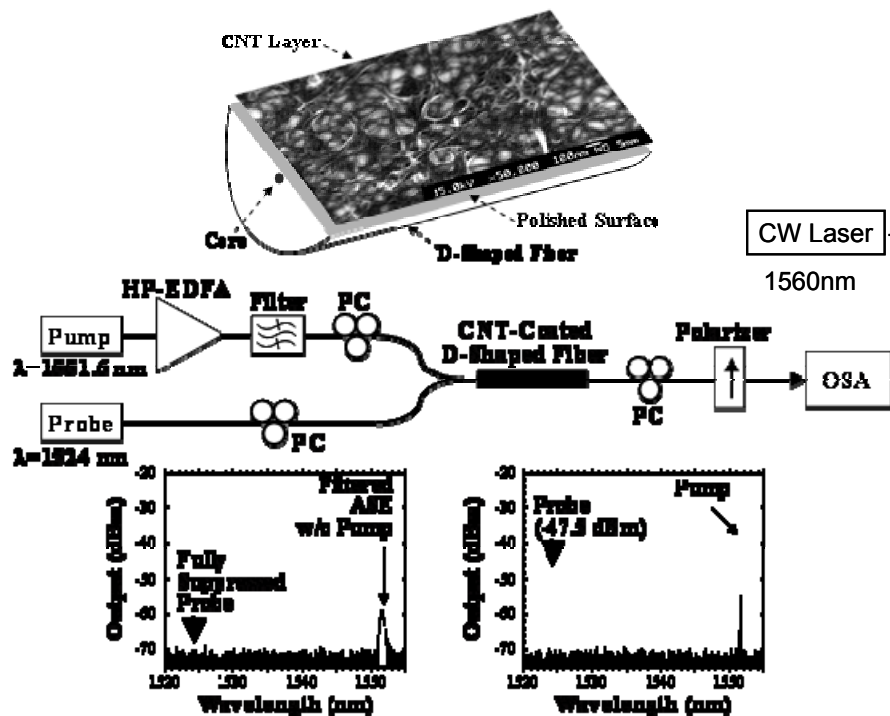
Data bit-pattern recovery for optical sampling scope



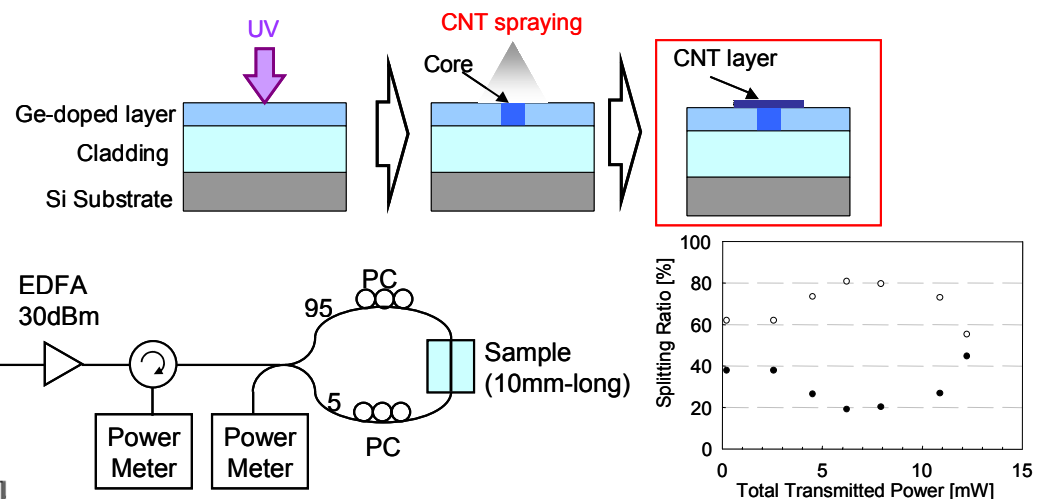
S. Y. Set, et al., Japanese Journal of Applied Physics, vol. 47, no. 8, pp. 6809-6811, Aug. 2008.

③CNT光デバイスによる光スイッチ(山下)

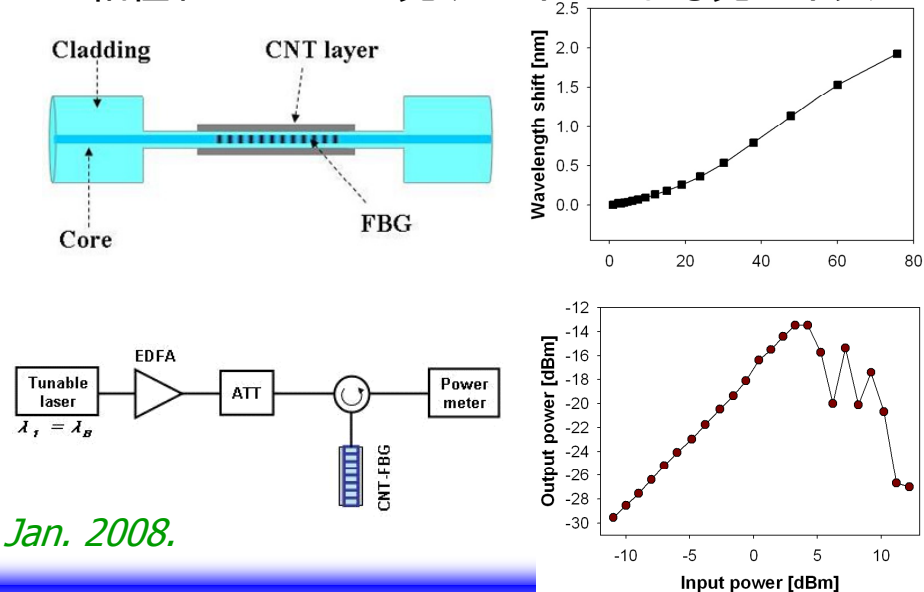
Dシェイプ光ファイバ型CNTデバイスによる光スイッチ



導波路型CNTデバイスによる光スイッチ



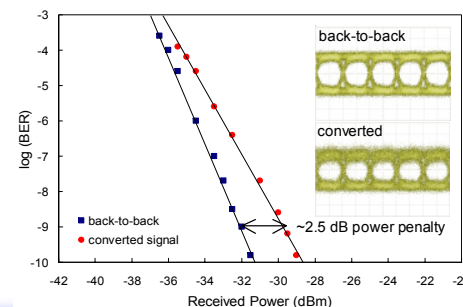
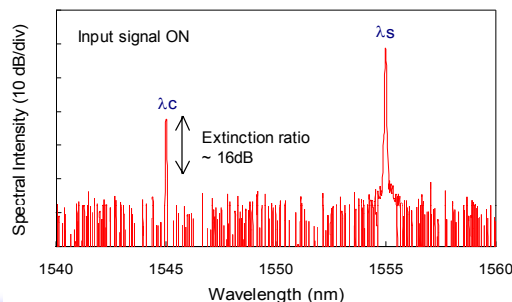
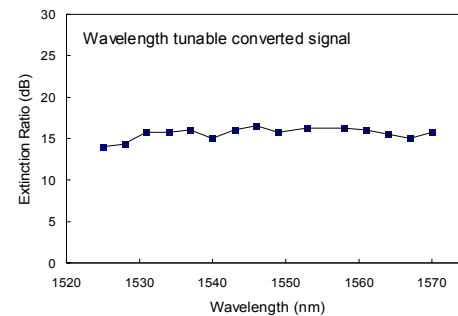
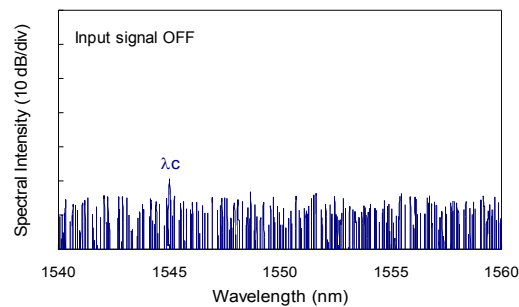
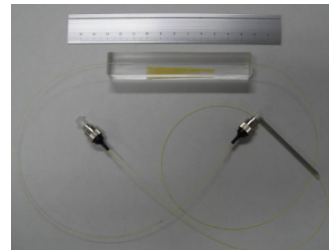
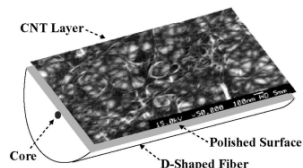
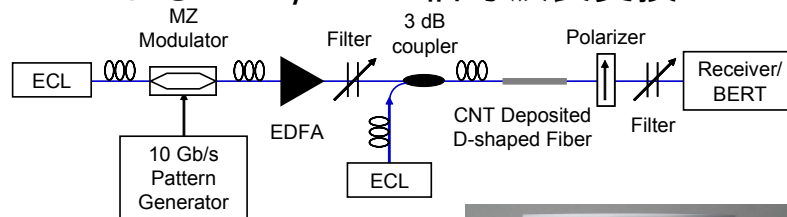
細径化CNT-FBG光デバイスによる光スイッチ



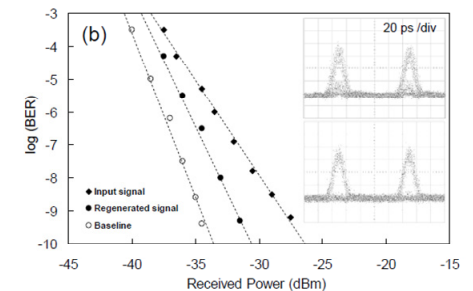
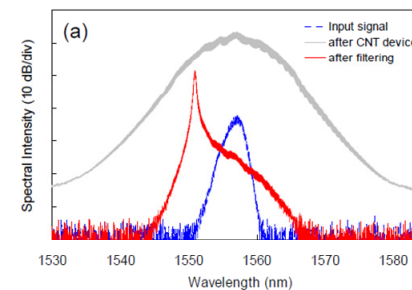
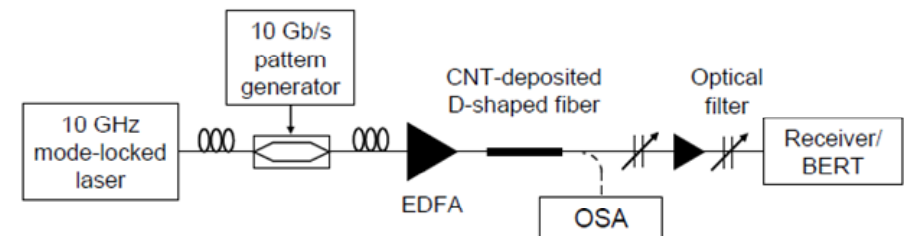
Y. W. Song, et al. CLEO 2006, no.CMA4, May 2006.
 K. Kashiwagi, et al. CLEO 2006, no.CMA5, May 2006.
 K. T. Dinh, et al. Applied Physics Express, no.012008, Jan. 2008.

③CNT光ファイバによる波長変換・波形整形(山下)

DシェイプCNT光ファイバ中の非線形偏波回転
による10Gb/s NRZ信号波長変換



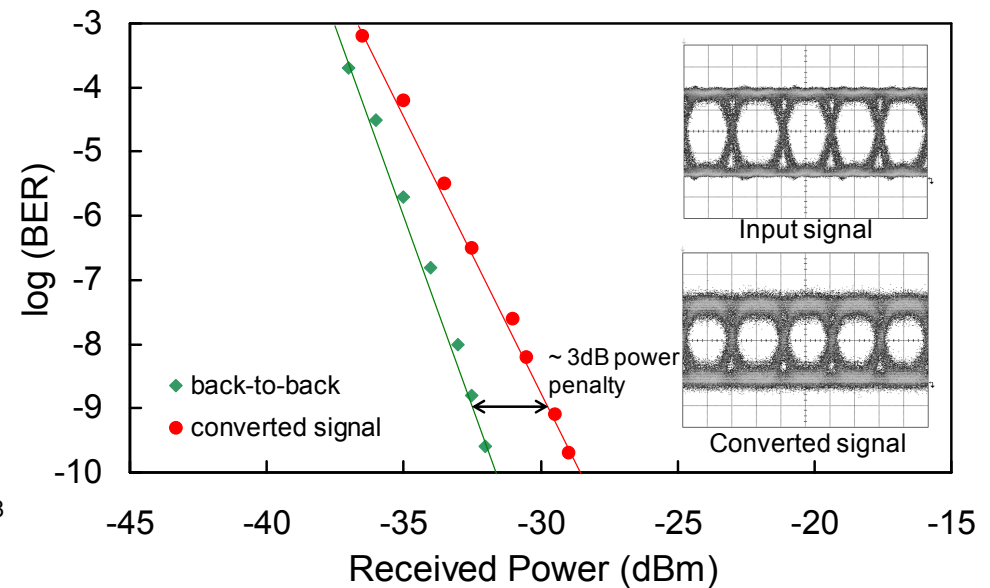
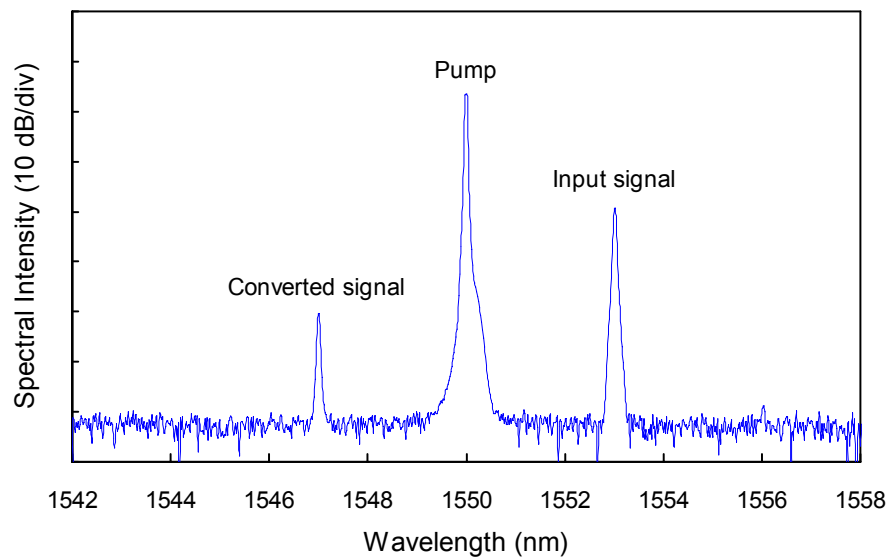
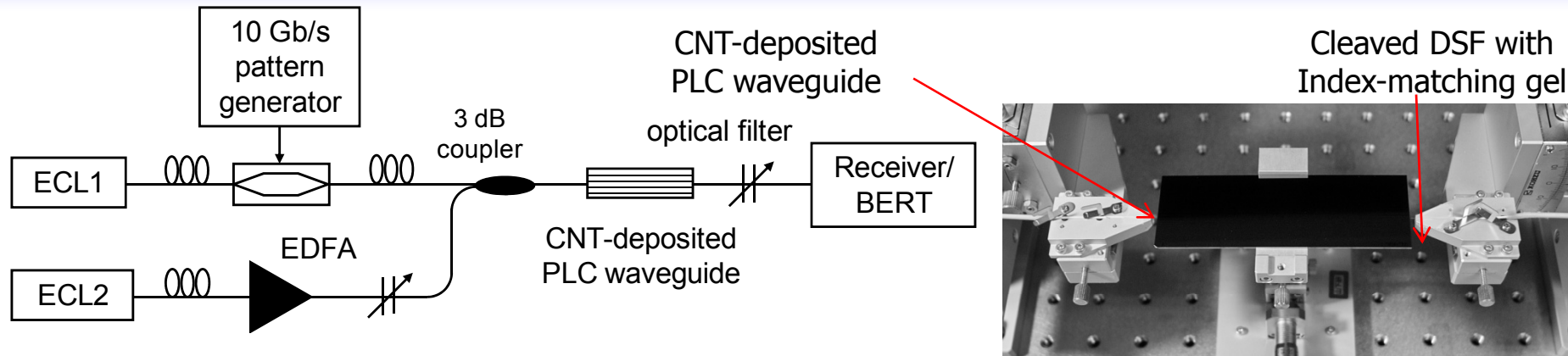
DシェイプCNT光ファイバ中の自己位相変調とオフ
セットフィルタリングによる10Gb/s RZ信号波形再生



K. K. Chow, et al., *Opt. Exp.*, vol.17, pp.7664-9, Apr. 2009.

K. K. Chow, et al., *CLEO2010*, no.CWI6, Mar. 2010.

③CNT集積回路による波長変換(山下)



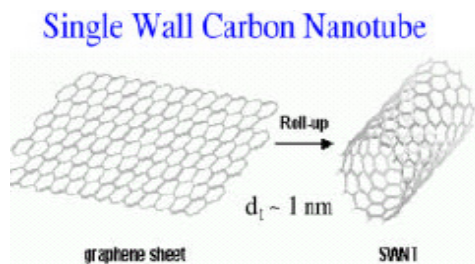
- 集積型CNT機能デバイスの可能性を示した

*K. K. Chow, et al., OFC2010, no. OTuB4, 2010.
K. K. Chow, et al., Opt. Lett., to be published.*

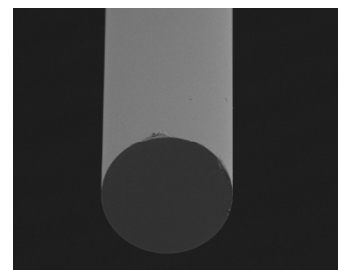
まとめと今後の展望

- ✓ 成果：学会誌論文58件、学会発表187件（招待講演29件）
- ✓ CNTをフォトニクス応用に向けてさらに洗練し、光導波路・ファイバとCNTとの新しい形での融合により、より高機能・高性能なレーザ・デバイスを実現し、さらにそれを幅広い分野に応用してゆきたい。

光計測・計量・医療・加
工・ディスプレイ応用



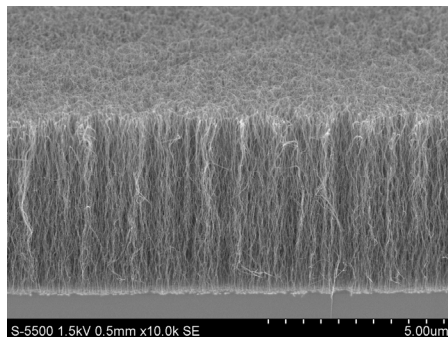
+



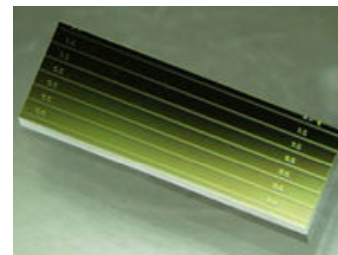
光ファイバ



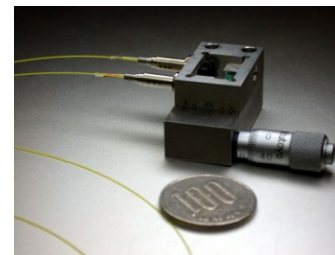
光ファイバ増幅技術



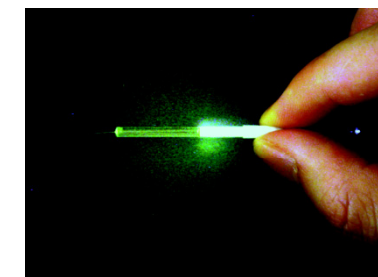
光学用高品質単層
カーボンナノチューブ



光導波路



デバイス実装技術



フェムト秒パルス
光ファイバレーザ

超高速光非線形デバイス
・光スイッチ
・波長変換
・全光処理集積デバイス



光通信応用
東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO