

単一光子光源に向けた カーボンナノチューブ光・電子デバイス研究

研究代表者： 牧 英之

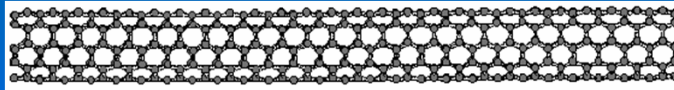
(慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科 専任講師)

発表者： 森 達也、室野井 有

(物理情報工学科 牧研究室 修士1年)

Carbon nanotube

SWNT



One-dimensional material

diameter: $\sim 1\text{nm}$ (SWNTs)

length: several μm

Electronic structure

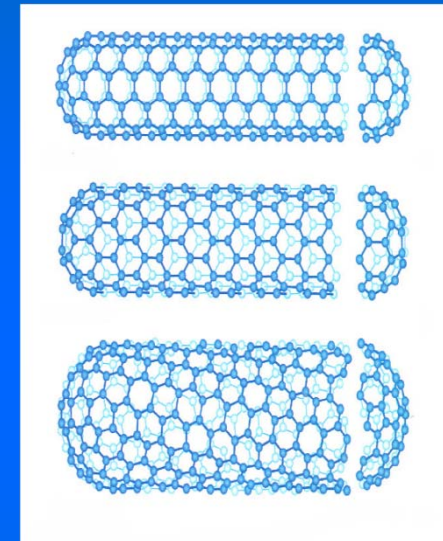
metal or semiconductor

(depending on a chirality)



Attractive material for nanodevices

Field effect transistor, quantum dot, one-dimensional conductor,
light emitting device, MEMS, etc.



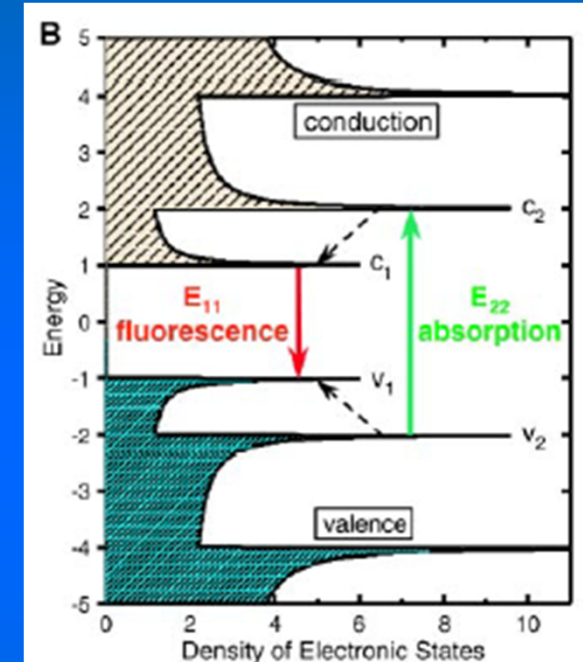
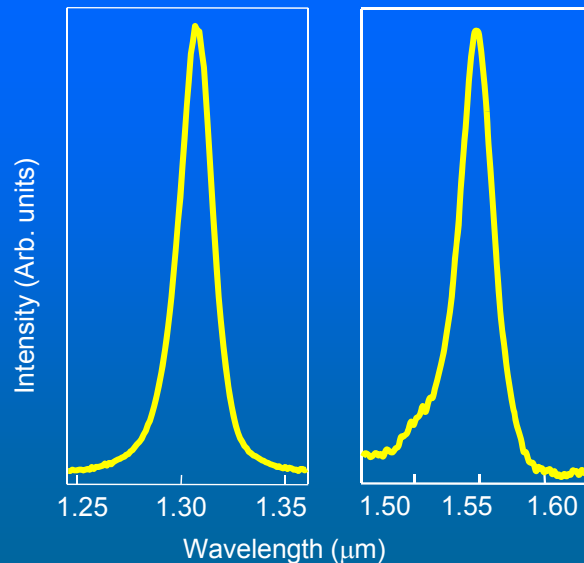
Various chirality SWNT

カーボンナノチューブからの発光

半導体ナノチューブ

- ・ 直接遷移半導体
- ・ カイラリティー(n,m)によりバンドギャップが異なる(直径に反比例)
- ・ 室温において近赤外発光 ($\lambda > 0.8 \mu\text{m}$)
[通信波長帯(1.3 and 1.55 μm)を含む]
- ・ 巨大な励起子束縛エネルギー
(数百meV)

光デバイス応用が期待



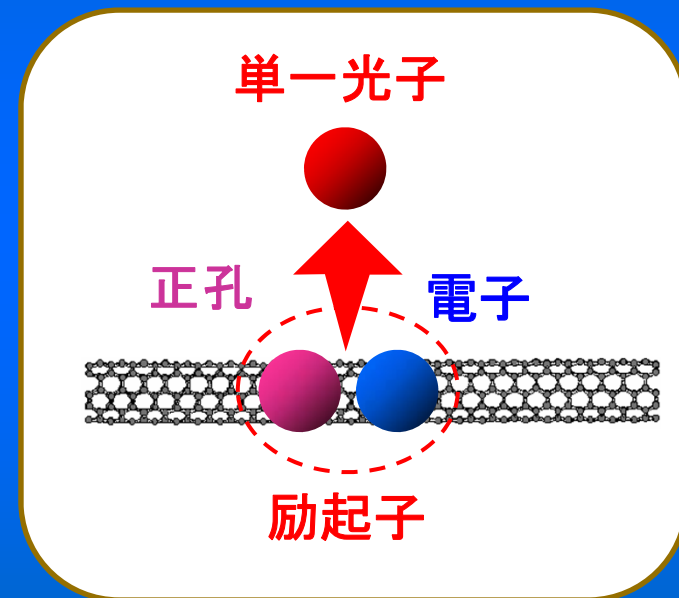
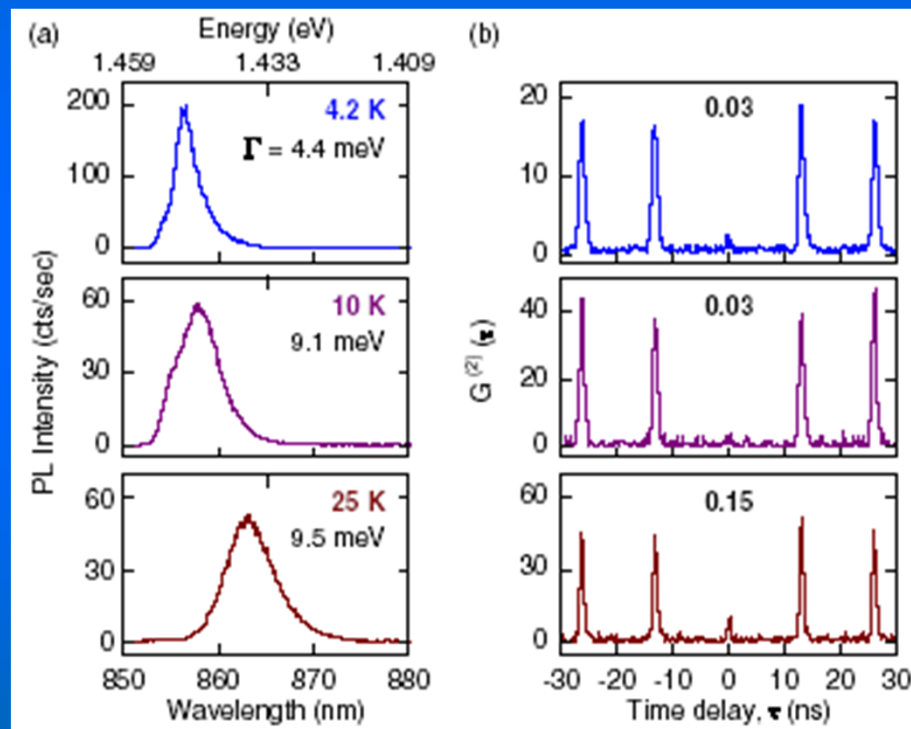
通信波長帯での
一本のCNT発光

カーボンナノチューブからの単一光子観測

CNTからのアンチバンチングの観測

Alexander Hoge, et al., PRL 100, 217401 (2008)

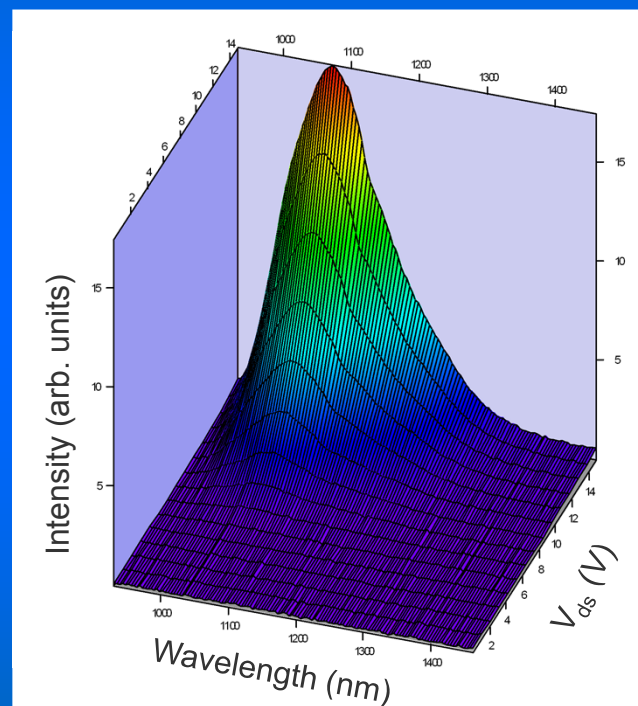
唯一、通信波長帯以外で報告(850-870nm)



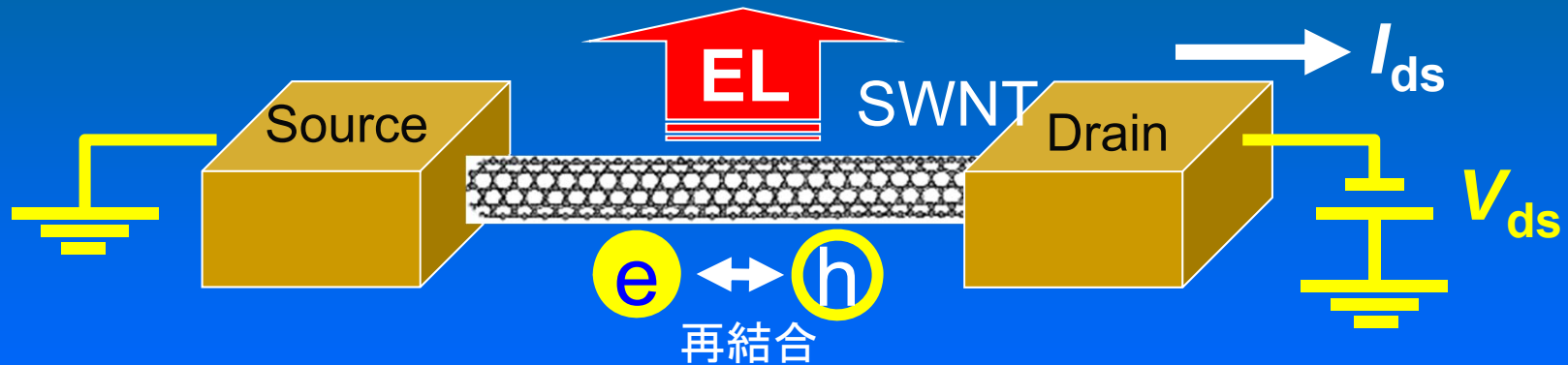
総務省SCOPE

➡ 通信波長帯での高温単一光子源開発

電流注入型発光素子開発(EL素子)

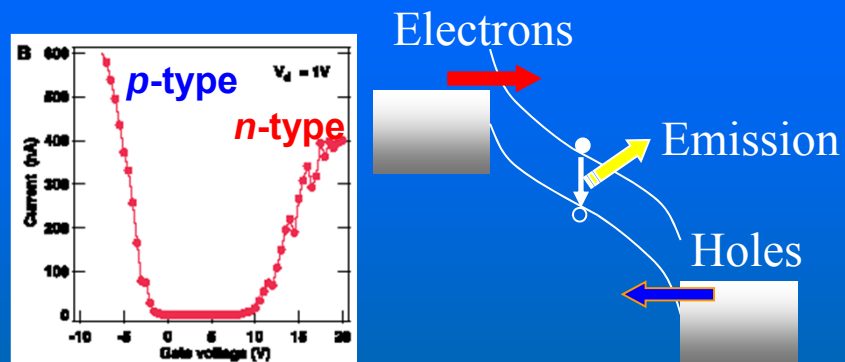


SWNTからのエレクトロルミネッセンス (EL)



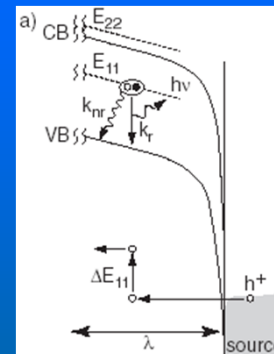
ELの研究動向 (励起メカニズム)

1. 電子正孔注入励起



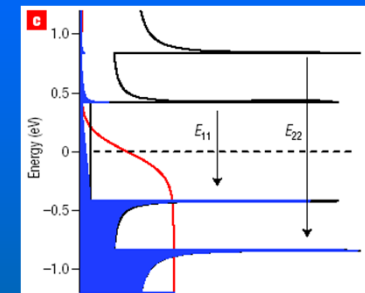
J.A.Misewich et al., Science, **300**, 785(2003).

2. 衝突励起



J. Chen et al., Science **310**, 1171 (2005),
L.Marty et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 136803(2006).

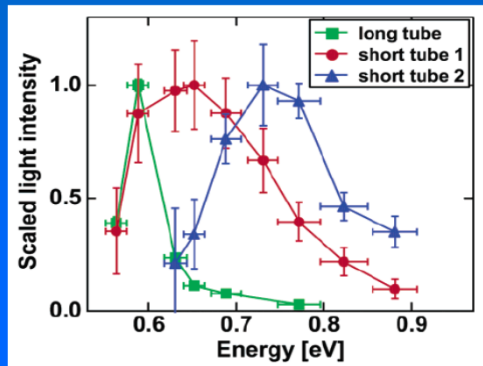
3. 熱励起



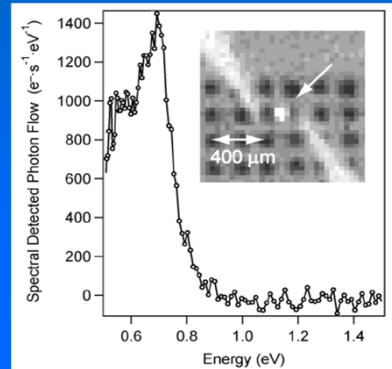
D.Mann et al., Nature nanotechnology, **2**, 33 (2007)

ELスペクトルと発光波長

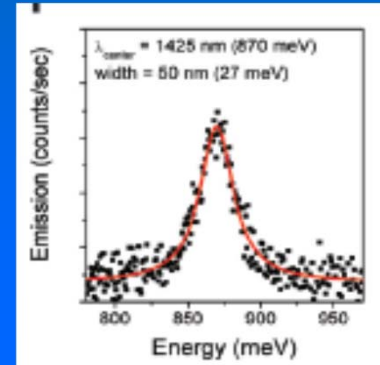
電子・正孔注入励起



M. Freitag et al., Nano Lett., 4, 1063 (2004).

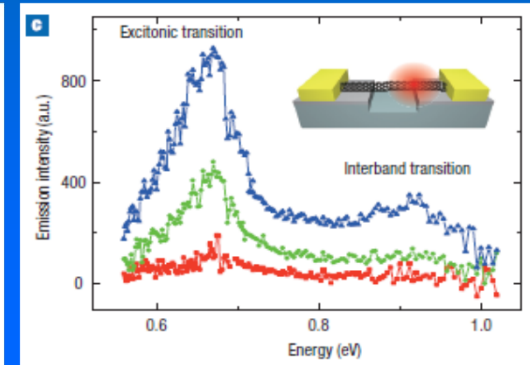


L.Marty et al., Phys. Rev. Lett. 96, 136803(2006).



J. Zaumseil et al., ACS Nano, 3, 2225 (2009).

衝突励起



P. Aavouris et al., Nature Phys 2,341(2008).

長波長EL (>1.5 μm)のELのみが報告

(PLでは、短波長(>0.8μm) 発光が観測される)

- ・ ワイドギャップのCNTでは、電流注入によるキャリア励起が難しい。

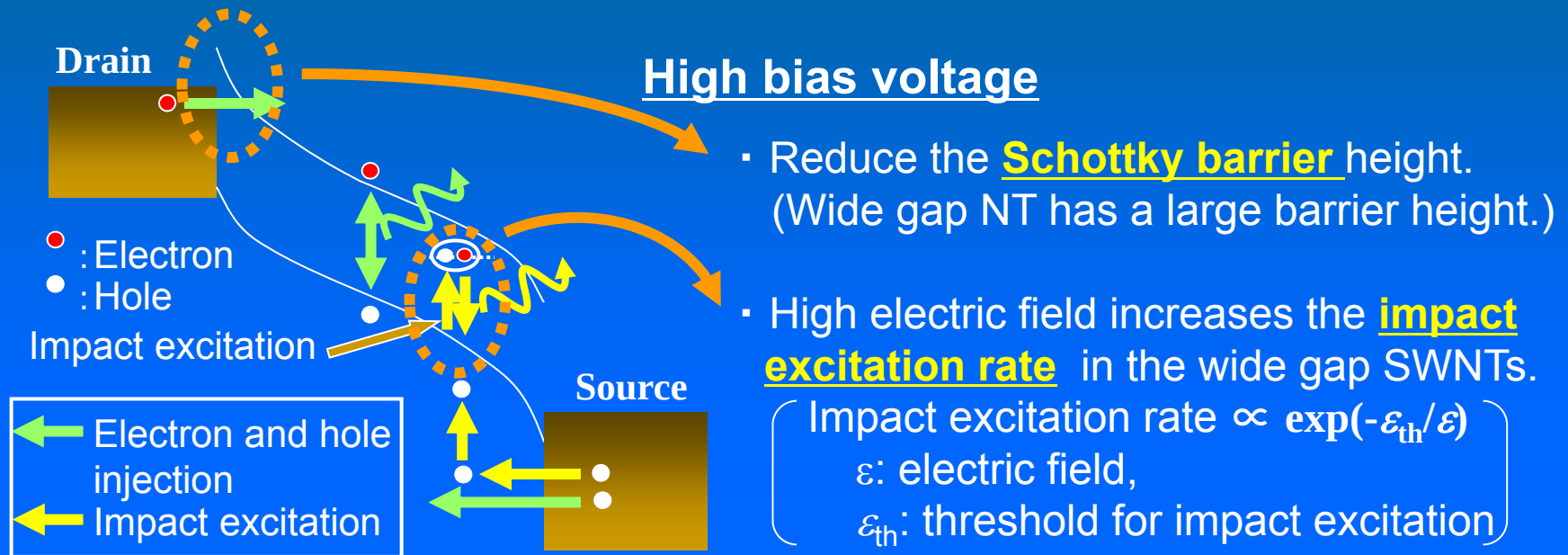
光通信への発光素子応用



短波長EL

λ_{11} (nm)	λ_{22} (nm)	$h\nu_{11}$ (eV)	$h\nu_{22}$ (eV)
833	483	1.488	2.567
873	581	1.420	2.134
912	693	1.359	1.789
952	663	1.302	1.870
975	567	1.272	2.187
1023	644	1.212	1.925
1053	734	1.177	1.689
1101	720	1.126	1.722
1113	587	1.114	2.112
1127	647	1.105	1.916

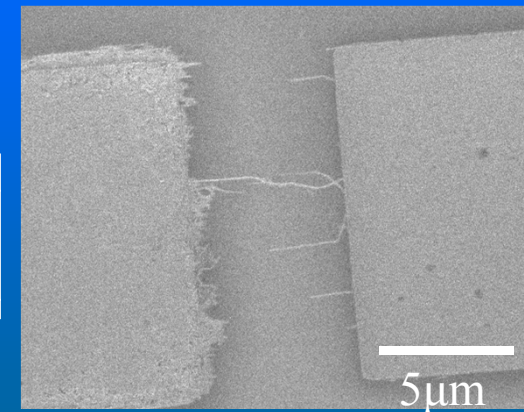
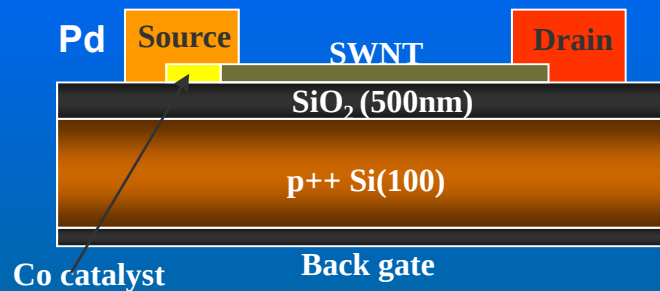
高バイアス印可による短波長EL



デバイス構造

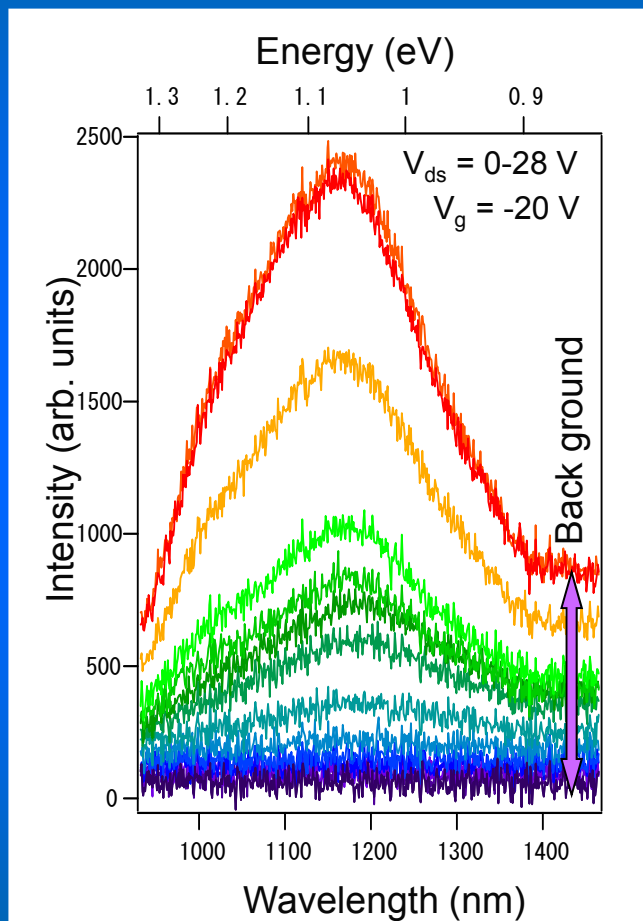
基板に接した
CNTデバイス構造で
ジュール発熱を抑制

→ 高電圧印可を可能に

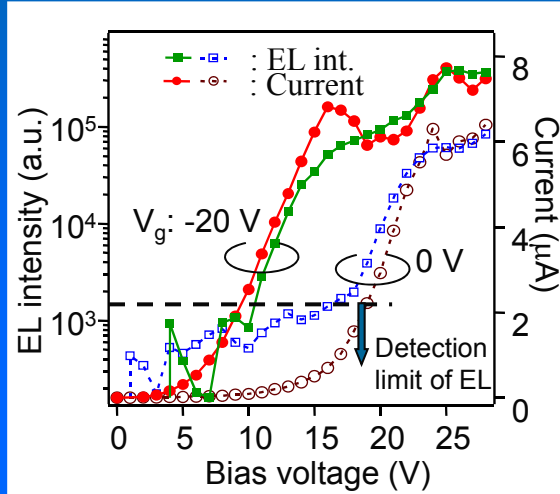


p型CNTデバイスからの短波長EL発光

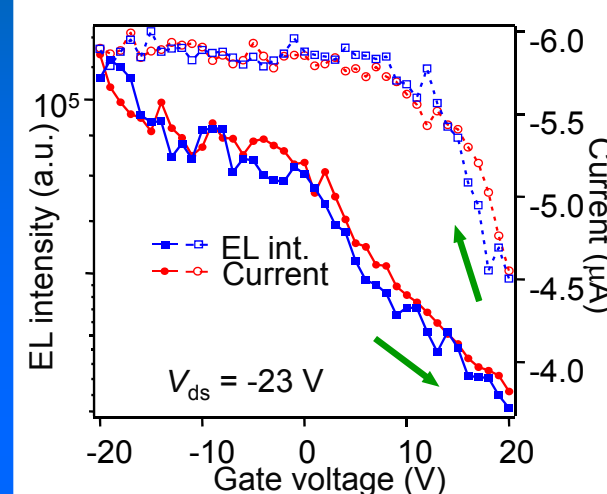
EL スペクトル



発光強度, I_{ds} v.s. V_{ds}



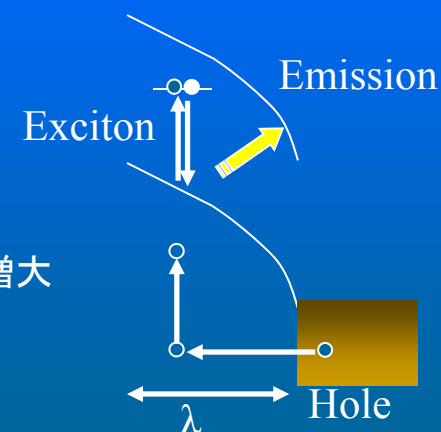
発光強度, I_{ds} v.s. V_g



短波長EL (@1170 nm) の観測に成功

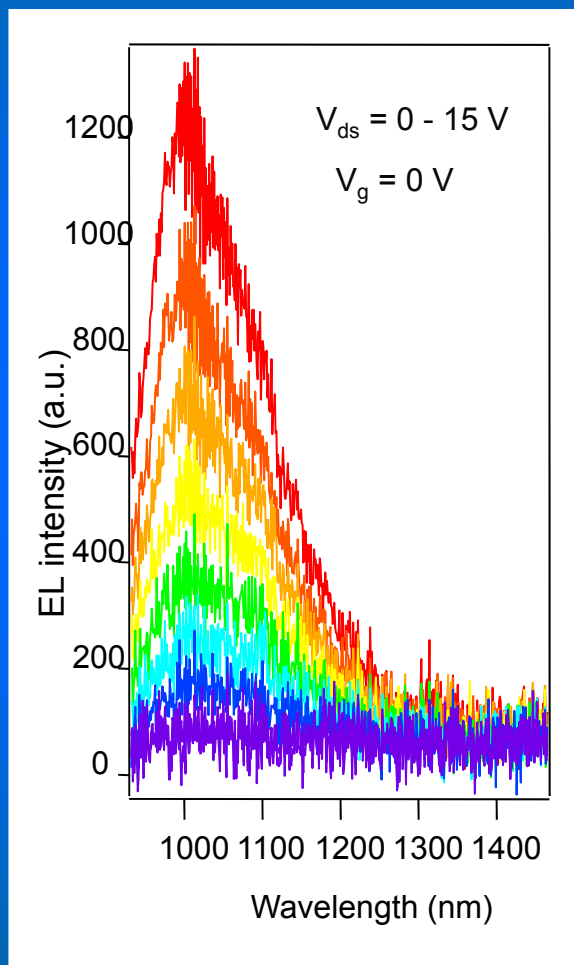
メカニズム: 衝突励起

- ・ 衝突励起レート $\propto \exp(-\varepsilon_{th}/\varepsilon)$
- ・ 多数キャリア領域 (p型領域) での発光増大

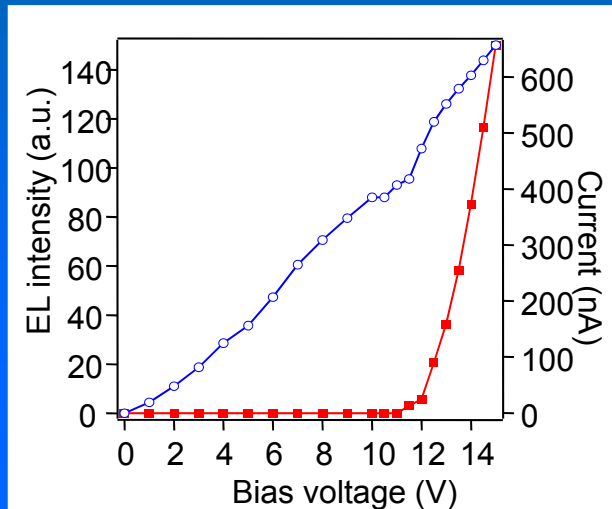


アンバイポーラ(両極性)CNTデバイスからの短波長EL

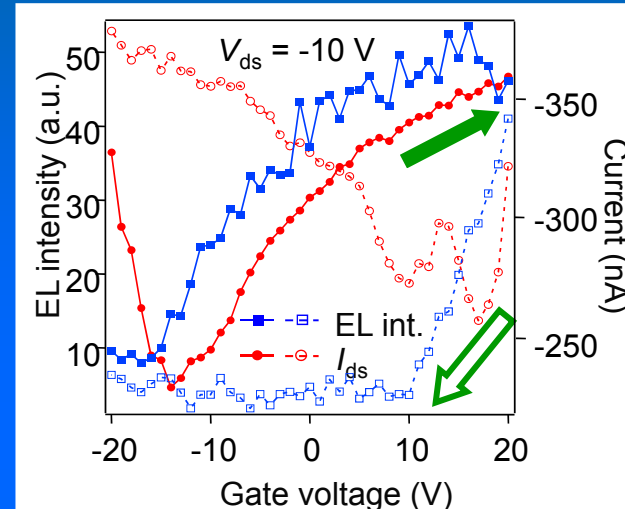
ELスペクトル



発光強度, I_{ds} v.s. V_{ds}



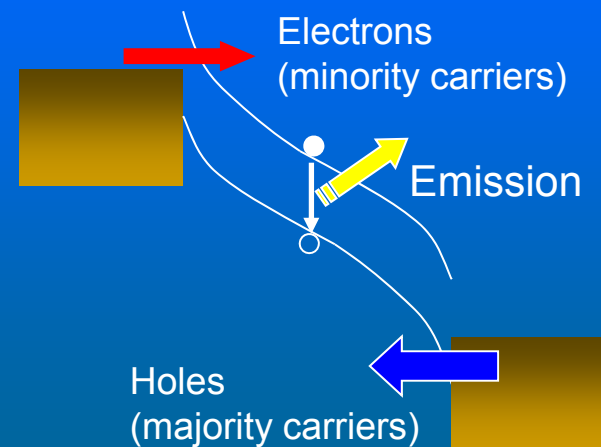
発光強度, I_{ds} v.s. V_g



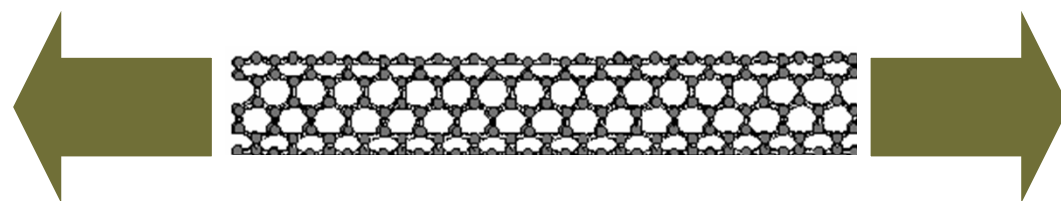
短波長EL (@1000 nm) の観測に成功

メカニズム: 電子・正孔注入

- ・ 少数キャリア領域 (n型領域) での発光増大



歪印可による波長可変素子の開発

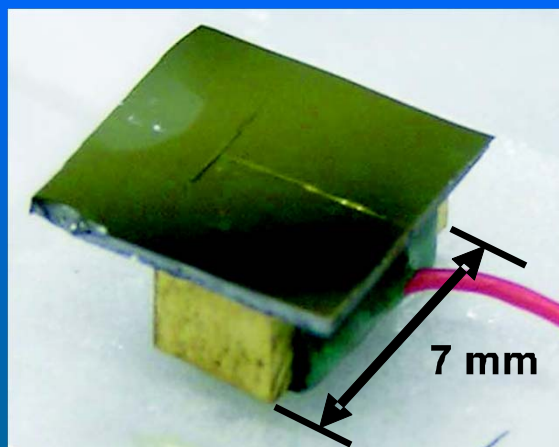
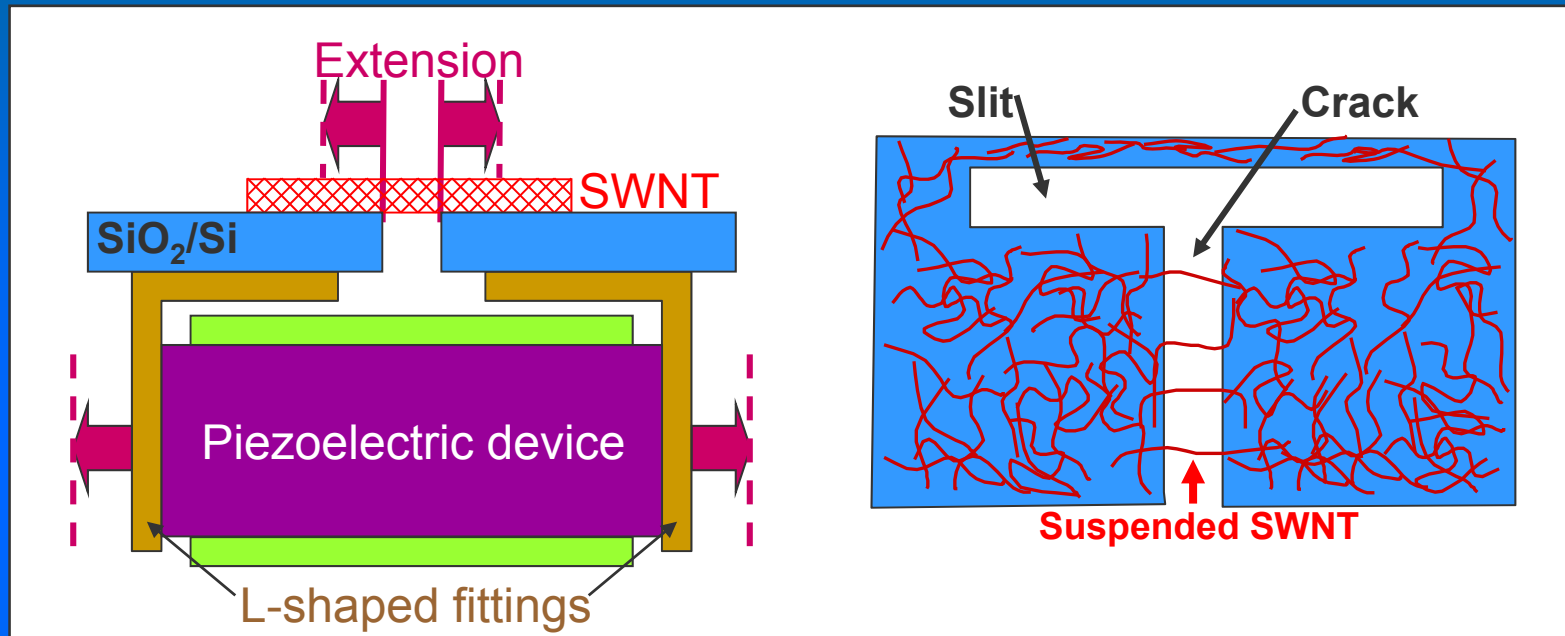


伝導帯

バンドギャップ

価電子帯

CNT歪印可素子



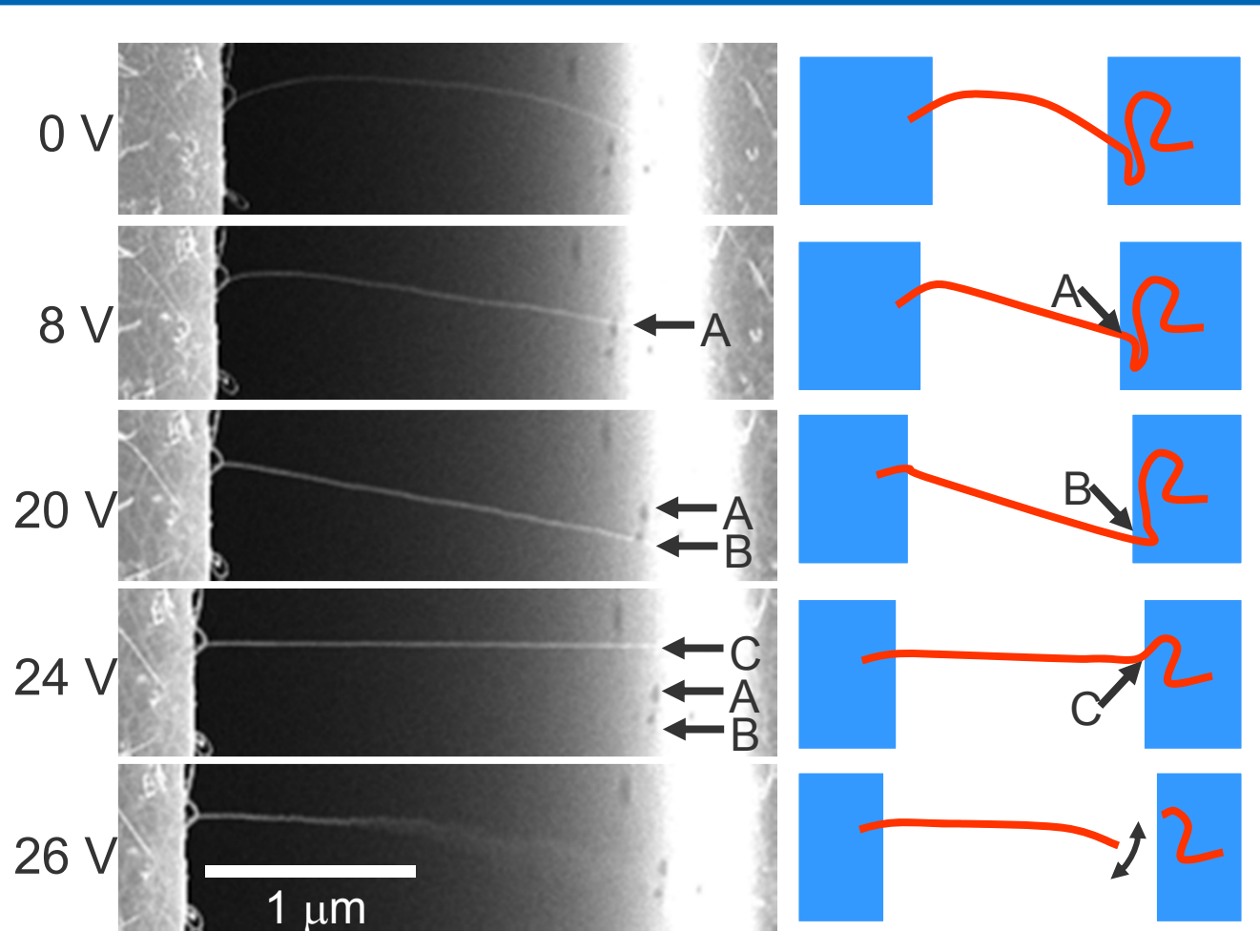
圧電素子への電圧印加により、クラックのギャップが開き、SWNTへ引張り応力が印加される。(25 nm/V)

素子の長さは、最長部7mm

→ SEM, 光計測装置等に容易に導入可能

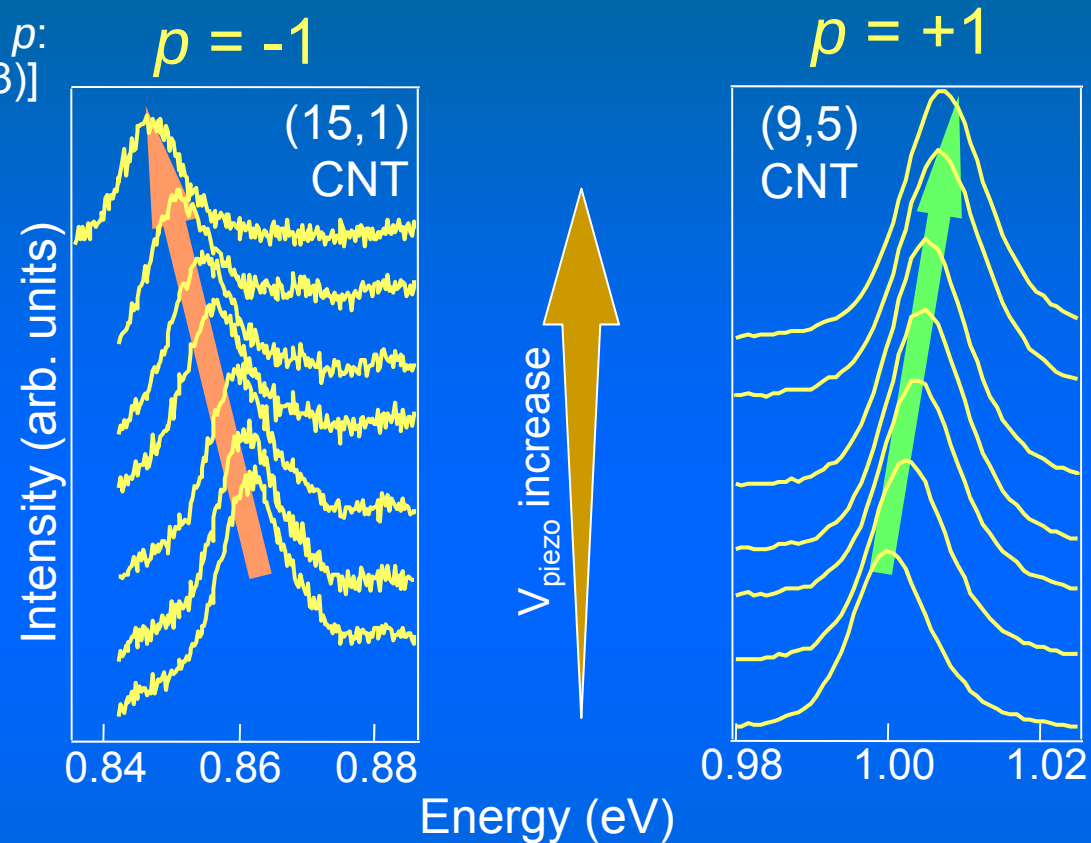
本研究：顕微PL測定、SEM観察

CNTへの歪印可



CNTのカイラリティーに依存した波長可変発光

Family index p :
 $[\text{mod}(n - m, 3)]$



歪印可による波長可変発光を観測

バンドギャップ(引っ張り時)

実験:

縮小

拡大

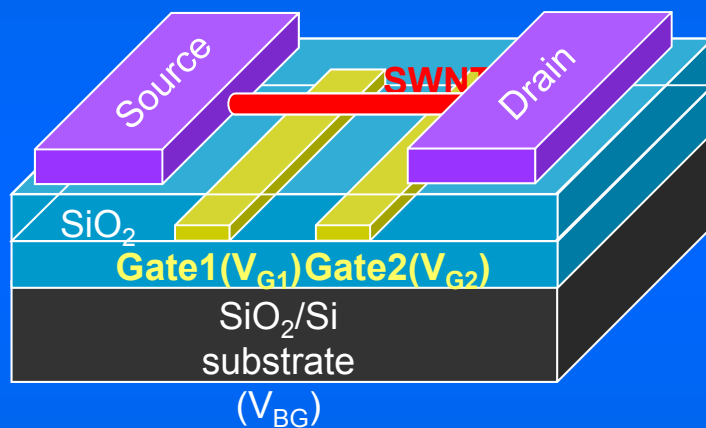
理論:

縮小

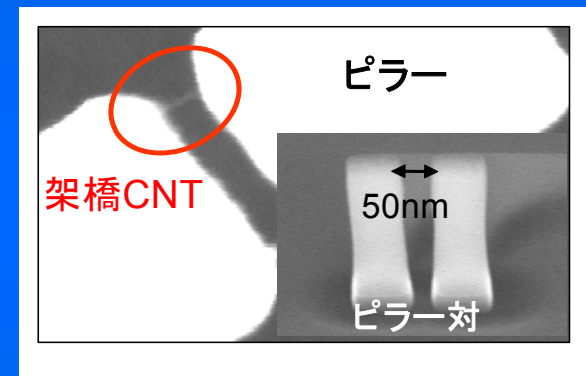
拡大

バンドギャップの拡大縮小をカイラリティーにより選択可能

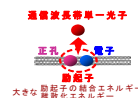
CNT量子ドットを用いた輸送制御 &励起子消滅による単一光子発生



二重結合量子ドット

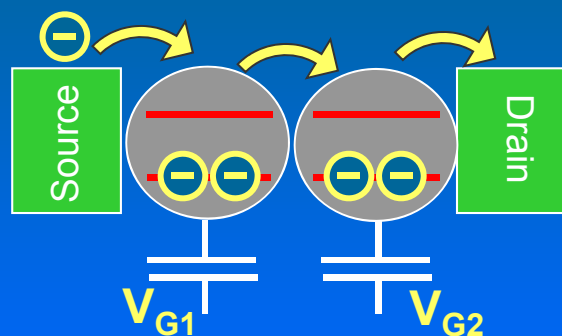


短尺CNT成長



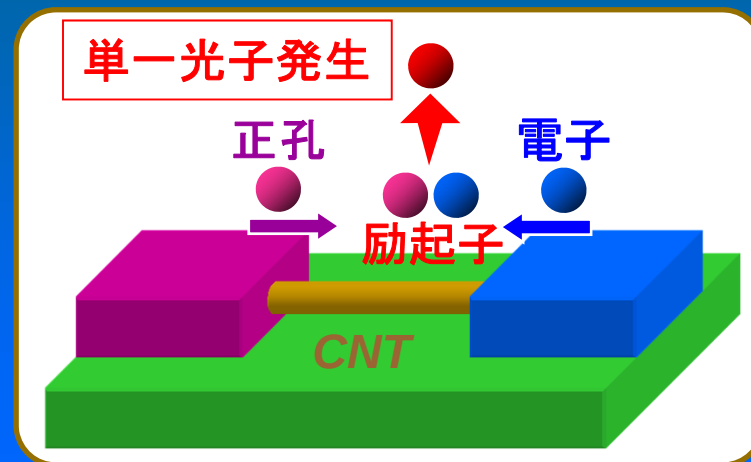
光子相関測定

二重結合量子ドット



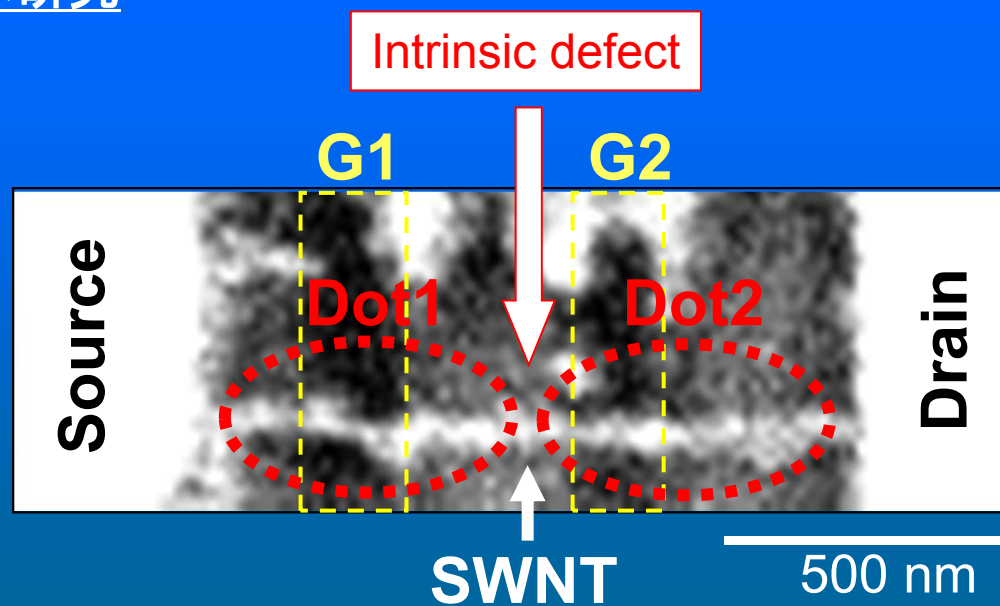
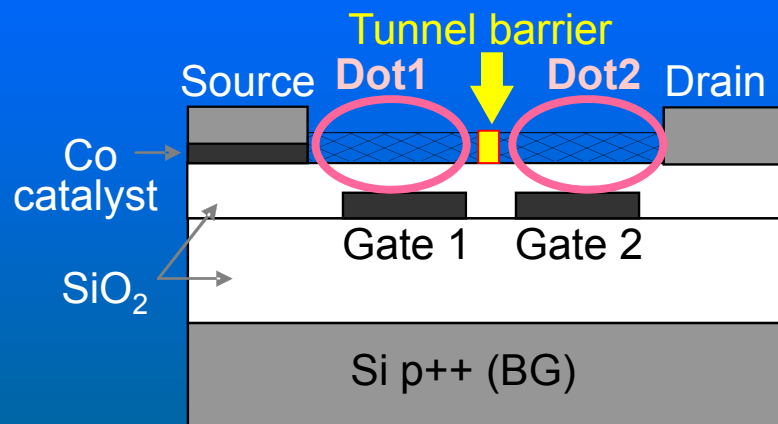
局所ゲート電圧に同期して、
単一キャリアを輸送可能

→ 単一電子ポンプ

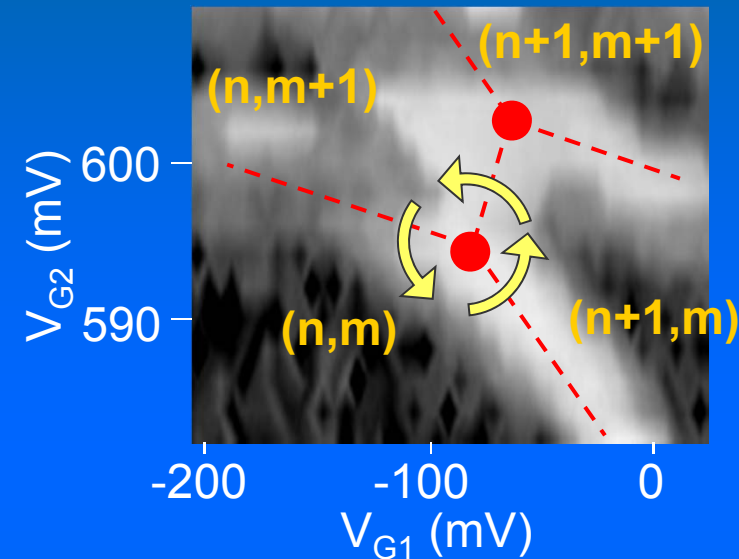
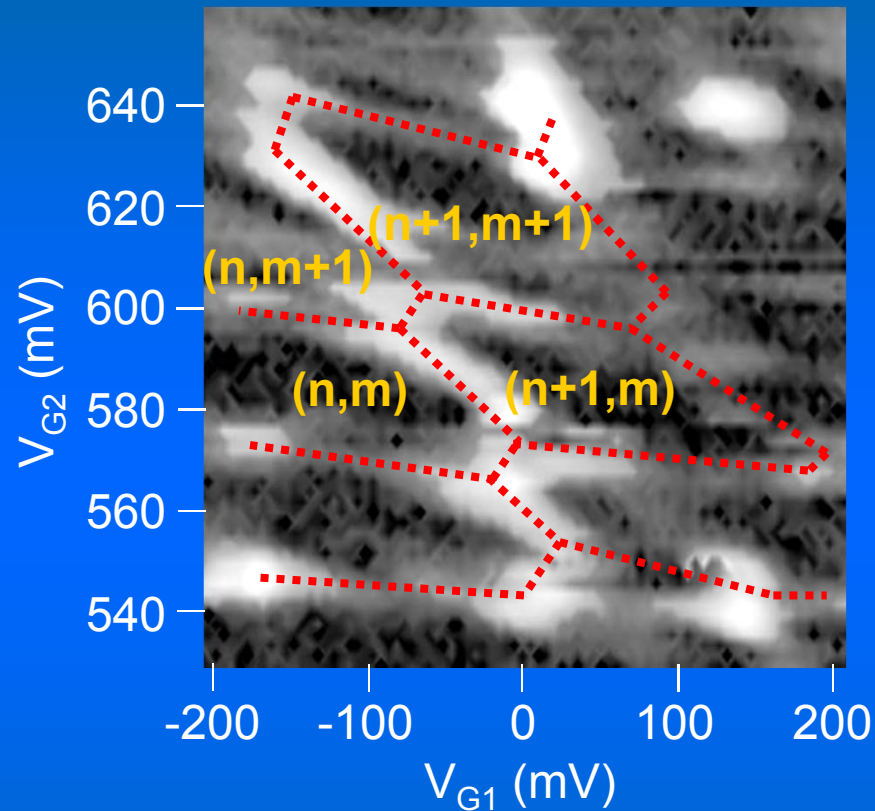


本研究

バックゲート構造：発光を取り出し可能



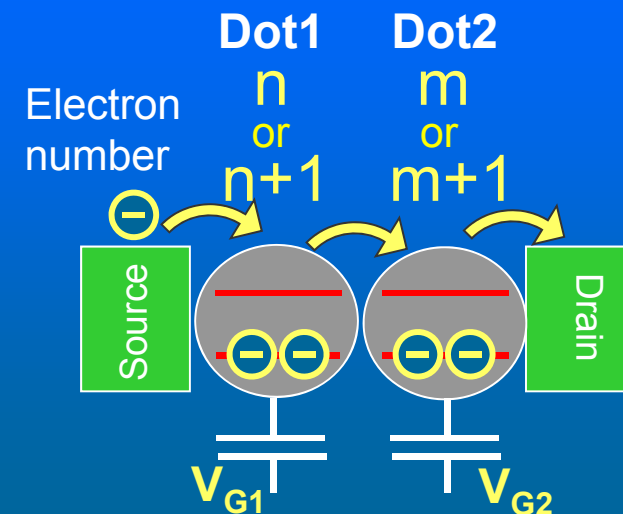
2重結合量子ドットの局所ゲート特性(ハニカム構造)



それぞれのハニカム内は電子数が固定

ハニカムの頂点を回るようにゲート電圧を印加すると、一周で一個の電子が移動可能。

→ 単一電子ポンプ



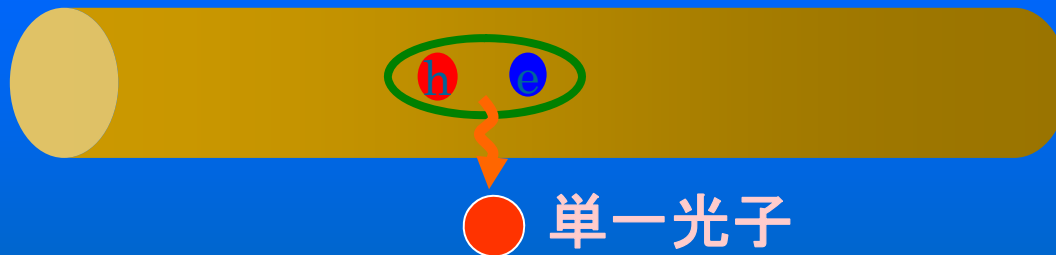
励起子対消滅による単一光子発生

パルスレーザー
などによる励起



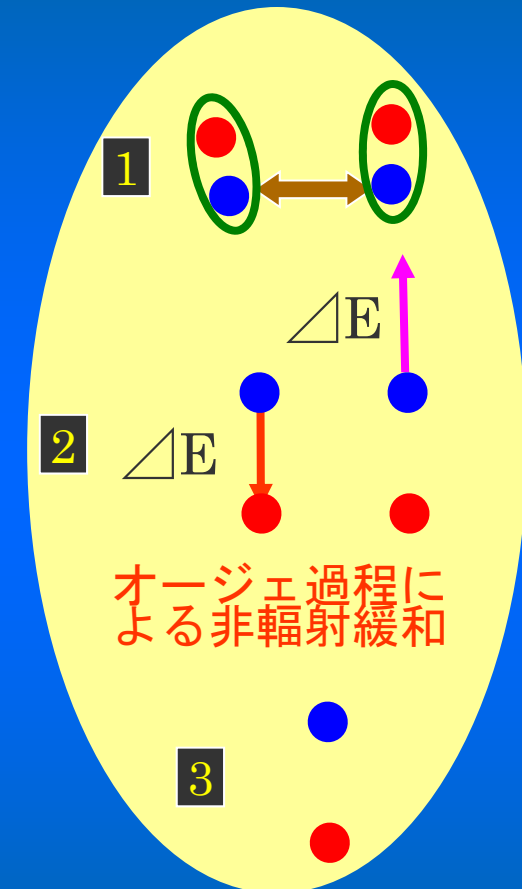
Exciton dissusion
 $L_{\text{diff}} \sim 300\text{nm}$ [1]

励起子対消滅

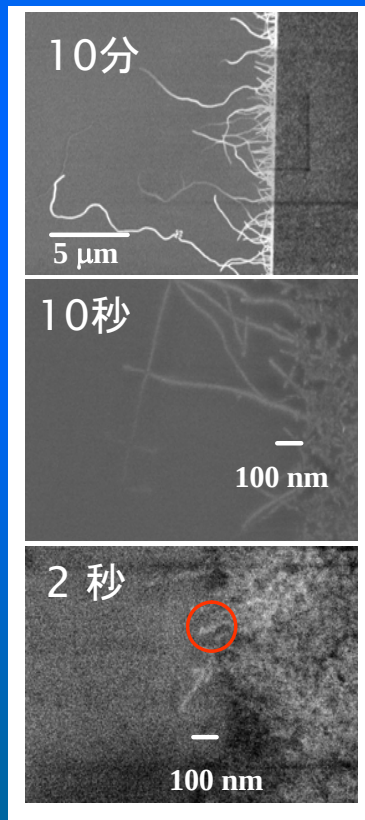
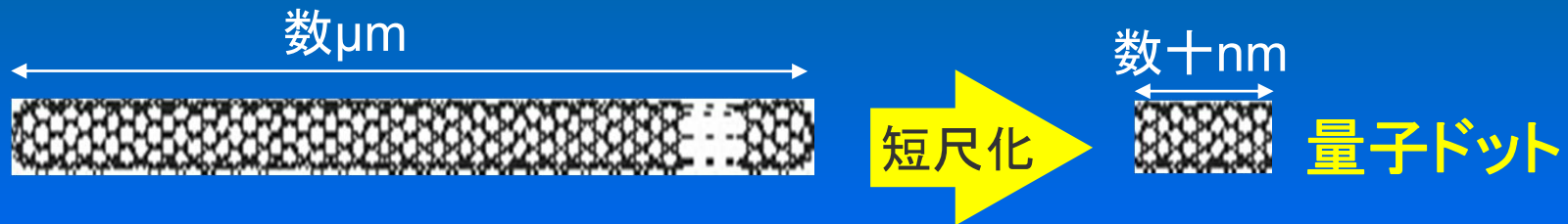


単一光子

励起子対消滅を用いることで、
最後の一個の励起子より単一光子が発生



カーボンナノチューブ成長技術構築(架橋短尺CNT等)

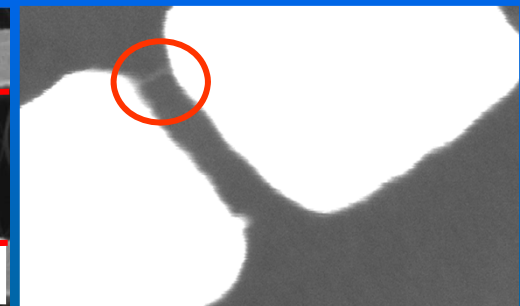
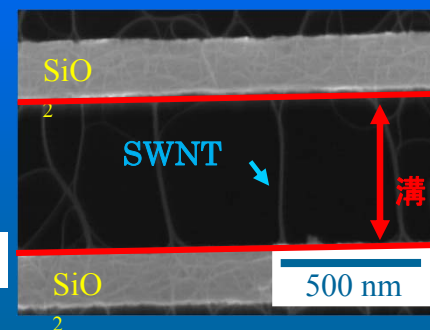
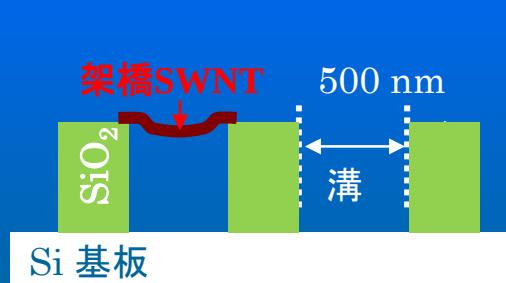
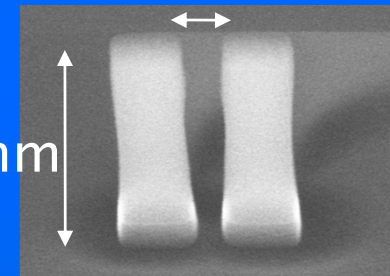


- ・ CNTの長さ制御
成長時間制御
 $\rightarrow$ 数 μm ~ 数十nmで制御可

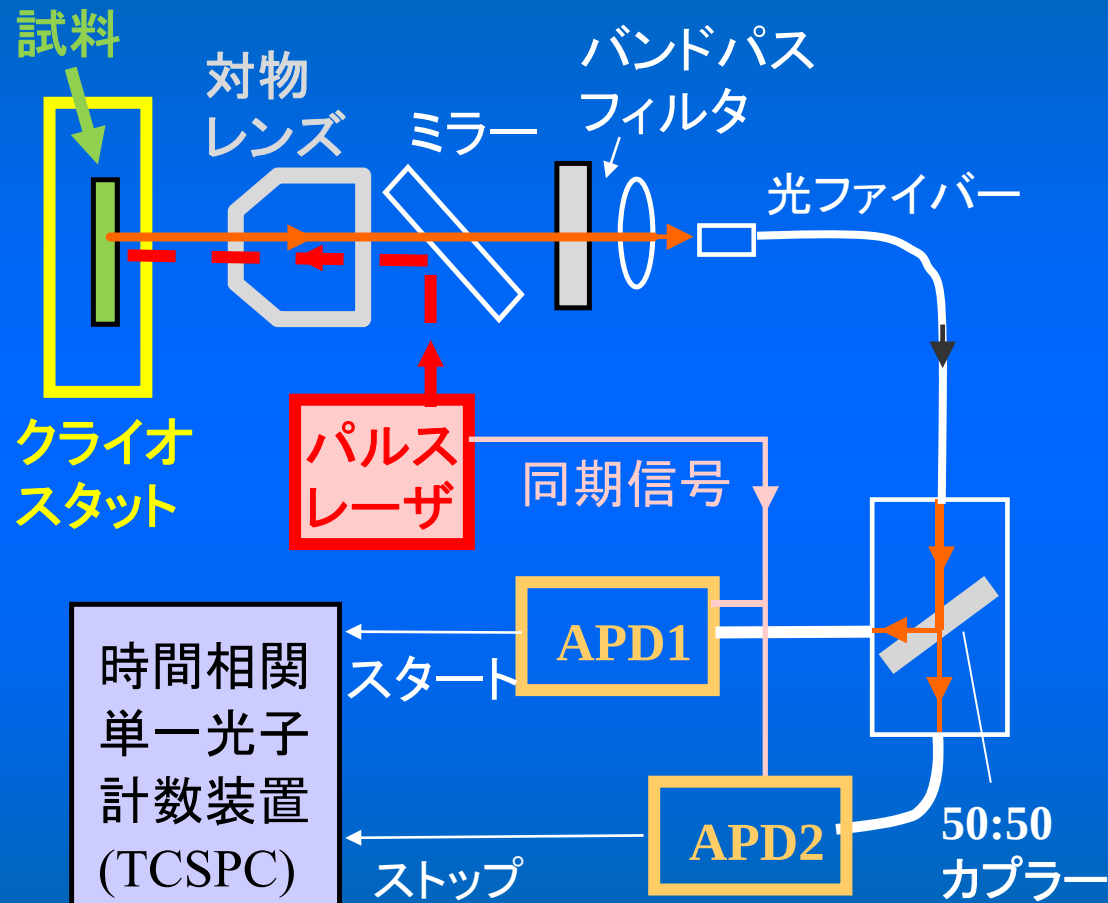
- ・ 架橋CNT
基板との相互作用が無く
高効率な発光

間隔; 50nm ~ 500nm

高さ;
数百nm

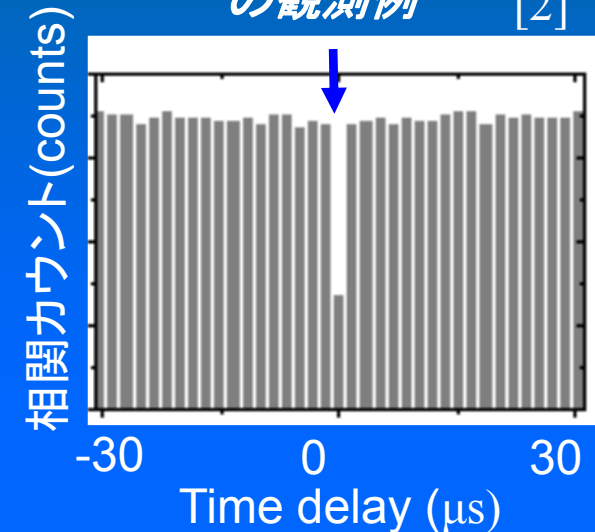


光子相関測定系



Hanbury-Brown and Twiss 測定系

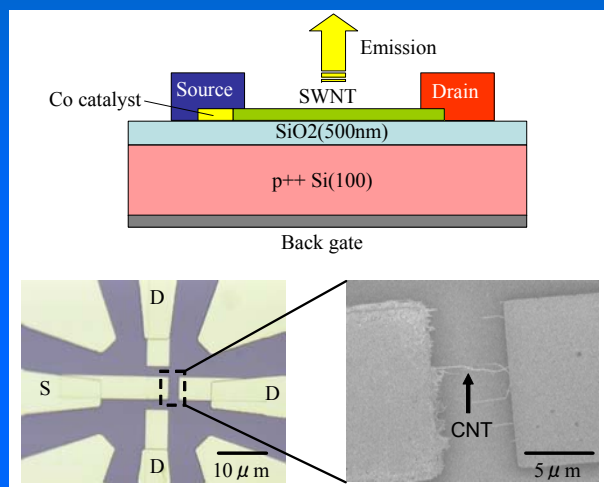
アンチバンチング
の観測例 [2]



- ・励起パルスレーザー
(半導体、Tiサファイア)
- ・クライオスタット改造
(ワーキングディスタンス向上)
- ・対物レンズ
(高N.A.の検討)
- ・測定試料
(架橋CNT、サンプルサイズなど)
- ・APDのダークカウント

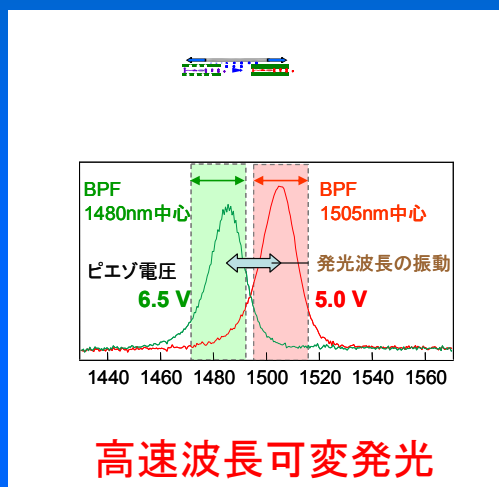
まとめ

電流注入型発光素子



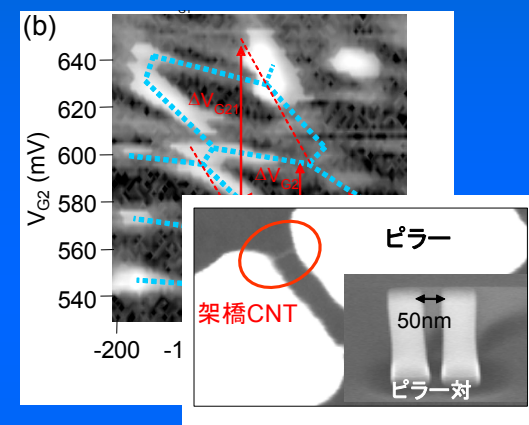
通信波長帯に対応した短波長EL
単一光子発生に向けた
発光メカニズム解明

歪印可波長可変素子



高速変調波長可変
発光素子
微細加工新規波長可変素子

CNT量子ドット輸送制御 &励起子消滅 ・光子相関測定系構築



2重結合量子ドット
短尺CNT成長
光子相関測定系構築

カーボンナノチューブ単一光子発生素子に向けた要素技術開発