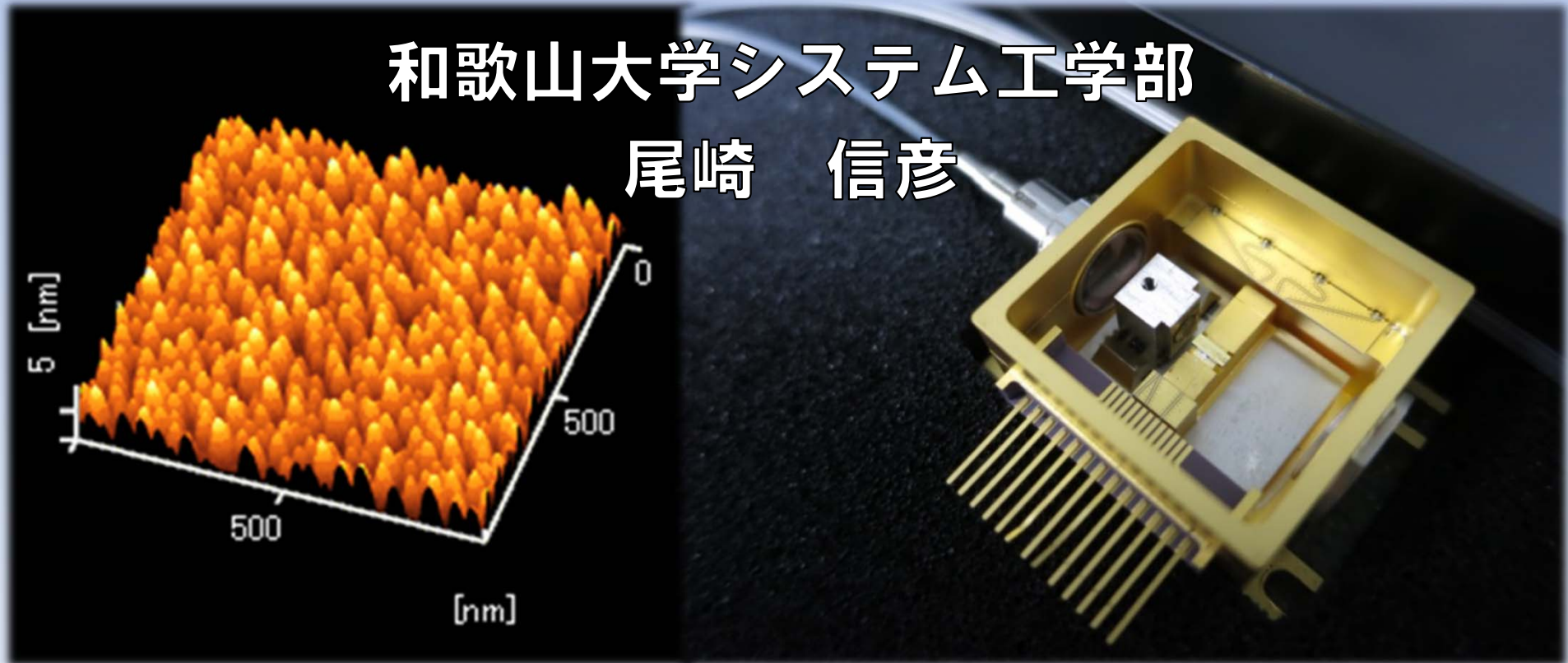
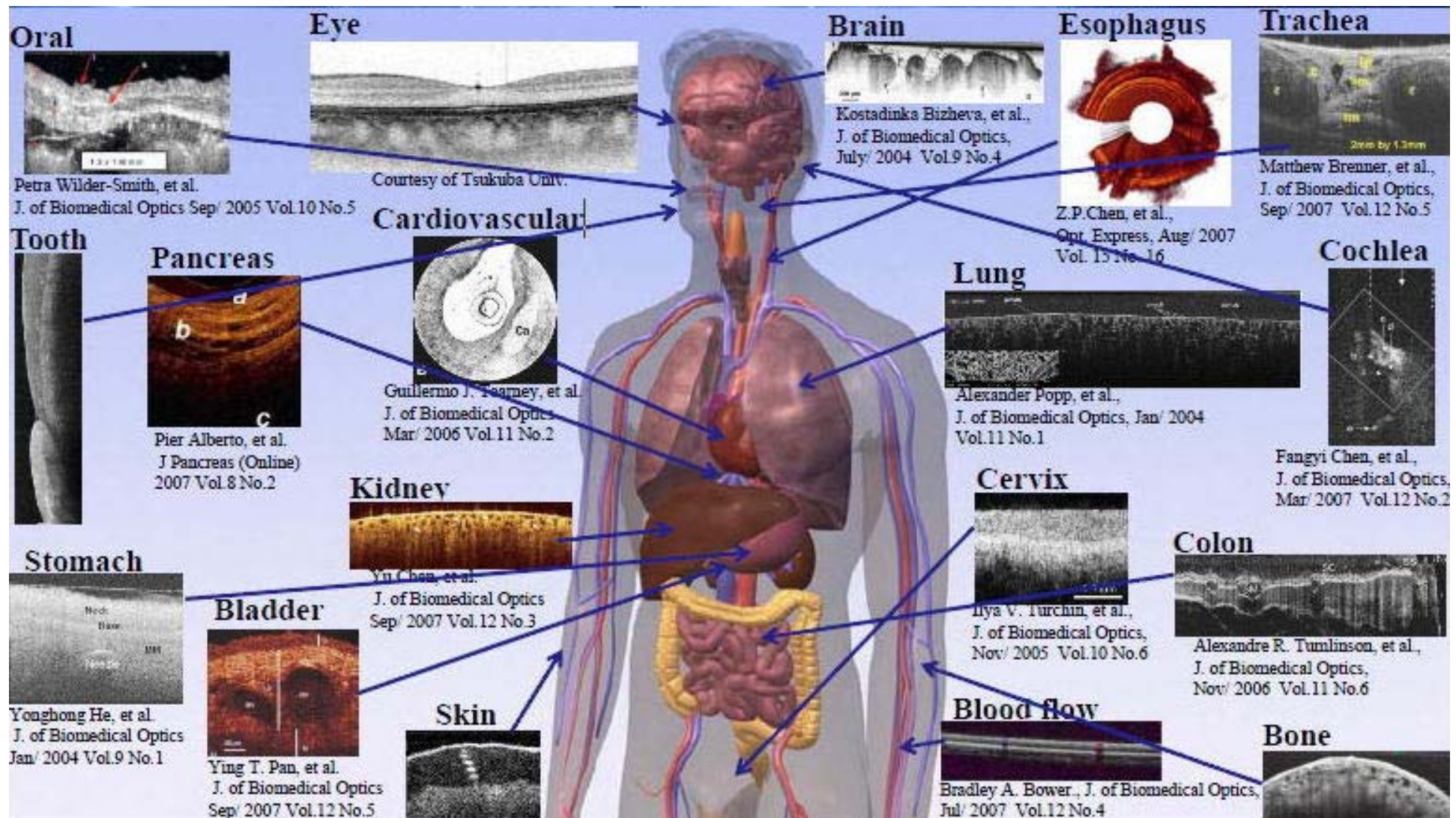


医療用OCT光源に向けた半導体ナノ材料開発



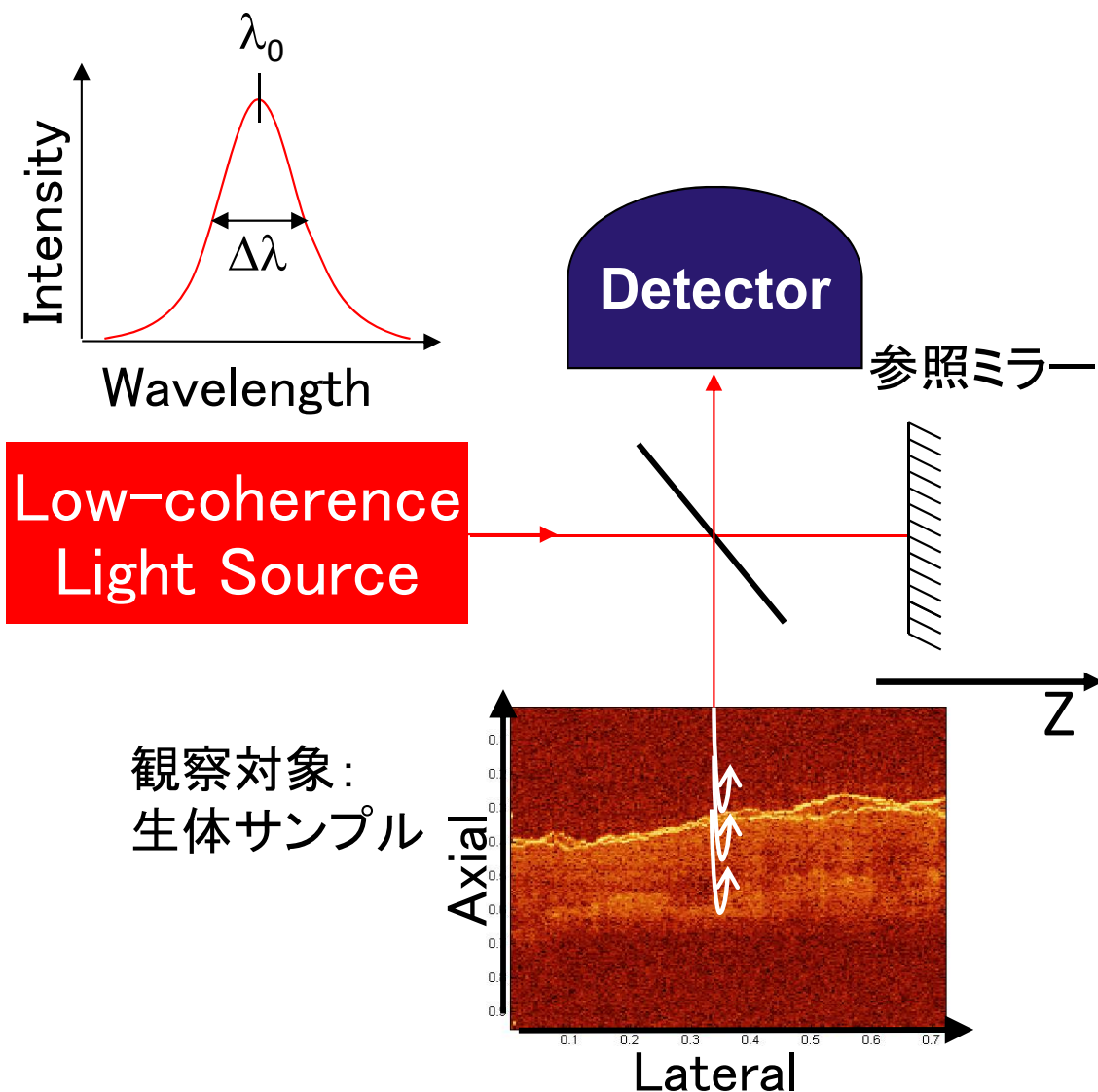
Optical Coherence Tomography



http://www.geocities.jp/eulers_formula/OpticalCoherentTomography1.html

近赤外光を用いた非侵襲な断層イメージング技術である
OCTは眼科以外にも様々な部位に応用が進みつつある

OCTの原理



・コヒーレンス長(l_c)内の局所範囲での干渉強度を光軸方向に測定

・生体組織による反射率(屈折率)変化をコントラスト表示

・面内方向走査による2D,3D画像

OCT軸方向分解能:

$$l_c \approx 0.44 \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}$$

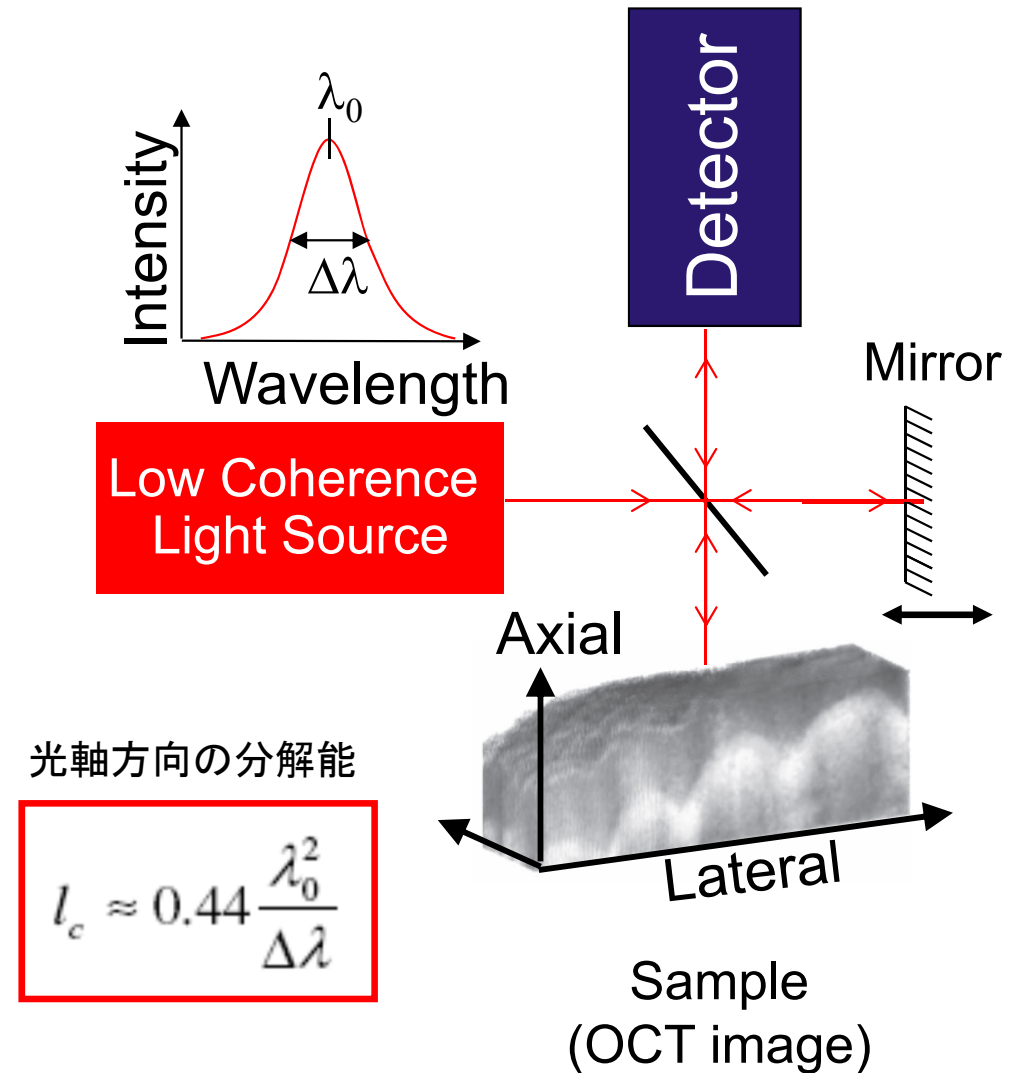
$\Delta\lambda$ 大 \rightarrow 高分解能

分解能向上には広帯域(低コヒーレンス)な光源が望ましい

次の目標: より理想的なOCT光源を目指して...

より高品質なOCT実現のためにより理想的な光源開発が必要

1. 広帯域な発光
 - 高い分解能
2. 近赤外波長
 - 高い光到達深度
3. スペクトル形状制御
 - 低ノイズ化



ポイント: 上記3つの条件をみたす光源をいかにして実現するか

OCT用光源の種類と特徴

光源の種類	SLD (Superluminescent Diode)	白色光源 ^[1]	チタンサファイア レーザー ^[2]	SC光 ^[3] (Supercontinuum)
スペクトル帯域	~100 nm	340 nm	260 nm	370 nm
OCT分解能	10 μm	1.1 μm	0.8 μm	2.5 μm
メリット	軽量 小型 安価	広帯域 色情報有り	広帯域 出力高い	広帯域 出力高い
デメリット	やや狭帯域	出力低い 熱が発生	高価 大型	高価 大型

[1] M. Ohmi, *et. al.*, Optical Review **10**, 478 (2003).

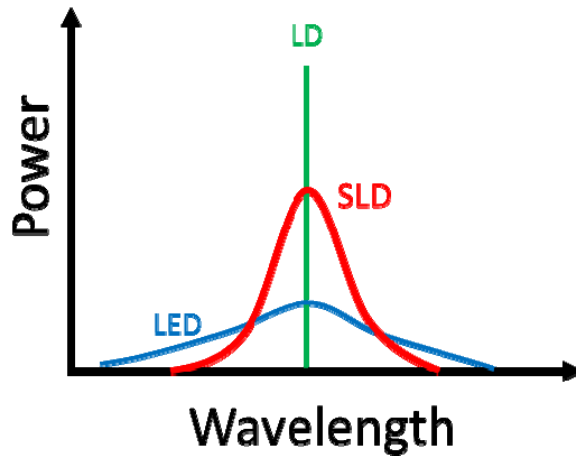
[2] W.Drexler, *et. al.*, Optics Letters **24**, 1221 (1999).

[3] I. Hartl, *et. al.*, Optics Letters **26**, 608 (2001).

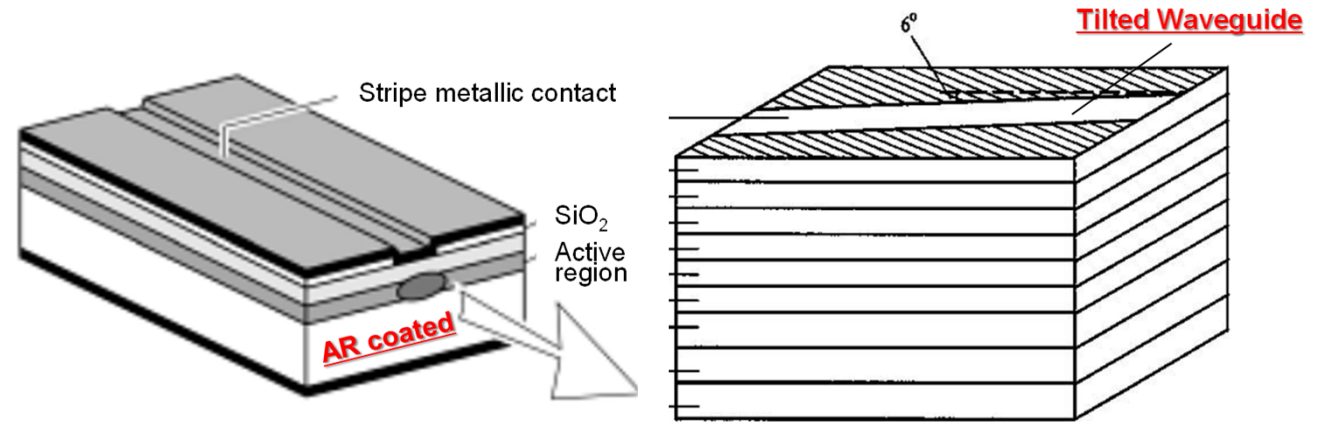
軽量、小型で安価なスーパーluminescentダイオード
(Superluminescent Diode: SLD)が有用

スーパールミネッセントダイオード(SLD)光源

広帯域かつ高輝度な半導体光源デバイス
SLD (SuperLuminescent Diode)



LED, LD, SLDの比較



SLDの構造例(レーザー発振させない構造)

SLDの特性

共振器構造を有さず、反転分布状態で
誘導放出により増幅された光
(Amplified Spontaneous Emission: ASE)
が出射される

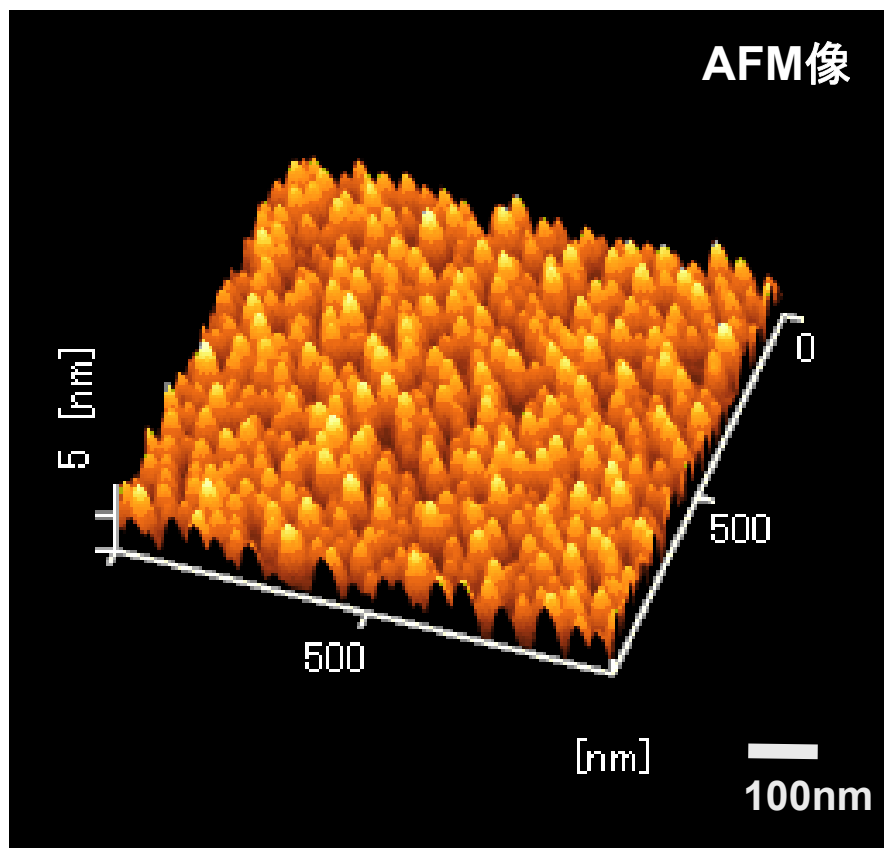


光利得(Gain)を有する発光デバイス
↳ 光が1 cm導波する当たりの光の増幅率

OCT高分解能化のため、既存のスペクトル帯域100 nm
を超える広帯域SLD光源の開発が求められている

GaAs基板上自己組織化InAs量子ドット(QD)

格子不整合による歪誘起成長(S-Kモード成長)



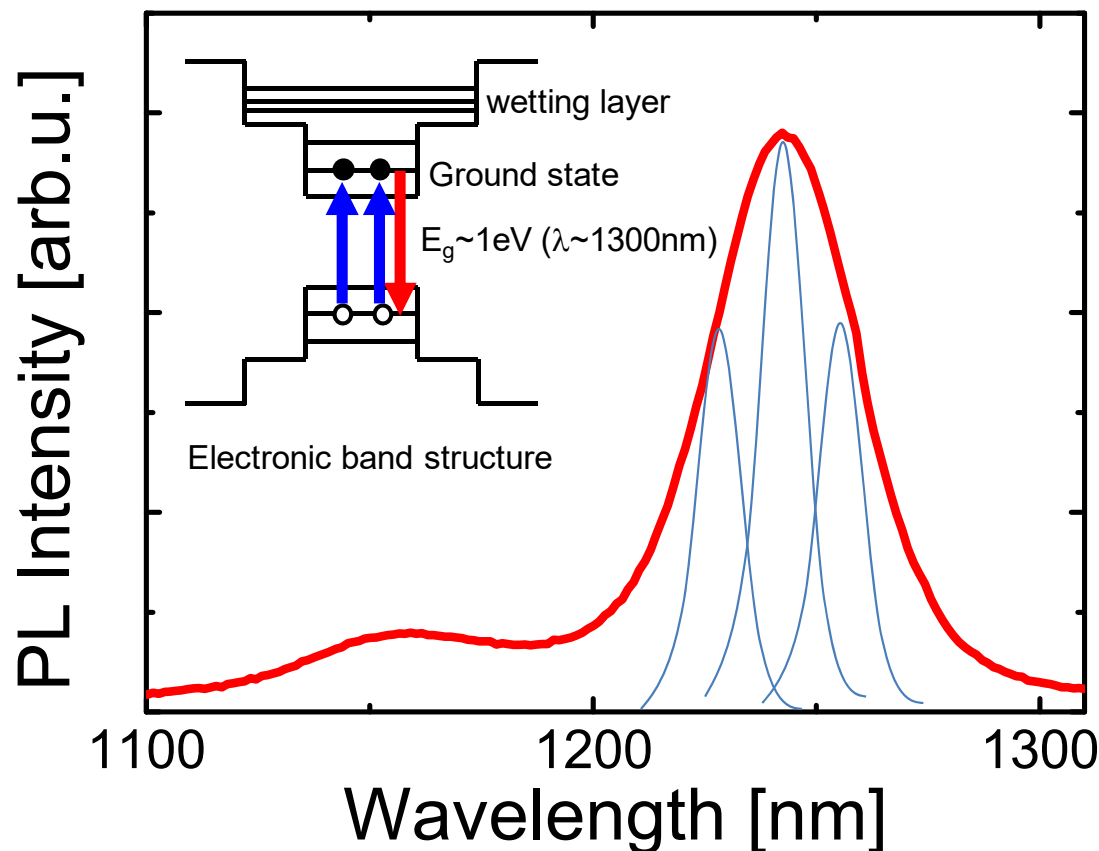
QDのサイズ:高さ 約5nm 直径 約40nm
密度 約 4.0×10^{10} 個/cm²

一定のサイズ分布を有する



近赤外波長帯(1~1.3 μ m)で広帯域発光

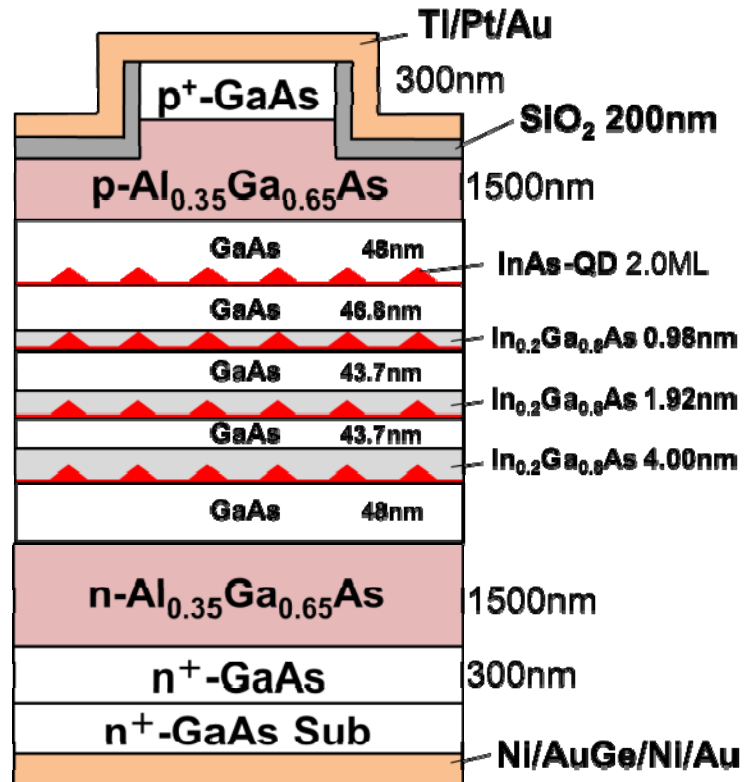
PL発光特性(室温)



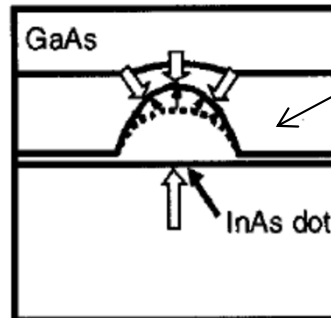
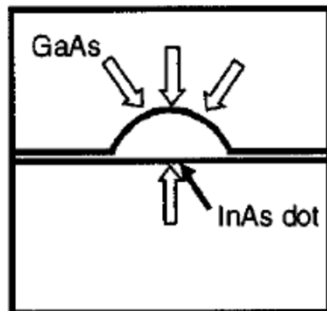
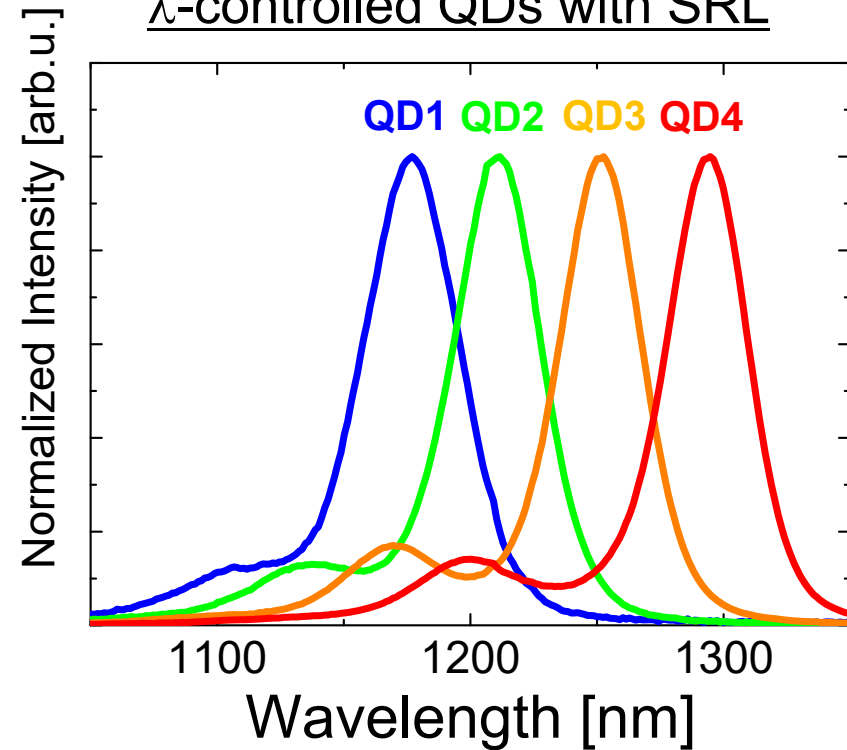
QD-SLD

Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 04EG10 (2014).

Device Profile



λ -controlled QDs with SRL



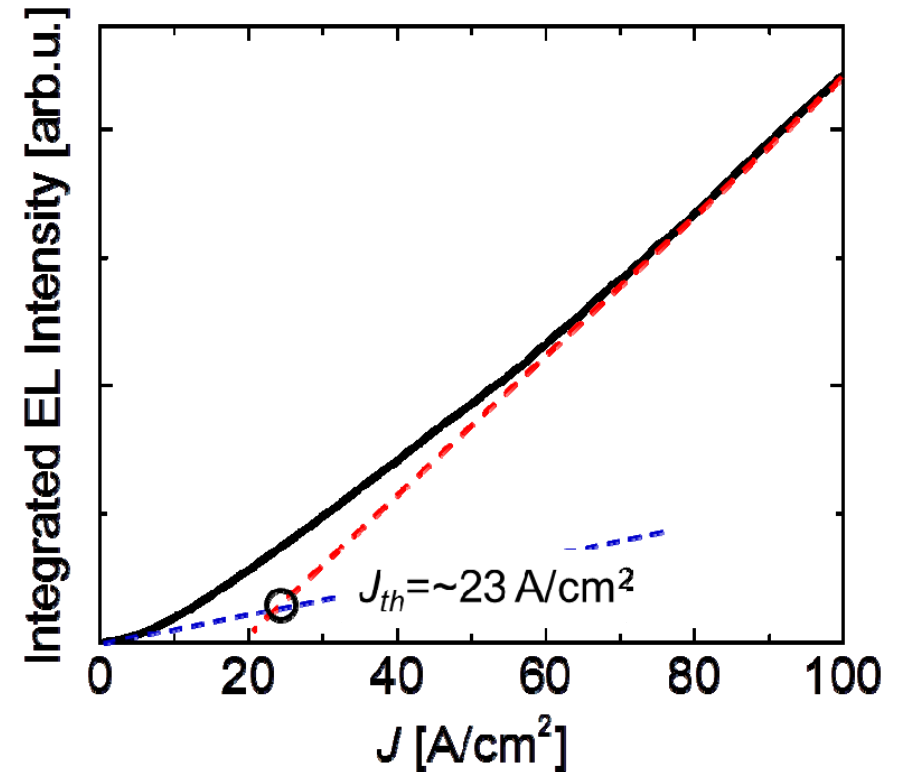
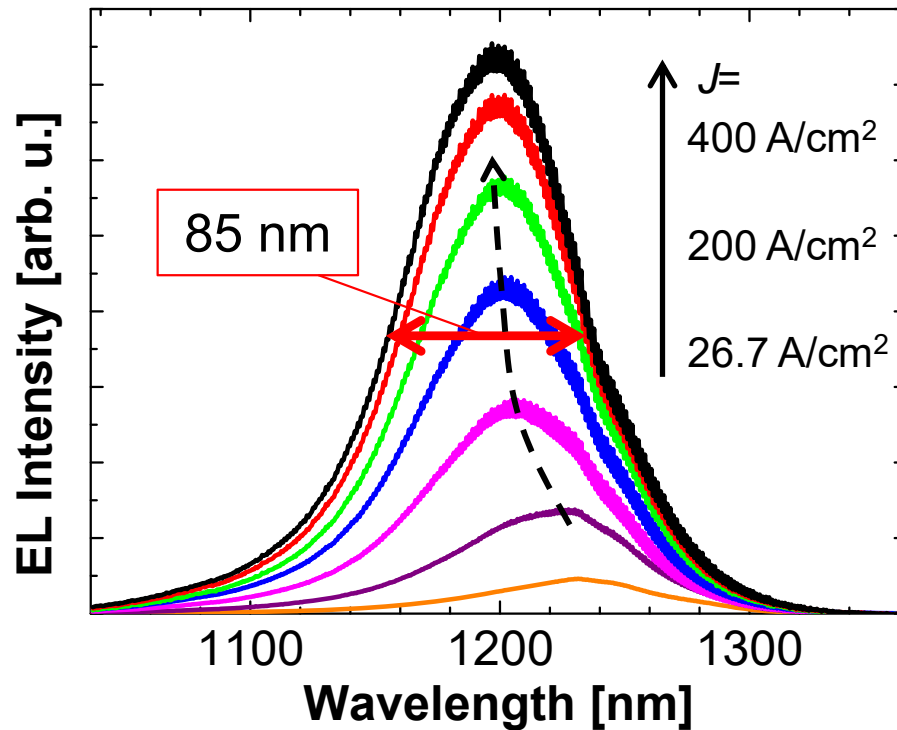
InGaAs : Strain reducing layer (SRL)

K. Nishi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **74** 1111 (1999).

Variation of compressive stress on QDs with **thickness of SRL**
 \Rightarrow Enlargement of QD size results in **red-shift of emission wavelength.**

EL Spectra from QD-SLD

IEICE Trans. Electron. E99-C (3) 381-384 (2016).



- peak shifted to shorter wavelength $\sim 1.2 \mu\text{m}$.
- Bandwidth saturated at ~ 85 nm

The integrated EL intensity increased super-linearly with injection current density.

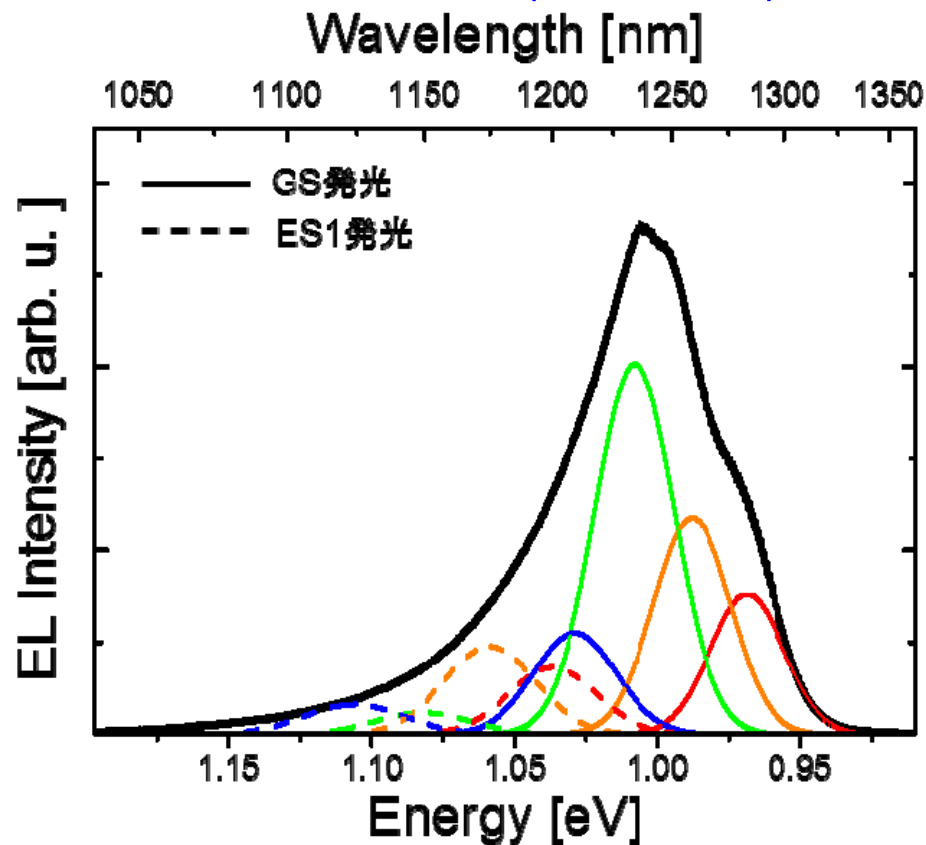
- QD density: $2\sim 4 \times 10^{10}$ [cm⁻²], $\tau \sim 1$ ns
- GS states: $\sim 10^{20}$ [/cm²·s] = 20~40 [A/cm²]

→ indicating QD-SLD properties

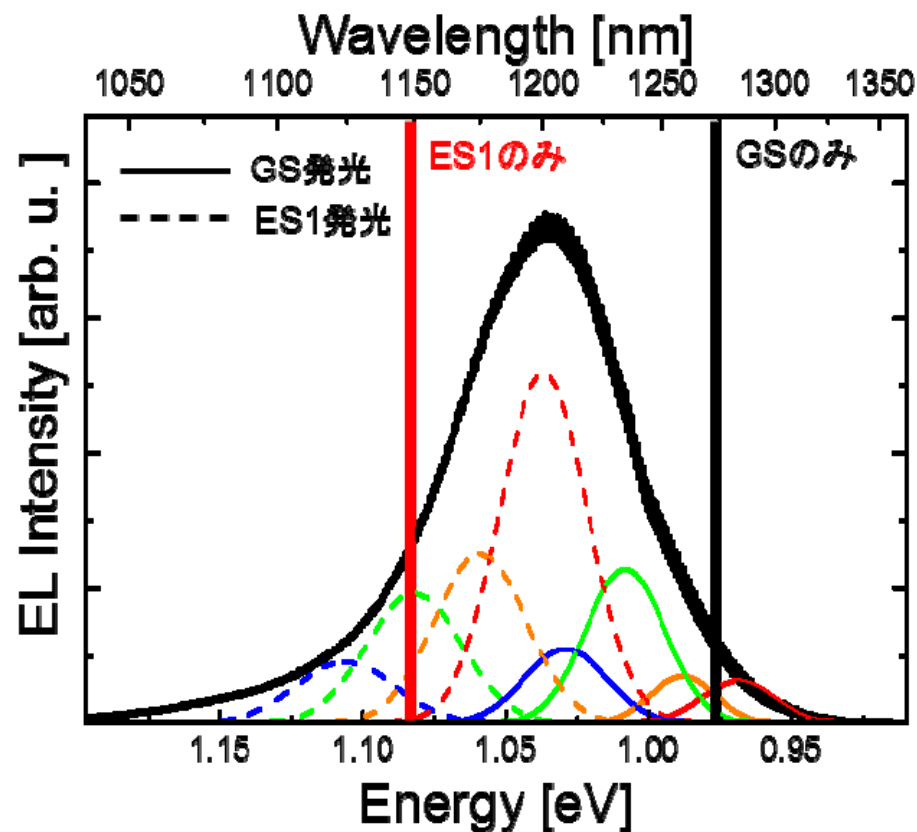
ELスペクトルのGS, ES1発光スペクトル分解

IEICE Trans. Electron. E99-C (3) 381-384 (2016).

低電流密度下 (1.3 A/cm^2)



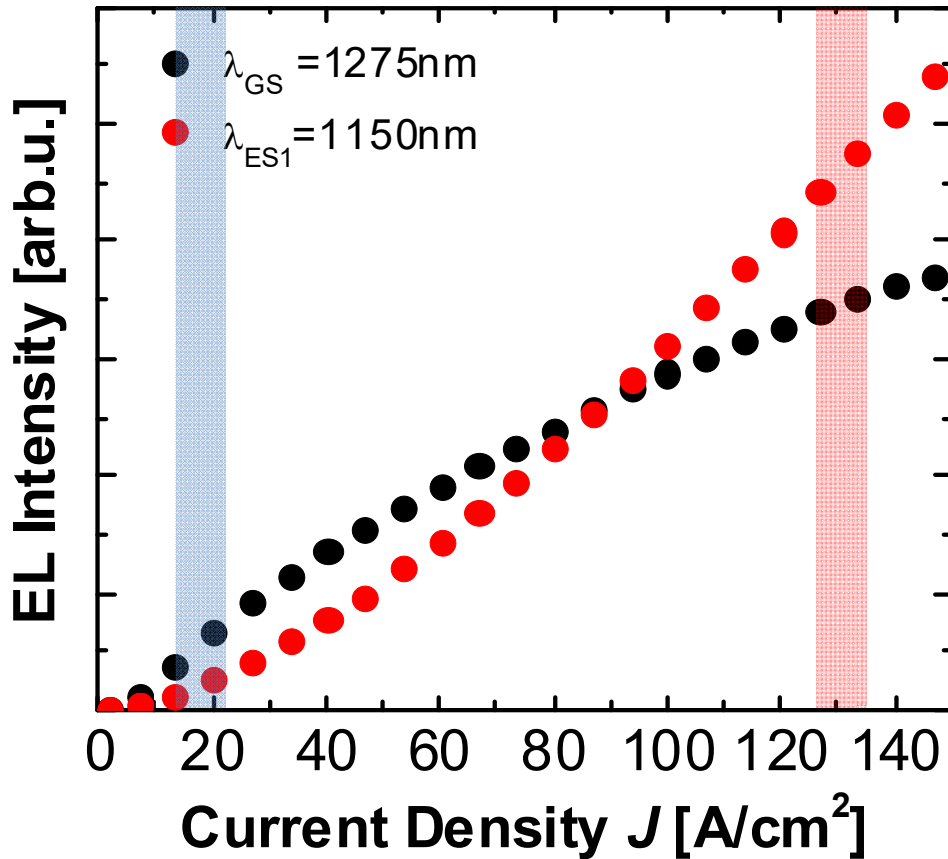
高電流密度下 (400 A/cm^2)



高電流密度下で、ES1発光が増大

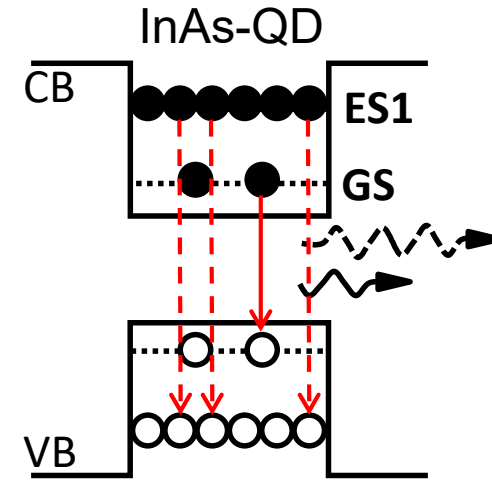
各波長におけるEL強度変化

IEICE Trans. Electron. E99-C (3) 381-384 (2016).



J 大(電子数多)

GS準位が飽和、ESの誘導放出により発光増強

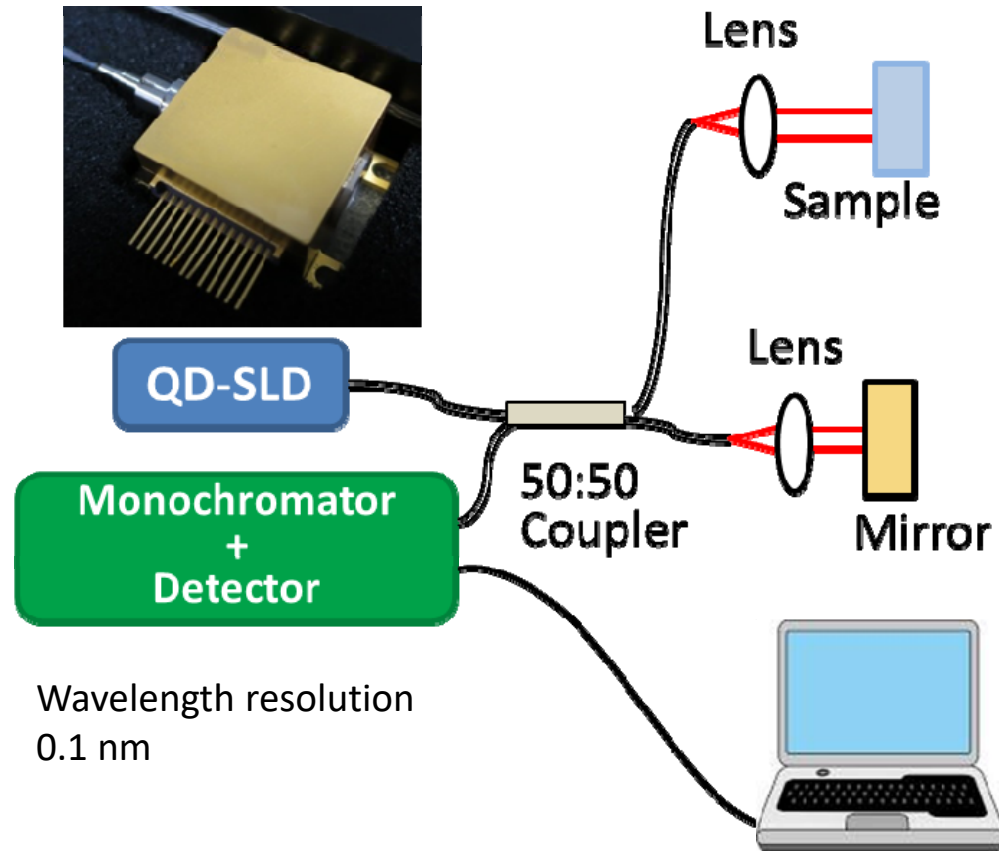


- $J_{th} \sim 23$ [A/cm^2]
- QD 密度 : 2×10^{10} [$/\text{cm}^2$]
- 全GS準位飽和電子数 $\sim 10^{20}$ [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}$]
 $= 20$ [A/cm^2]

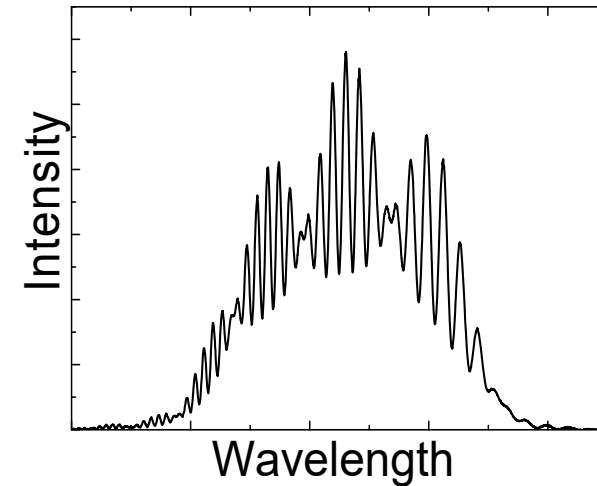
低電流密度でGSが飽和 \Rightarrow ES1発光の増大

2段階の発光増大を示す**QDのEL特性**

Spectral Domain (SD) - OCT Interferometer

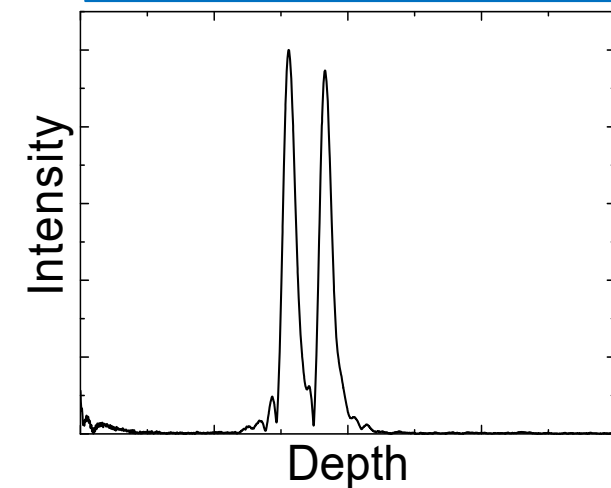


干渉光スペクトル



フーリエ変換

反射光強度分布



反射光強度分布と干渉スペクトルの関係

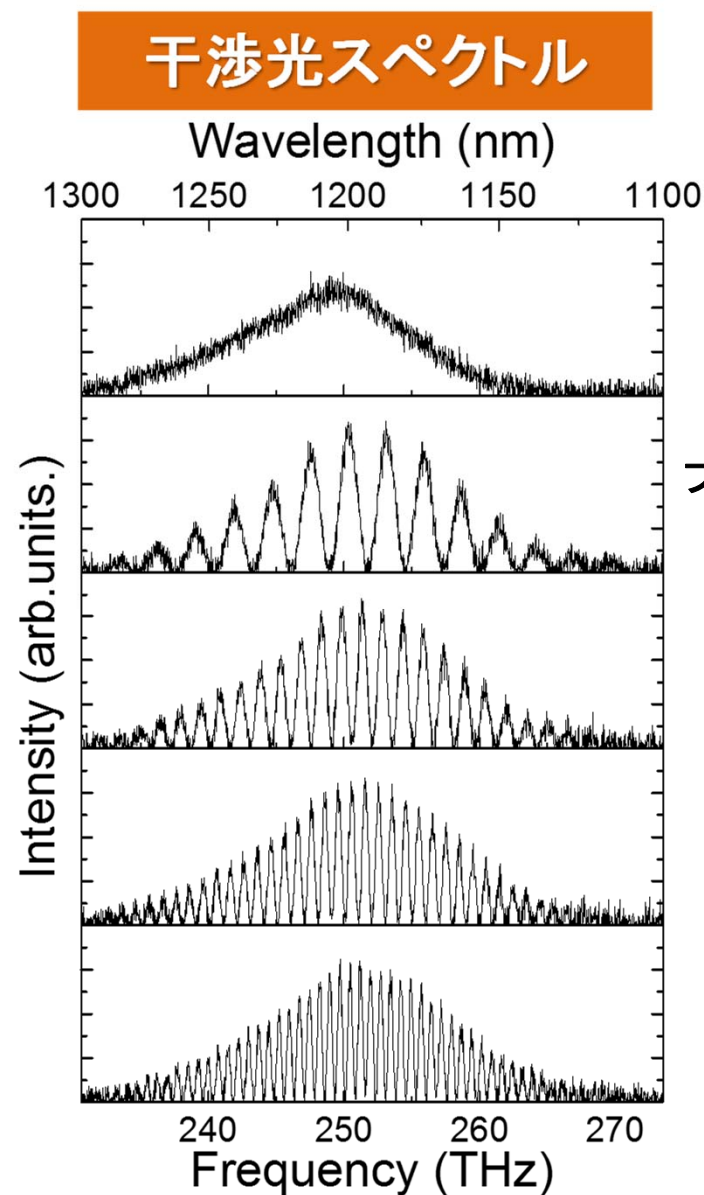
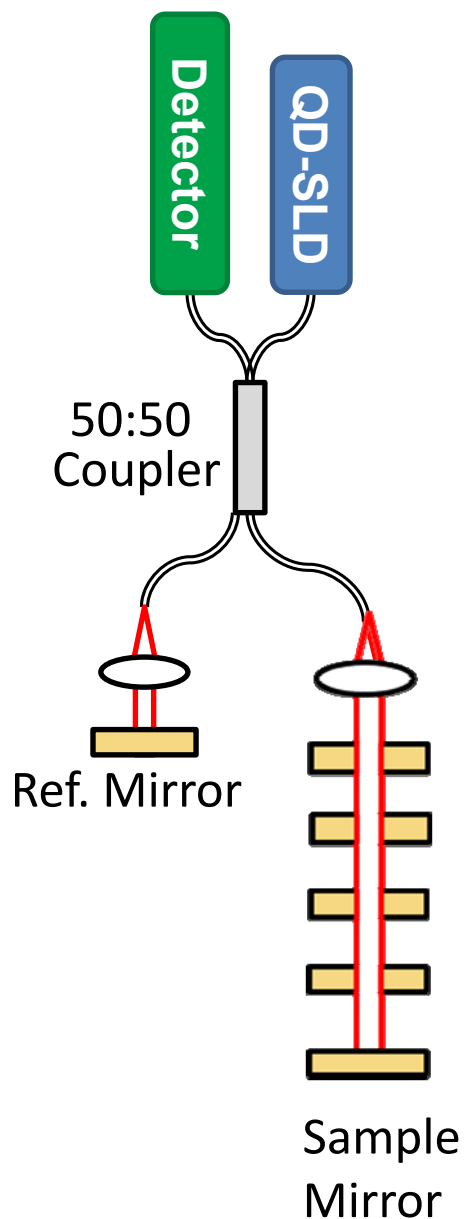
$$I(x) = \int P(k) e^{2\pi i k x} dk$$

反射光強度分布

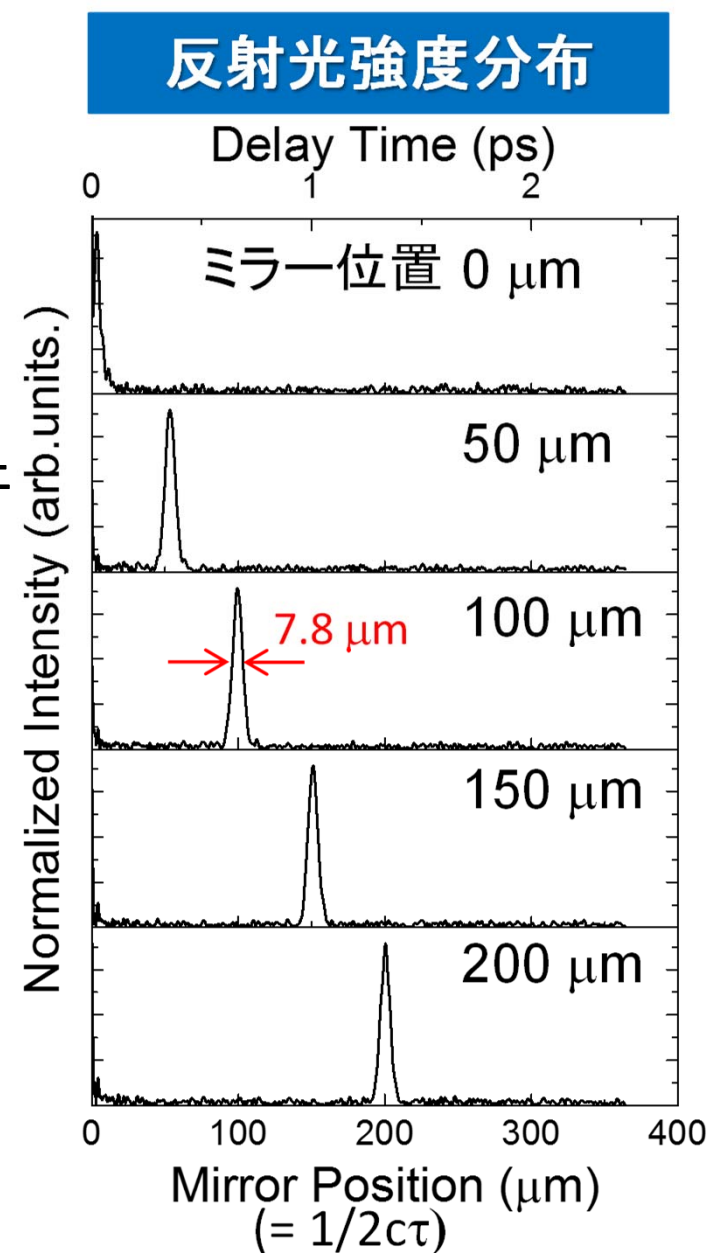
波数軸に対する干渉スペクトル

ミラーサンプルを用いた点拡がり関数(PSF)取得

Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 04DG07 (2015).

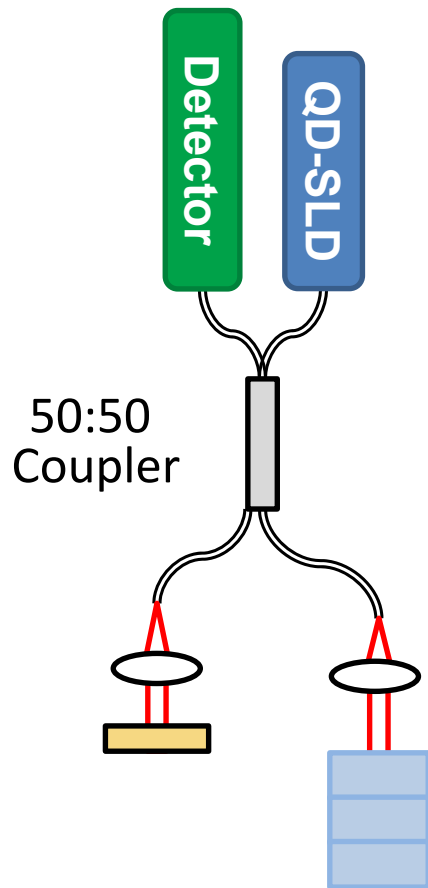


フーリエ
変換

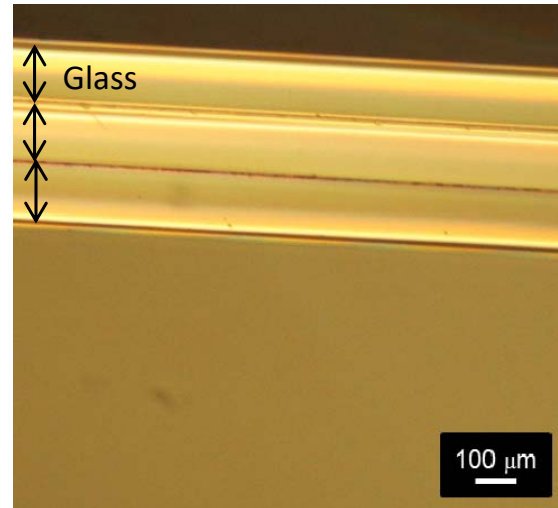


OCT image of stacked cover glasses

Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 04DG07 (2015).

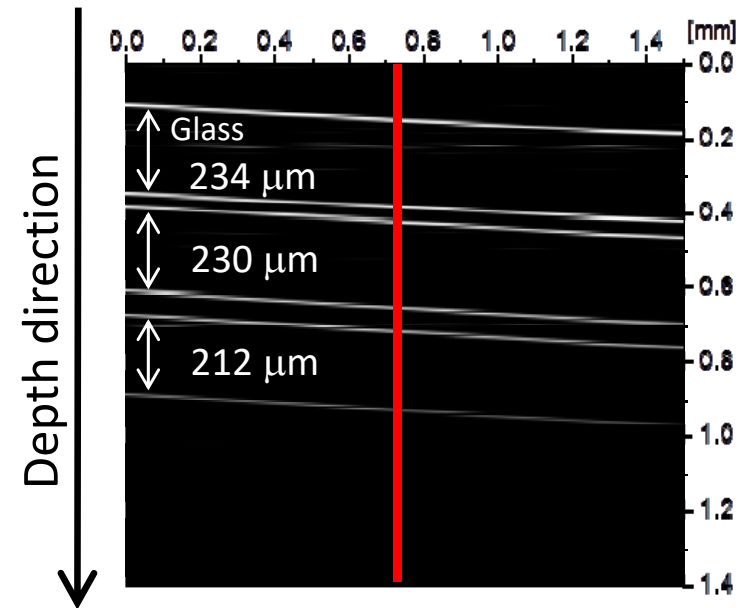


Optical microscope image



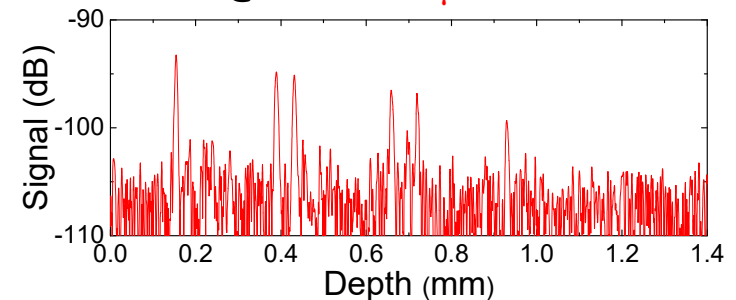
A stacking of three
cover glasses
Refractive index ≈ 1.5
Thickness $\approx 150 \mu\text{m}$ per
glass

QD-SLD



Depth profile

FWHM@-3dB = **7.8 μm**

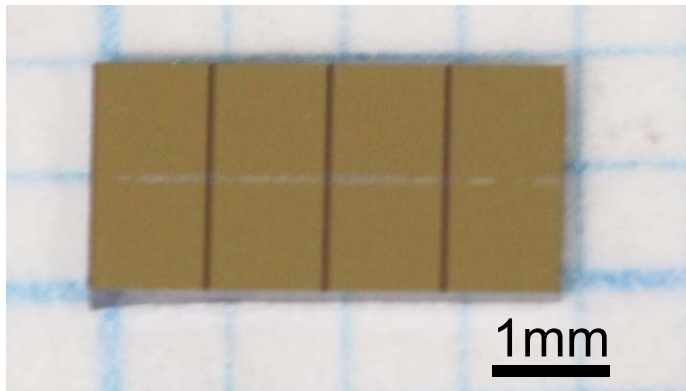
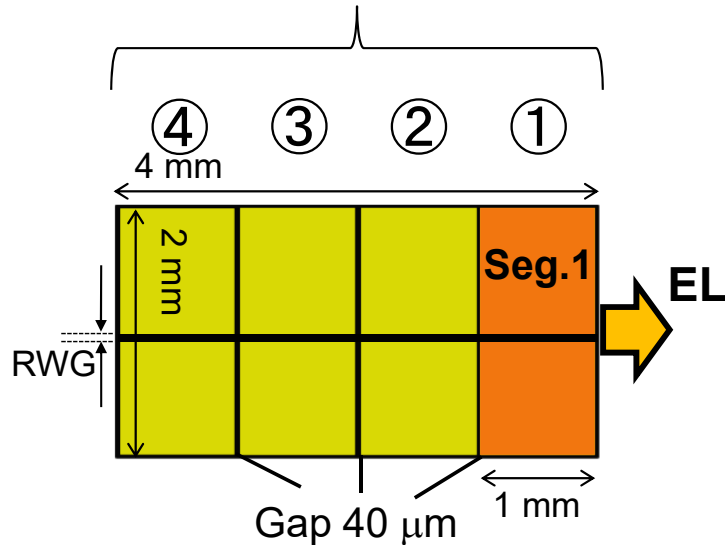


OCT imaging with high axial resolution was performed by using QD-SLD.

Segmented contacts formed on QD-SLD

J. Appl. Phys. **119**, 083107 (2016).

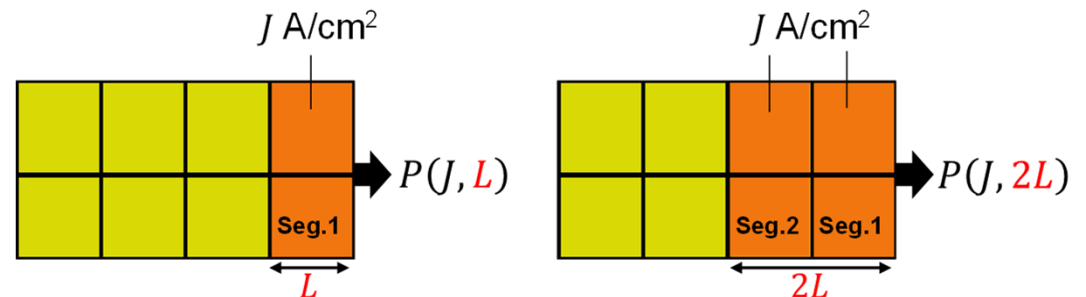
Segmented contacts



Segmented contacts can be used for...

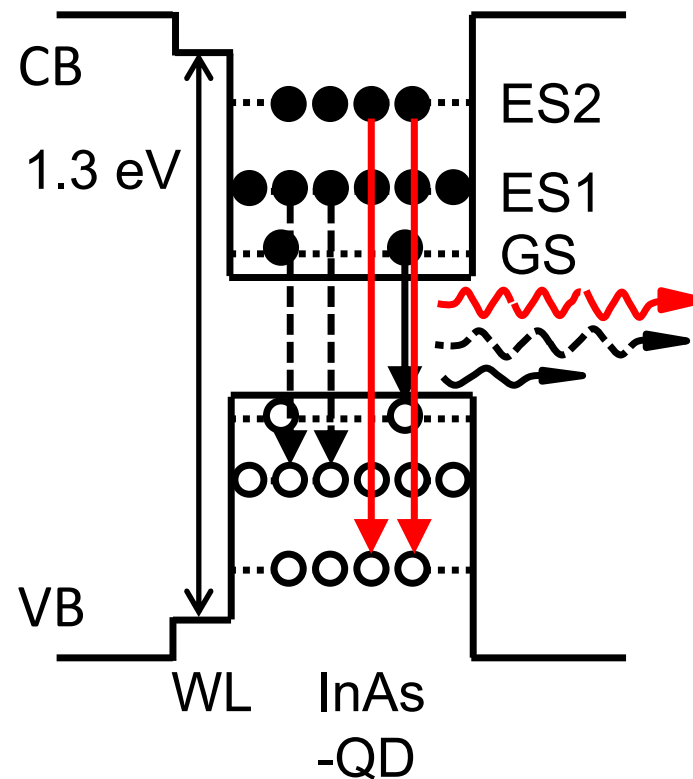
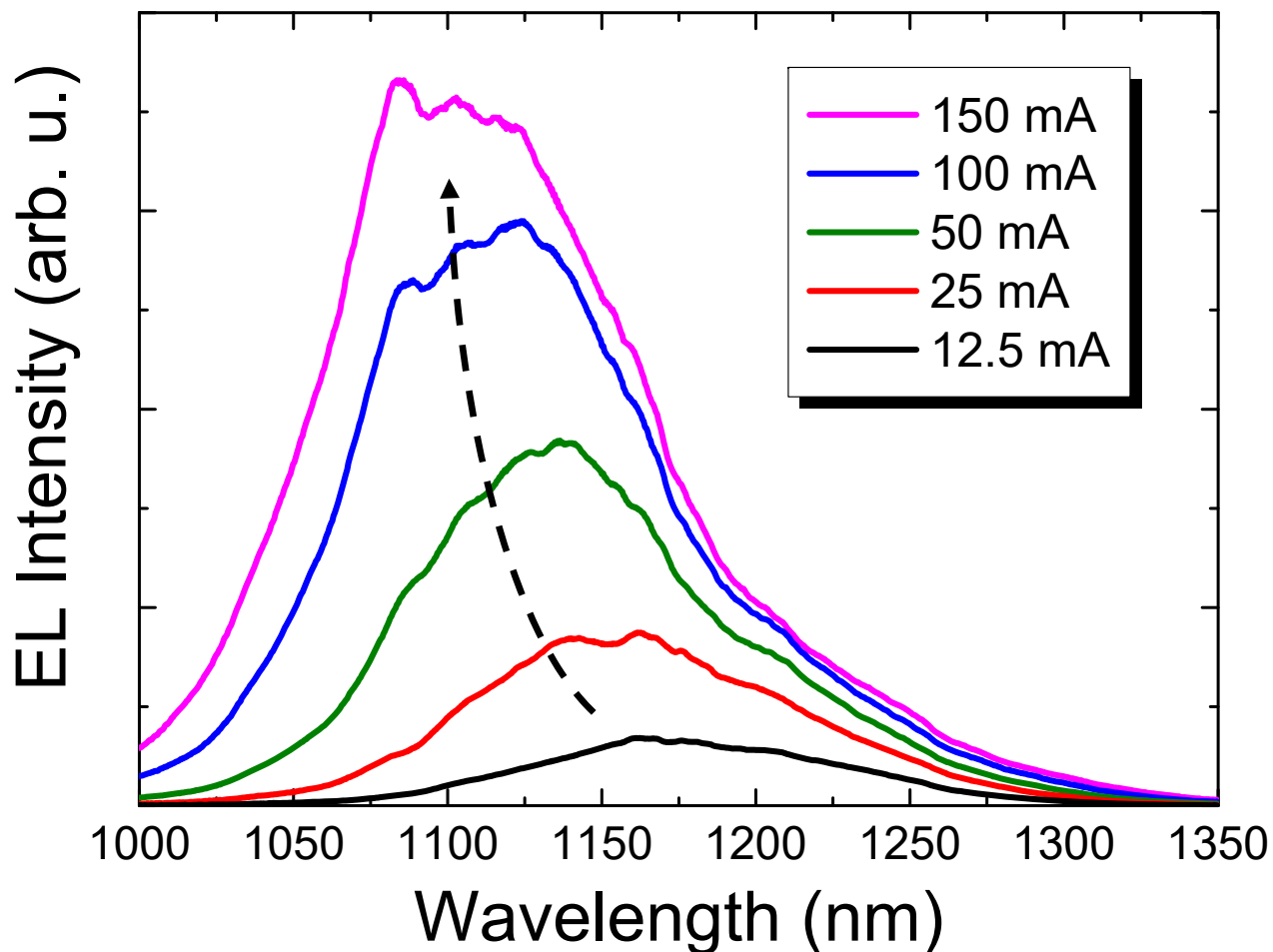
1. Higher injection current density
-> Emissions from higher excited states of QDs due to state-filling
2. Suppression of lasing as the rest regions play a role of optical absorber
3. Gain measurement

$$\text{Net Modal Gain} = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{P(J, 2L)}{P(J, L)} - 1 \right) \quad [\text{cm}^{-1}]$$



EL spectra as a function of injection current

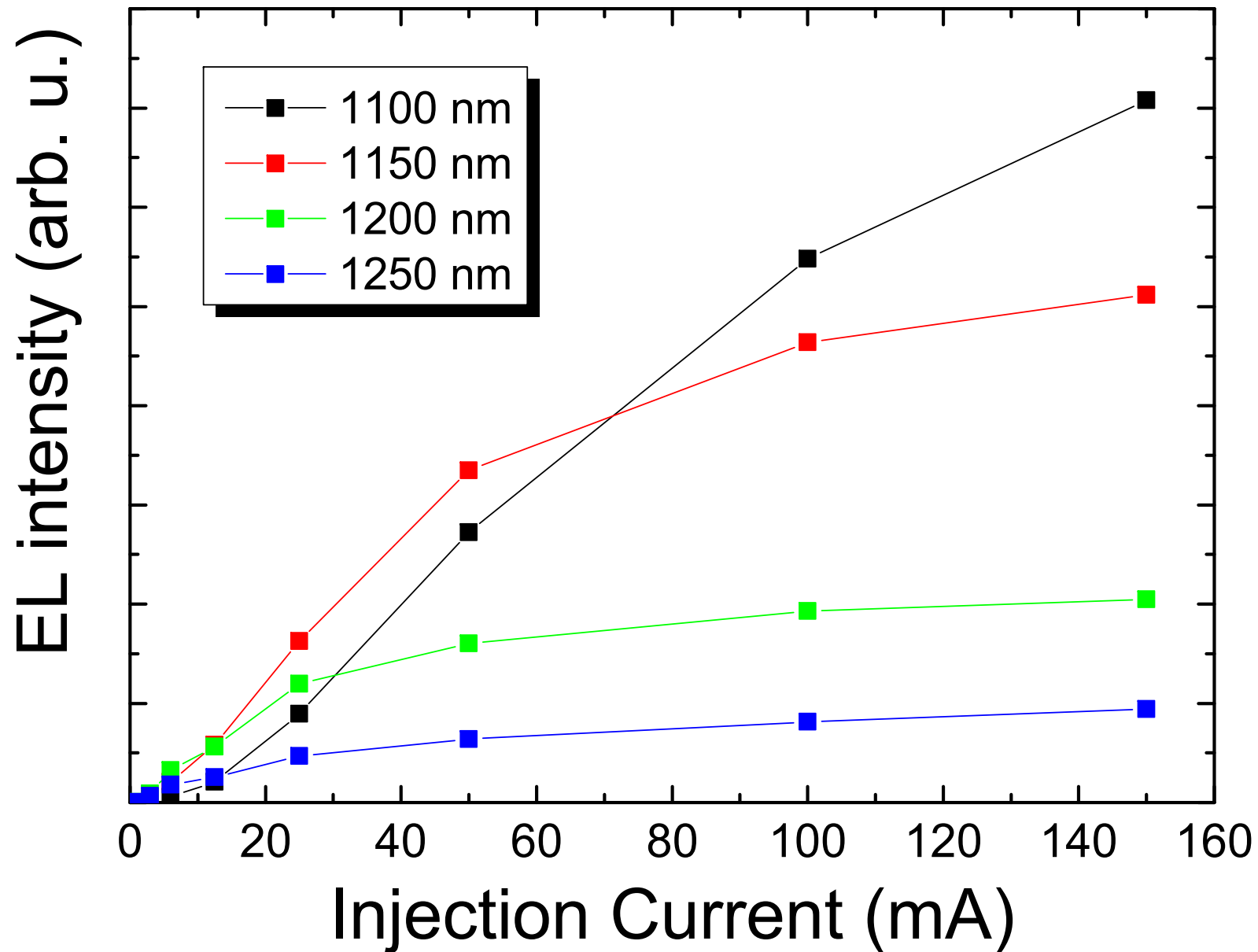
J. Appl. Phys. **119**, 083107 (2016).



Emissions from higher excited states (ES1, ES2) in addition to the GS result in broadened and blue-shifted spectrum.

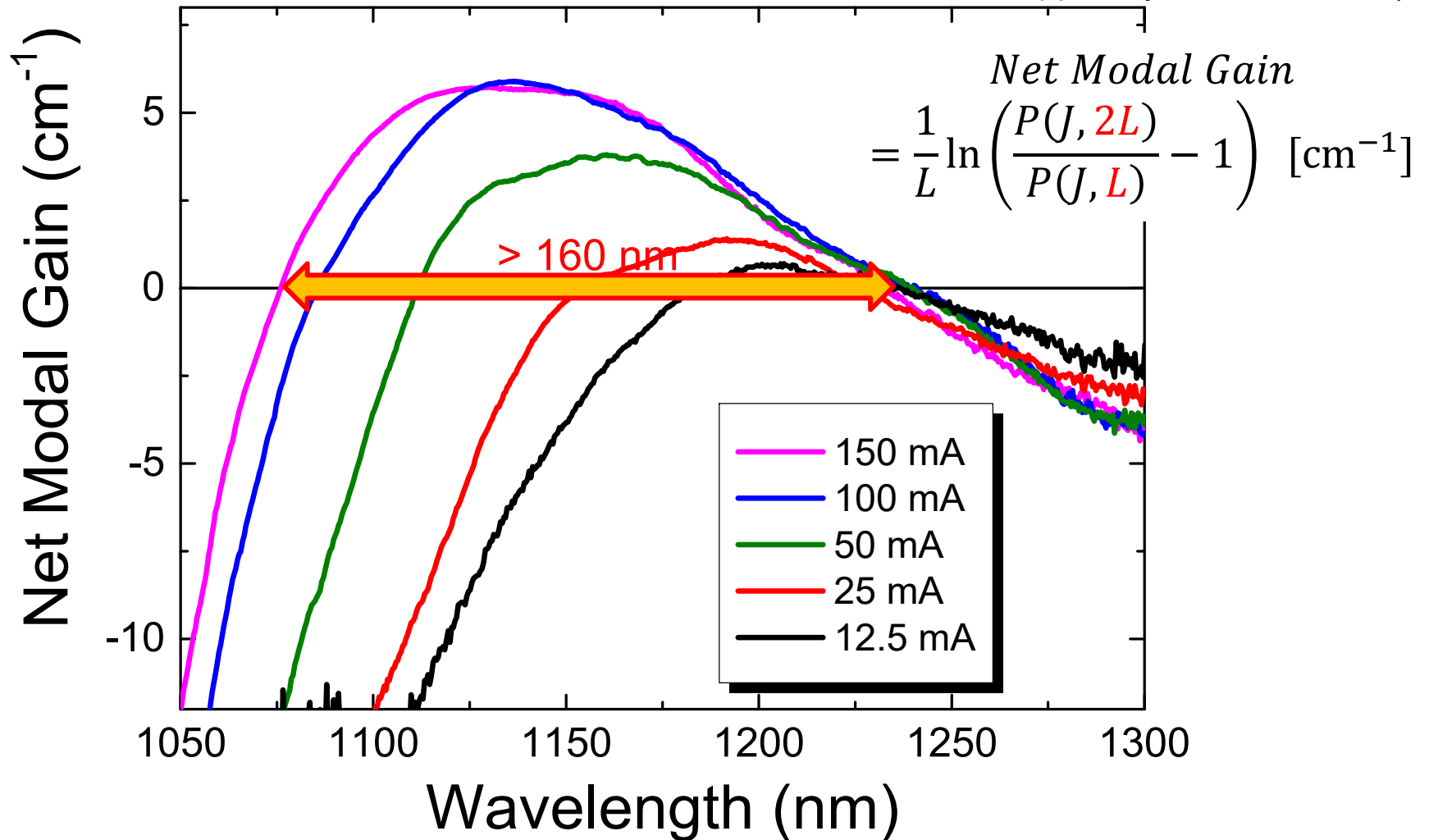
EL intensity vs. injection current

J. Appl. Phys. **119**, 083107 (2016).



Gain spectra as a function of injection current

J. Appl. Phys. **119**, 083107 (2016).



Gain spectrum indicates extension of gain bandwidth with increase in injection current, which can be attributed to ES1, ES2 stimulated emissions.

➔ Broadband ASE (superluminescent diode) was demonstrated

まとめ

- ナノ材料である量子ドットを用いて、医療用OCTの高分解能化に寄与する近赤外広帯域光源デバイス(QD-SLD)を作製
- OCT画像の高性能化に必要な、広帯域、近赤外波長、ディップレスなスペクトル形状を実現
- 分割電極を用いて、より高次のQD発光を活用し、最大ゲイン幅160nmを得た
- QD-SLDのOCT導入および画像取得を行い、OCT画像の光軸分解能向上($\sim 4\mu\text{m}$ in air)を確認

Acknowledgements

Research

Wakayama Univ.

Hiroshi Shibata, Takuma Yasuda



NIMS Nanofabrication Platform

Dr. E. Watanabe, Dr. H. Osato, Dr. N. Ikeda, Dr. Y. Sugimoto



Univ. Sheffield

Dr. E. Clarke, Dr. D. T. D. Childs, Prof. R. Hogg



Think-Lands Co., Ltd.

Mr. K. Furuki, Mr. K. Miyaji



Financial support

- Grant-in-Aid for Scientific Research (KAKENHI)
(25286052, 16H03858)
- The Terumo Foundation for Life Sciences and Arts
- The Canon Foundation
- Research Support Project of Wakayama University

