

# 栖原研究室 (集積光電子デバイス領域)

<http://ioe.eei.eng.osaka-u.ac.jp>

## 研究内容

将来の光通信や光情報処理、量子情報処理を支える

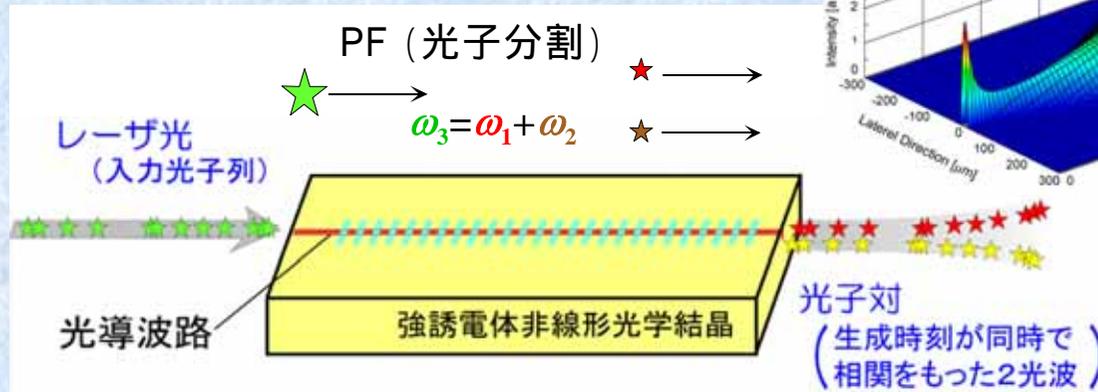
### 先端的な集積光電子デバイス

- 光通信用光集積回路
- 超高速信号処理用光集積回路
- 半導体量子井戸レーザ集積回路
- 光メモリ・センサ用光集積回路
- 集積量子フォトニックデバイス

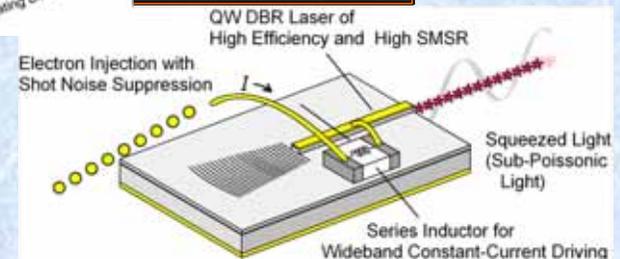
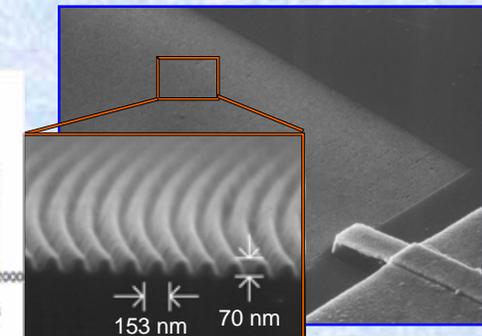


光集積回路作製用電子ビーム描画装置

設計理論 シミュレーション 作製技術開発  
デバイス作製・実験・実証



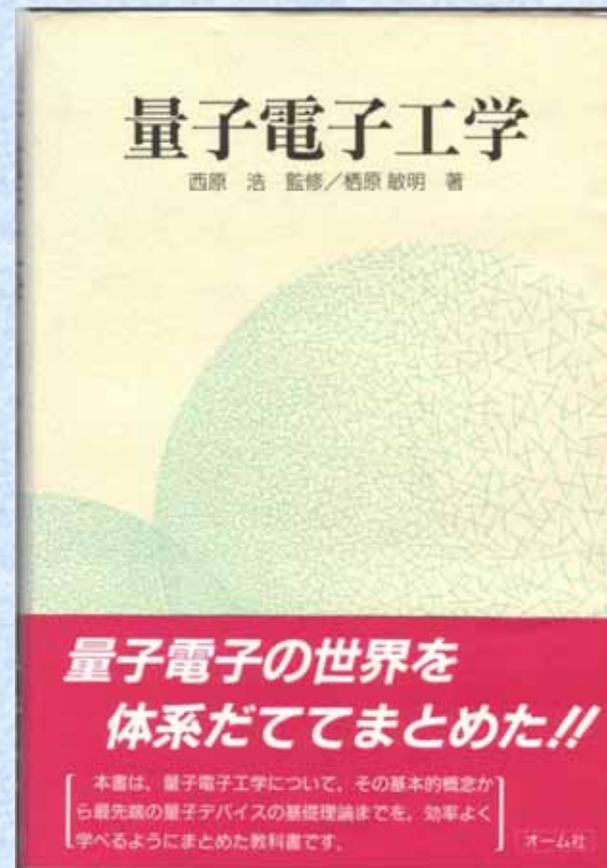
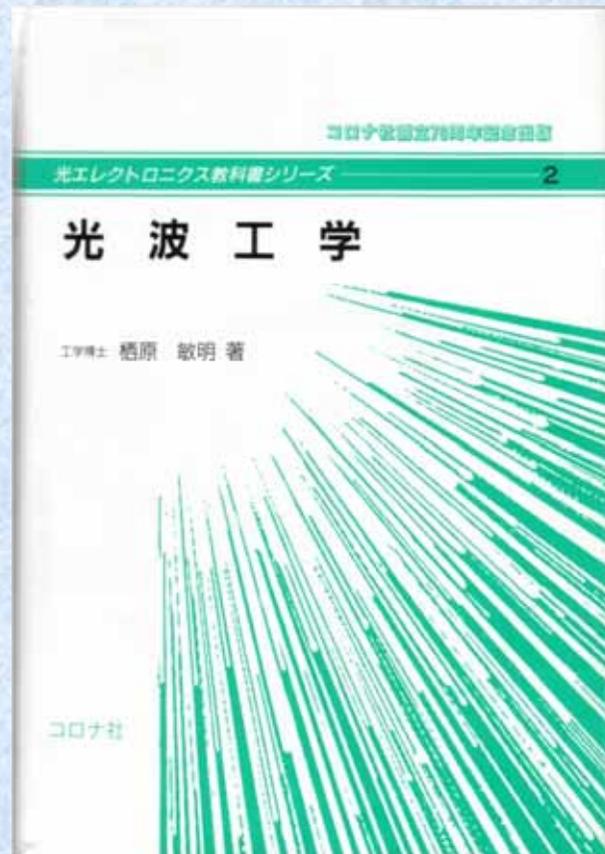
量子フォトニックデバイスの例



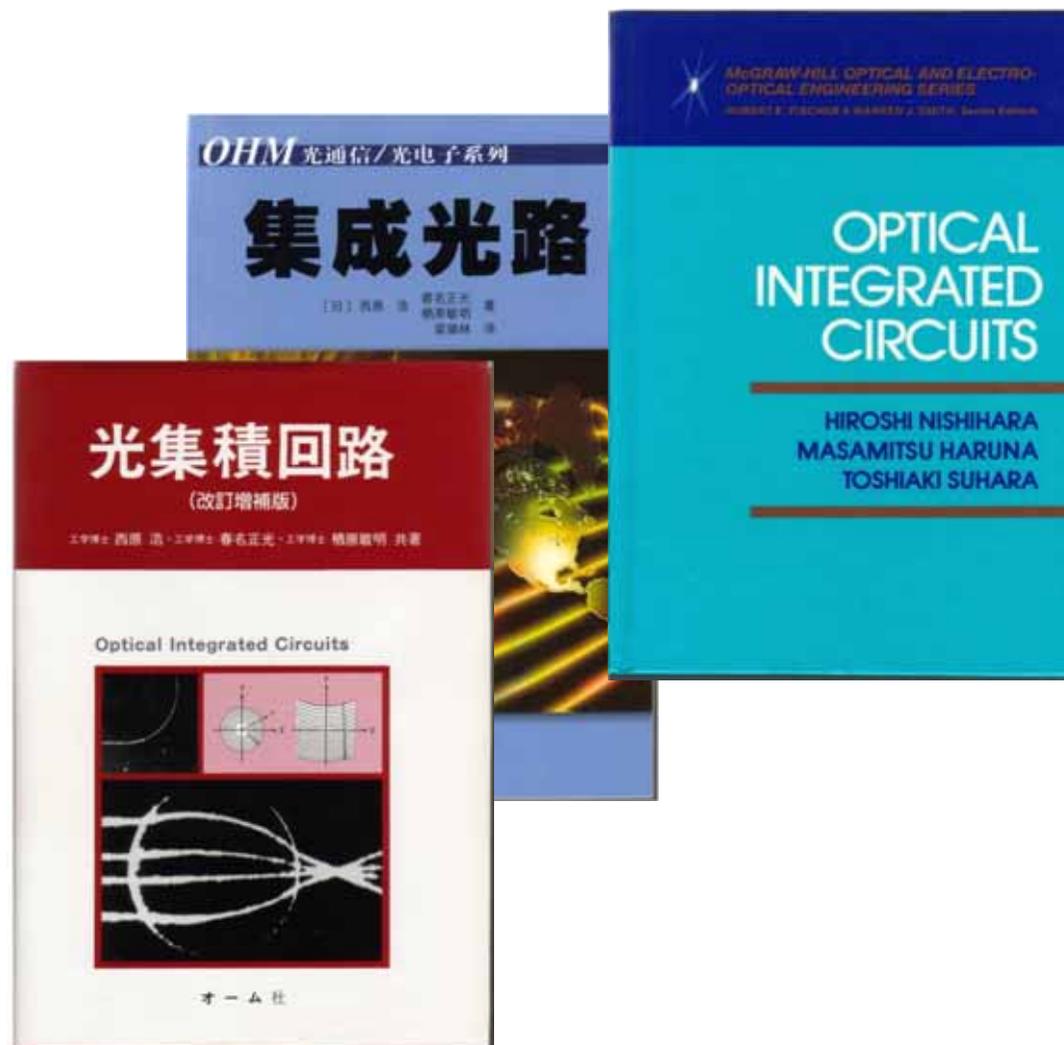
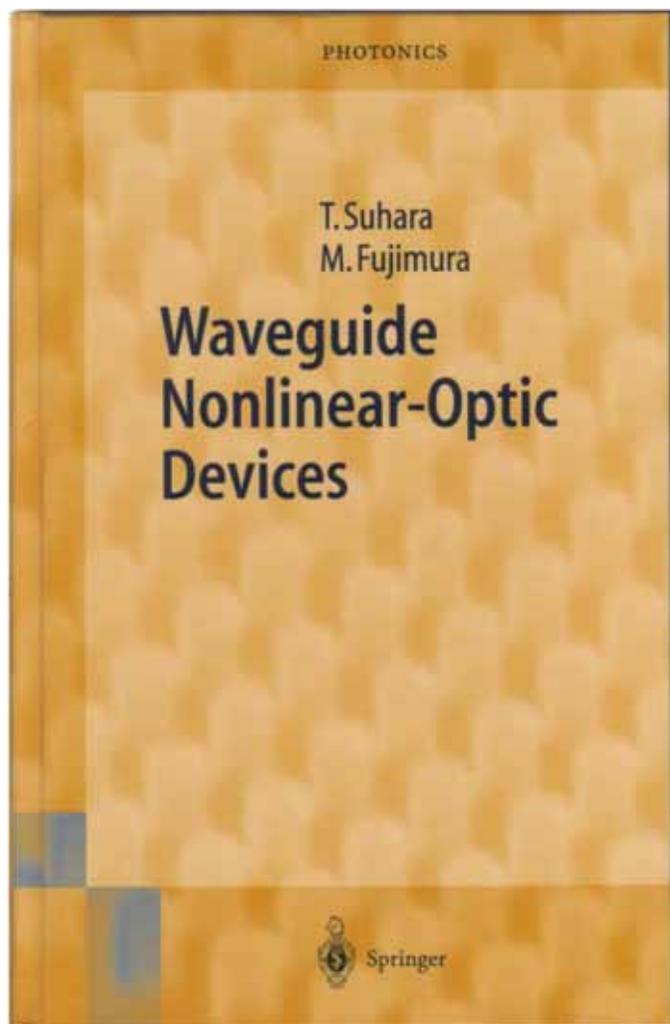
集積半導体量子井戸レーザの例

大学院講義： 先端エレクトロニクスデバイス工学特論  
光波電子工学  
量子光電子工学

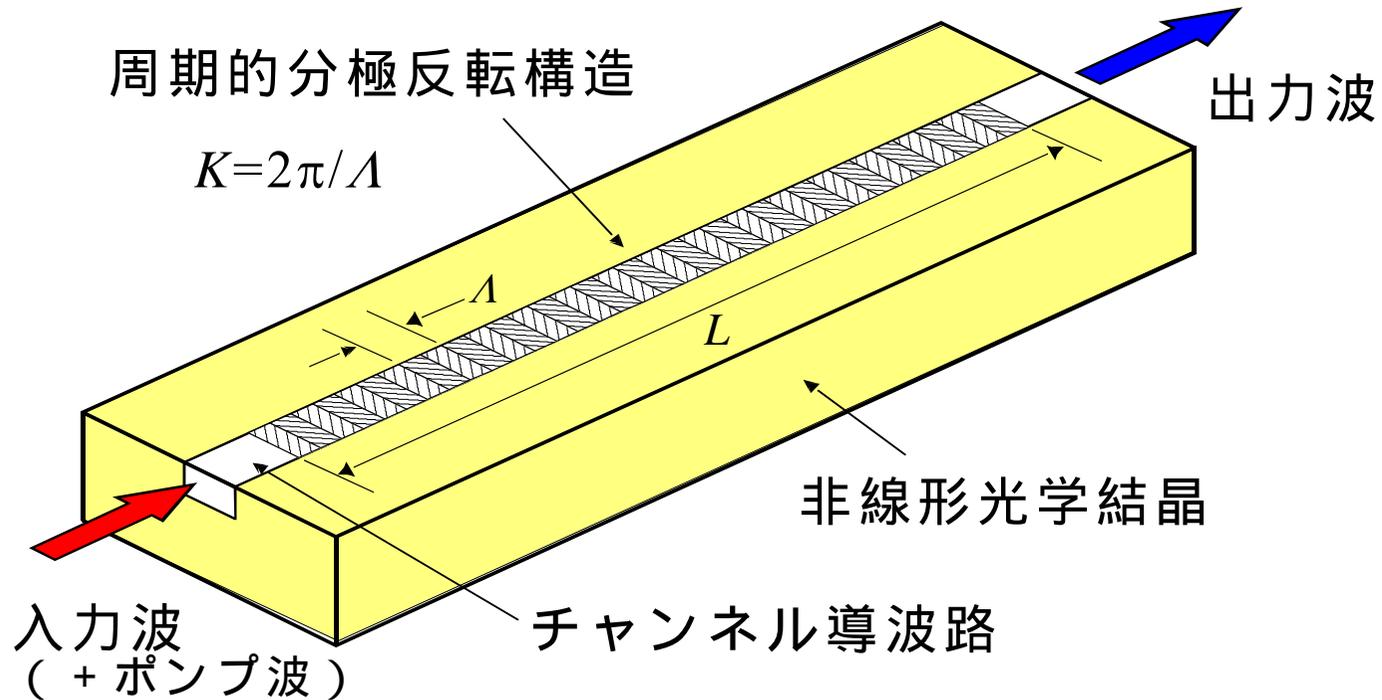
学部講義： 電磁理論、光波工学、量子エレクトロニクス



# 集積非線形光エレクトロニクスデバイス



# 導波型擬似位相整合非線形光学デバイスの基本機能と特徴



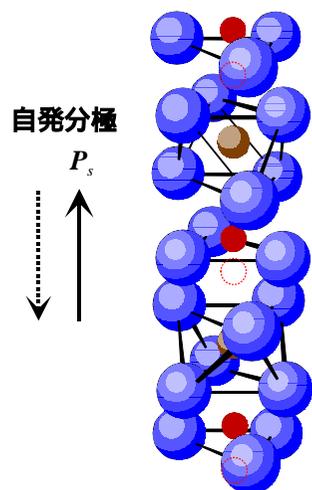
多様な波長変換形態（高調波発生、和・差周波数発生、・・・）

広波長域（赤外、可視、紫外、・・・）

超高速（ピコ秒、フェムト秒領域）

量子光学機能（光子の操作）

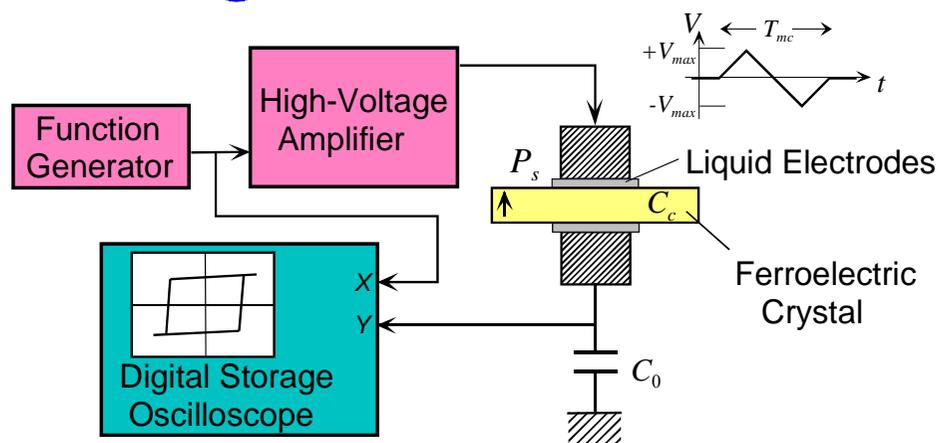
# 強誘電分極反転特性



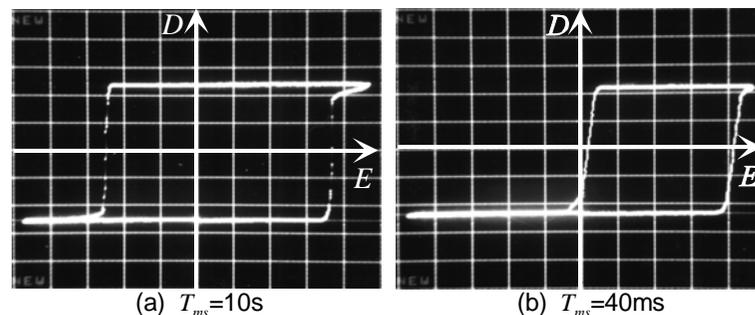
- Li ions
- Nb or Ta ions
- O ions

自発分極の反転

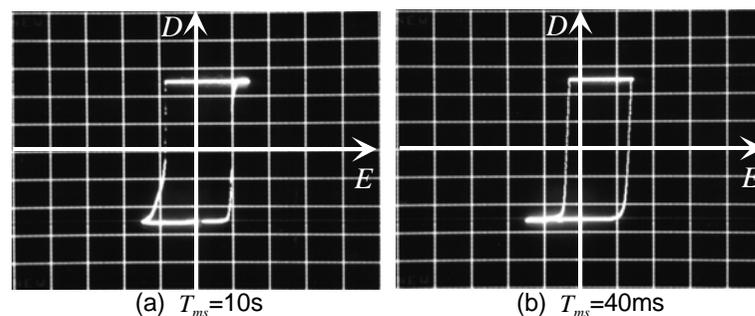
非線形係数  $d$   
の符号反転



強誘電ヒステリシスループ  
測定装置



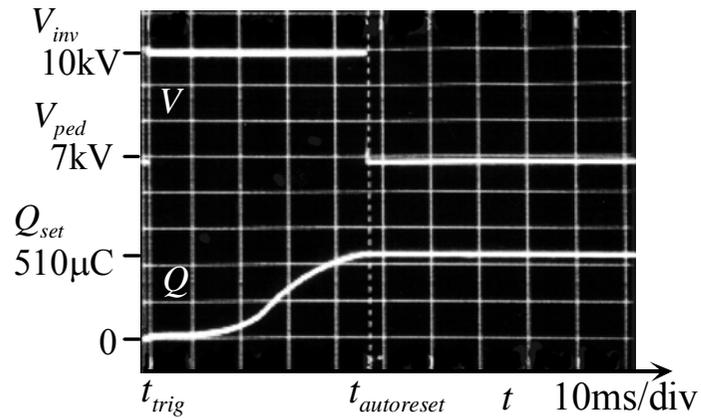
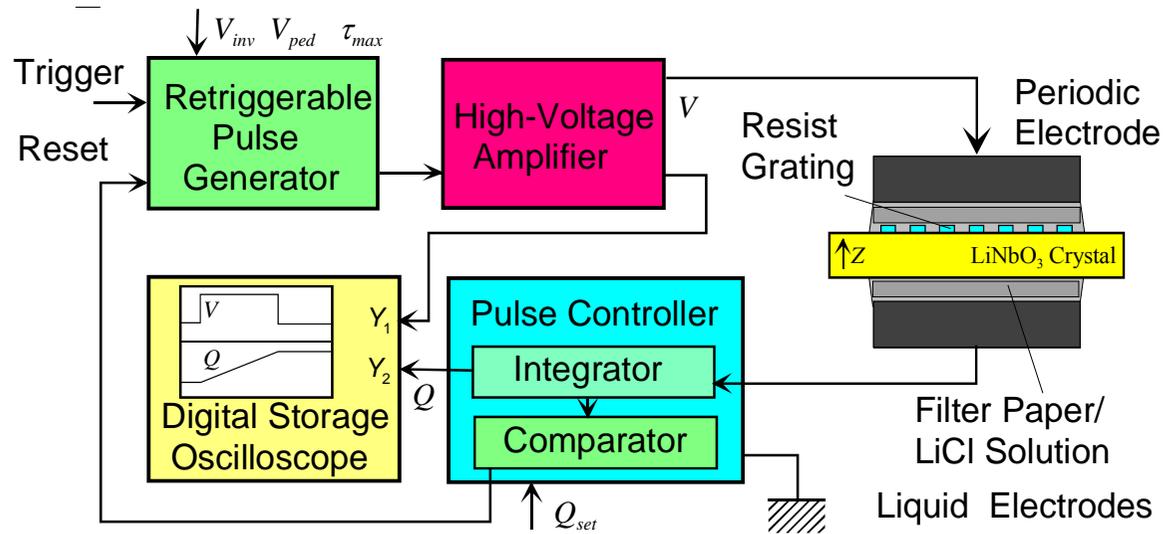
Congruent  $\text{LiNbO}_3$  結晶の  
強誘電ヒステリシスループ



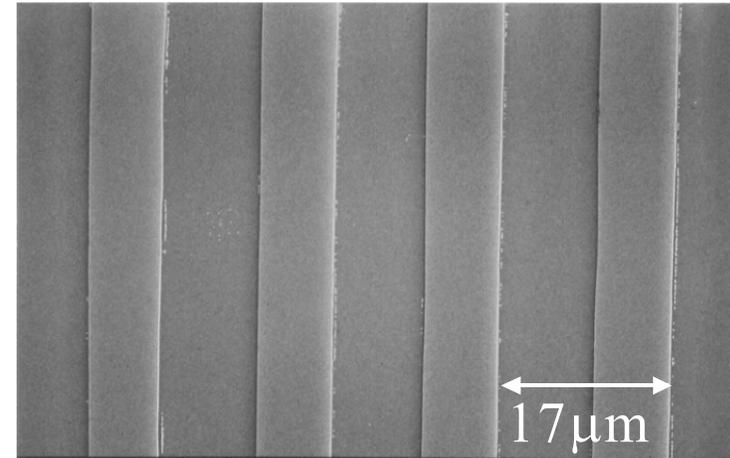
Stoichiometry  $\text{LiNbO}_3$  結晶の  
強誘電ヒステリシスループ

# 分極反転構造形成技術

## 液体周期電極 電圧パルス印加法

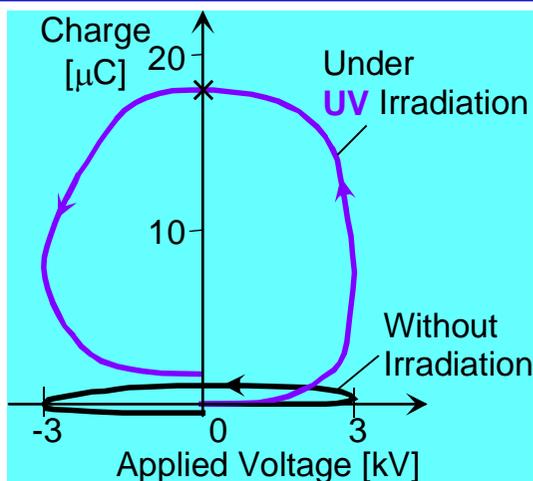


電圧・電荷 波形



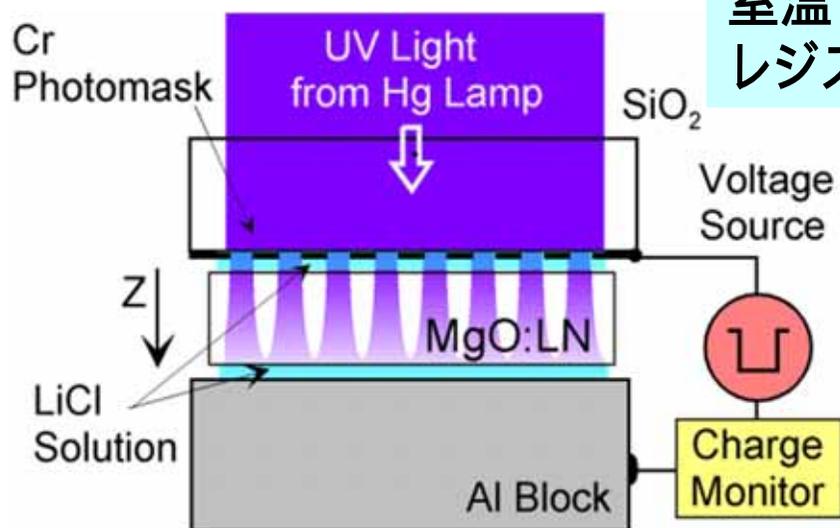
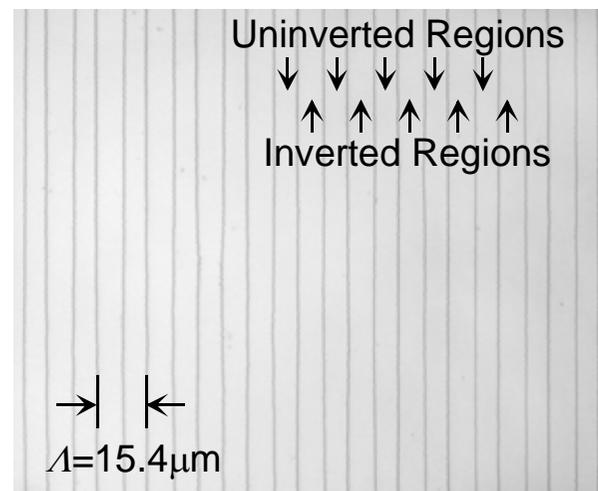
分極反転構造のSEM写真

# MgO:LiNbO<sub>3</sub>分極反転構造形成



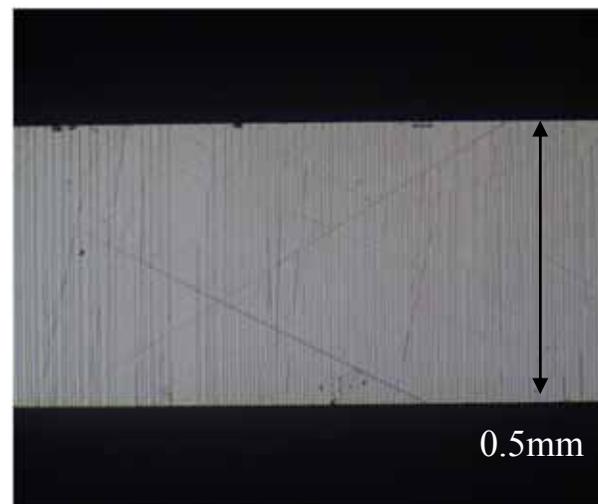
強誘電ヒステリシスループ

MgO:LiNbO<sub>3</sub> 光損傷耐性が高い



周期的分極反転構造の形成

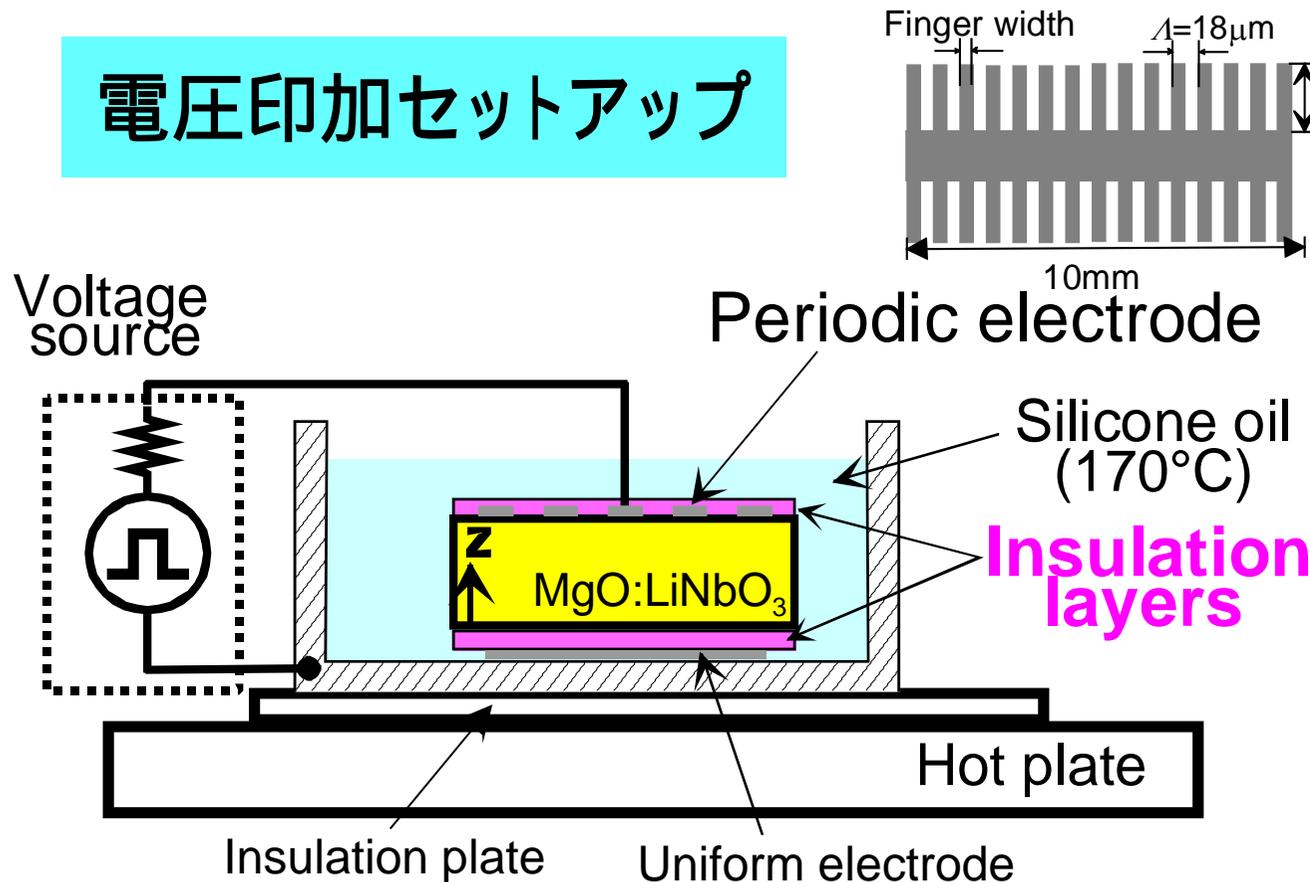
Top View



Cross Section

# 絶縁膜装荷結晶加熱電圧印加による分極反転構造形成

## 電圧印加セットアップ



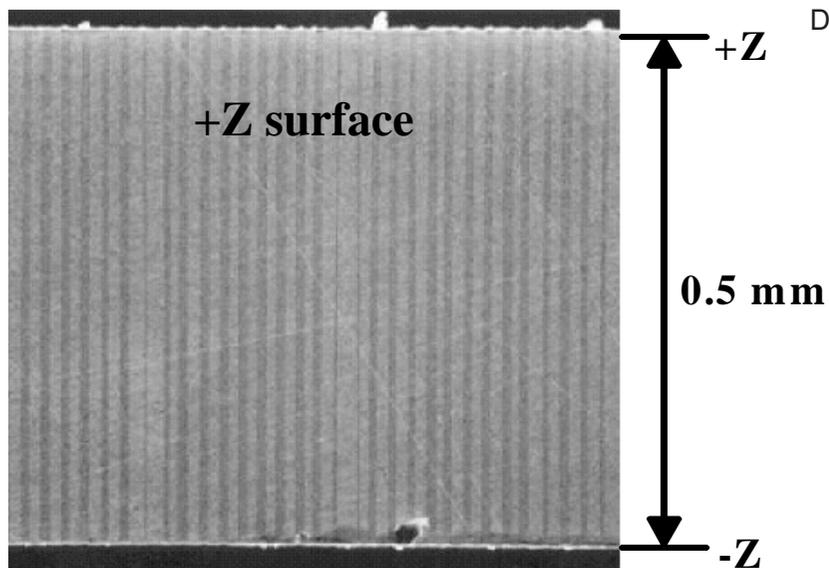
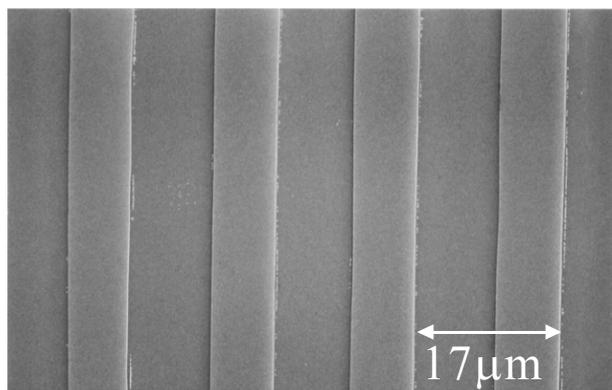
## 電圧印加条件

絶縁膜: SiO<sub>2</sub>  
膜厚: - Z面上 2 $\mu\text{m}$   
+ Z面上 1 $\mu\text{m}$   
パルス電圧: 1.3~2.2kV  
パルス幅: 0.3~150ms  
パルス周期: 10~180s  
印加回数: 60~200回  
電極指幅: 3 $\mu\text{m}$ , 6 $\mu\text{m}$

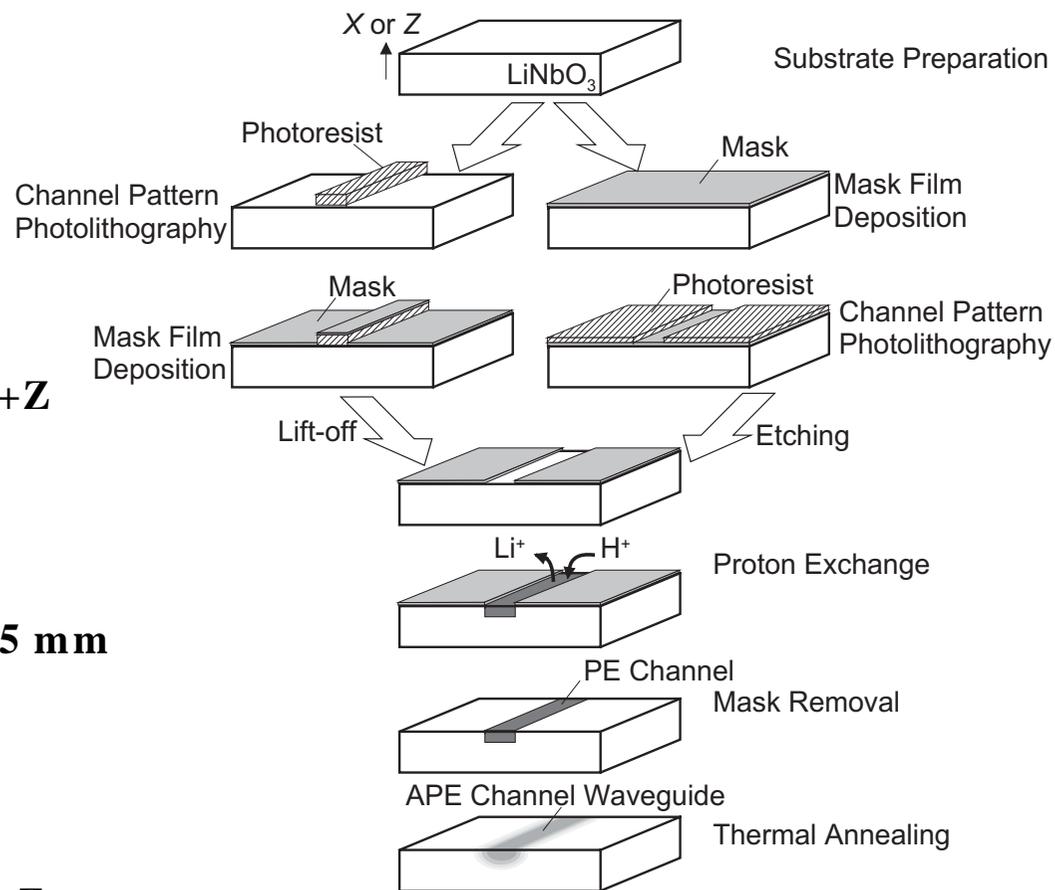
絶縁膜装荷により短絡回路形成回避  
パルス印加して有効に電圧を印加

# 光導波路型 擬似位相整合 非線形光学 デバイスの作製

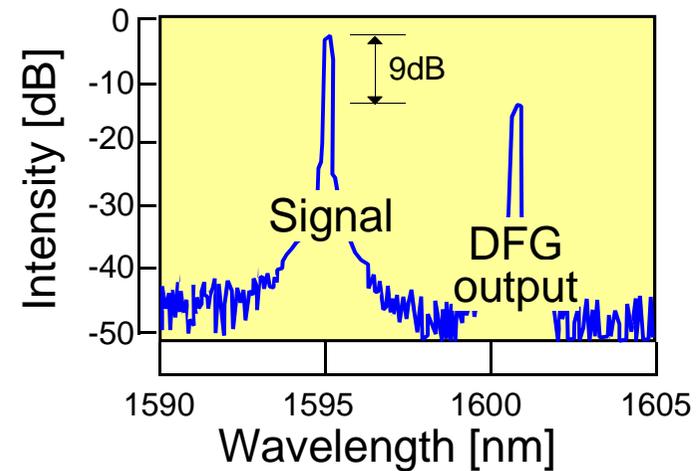
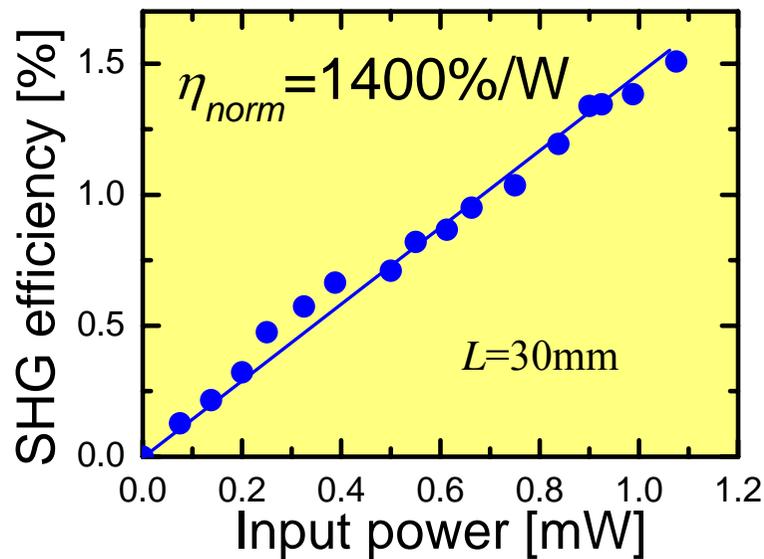
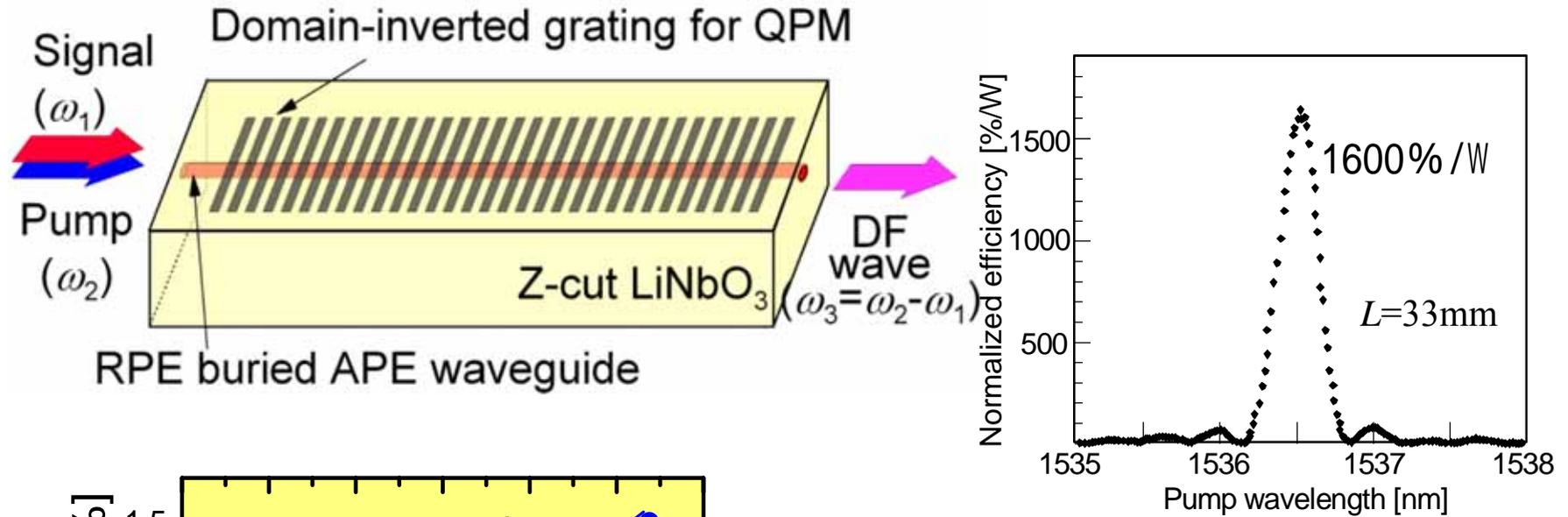
## 分極反転構造の形成



## プロトン交換光導波路の形成



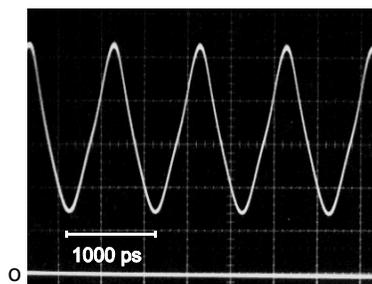
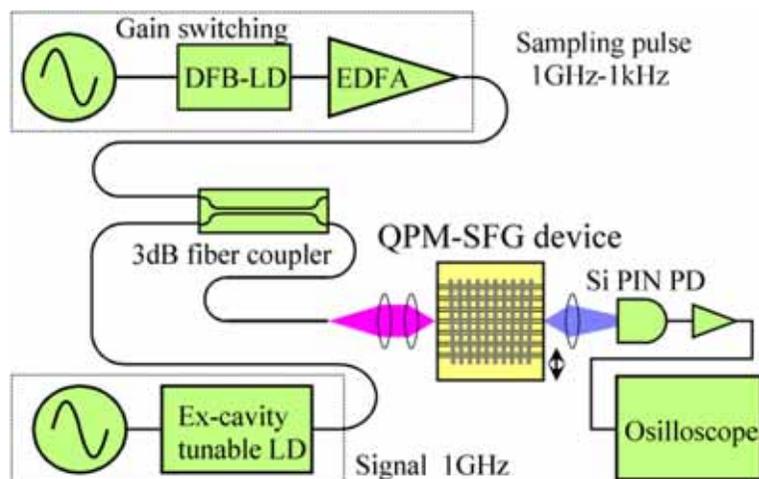
# 埋込みAPE導波路QPM-DFG波長変換デバイス



DFG 効率:  
- 9dB (12mW 励起)

# 超高速光信号処理デバイス

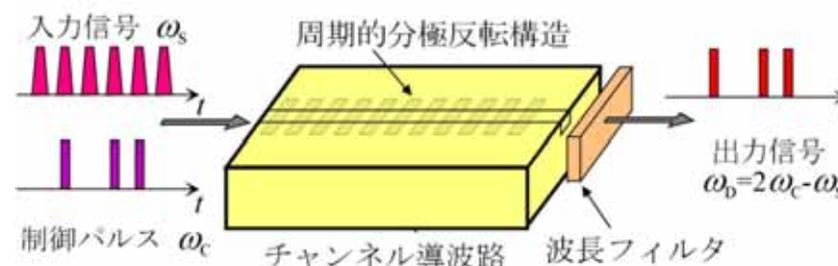
## SFG光サンプリングデバイス



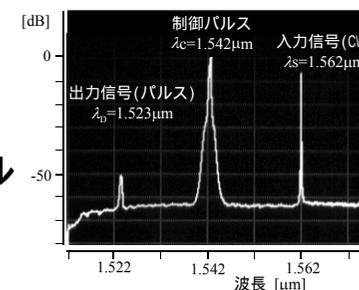
光サンプリングによる  
波形観測結果

効率 43%/W  
バルク結晶利用より  
約3桁高い

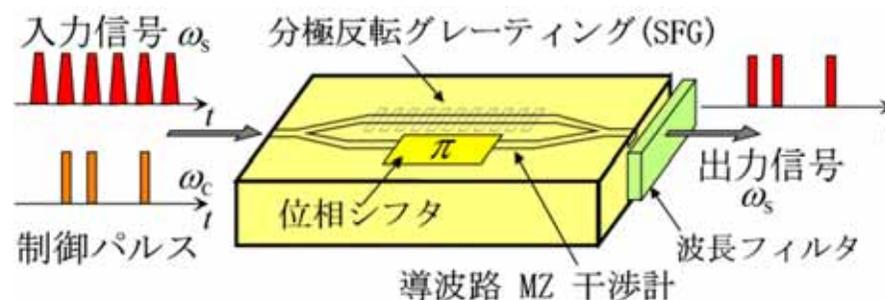
## SHG/DFG光スイッチングデバイス



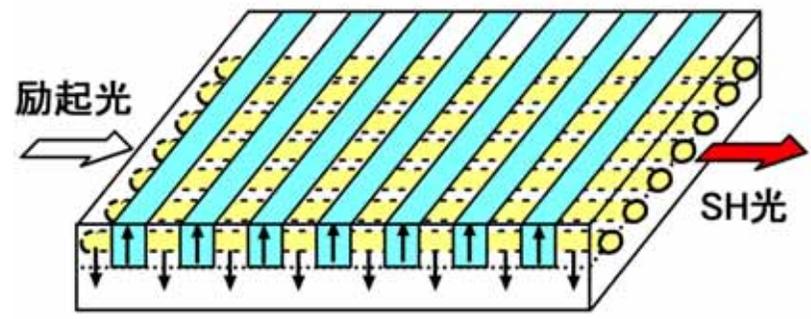
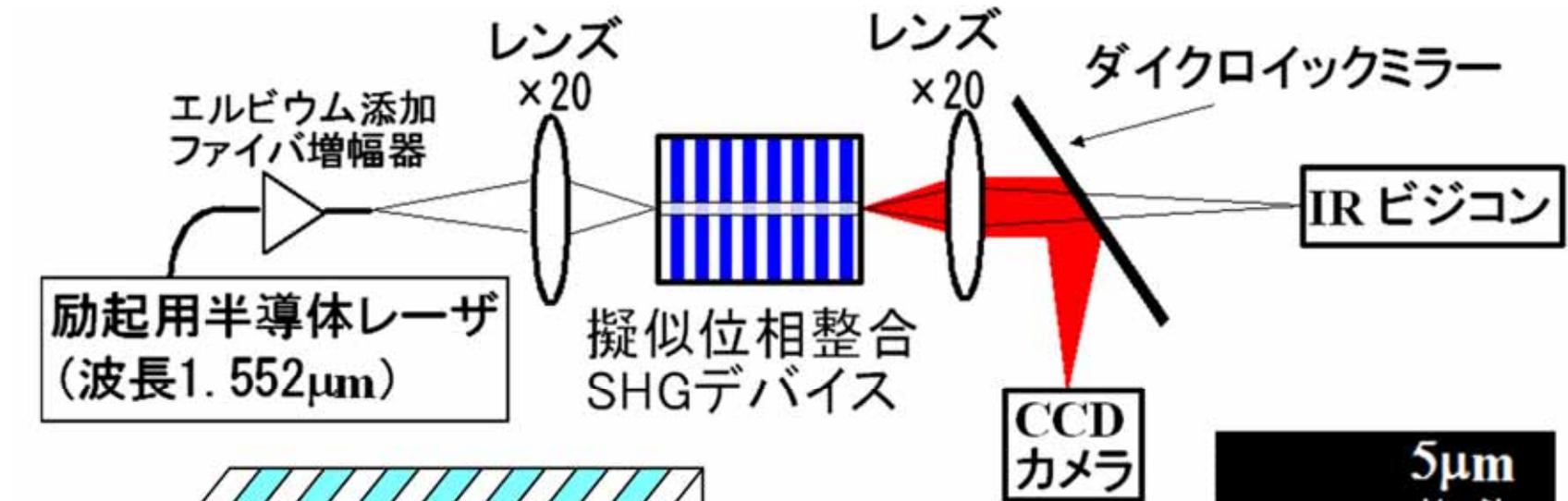
出力光のスペクトル



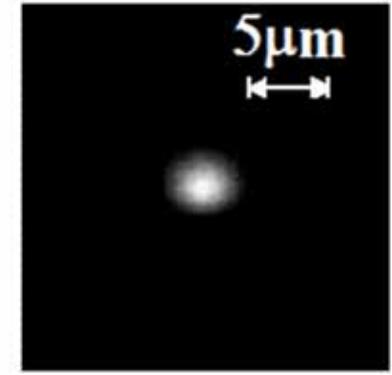
## SFG干渉計型光ゲートスイッチ



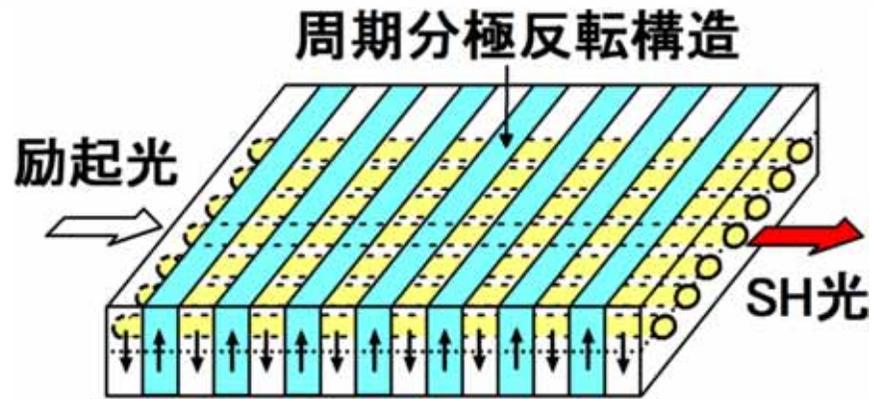
# 結晶直接接合埋込みQPM導波路非線形光学デバイス



H<sup>+</sup>拡散して  
屈折率分布  
が対称になる

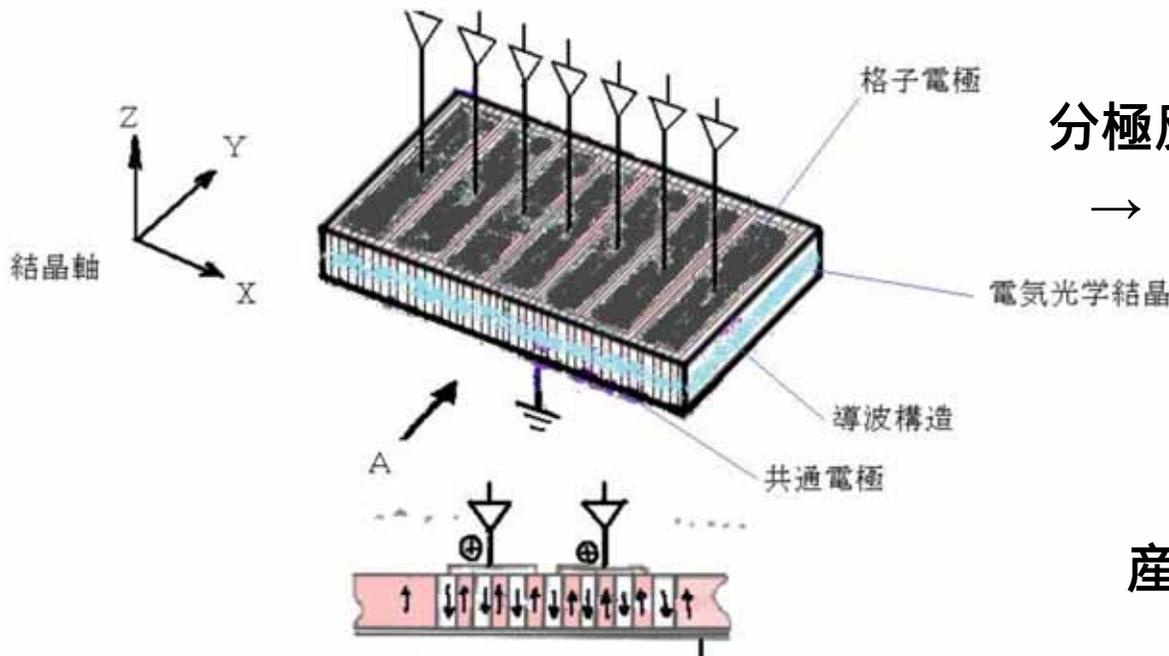


SH光近視野像



非埋込み型の2倍以上の $K$   
□変換効率増大

# MgO:LiNbO<sub>3</sub>周期分極反転構造の電気光学デバイス応用

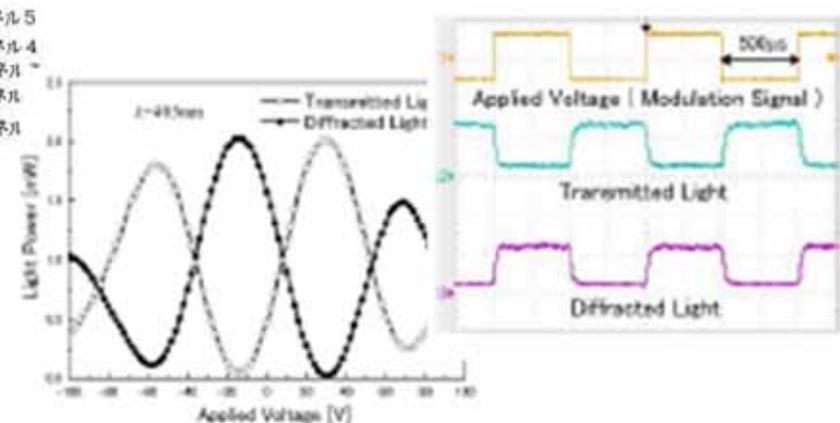
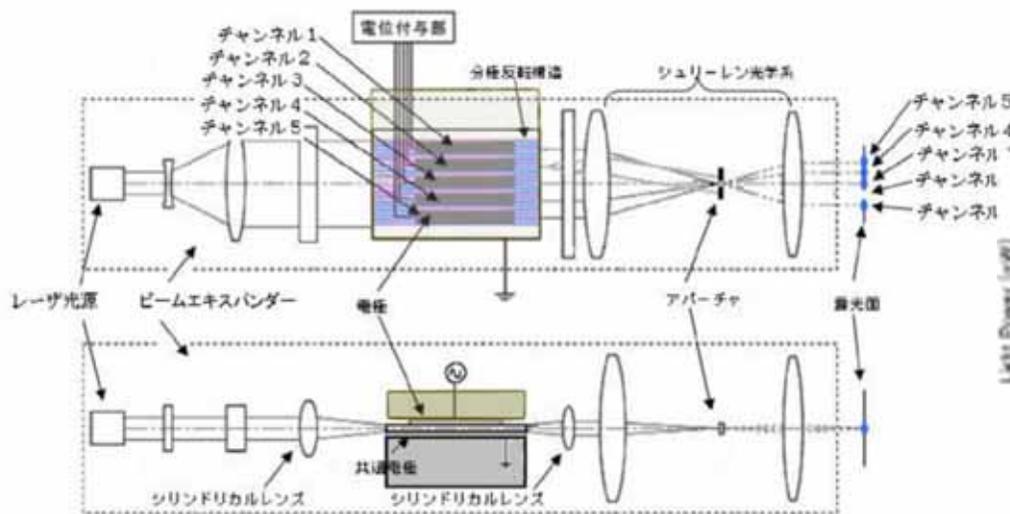


分極反転グレーティングに電界印加  
 → 屈折率変調型グレーティング  
 (EOグレーティング)

多素子集積化により  
 1次元空間変調器を実現

産業用レーザ描画装置への応用

強力紫外光の  
 高速空間変調



# 集積量子フォトニックデバイスの研究

## 量子光学機能の実現

量子フォトニックデバイス *Quantum Photonic Devices*

非線形光学により

光波の量子状態の制御 光子1個ごとの操作  
を可能にするデバイスを実現

将来応用： 量子情報処理

量子暗号

原理的に盗聴不可能な暗号？！

量子超高密度コーディング

1ビットに2ビット分の情報？！

量子テレポーテーション

量子状態の遠隔転送？！

量子コンピューティング

困難な問題の超高速計算？！

集積光デバイス技術

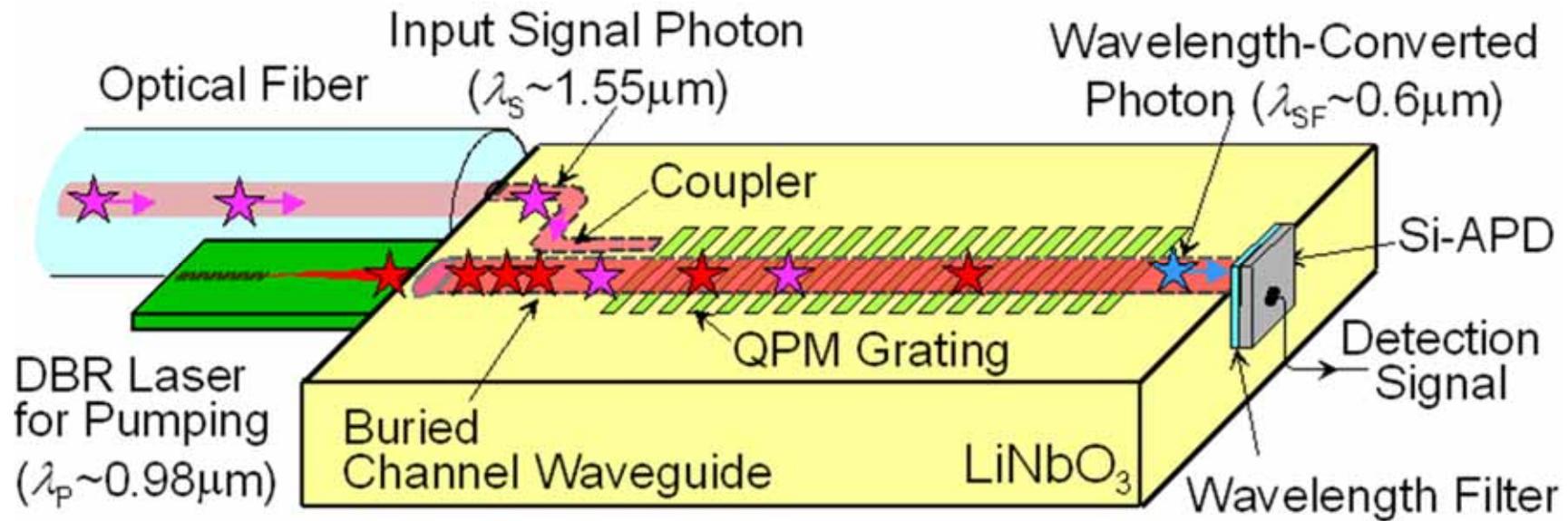
導波型擬似位相整合非線形光学デバイス

集積半導体レーザ

導波型受動素子

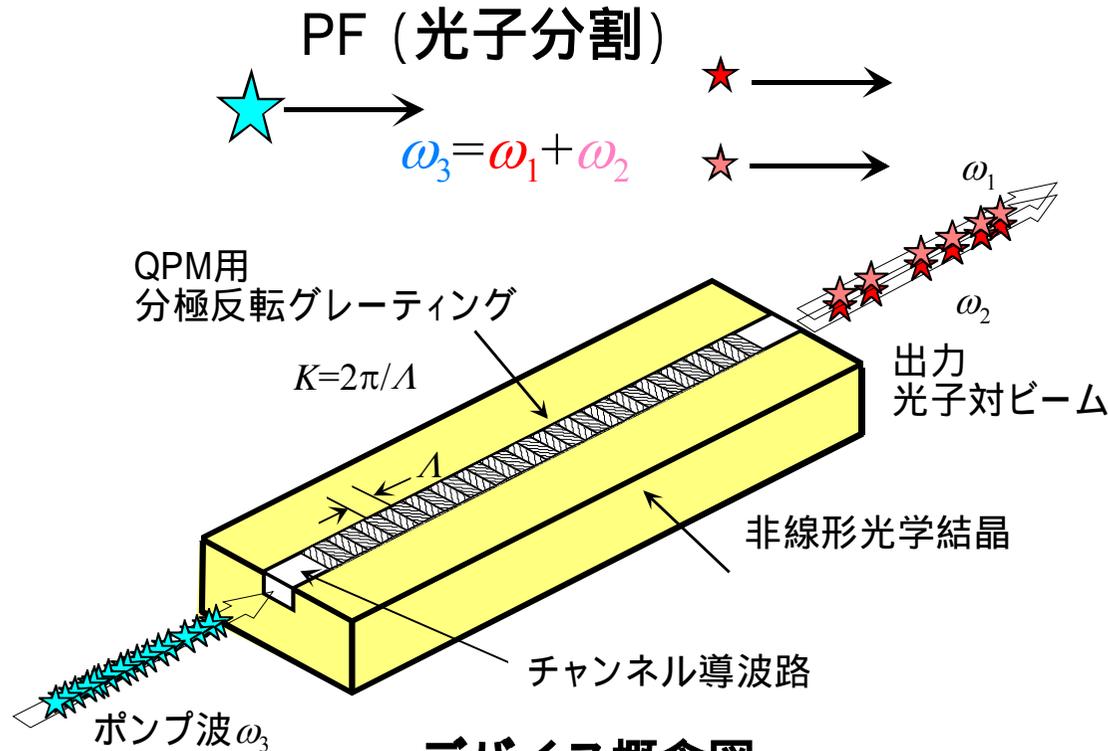
# 単一光子検出用 和周波発生型 光子波長変換デバイス

目標デバイス： 光通信波長帯単一光子検出モジュール



**Sum-Frequency Generation**

# 導波型擬似位相整合光子対発生デバイス



デバイス概念図

## 原理

2次NLOパラメトリック相互作用(パラメトリック蛍光)

Manley-Roweの関係

和周波発生  $\omega_1 + \omega_2 \rightarrow \omega_3$  の逆過程

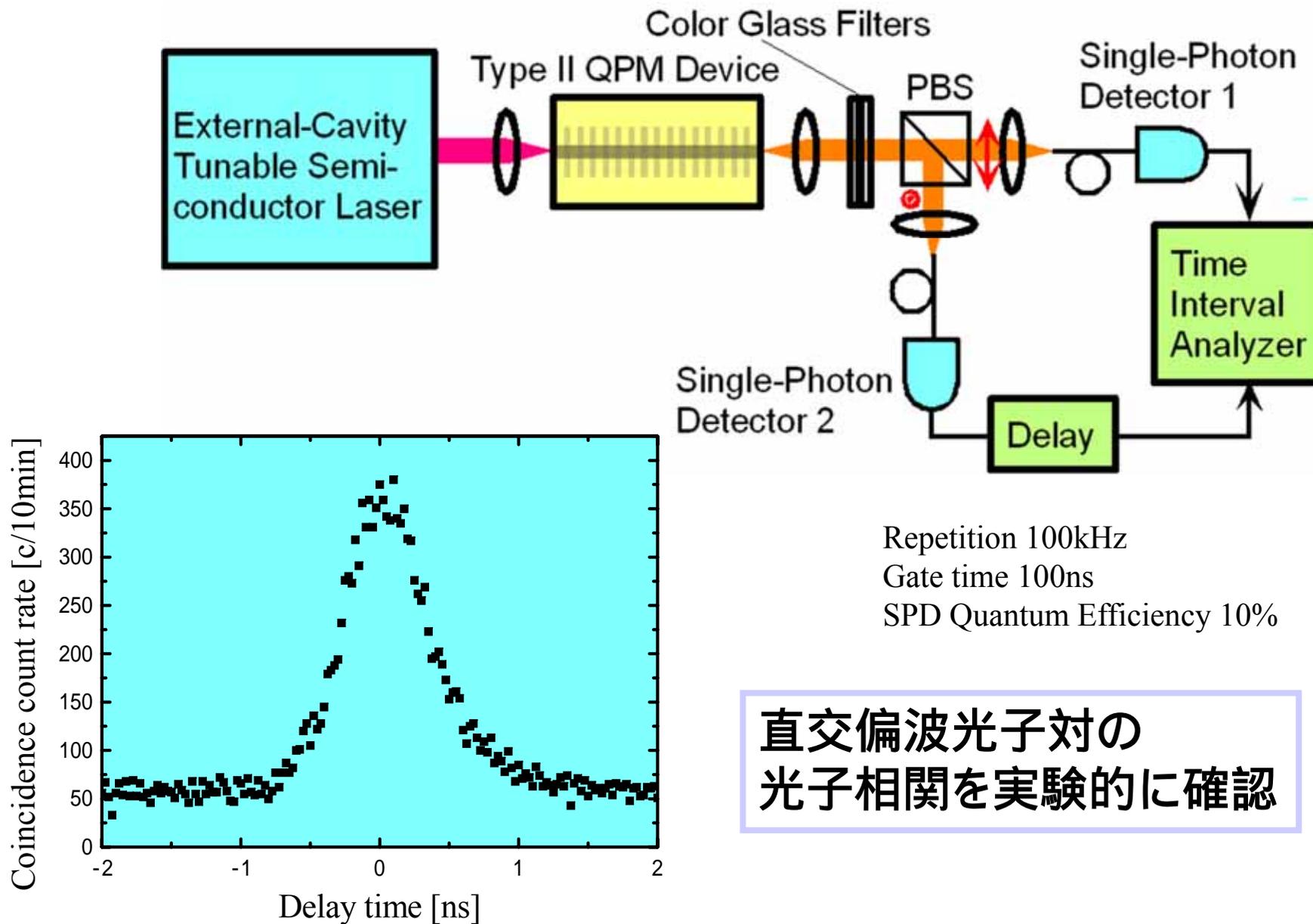
ポンプ波と入力真空揺らぎの差周波発生  $\omega_3 - (\omega_1) \rightarrow \omega_2, \omega_3 - (\omega_2) \rightarrow \omega_1$

出力波はインコヒーレント光

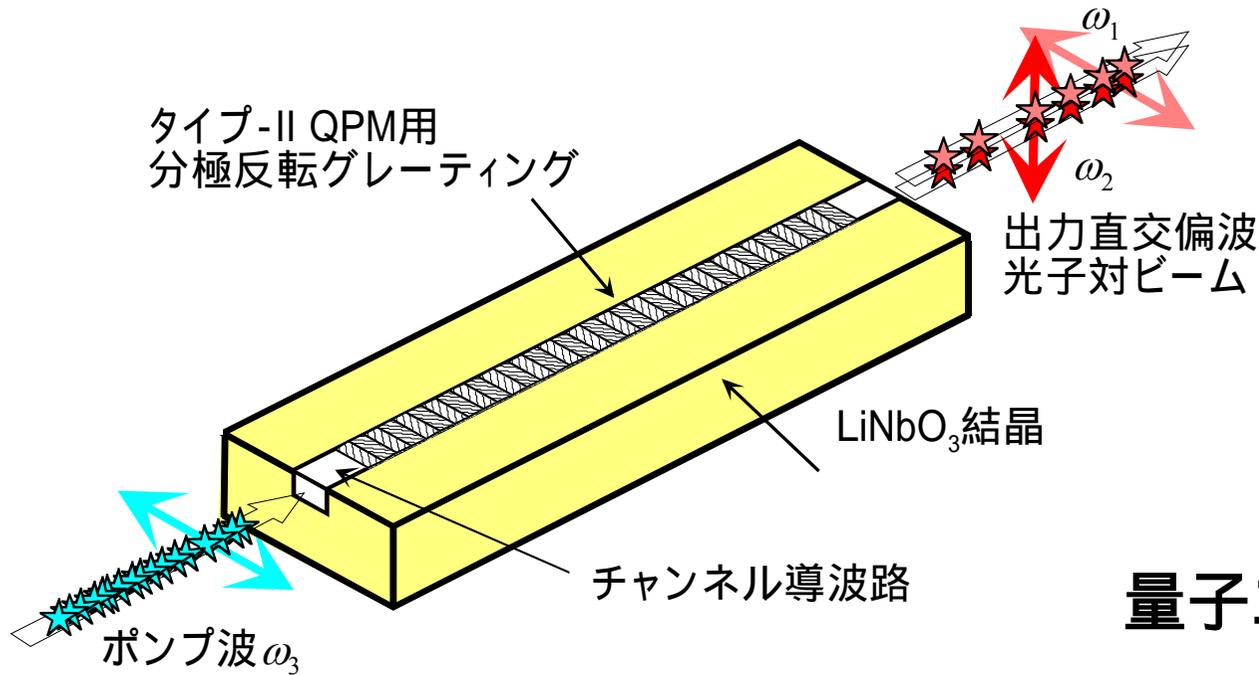
QPM周期の適切な設計で  
任意の波長域に対応  
空間的単一モード  
(ファイバとの高効率結合)

量子情報通信・処理の  
ためのキーデバイス

# 光子相関の測定

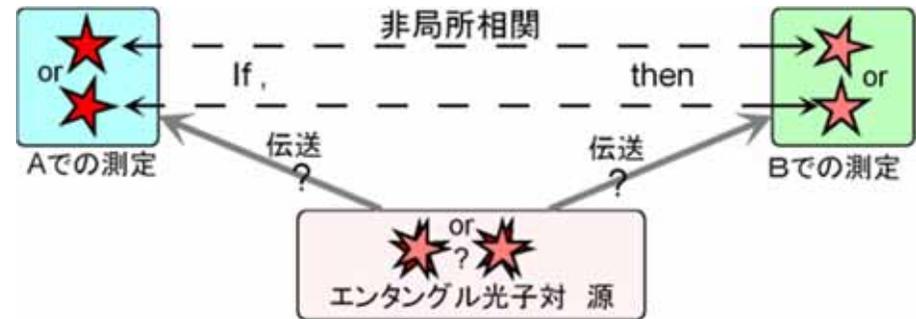


# 直交偏波光子対発生デバイス



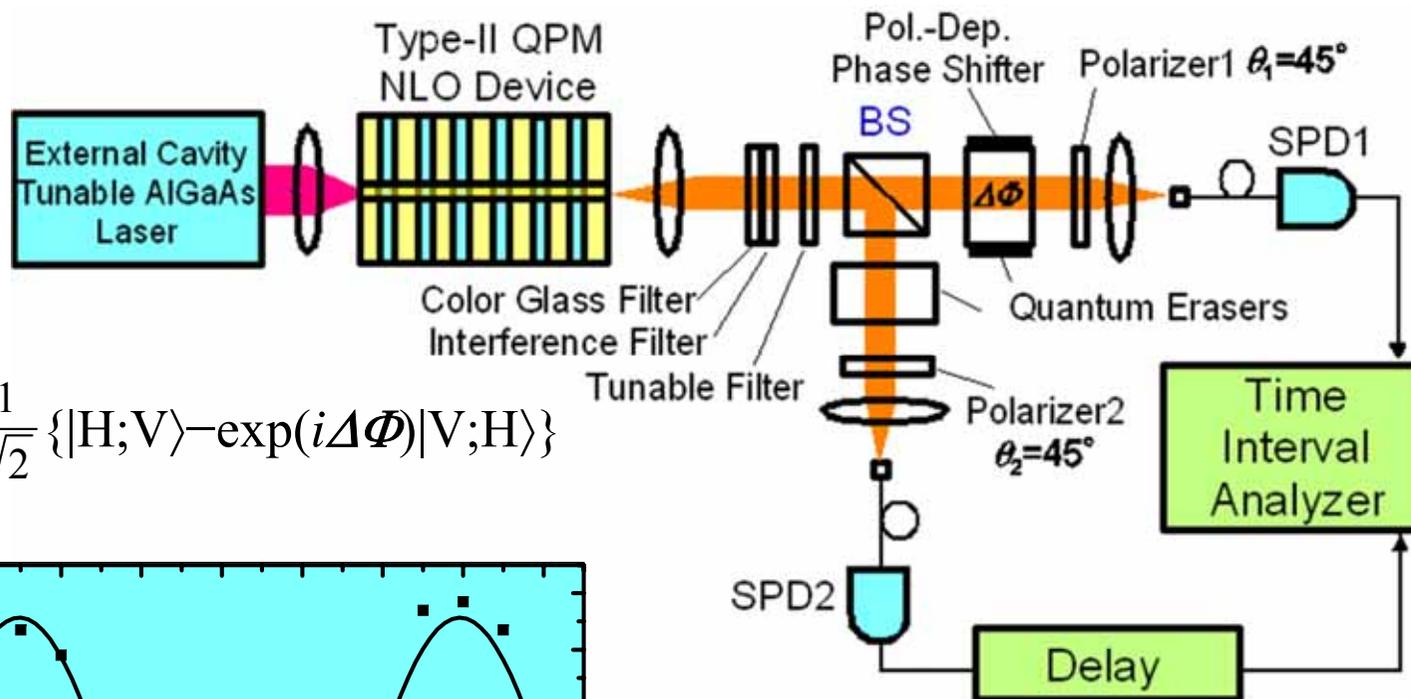
非線形テンソル非対角成分 $d_{24}$   
を用いたType II擬似位相整合

## 量子エンタングル光子対

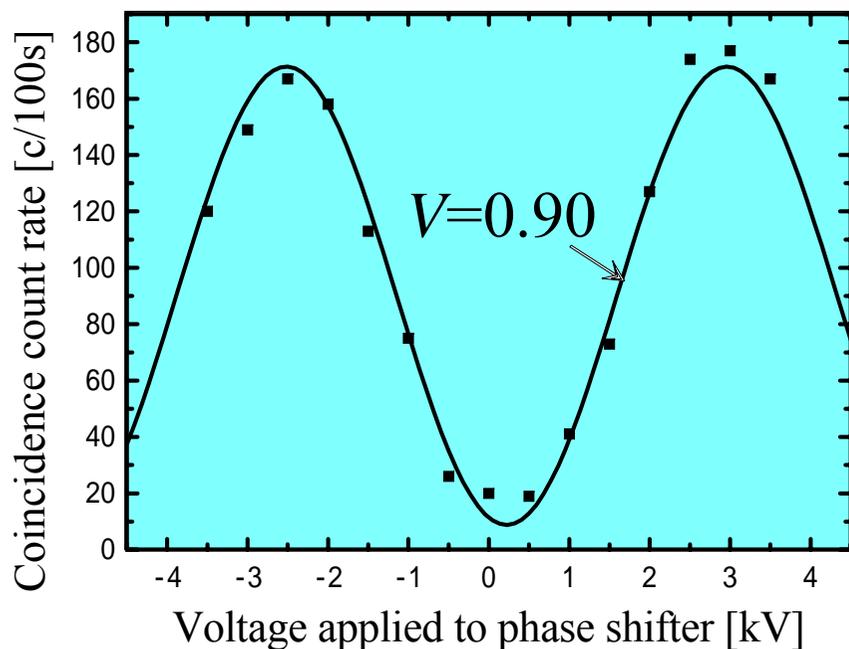


の発生に応用可能

# 偏波エンタングル状態発生の実験的検証



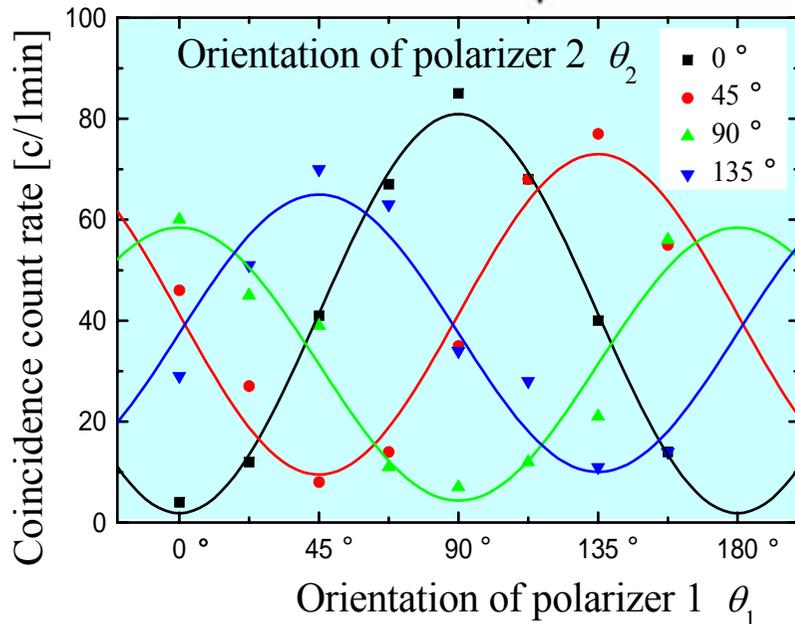
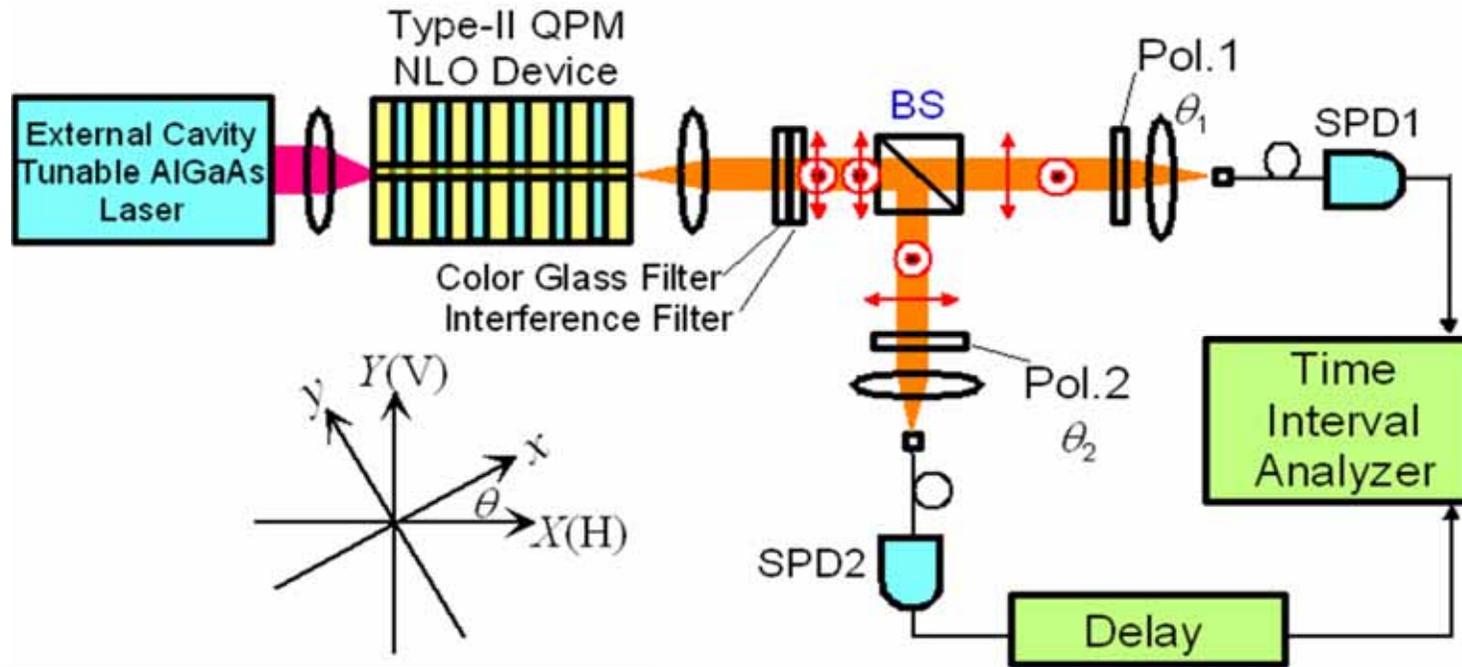
$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |H;V\rangle - \exp(i\Delta\Phi) |V;H\rangle \}$$



量子干渉 (可視度  $V=0.90$ ) を観測  
 一致検出レート  $\propto |1 - \exp(i\Delta\Phi)|^2$

偏波エンタングル状態発生を検証

# 偏波エンタングル光子対の偏波測定結果



光子対偏波の  
**非決定的性格**と**非局所性**を示す  
 理論予測

$$P_{XX} = (1/2)\sin^2(\theta_1 - \theta_2)$$

に近い周期的変調が観測できた

# ベルの不等式の破れの観測

## 局所的実在理論 (隠れた変数の理論)

Bell-CHSHの不等式  $|B| \leq 2$

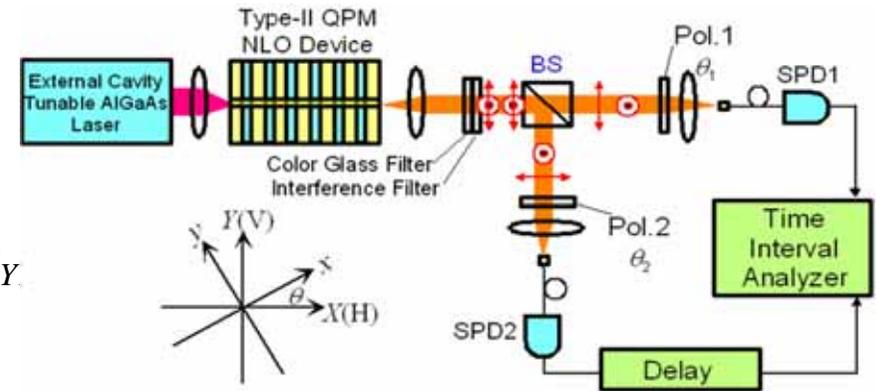
$$B = E(\theta_1, \theta_2) - E(\theta_1, \theta_2') + E(\theta_1', \theta_2) + E(\theta_1', \theta_2')$$

$$E(\theta_1, \theta_2) = (P_{XX} - P_{XY} - P_{YX} + P_{YY}) / (P_{XX} + P_{XY} + P_{YX} + P_{YY})$$

Bell-CHの不等式  $-1 \leq S \leq 0$

$$S = P(\theta_1, \theta_2) - P(\theta_1, \theta_2') + P(\theta_1', \theta_2) + P(\theta_1', \theta_2') - P_1(\theta_1') - P_2(\theta_2)$$

$$P(\theta_1, \theta_2) = P_{XX}, P_1(\theta_1) = P_{XX} + P_{XY}, P_2(\theta_2) = P_{XX} + P_{YX}$$



## 光子対に対する量子論では

$|B|$  は最大値  $2\sqrt{2}$ ,  $S$  は最小値  $-(\sqrt{2}+1)/2$ , 最大値  $(\sqrt{2}-1)/2$  をとる  
(Bellの不等式は破れる)

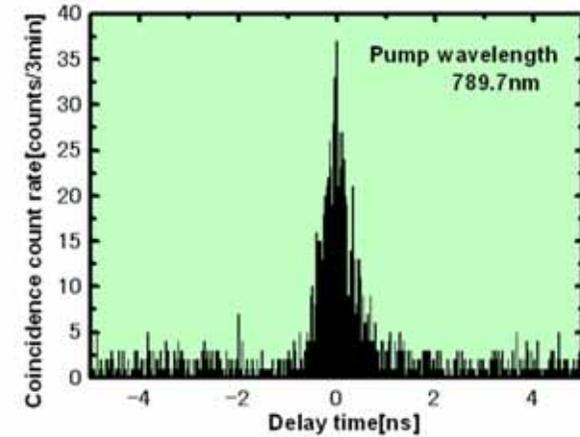
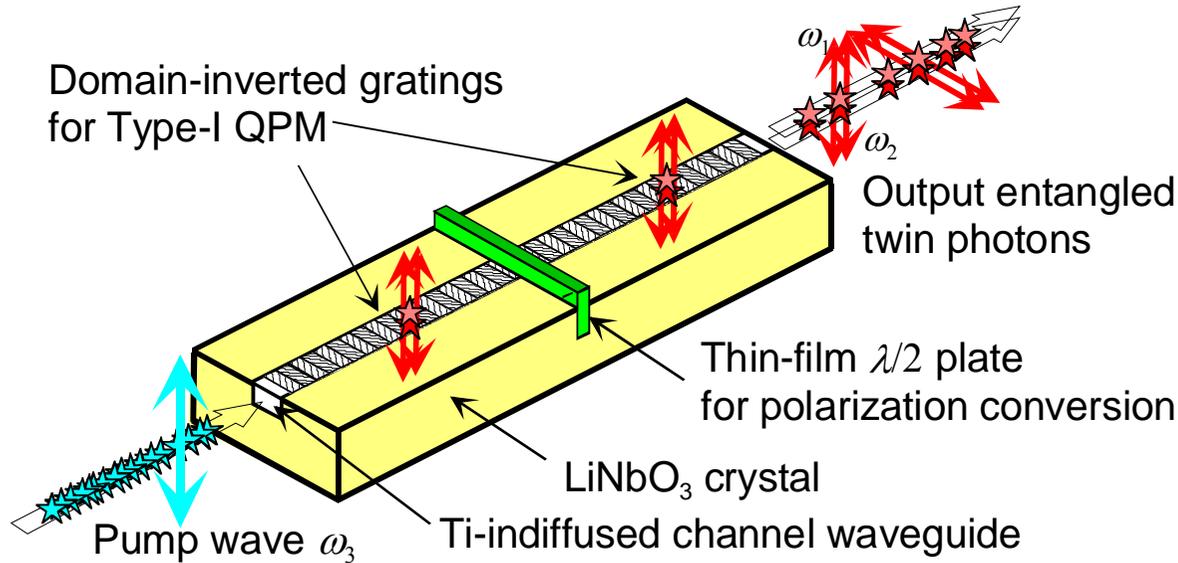
## 作製デバイスによるこれまでの実験結果

$$(\theta_1, \theta_2, \theta_1', \theta_2') = (22.5^\circ, -45^\circ, 67.5^\circ, 0^\circ) \text{ のとき } B = +2.3 \pm 0.1, S = +0.07 \pm 0.04$$

$$(\theta_1, \theta_2, \theta_1', \theta_2') = (67.5^\circ, -135^\circ, 202.5^\circ, 0^\circ) \text{ のとき } B = -2.3 \pm 0.1, S = -1.06 \pm 0.07$$

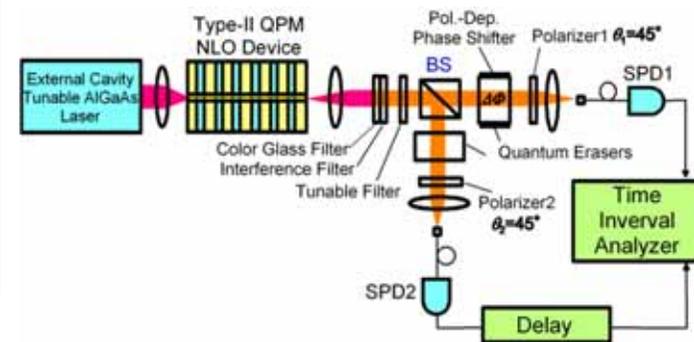
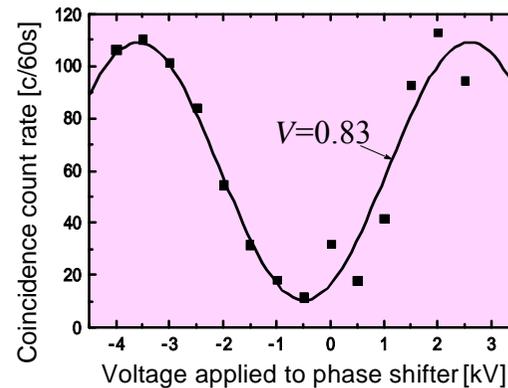
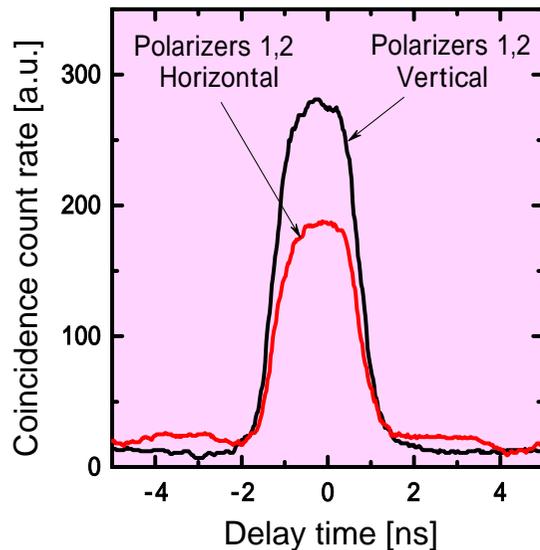
Bell-CHSHの不等式、Bell-CHの不等式ともにその破れが観測できた

# Type I QPM 偏波エンタングル光子対発生デバイス



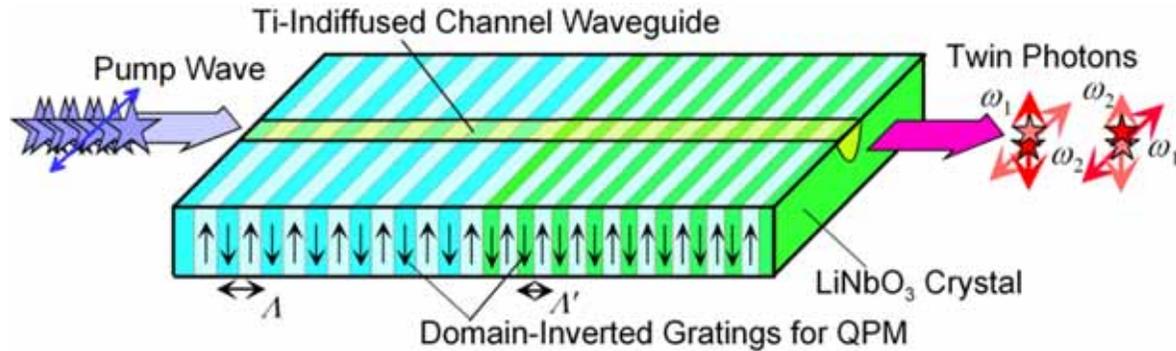
量子相関測定結果

効率はType II より約3桁大

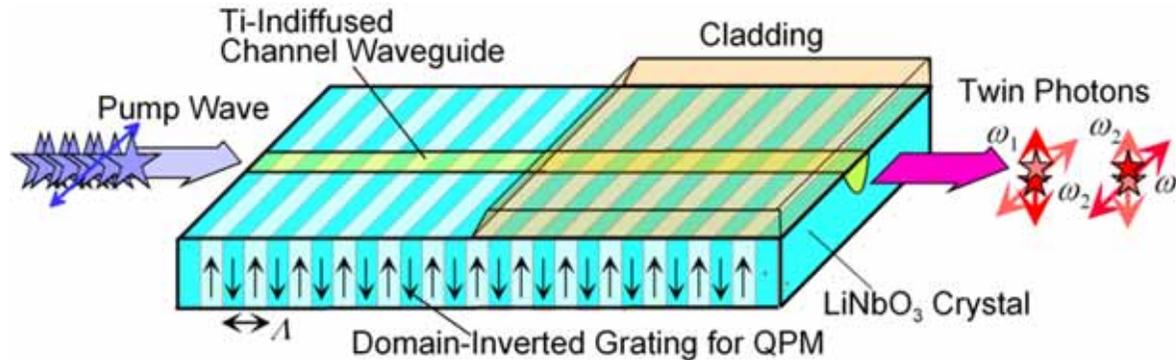


偏波エンタングル光子対発生を確認

# 2波長偏波エンタングル光子対発生デバイス

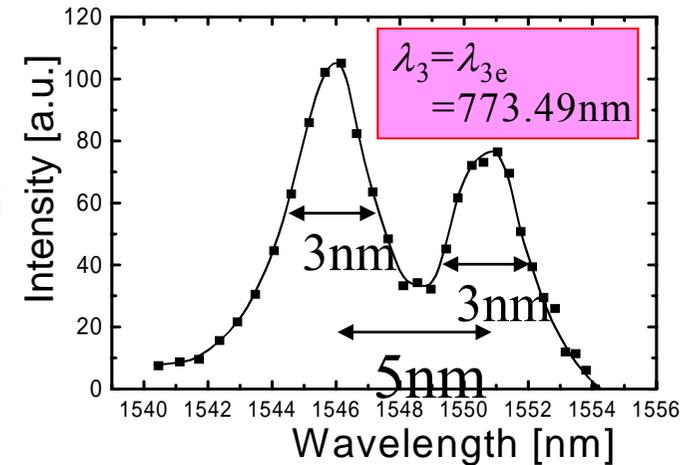


(a) biperiod device

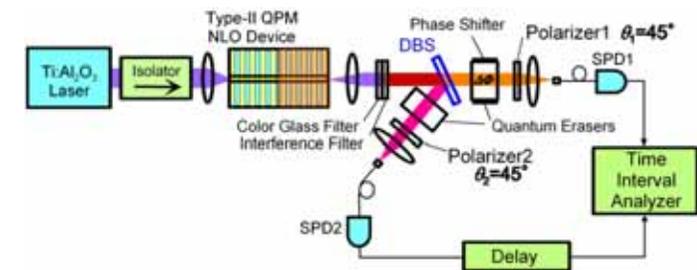


(b) clad/unclad device

スプリアス光子発生なし  
ポストセレクション不要



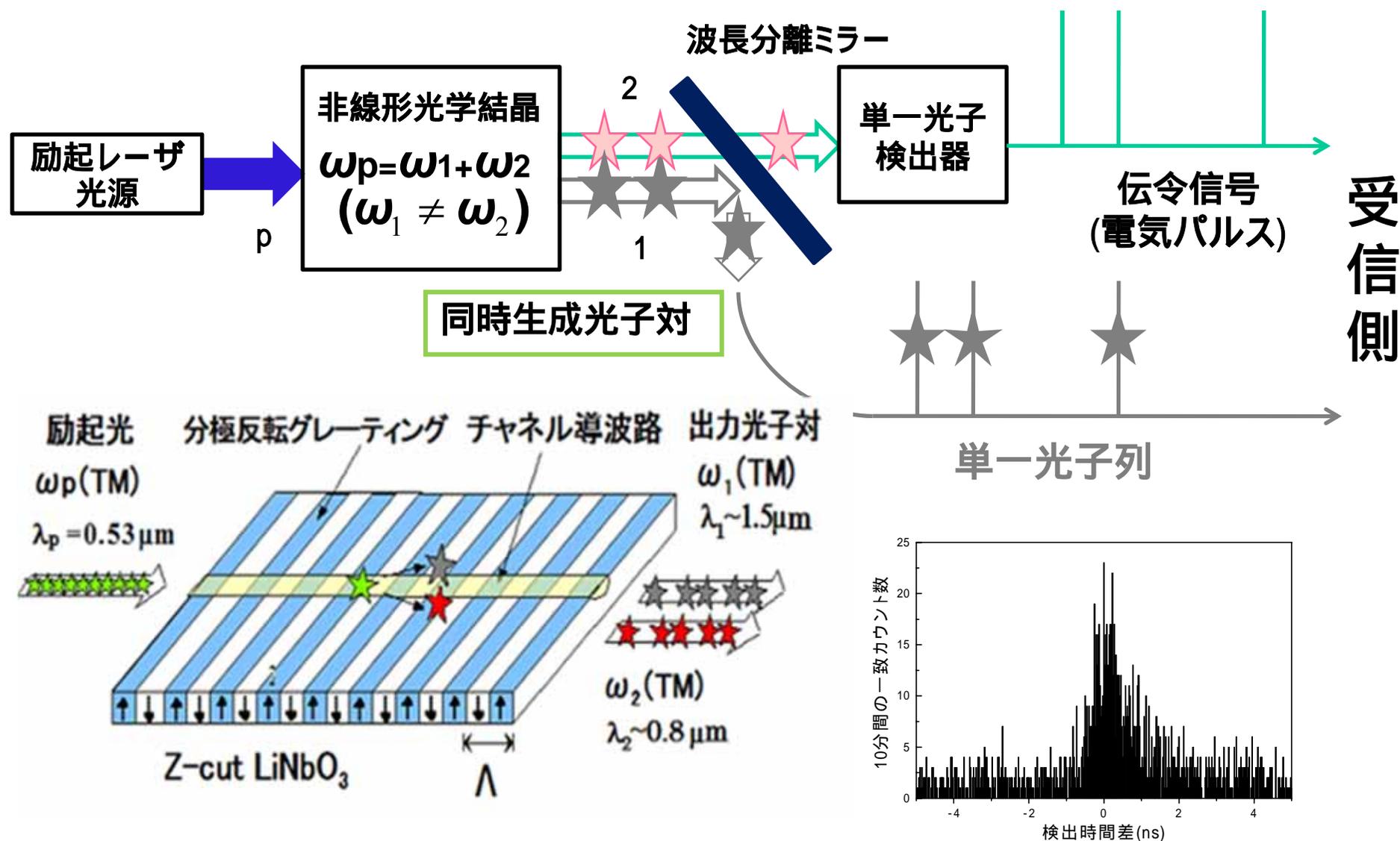
## スペクトル測定結果



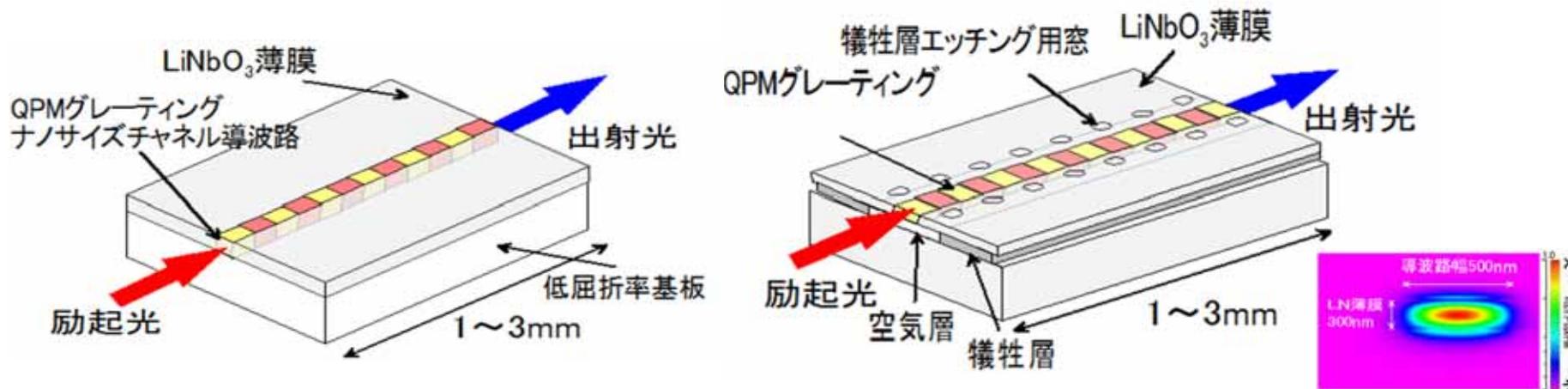
量子干渉実験で  
エンタングル光子対発生を検証

# 単一光子列発生用

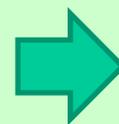
## Type QPM非縮退光子対発生デバイス



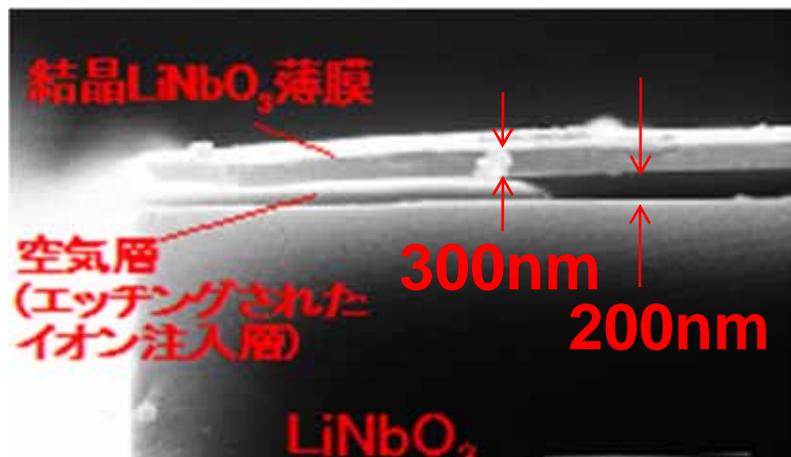
# 非線形ナノフォトニックデバイス



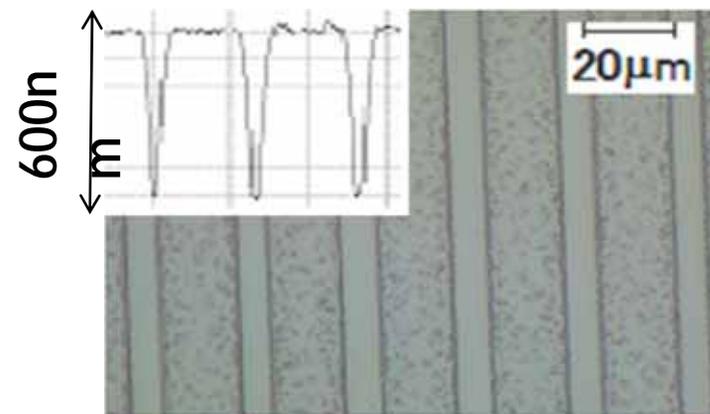
強い光閉込めにより、  
顕著な非線形光学相互作用



超小型高効率

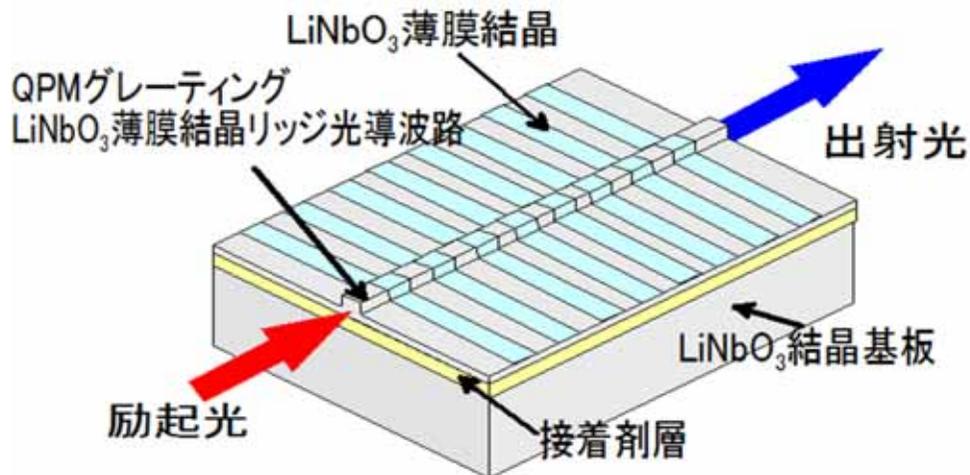


イオン注入層HFエッチング

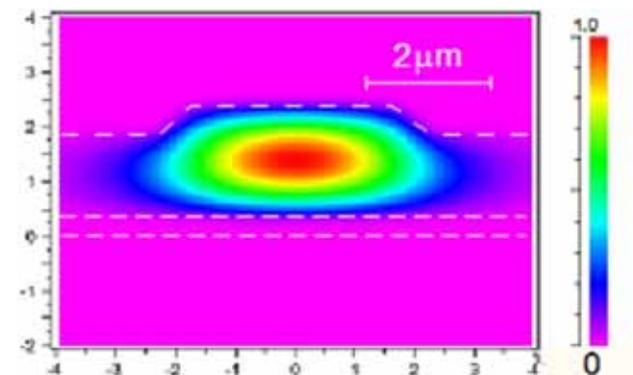


イオンビームエッチング後LN表面

# 非線形ナノフォトニックデバイス



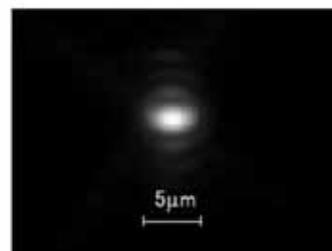
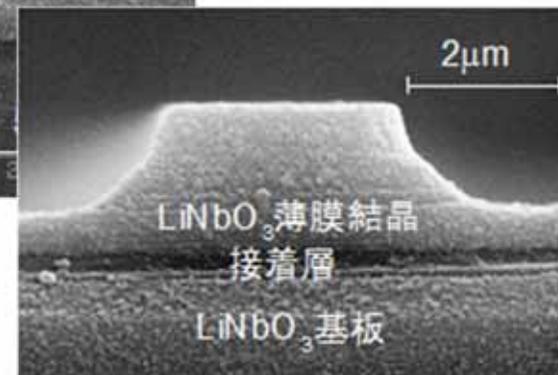
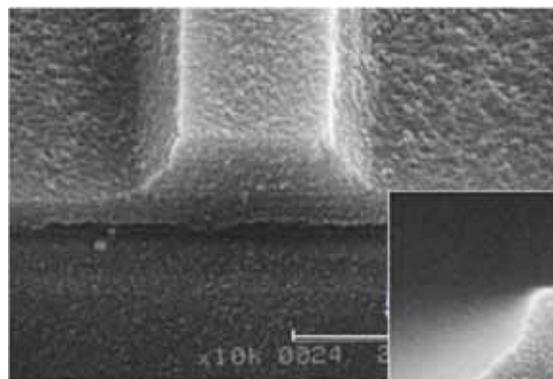
TM<sub>00</sub>モード電界振幅分布



## 目標デバイスの構成例

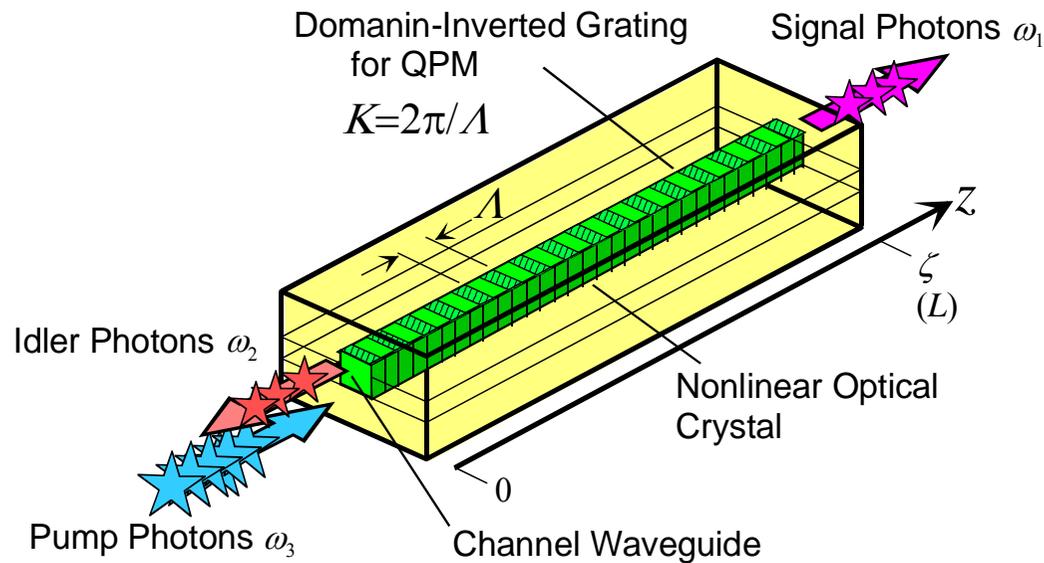
ナノ領域細線導波路  
サブミクロン周期分極反転構造

超高効率化  
新規機能実現

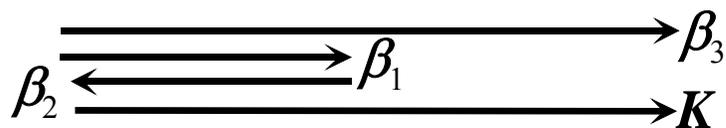


# 非線形ナノフォトニックデバイス

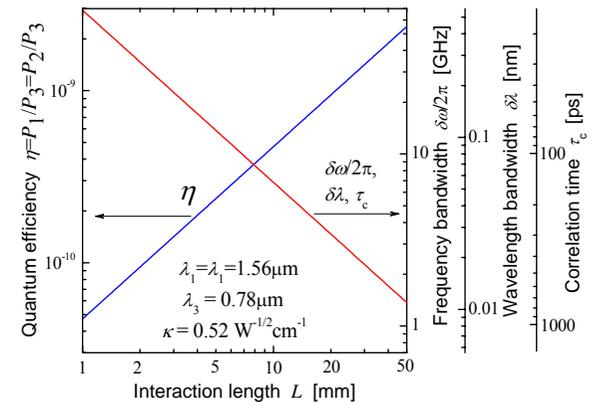
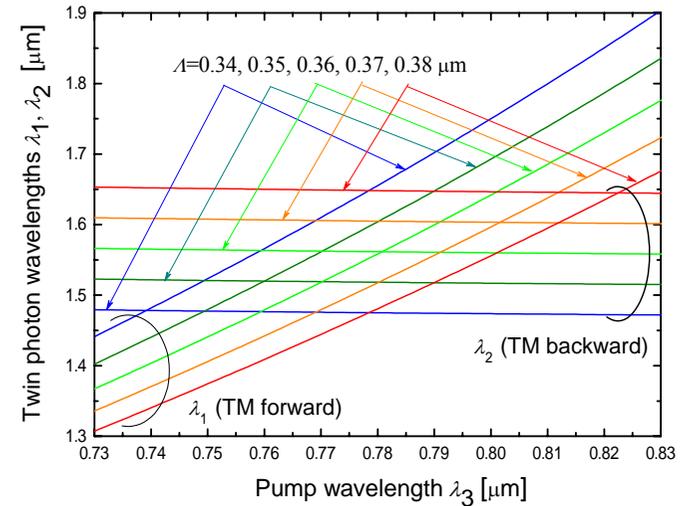
## 逆方向伝搬光子対発生デバイス



(a)

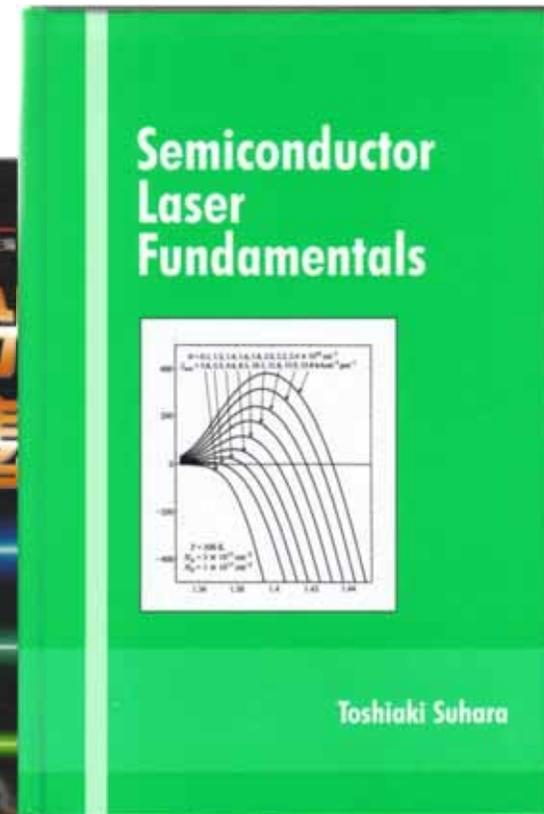


(b)

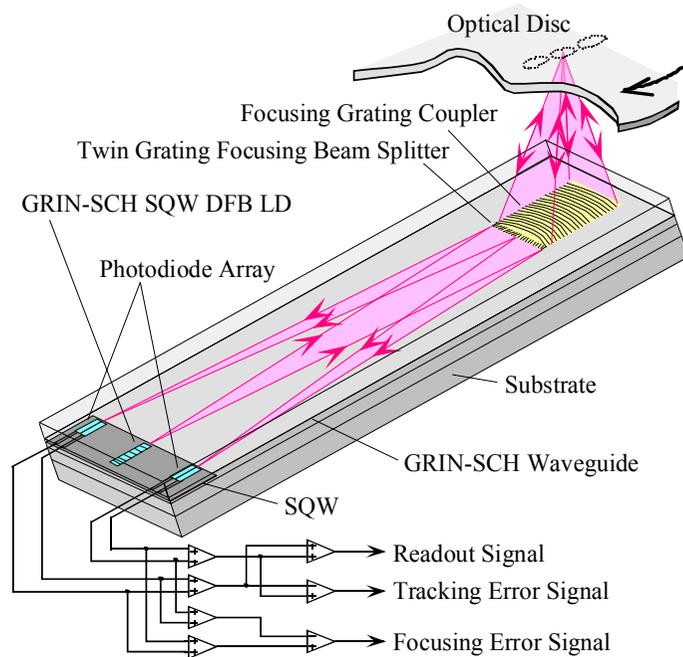


サブミクロン周期QPMグレーティングが必要

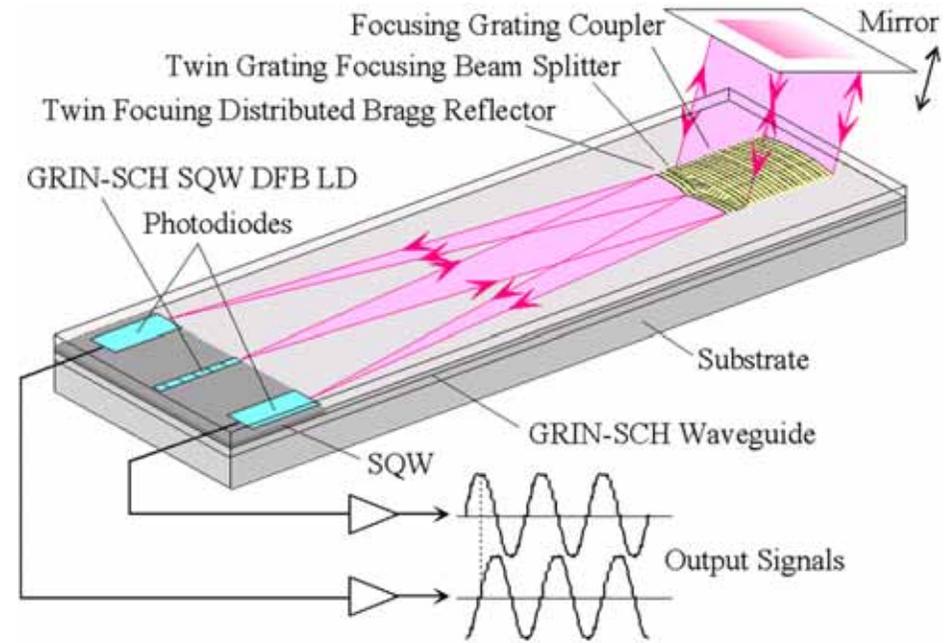
# 集積半導体レーザーとその応用



# 半導体モノリシック光集積センサデバイス

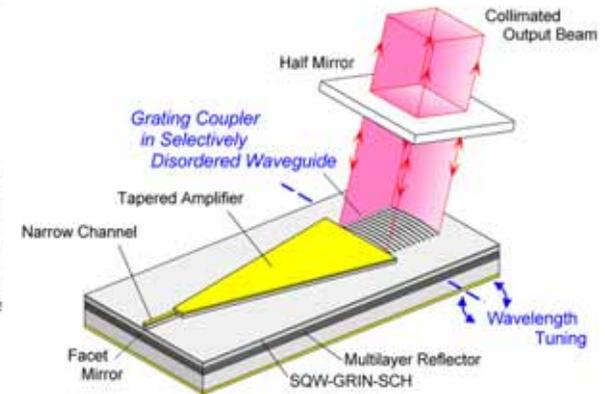
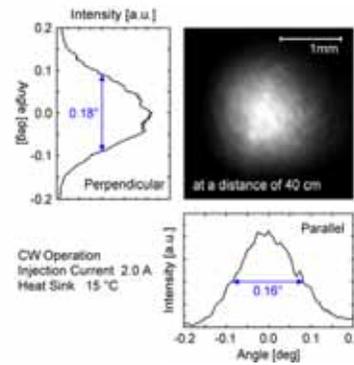
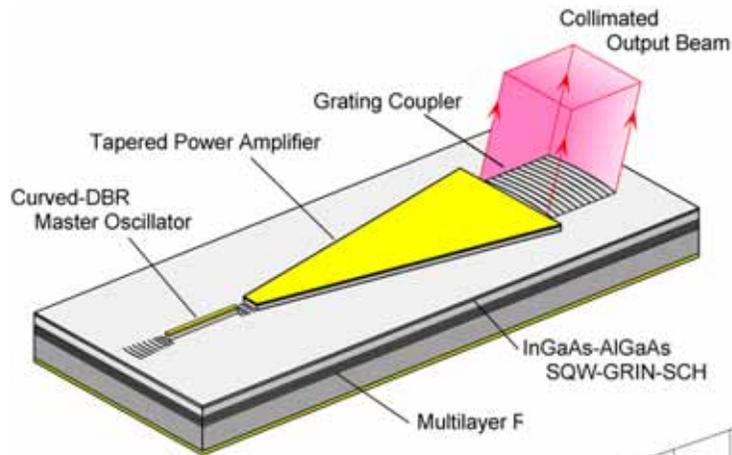


モノリシック光集積  
ディスクピックアップヘッド

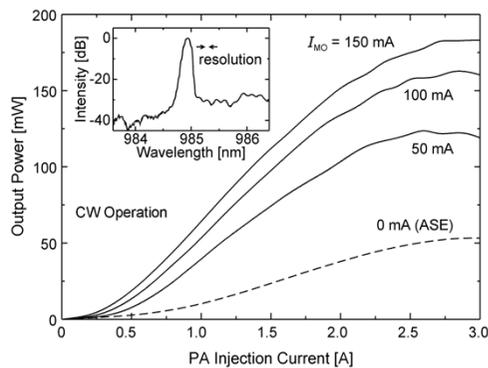
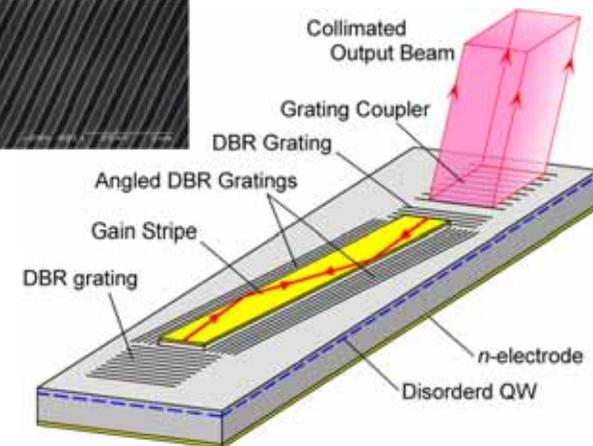
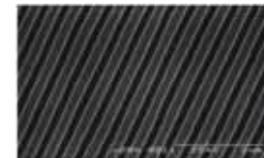
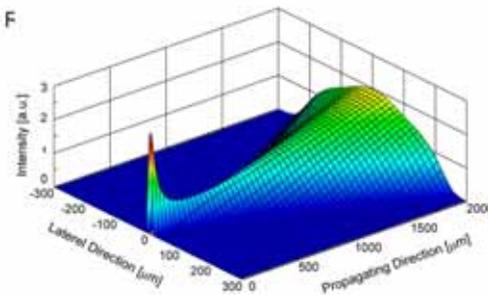
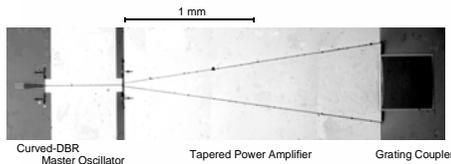


モノリシック光集積干渉計型  
位置・変位センサ

# 集積高出力半導体レーザー



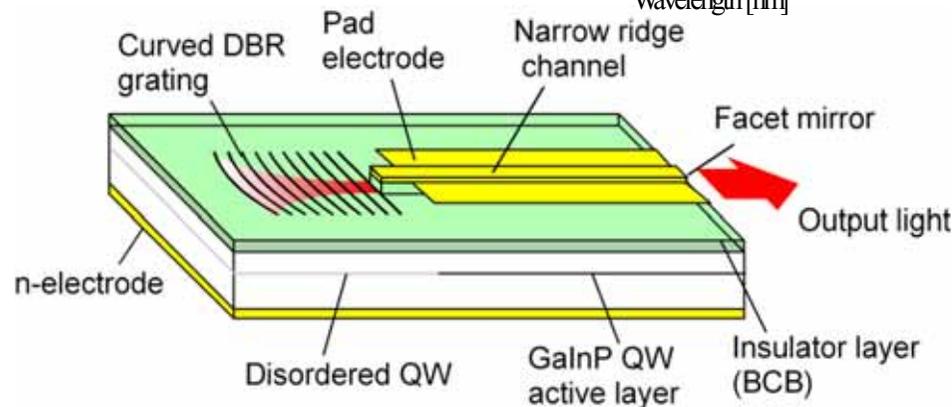
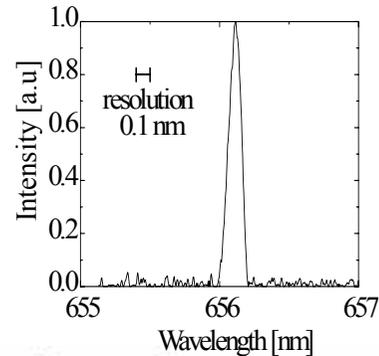
## 集積外部共振型可変波長レーザー



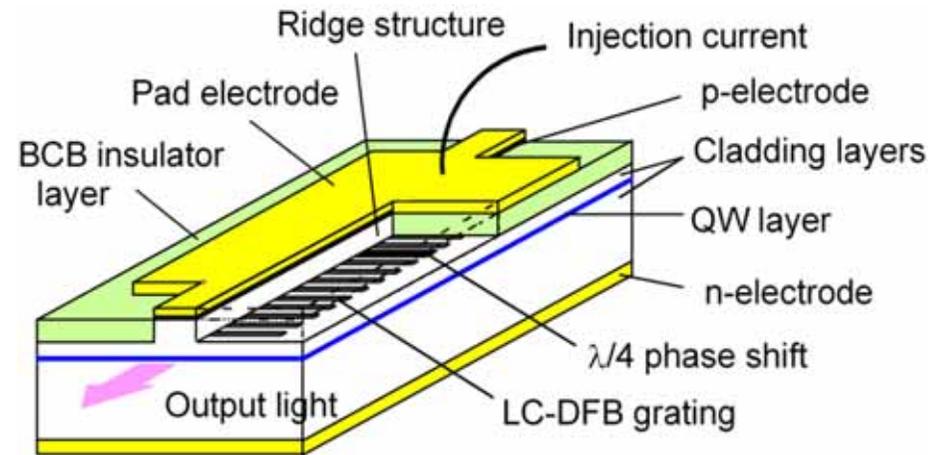
## 発振器・増幅器・結合器集積レーザー

## 傾斜グレーティング広面積 DBR レーザ

# 各種新半導体レーザーの設計・作製・性能改善

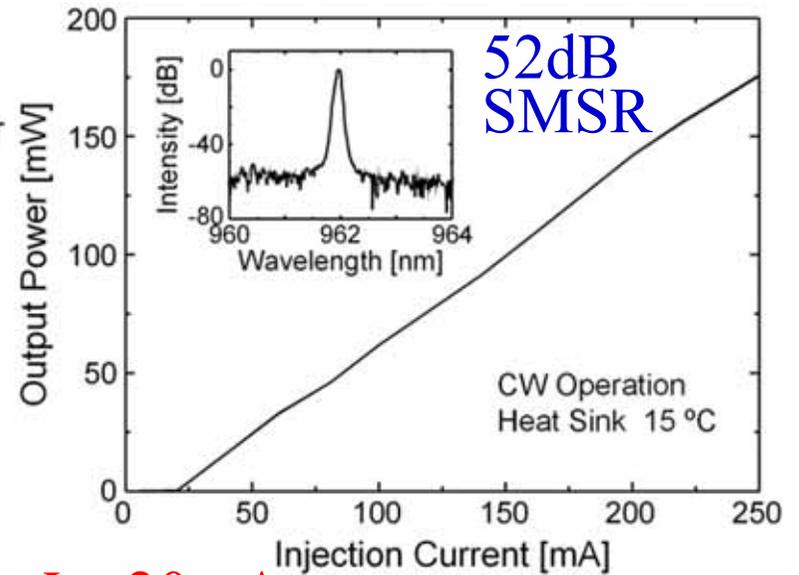
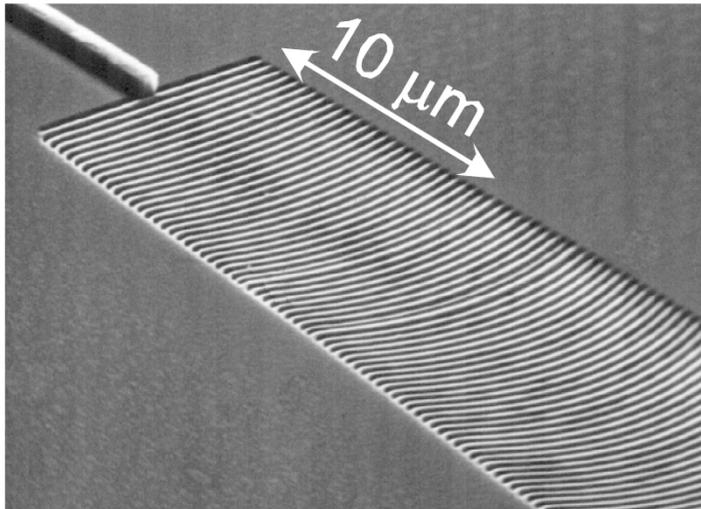
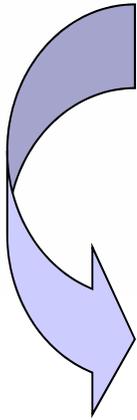
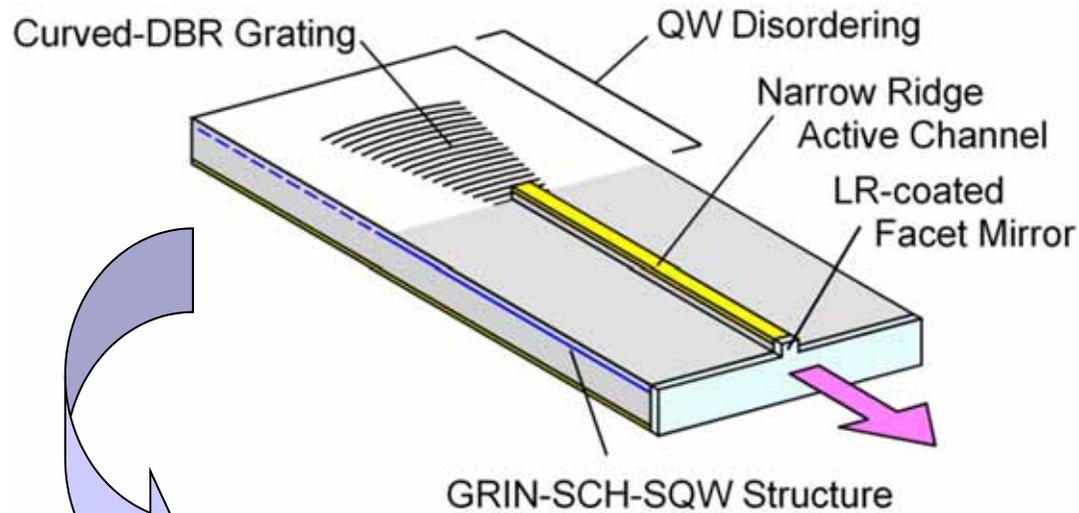


量子井戸赤色DBRレーザー  
出力44mW



ラテラル結合DFBレーザー  
出力19mW, 側モード抑圧比46dB

# 作製したInGaAs歪量子井戸DBRレーザ

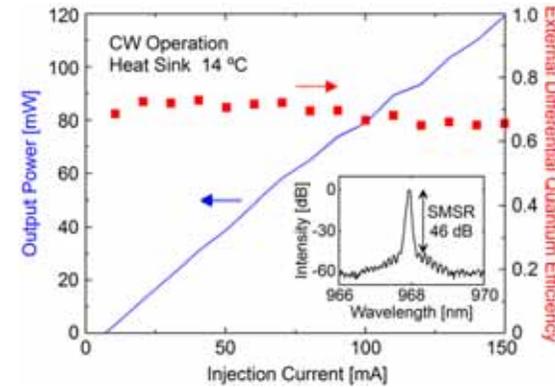
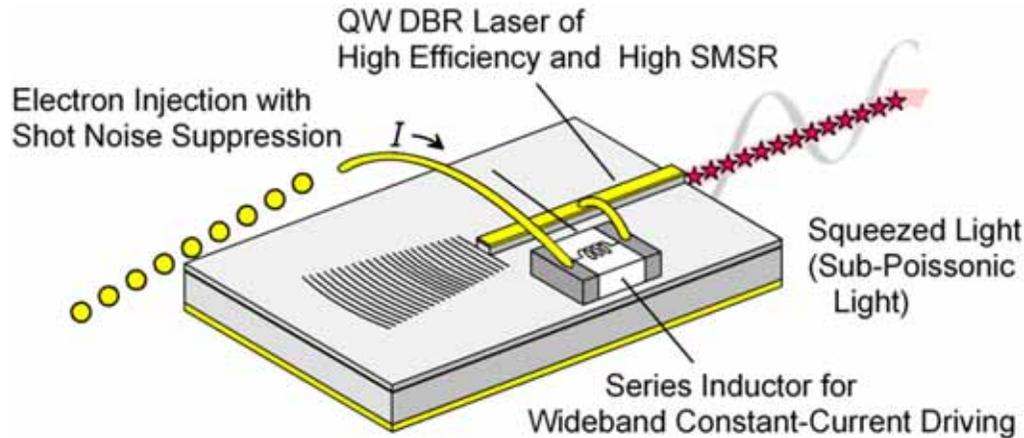


$$I_{th} = 20 \text{ mA}$$

$$R_{DBR} = 71\% \quad P_{max} = 180 \text{ mW}$$

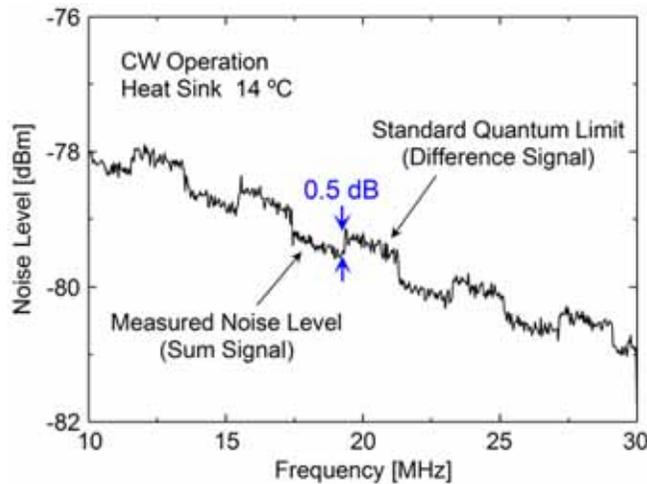
$$\text{最大励起率} \quad I/I_{th} = 12.5$$

# 半導体量子フォトニックデバイス

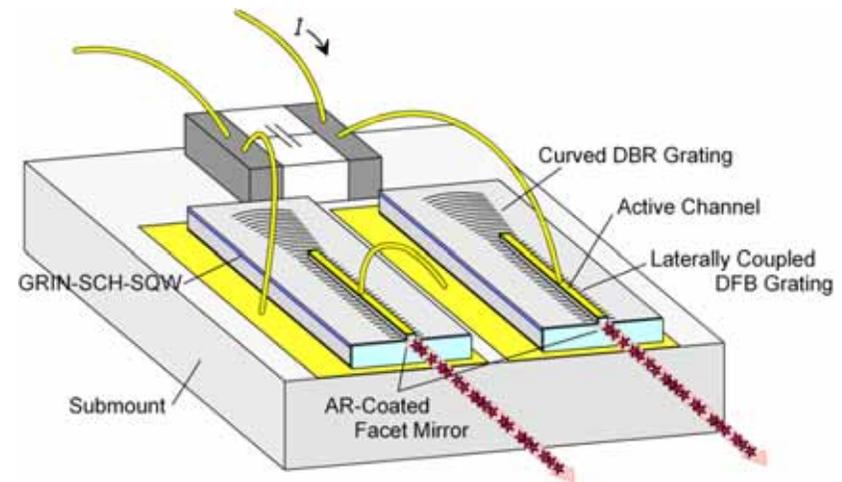


$I_{th}=7\text{mA}$  量子効率 0.63 最大励起率  $I/I_{th}=21$

## スクイズド光発生用歪量子井戸DBRレーザ

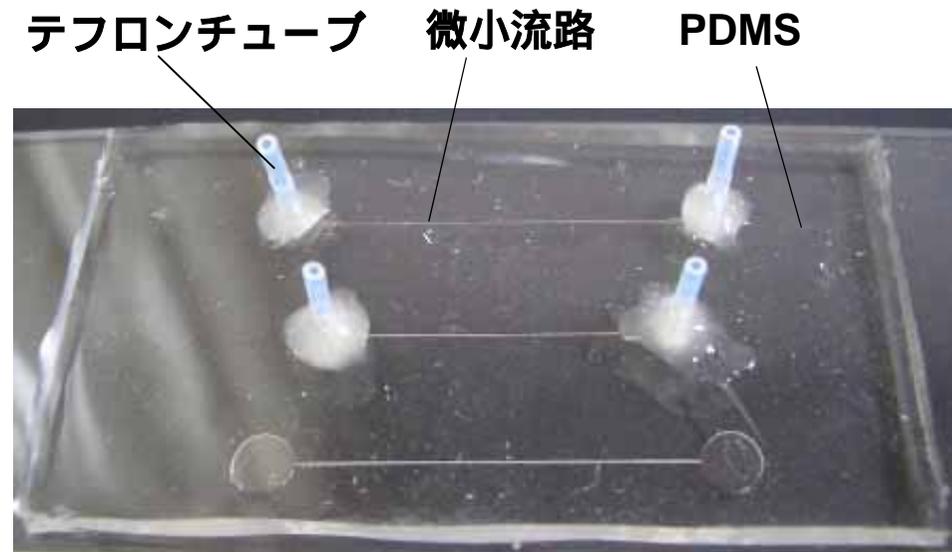
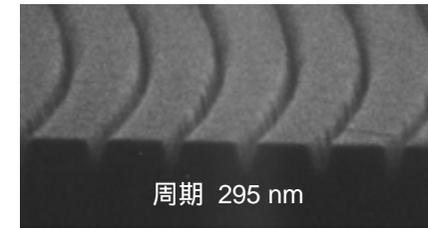
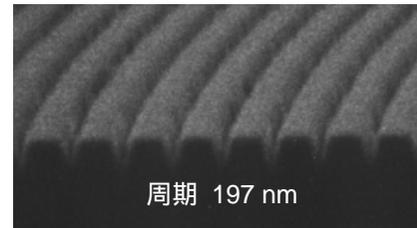
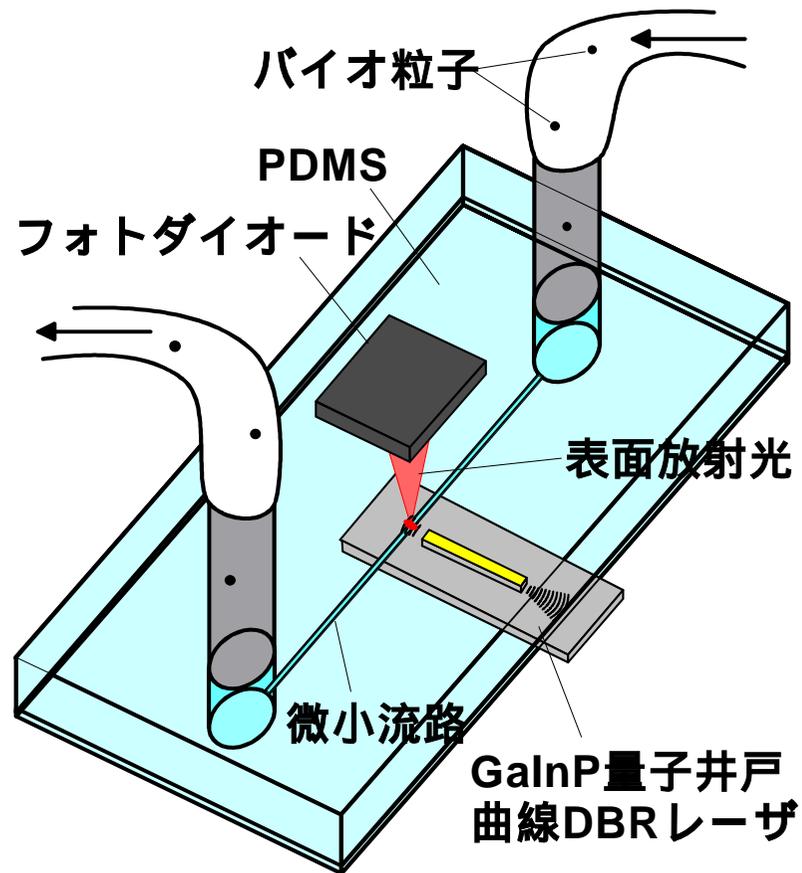


スクイズド光発生を確認

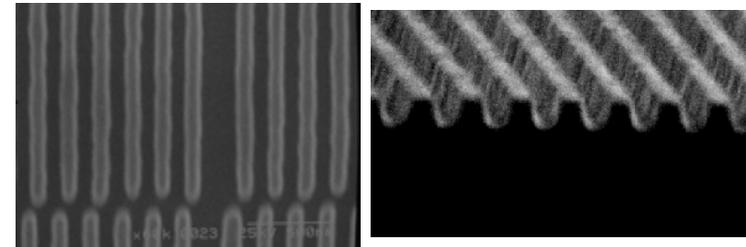
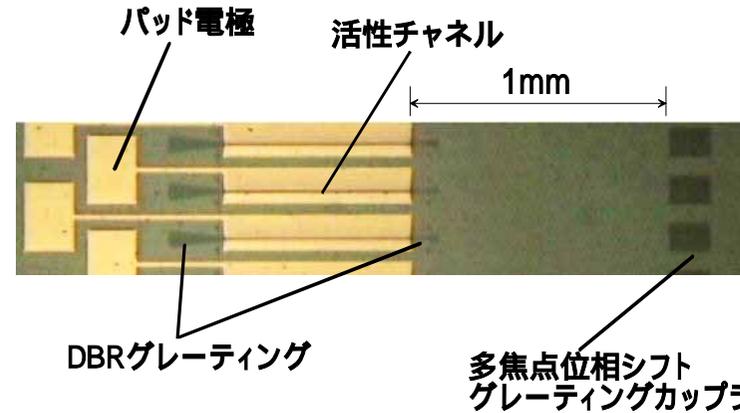
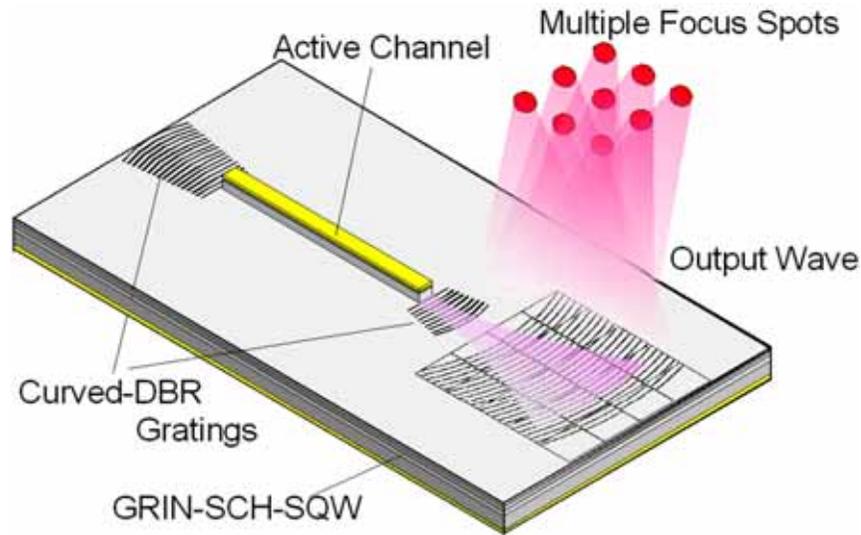


量子相関ビーム発生用ツインDBRレーザ

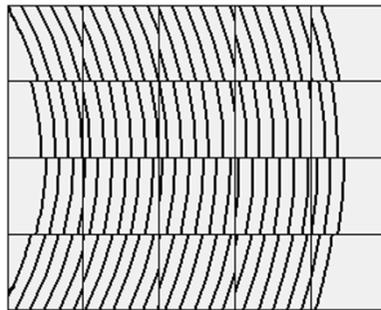
# 集積バイオ光電子サンサ



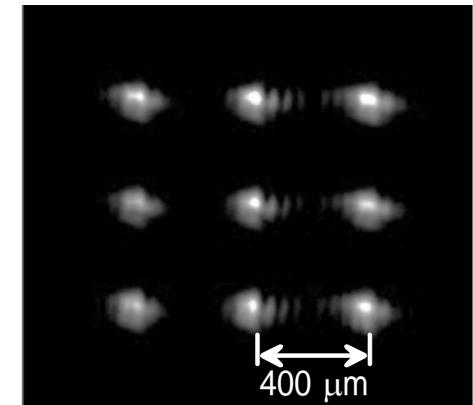
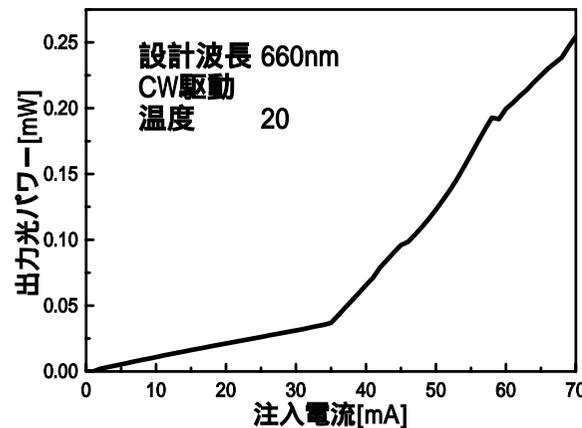
# 多焦点グレーティング結合器集積DBRレーザ



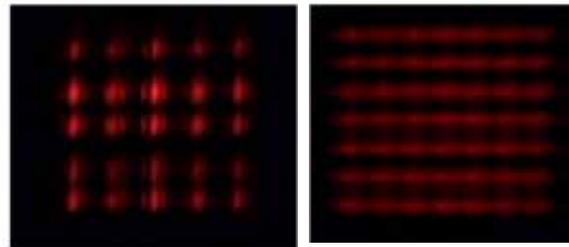
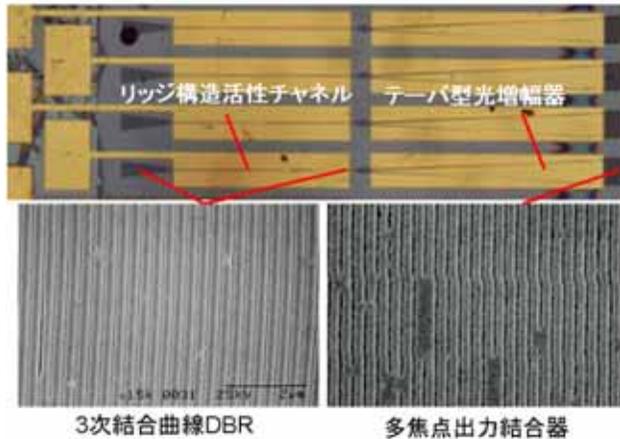
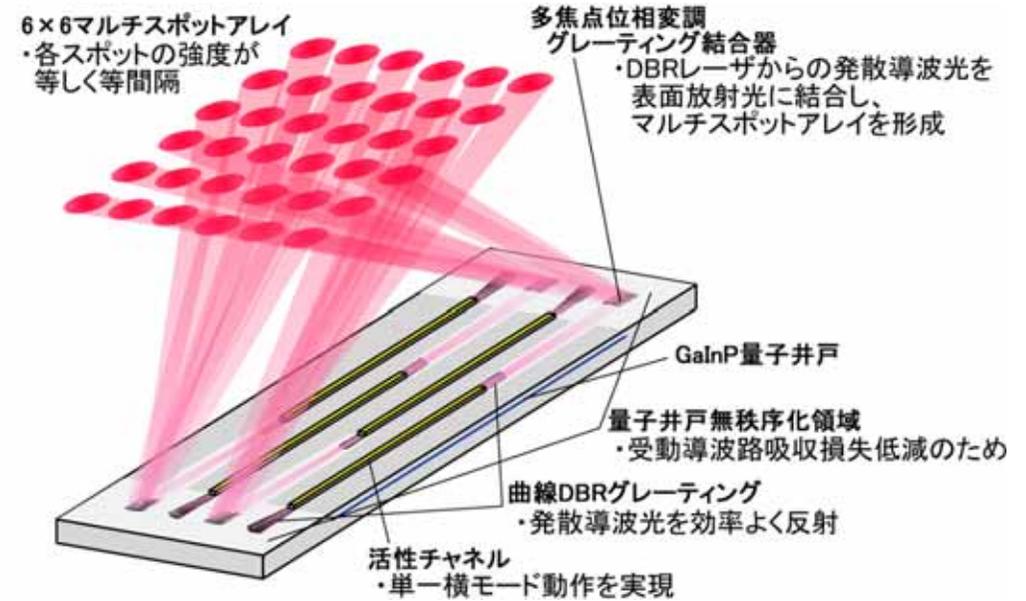
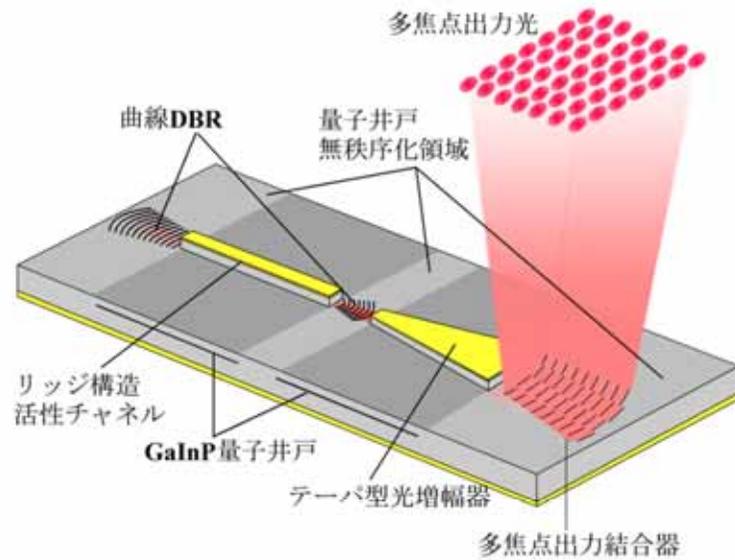
周期191nm, 溝深さ100nm



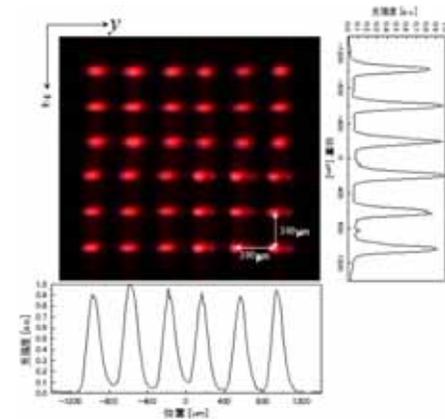
位相シフト多焦点  
集光グレーティング結合器



# 多焦点グレーティング結合器集積DBRレーザ

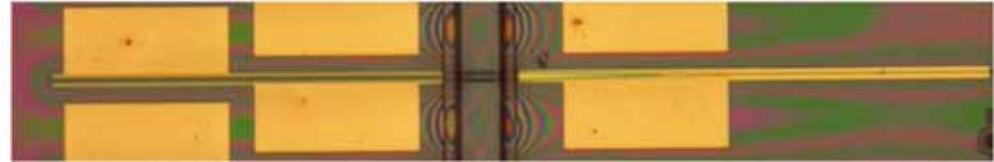
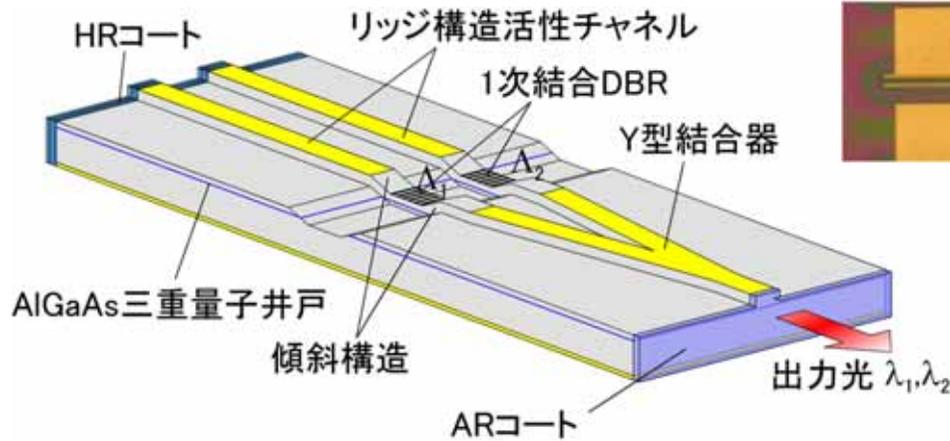


5×5、7×7マルチスポット

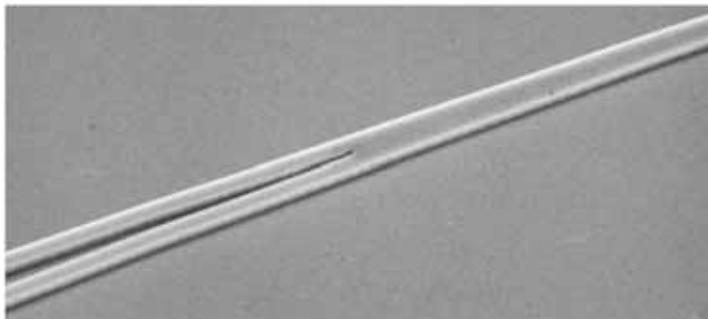
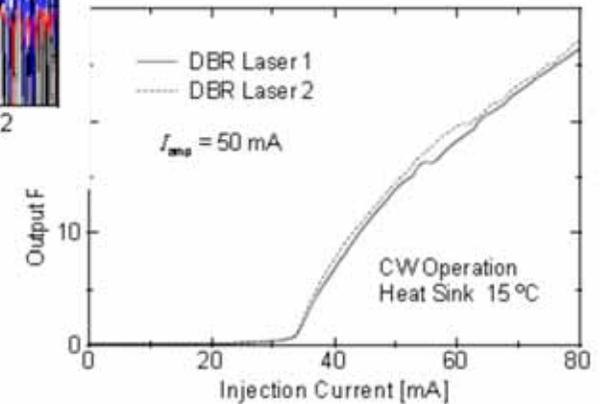
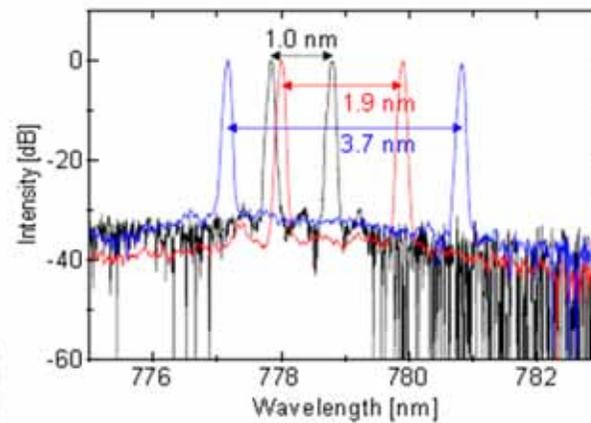
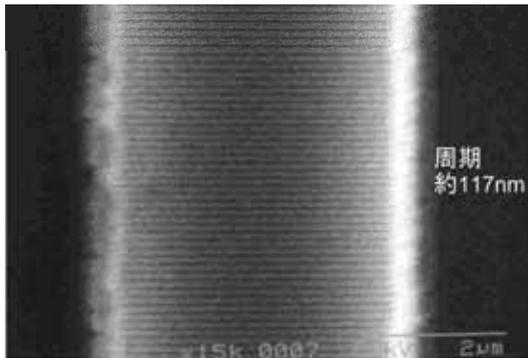
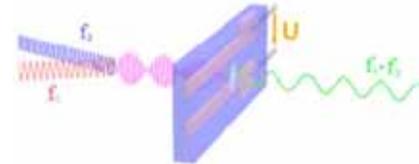


センサへの応用      レーザディスプレイへの応用

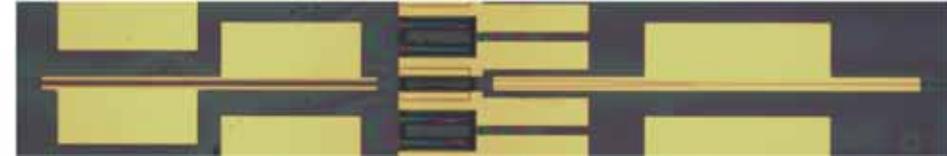
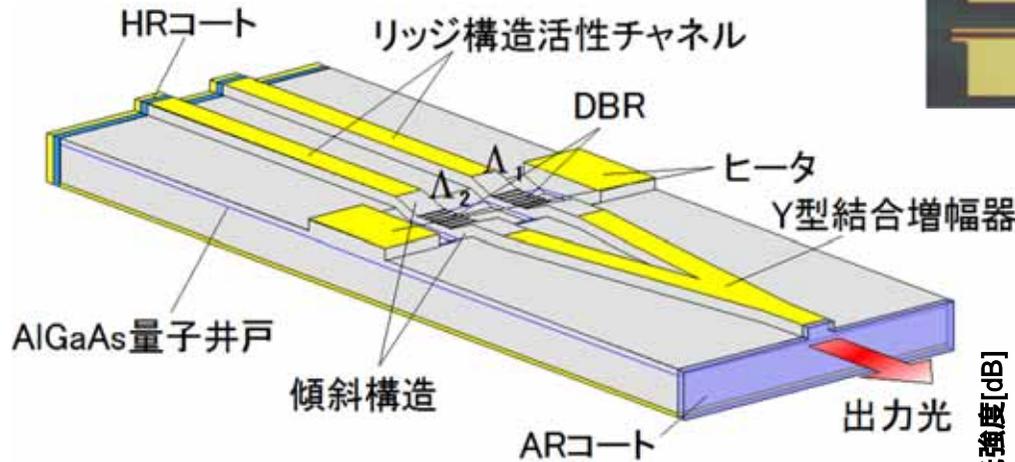
# THz波発生用集積2波長DBRレーザ



光導電型ミキサ  
でTHz電磁波に変換



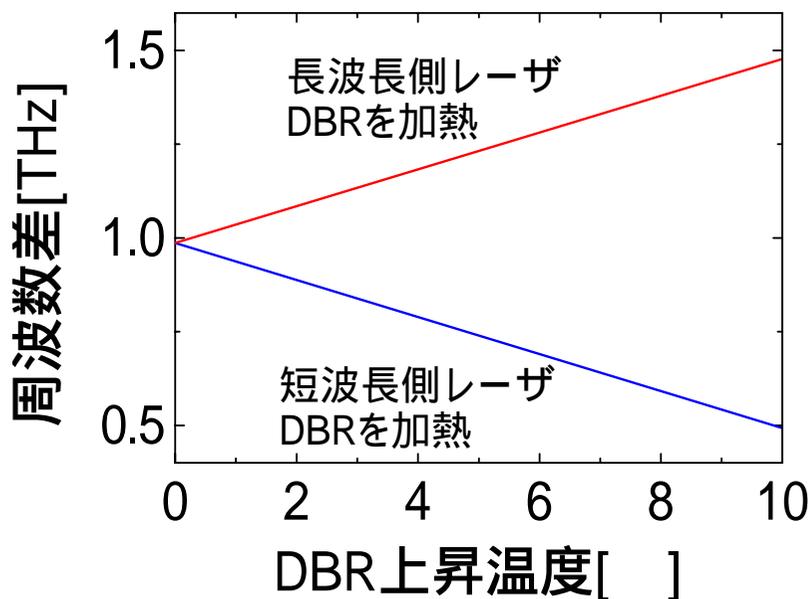
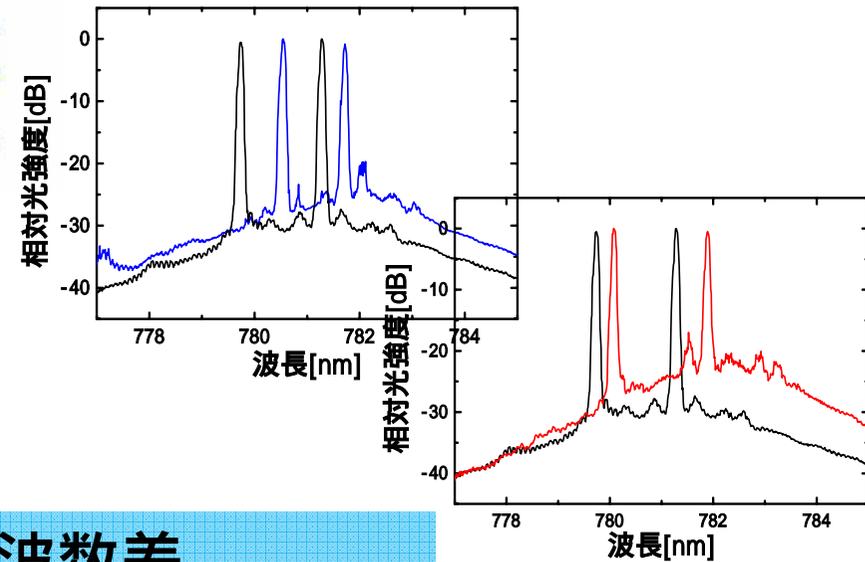
# 可変波長集積2波長半導体DBRレーザ



発振器  
720 $\mu$ m

**DBR/ヒータ**

Y型結合増幅器  
920 $\mu$ m



**周波数差**  
0.5THz ~ 1.5THz

可変周波数コヒーレント  
THz波発生への応用