

栖原研究室 (集積光電子デバイス領域)

<http://laser.ele.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

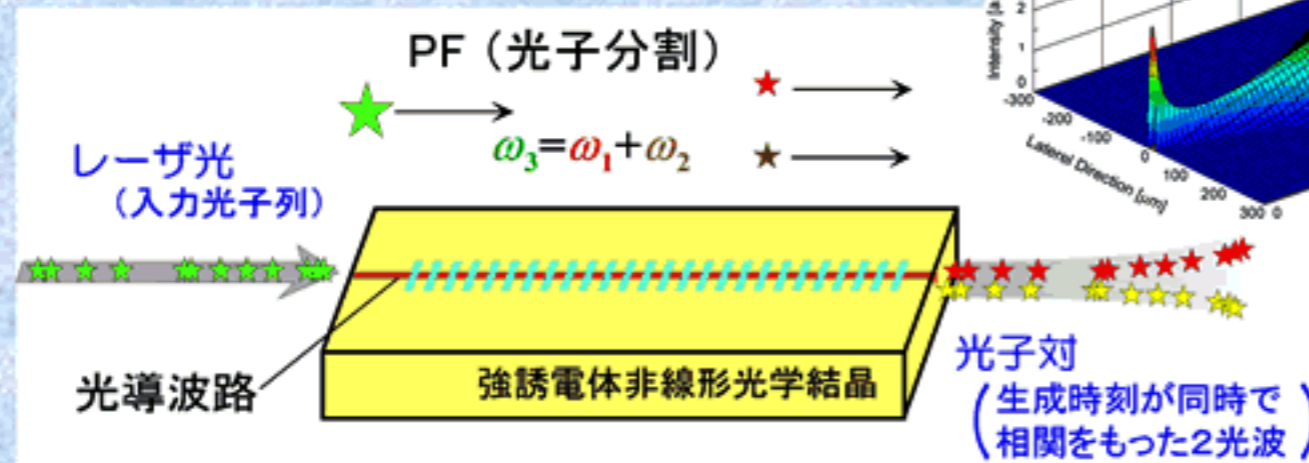
先端的な集積光電子デバイス

- 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

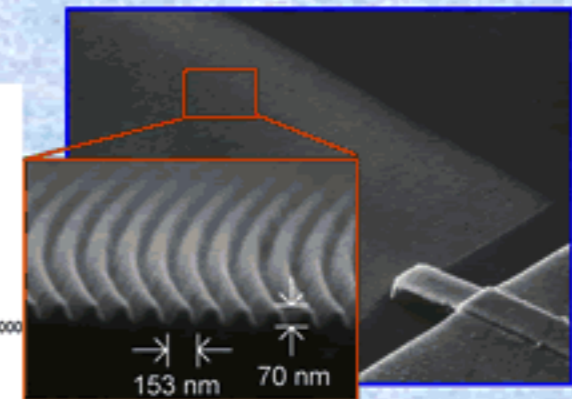
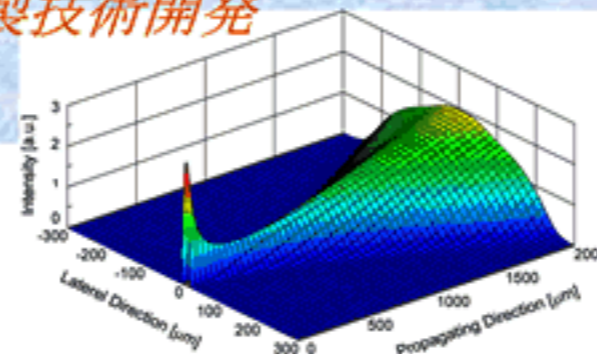


光集積回路作製用電子ビーム描画装置

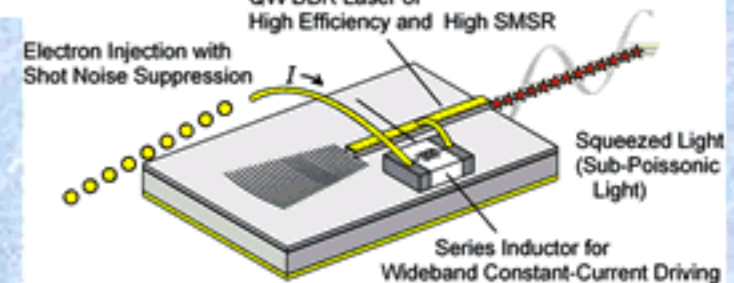
設計理論 シミュレーション 作製技術開発
デバイス作製・実験・実証



量子フォトニックデバイスの例



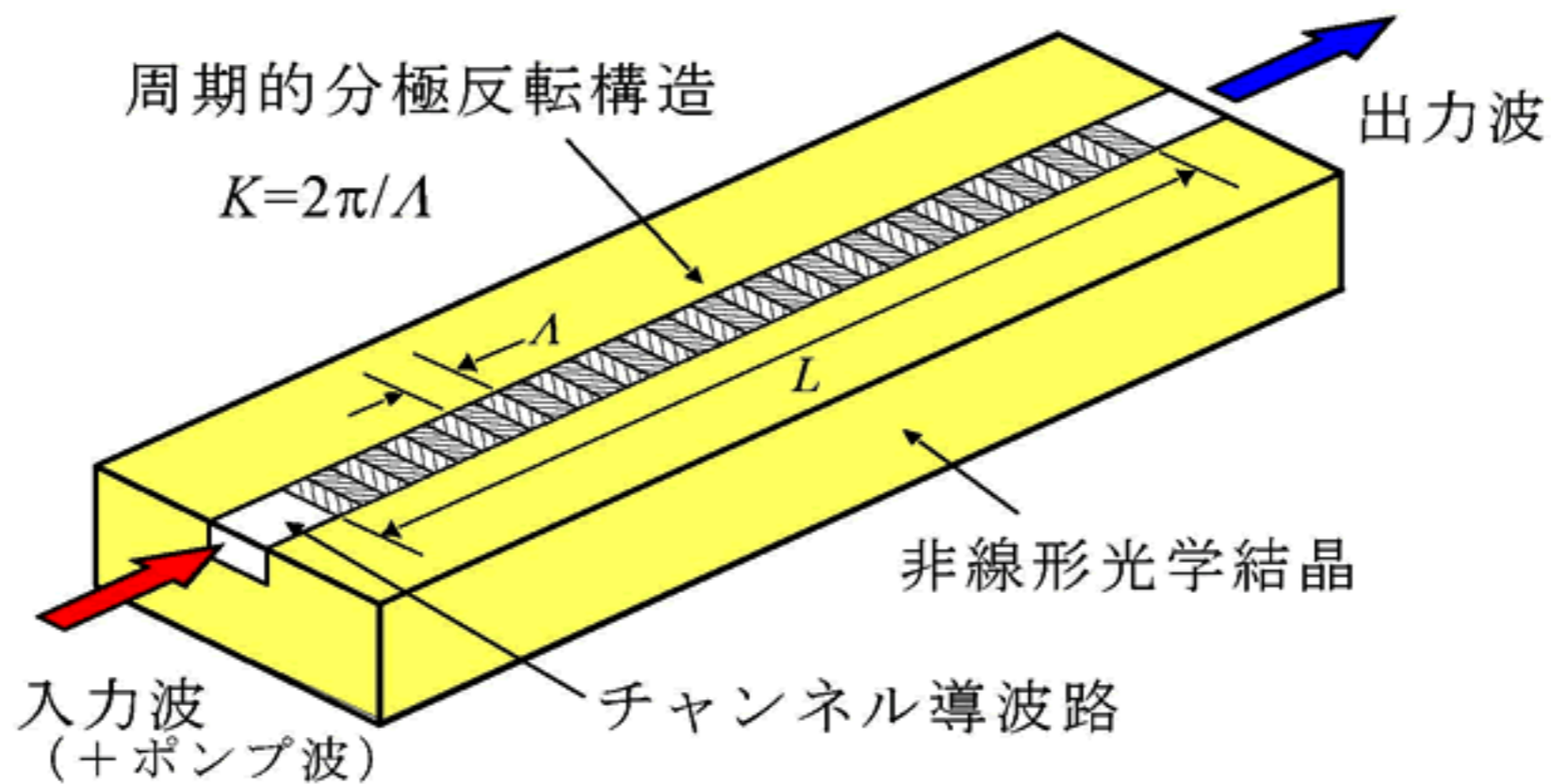
QW DBR Laser of High Efficiency and High SMSR



集積半導体量子井戸レーザの例

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



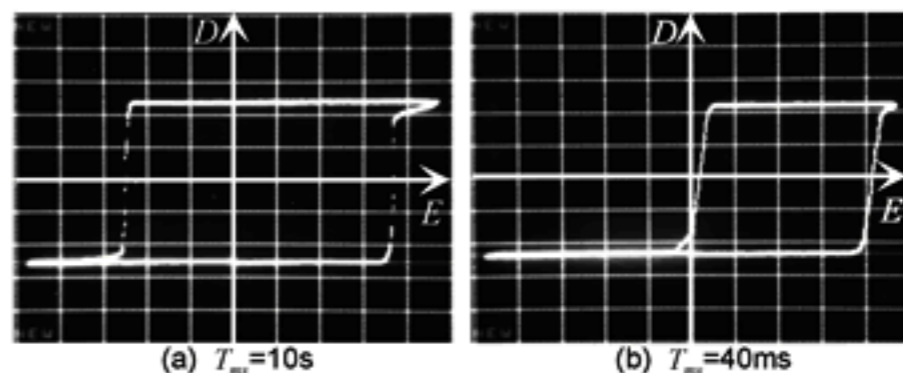
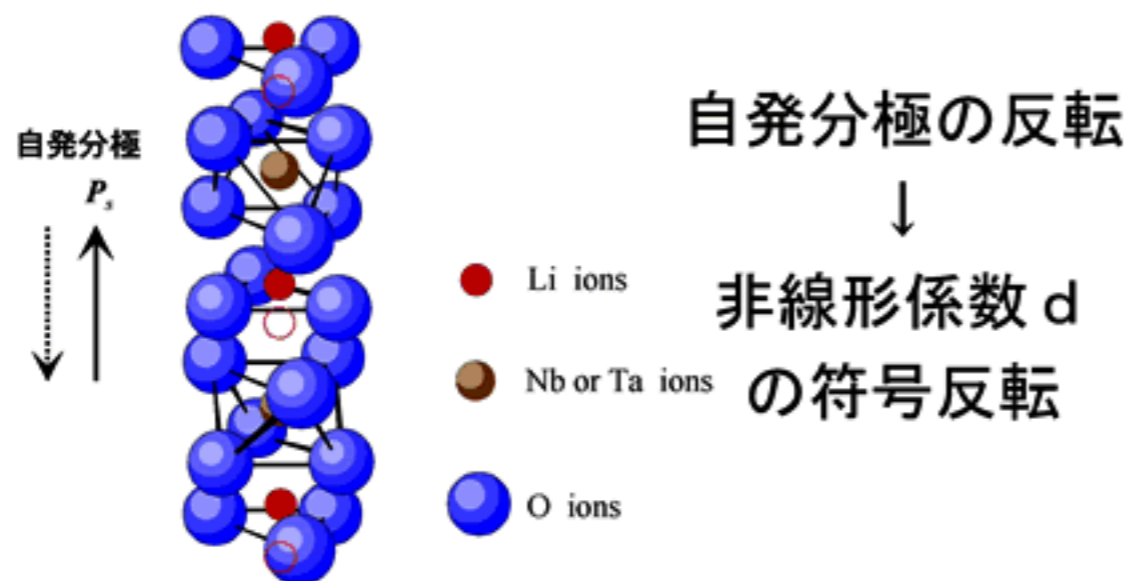
多様な波長変換形態 (高調波発生、和・差周波数発生、・・・)

広波長域 (赤外、可視、紫外、・・・)

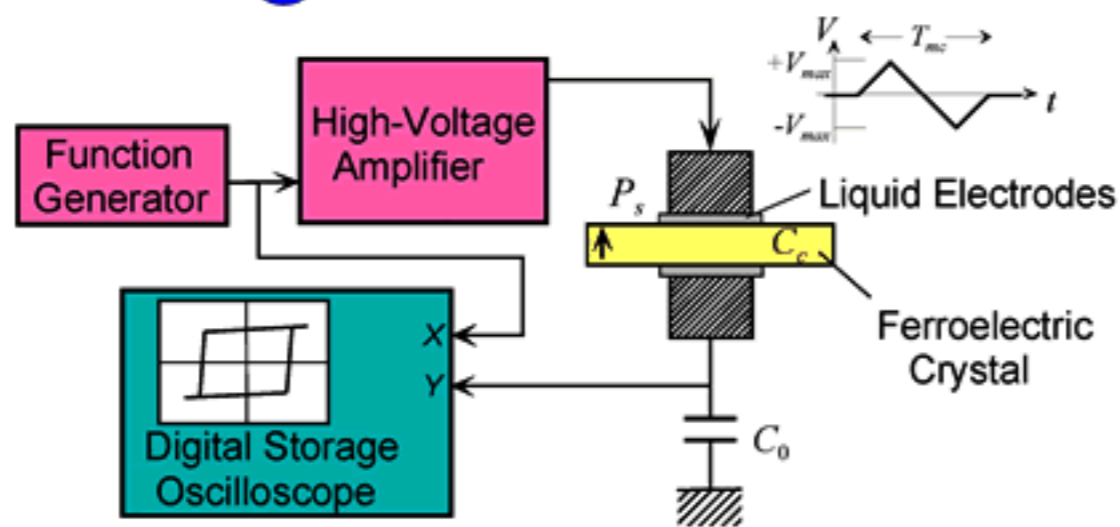
超高速 (ピコ秒、フェムト秒 領域)

量子光学機能 (光子の操作)

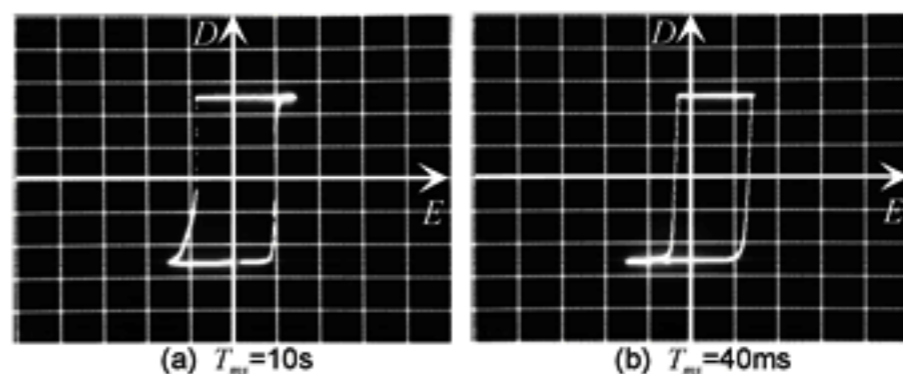
強誘電分極反転特性



Congruent LiNbO_3 結晶の
強誘電ヒステリシスループ



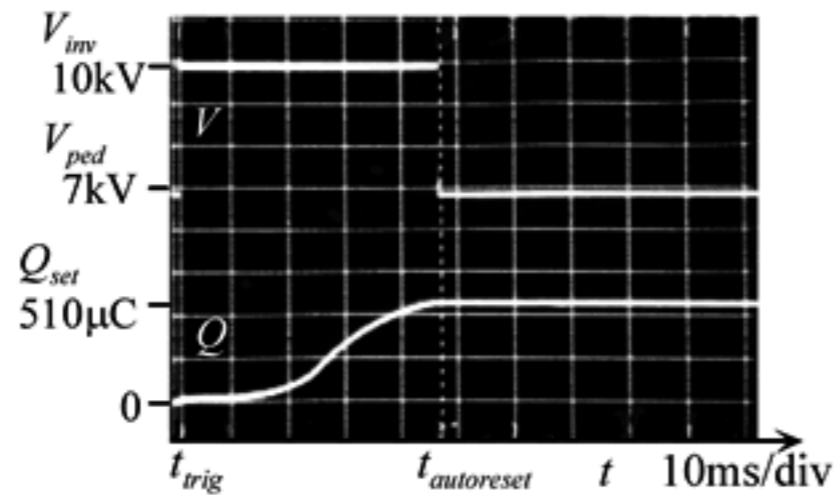
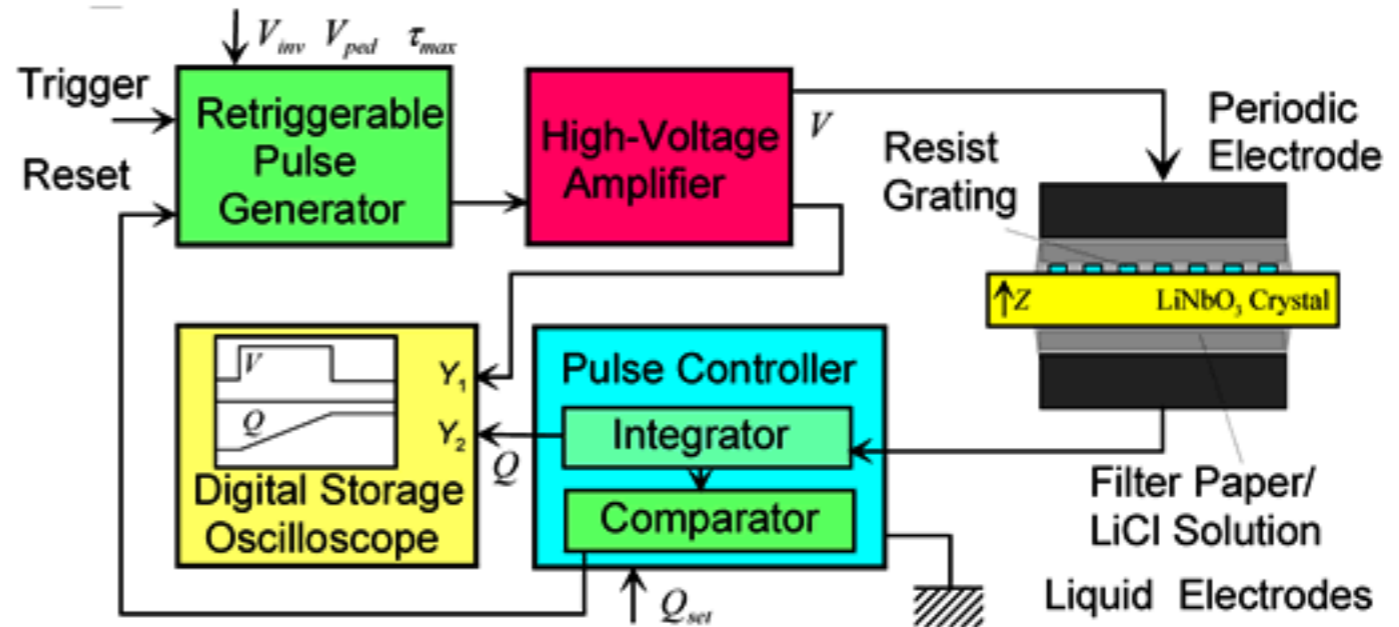
強誘電ヒステリシスループ
測定装置



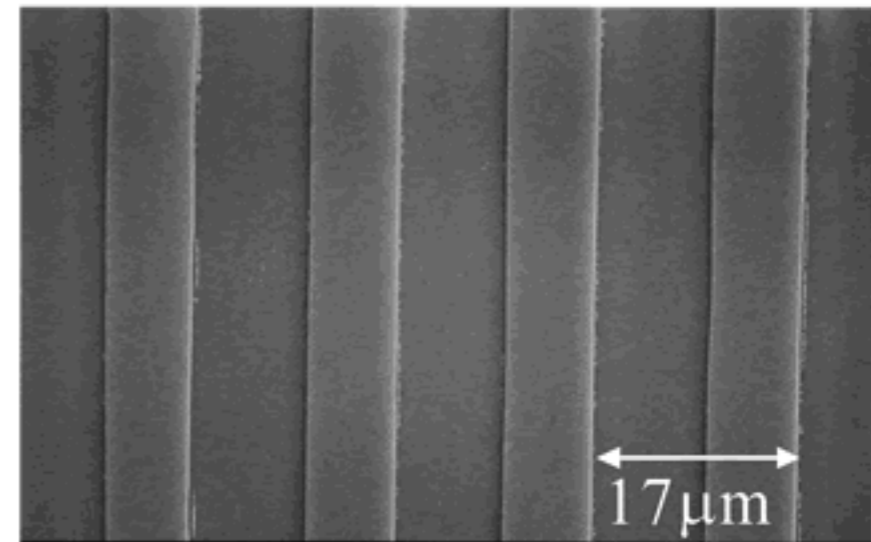
Stoichiometry LiNbO_3 結晶の
強誘電ヒステリシスループ

分極反転構造形成技術

液体周期電極 電圧パルス印加法

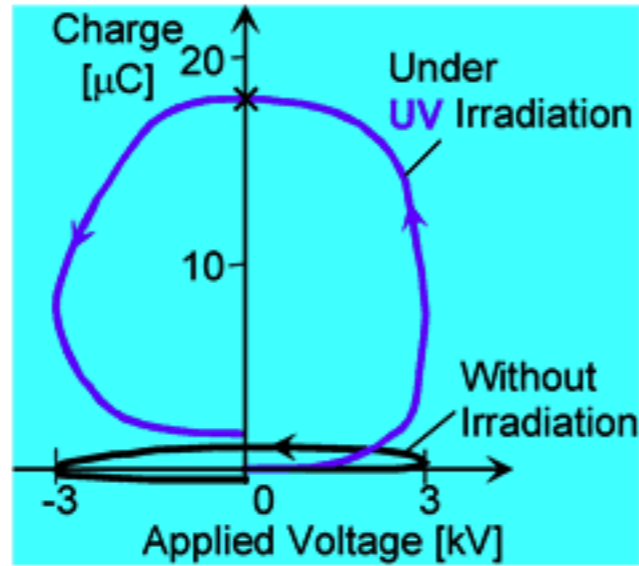


電圧・電荷 波形



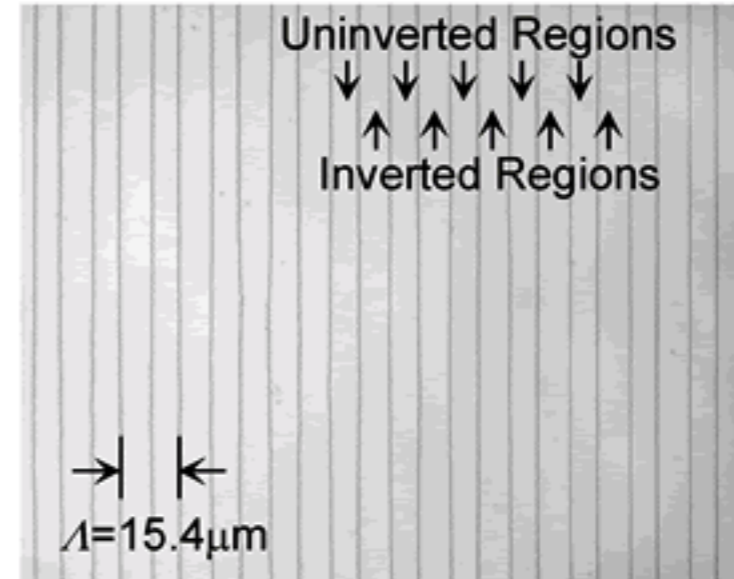
分極反転構造のSEM写真

MgO:LiNbO₃分極反転構造形成

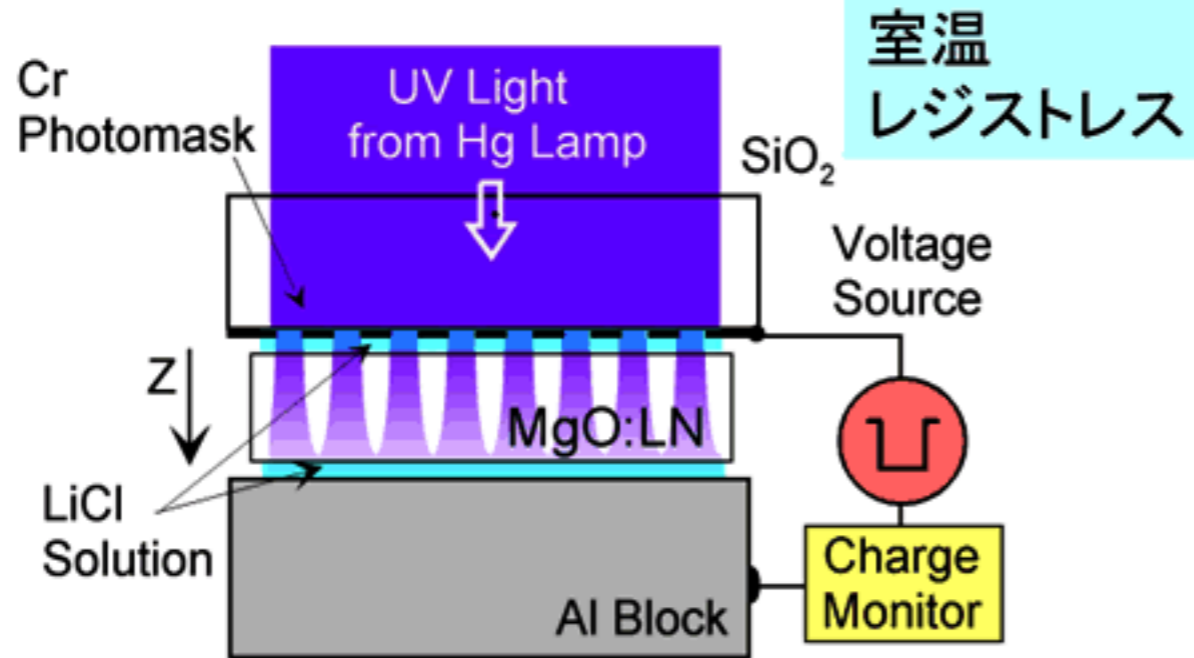


強誘電ヒステリシスループ

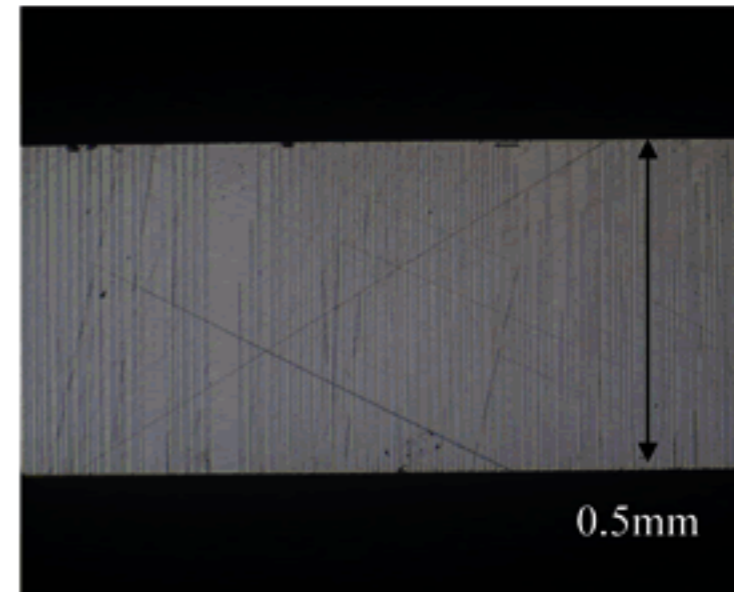
MgO:LiNbO₃ 光損傷耐性が高い



Top View



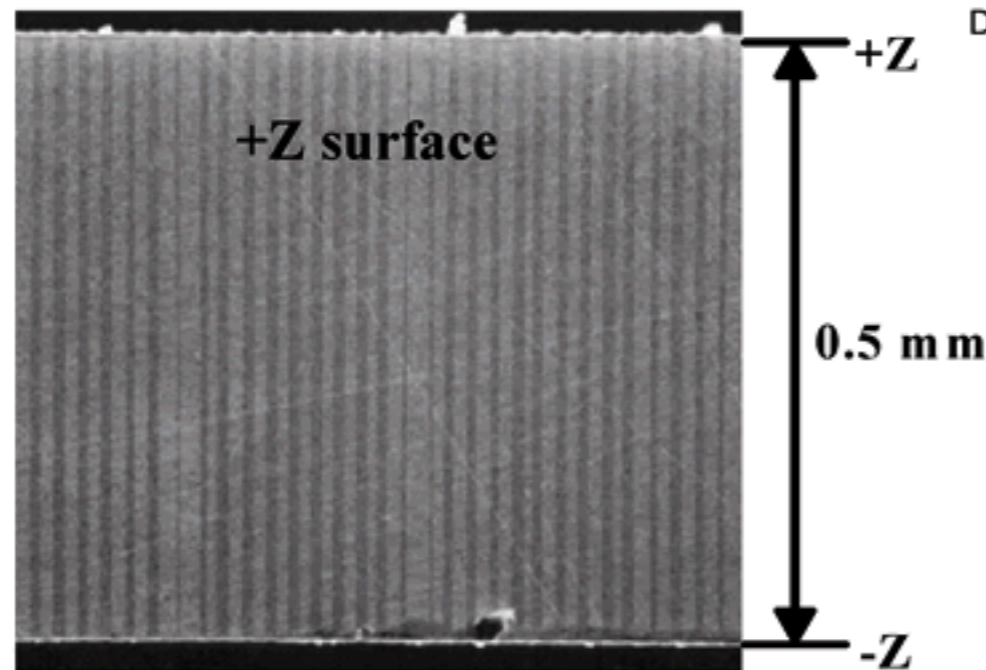
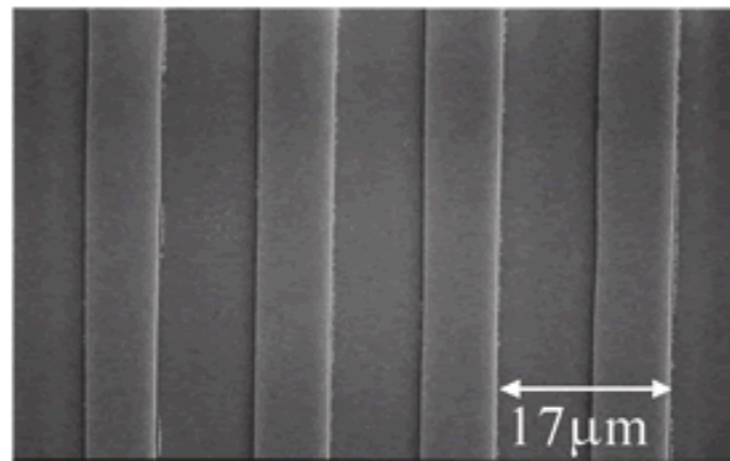
周期的分極反転構造の形成



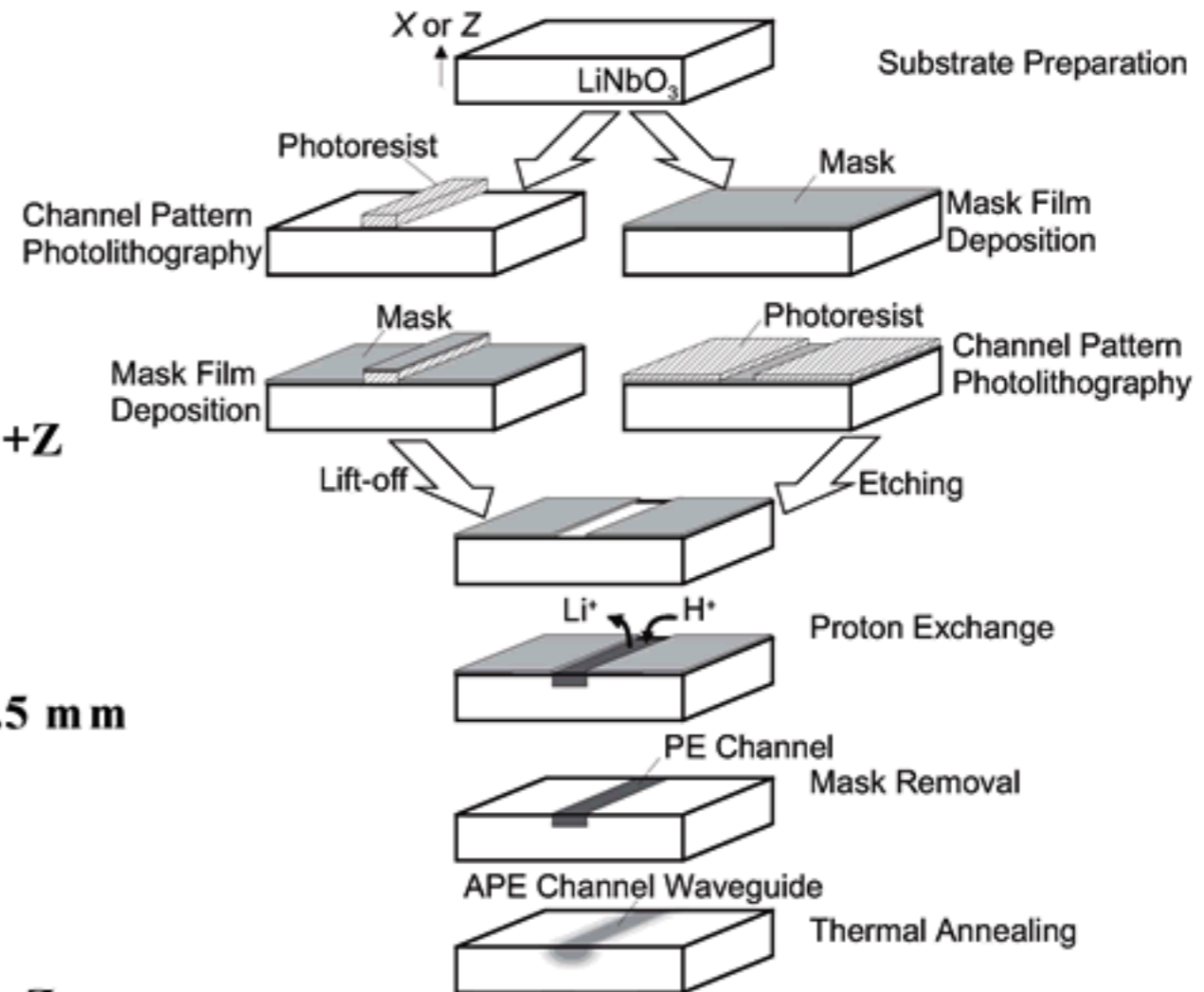
Cross Section

光導波路型 擬似位相整合 非線形光学 デバイスの作製

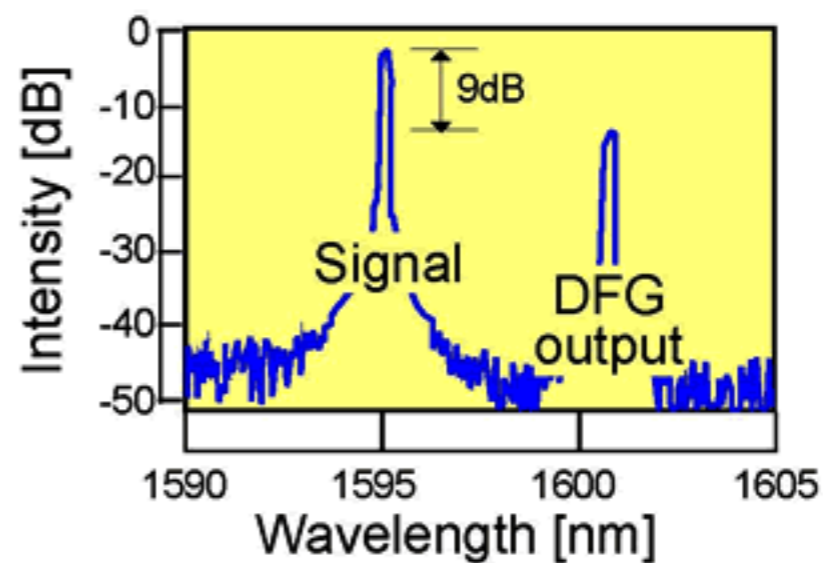
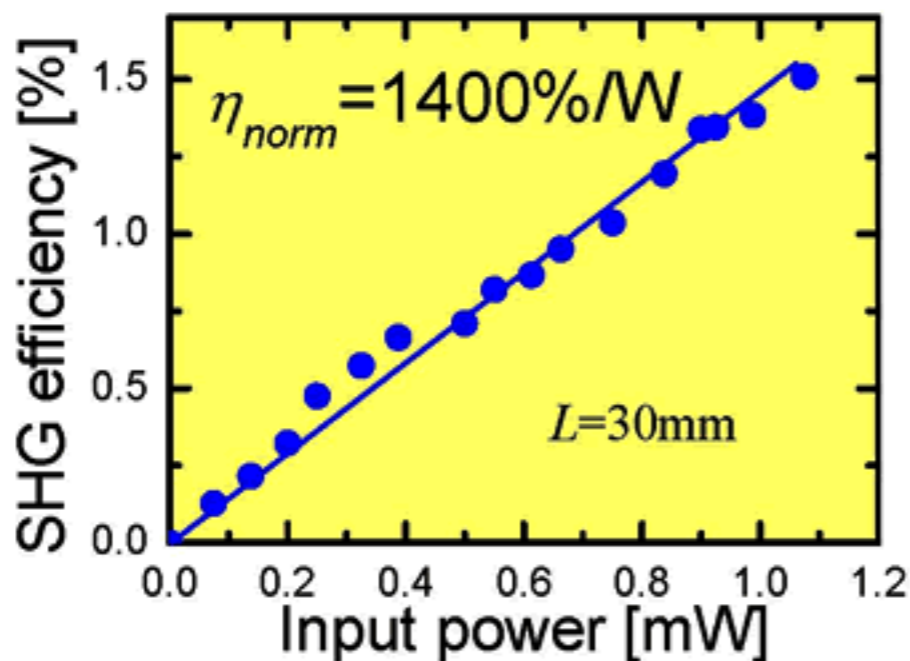
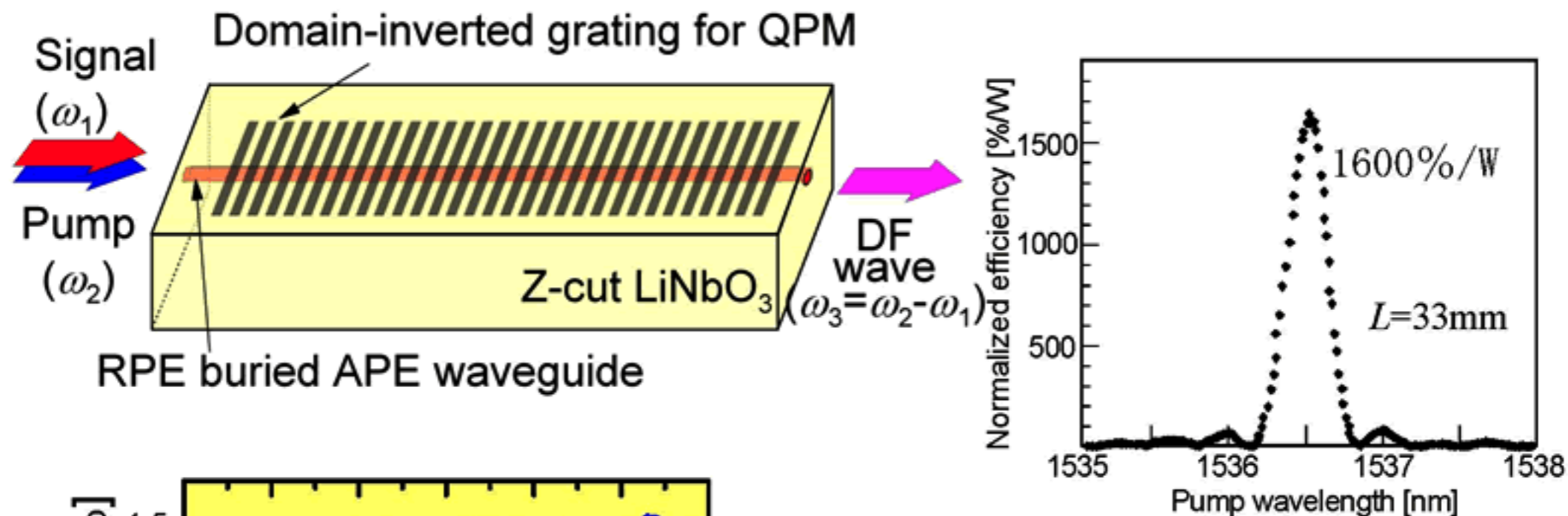
分極反転構造の形成



プロトン交換光導波路の形成



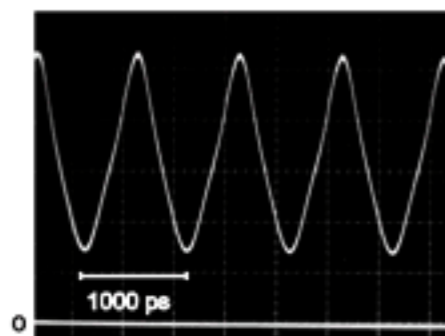
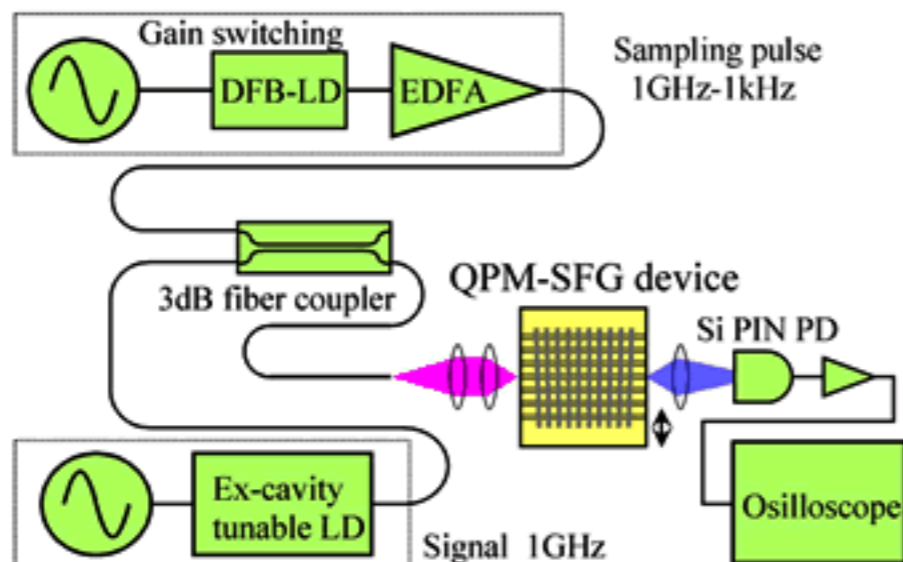
埋込みAPE導波路QPM-DFG波長変換デバイス



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

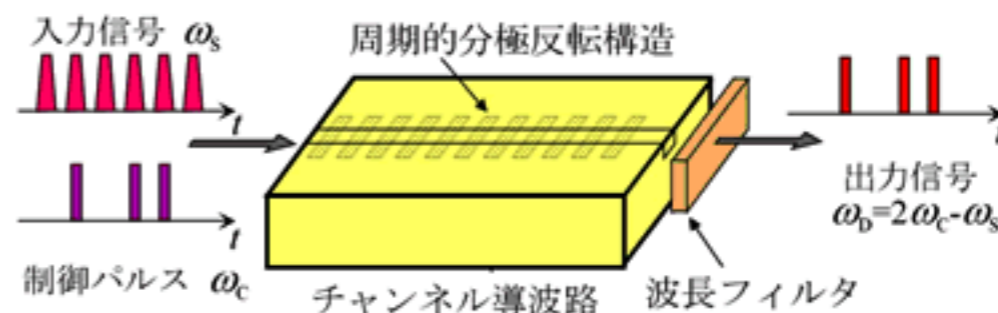


光サンプリングによる
波形観測結果

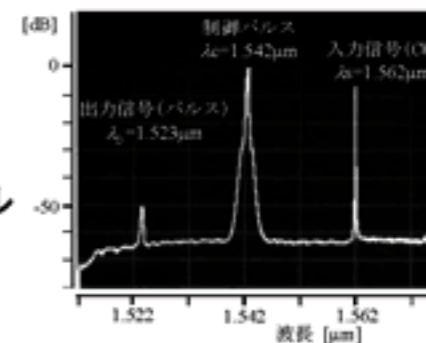
効率 43%/W

バルク結晶利用より
約3桁高い

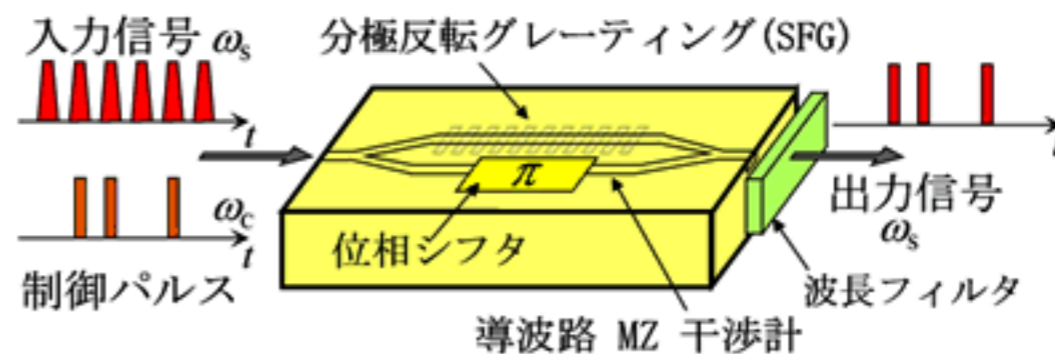
SHG/DFG光スイッチングデバイス



出力光のスペクトル



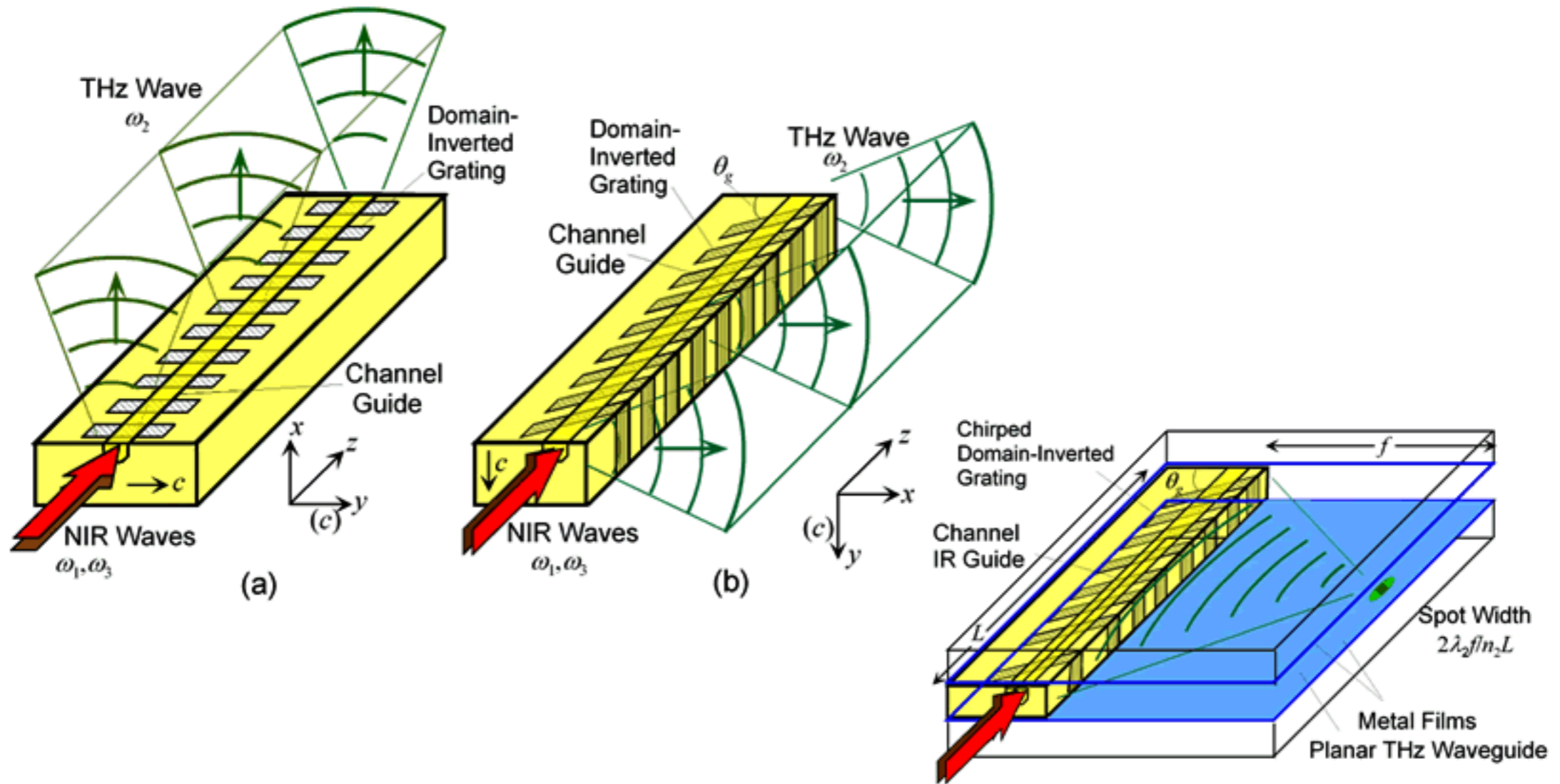
SFG干渉計型光ゲートスイッチ



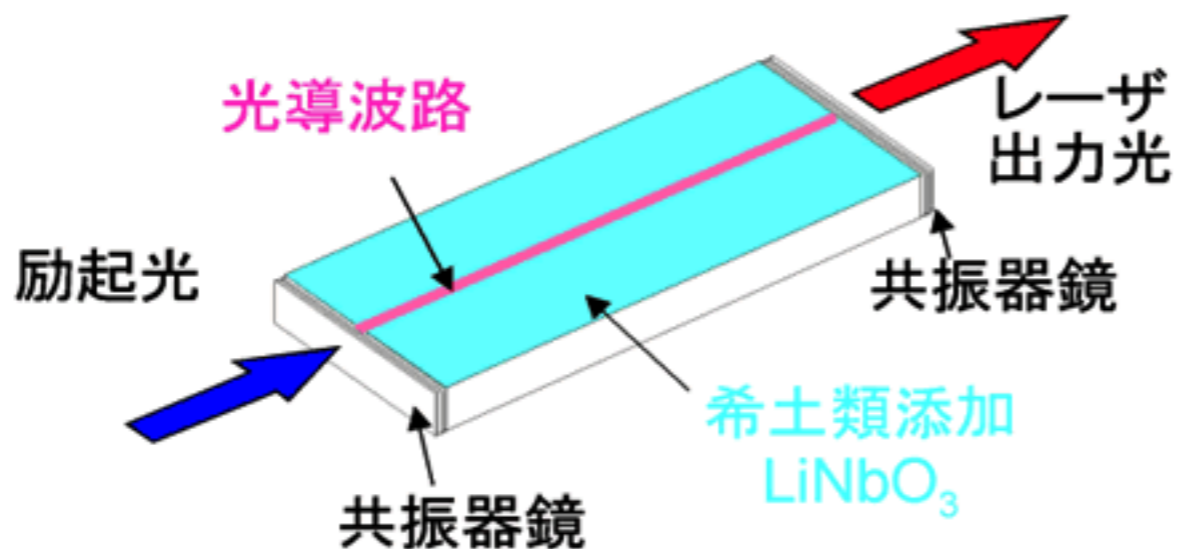
テラヘルツ域 差周波発生

THz波: 波長 $100\mu\text{m}$ 程度の電磁波

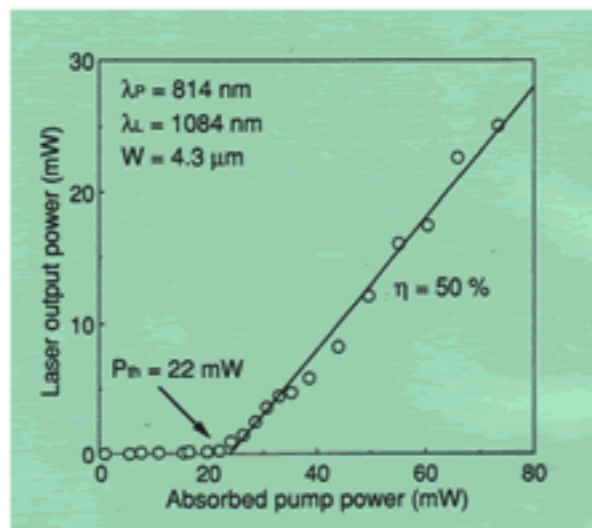
広範囲の計測・画像形成で多くの将来応用が期待されている



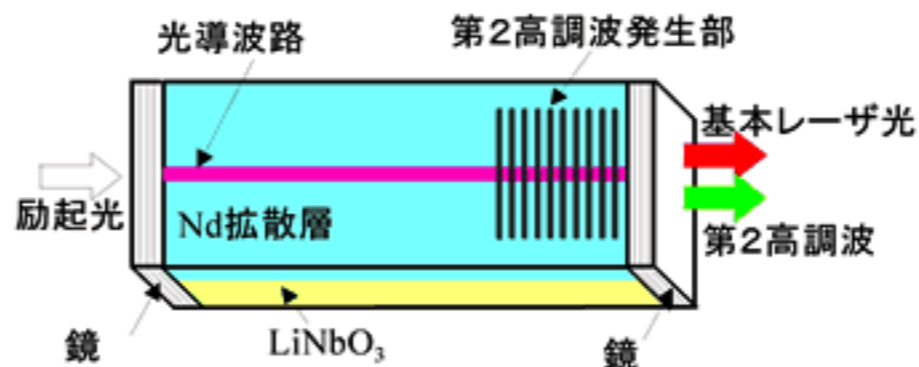
希土類添加 導波路レーザー



- 小型で高性能なレーザーを実現
- ・希土類による光増幅
 - ・導波路型光共振器
 - ・電気光学・非線形光学結晶



高出力レーザー発振



非線形光学波長変換素子集積導波路レーザー

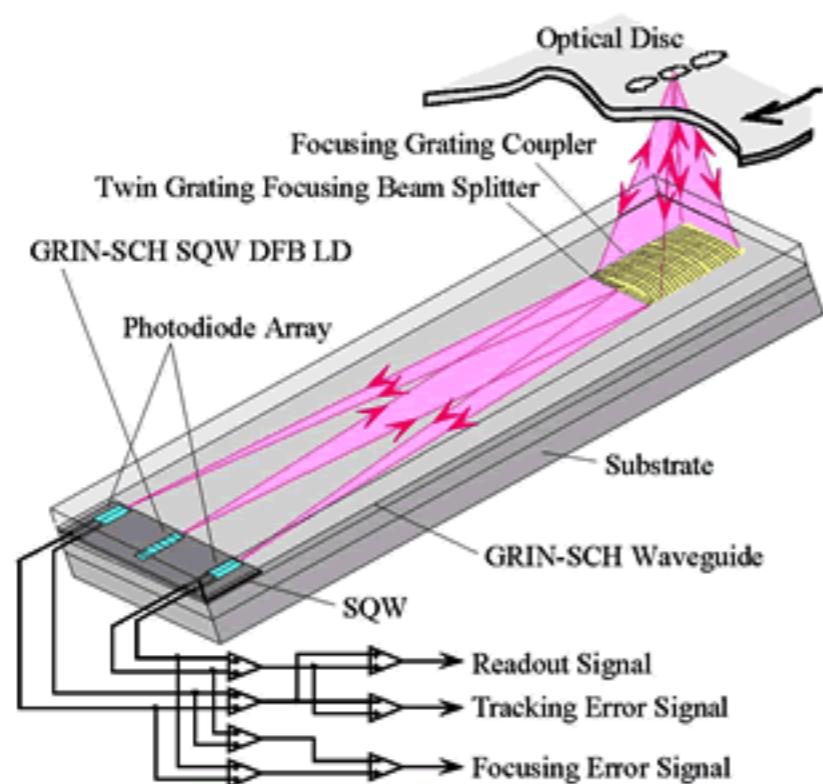
集積半導体レーザとその応用

光集積回路作製用 電子ビーム描画装置

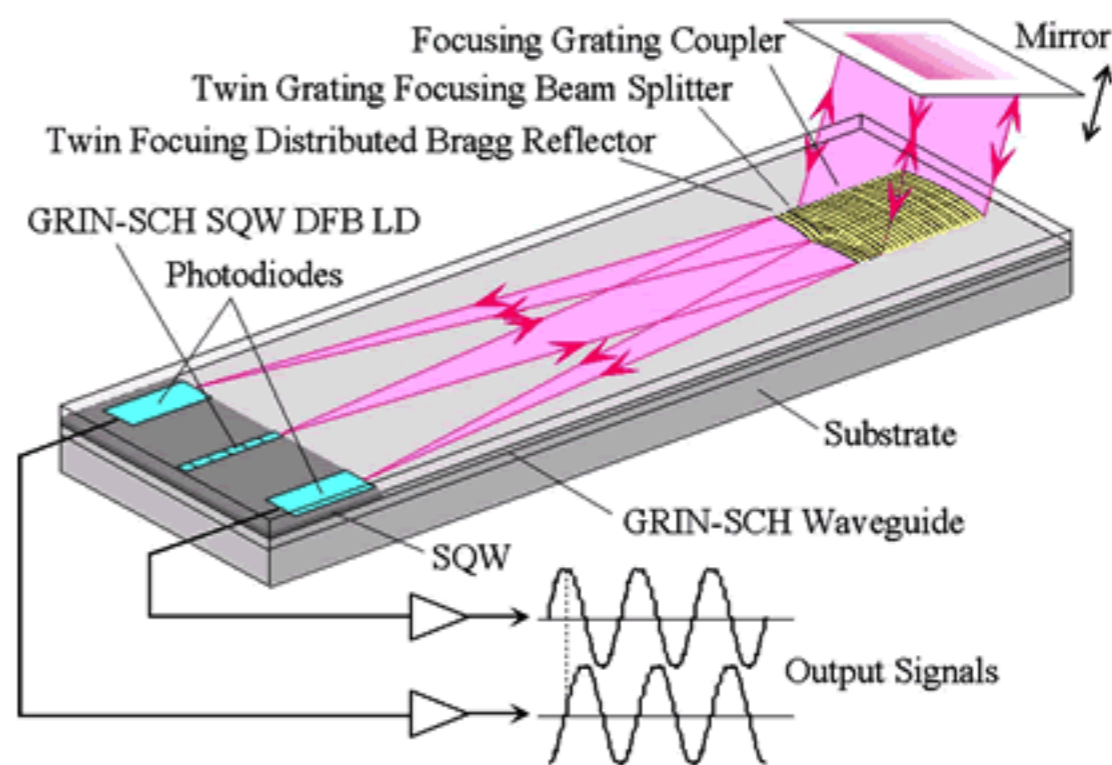
アナログ走査
デジタル走査



半導体モノリシック光集積センサデバイス

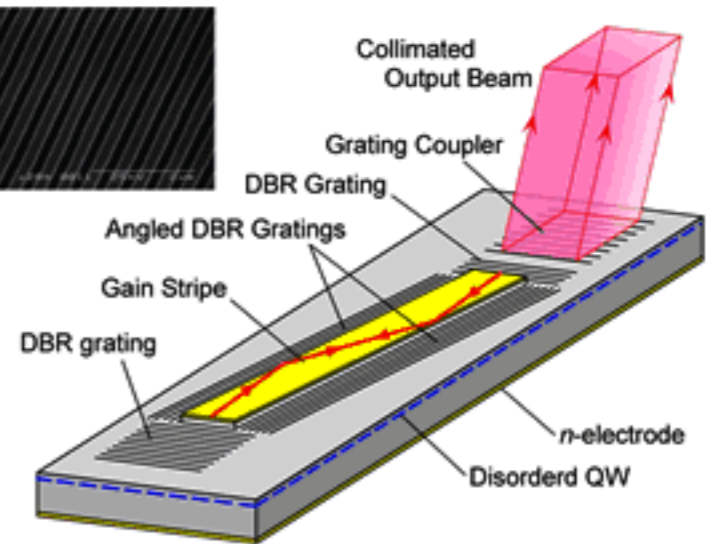
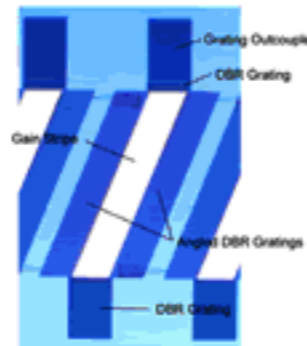
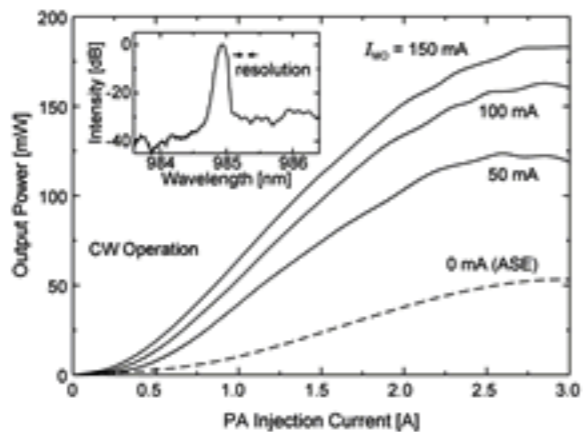
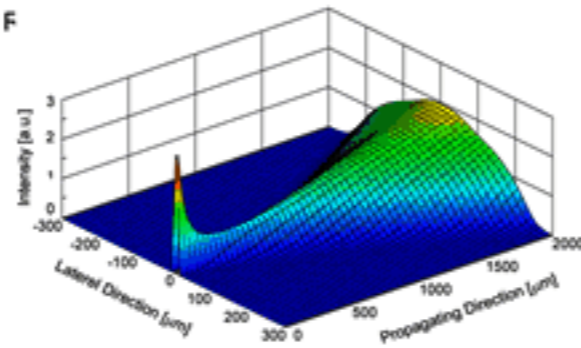
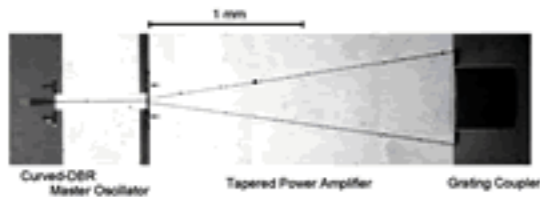
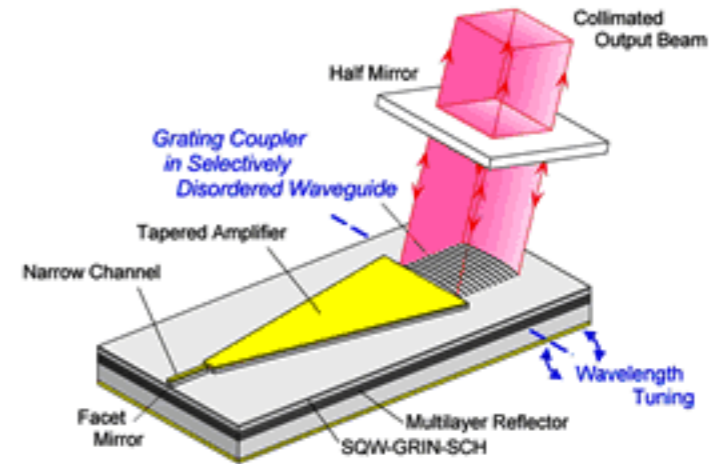
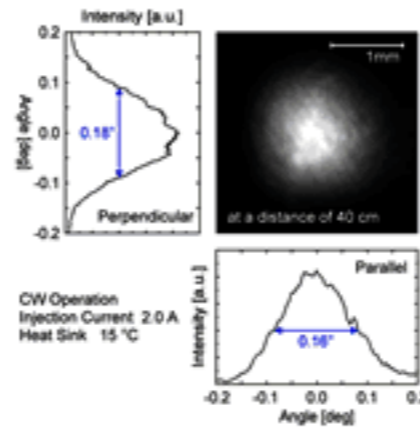
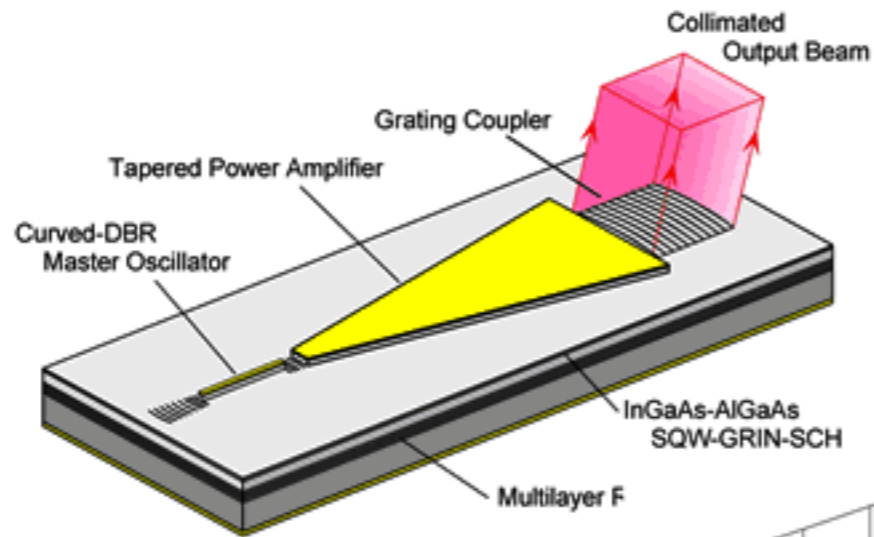


モノリシック光集積
ディスクピックアップヘッド



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

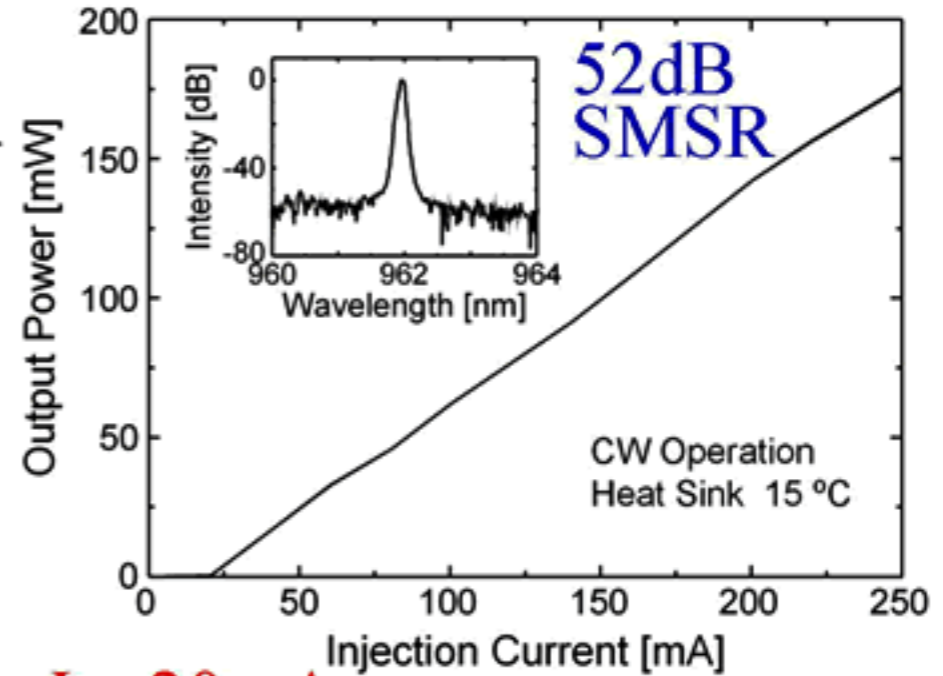
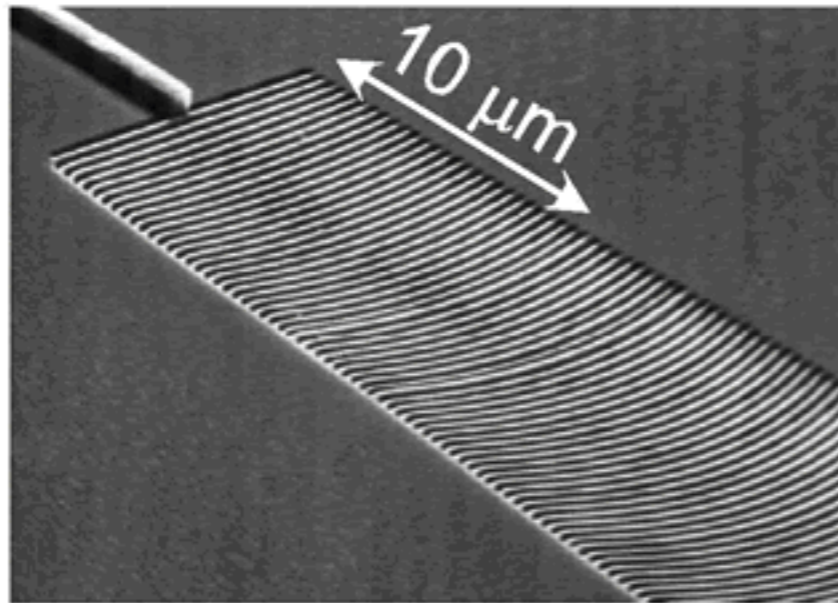
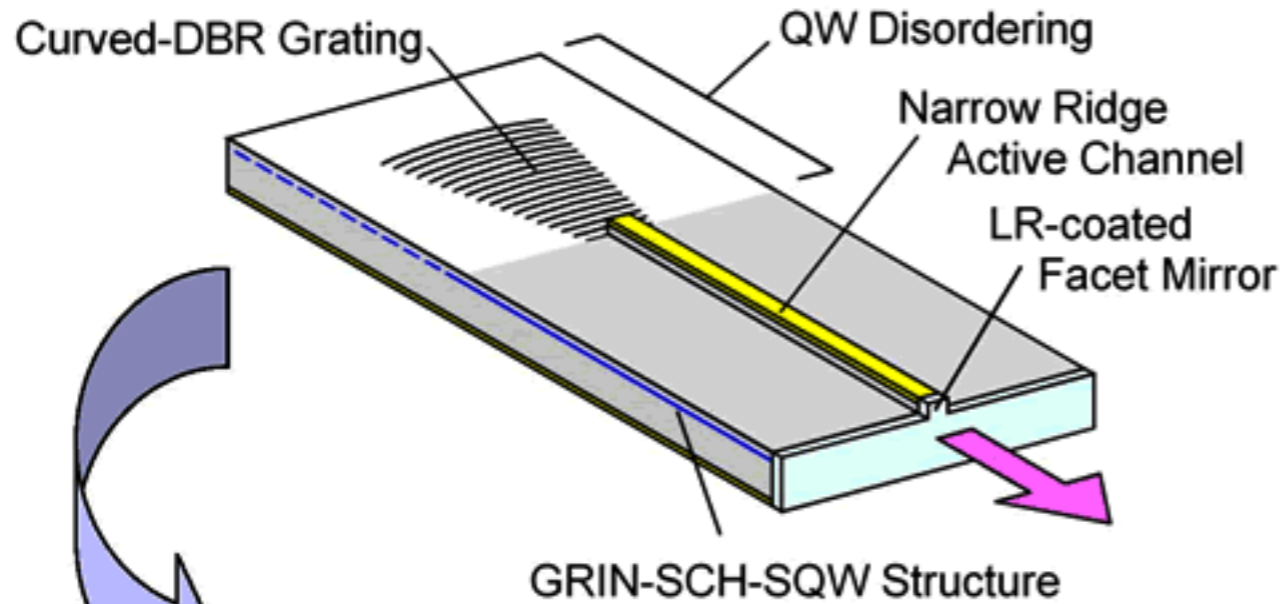


集積外部共振型可変波長レーザ

発振器・増幅器・結合器集積レーザ

傾斜グレーティング広面積 DBR レーザ

作製したInGaAs歪量子井戸DBRレーザ



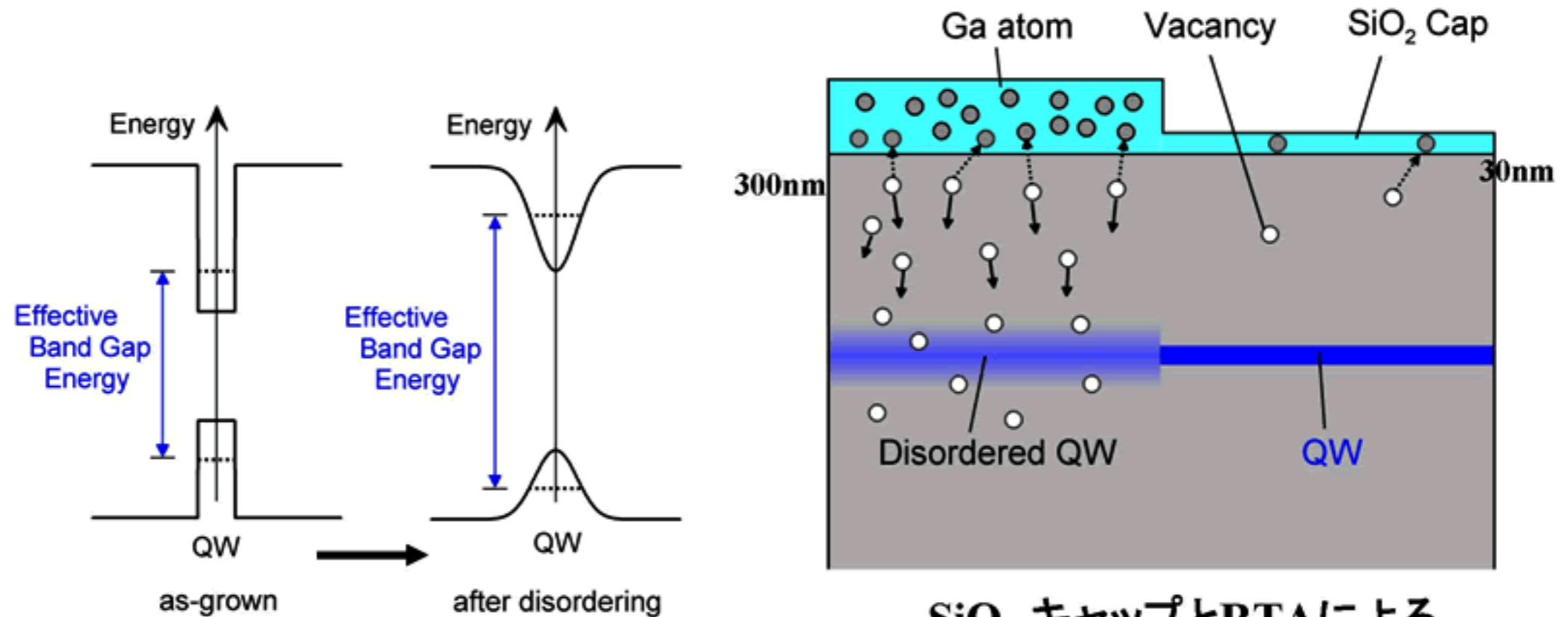
$$I_{th} = 20 \text{ mA}$$

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

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

量子井戸の選択的無秩序化による受動導波路損失の低減

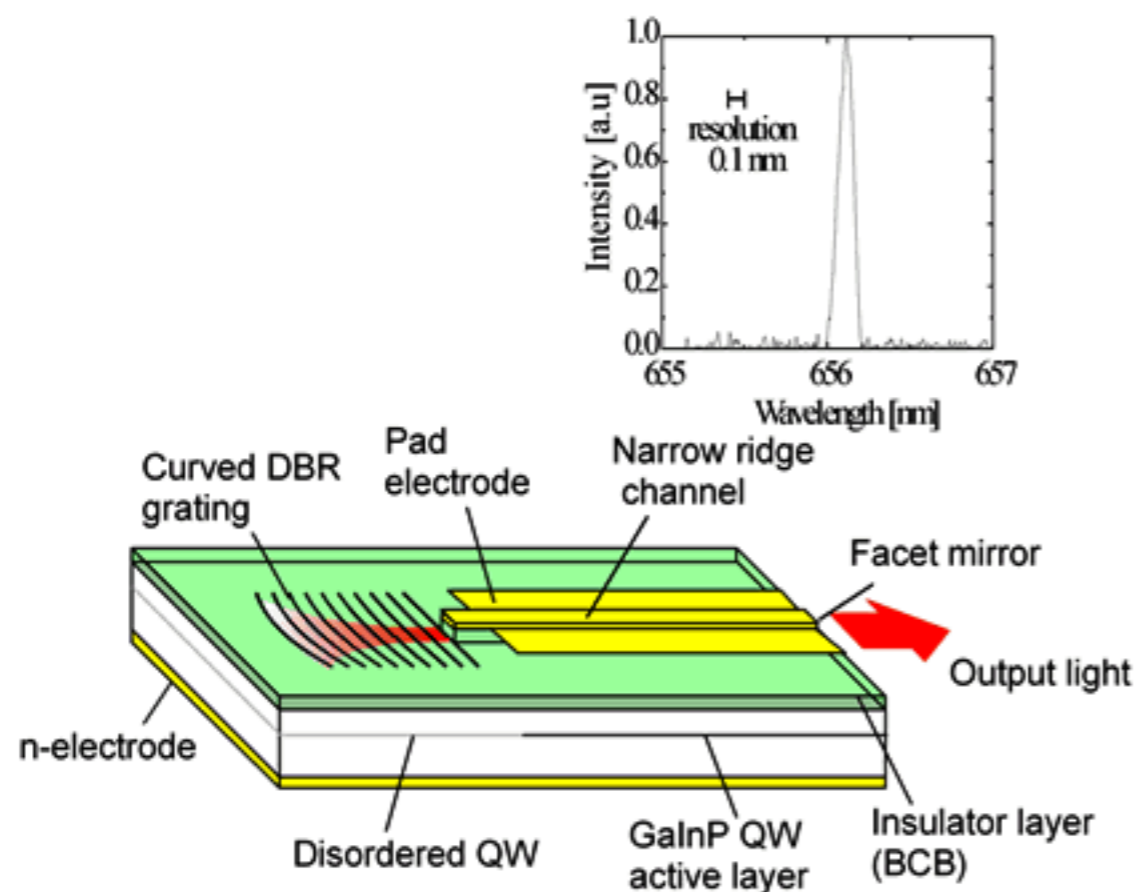
レーザと受動素子のモノリシック集積化 受動導波路損失の低減



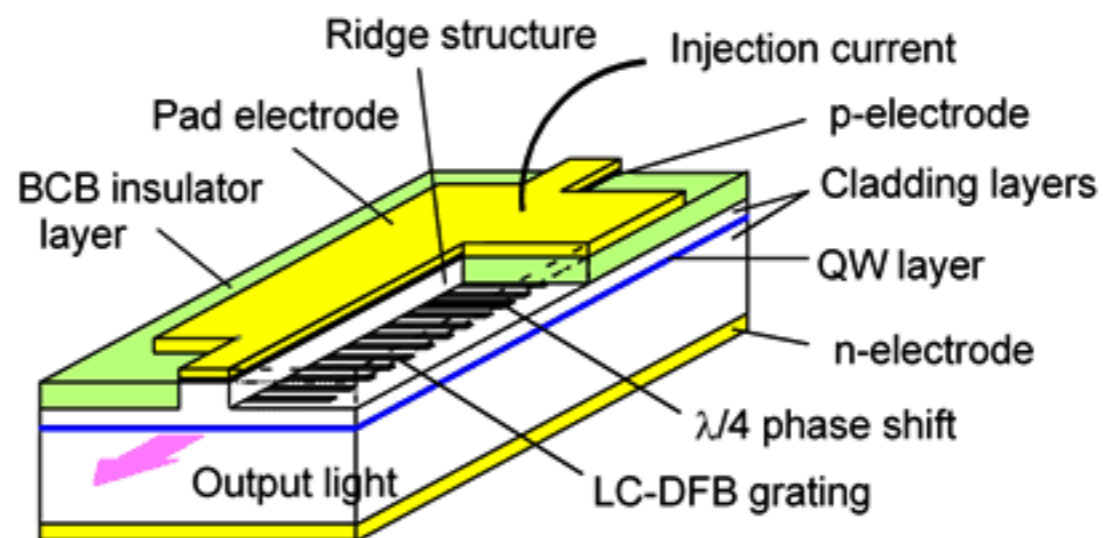
SiO₂ キャップとRTAによる
選択的無秩序化

実効バンドギャップシフト 23nm 受動導波路損失 $\alpha_p = 3 \text{ cm}^{-1}$

各種新半導体レーザーの設計・作製・性能改善

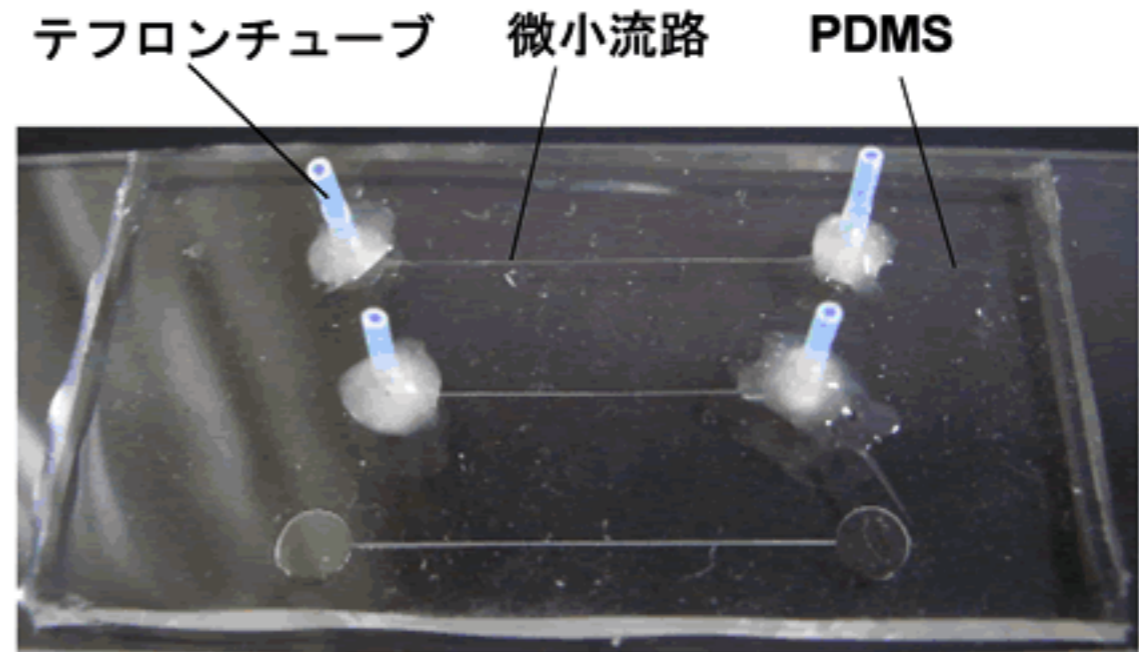
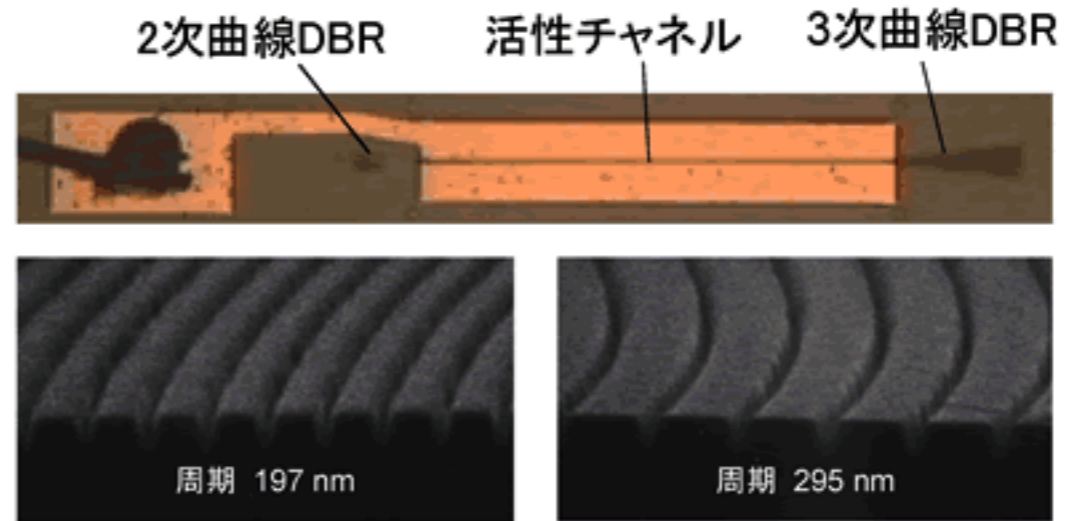
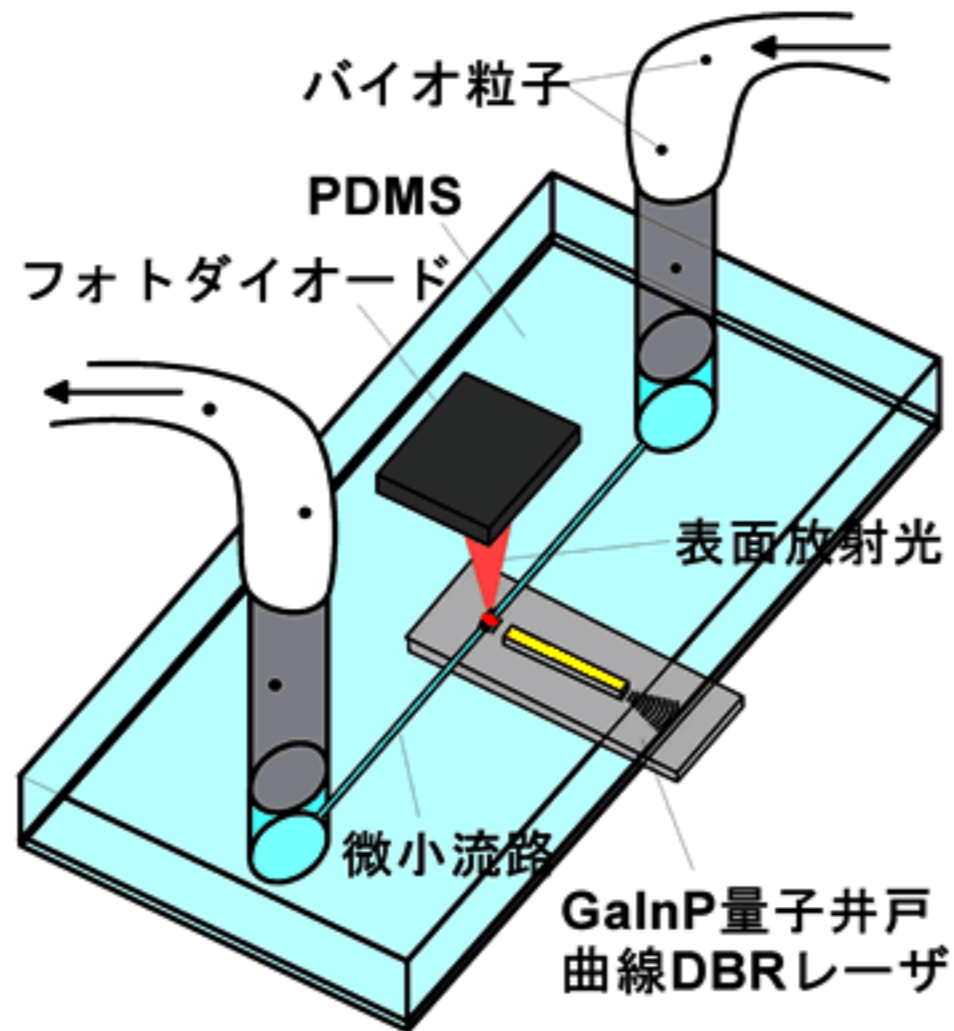


量子井戸赤色DBRレーザー
出力44mW

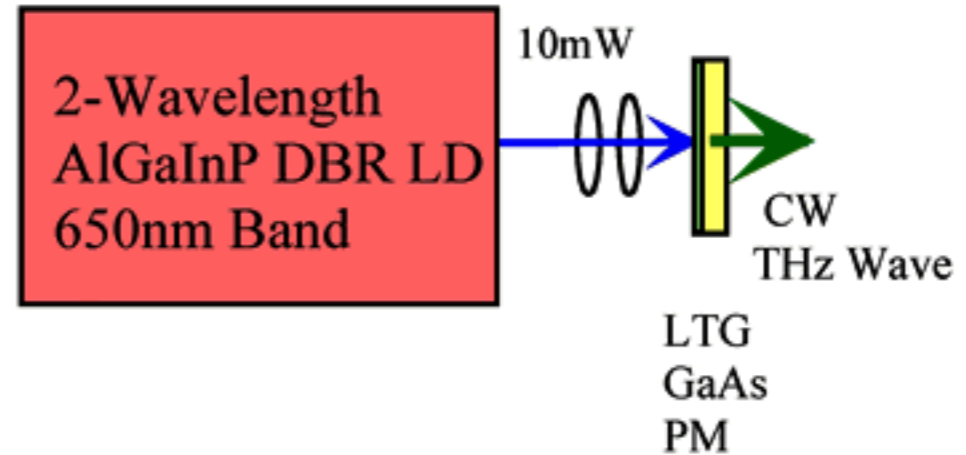
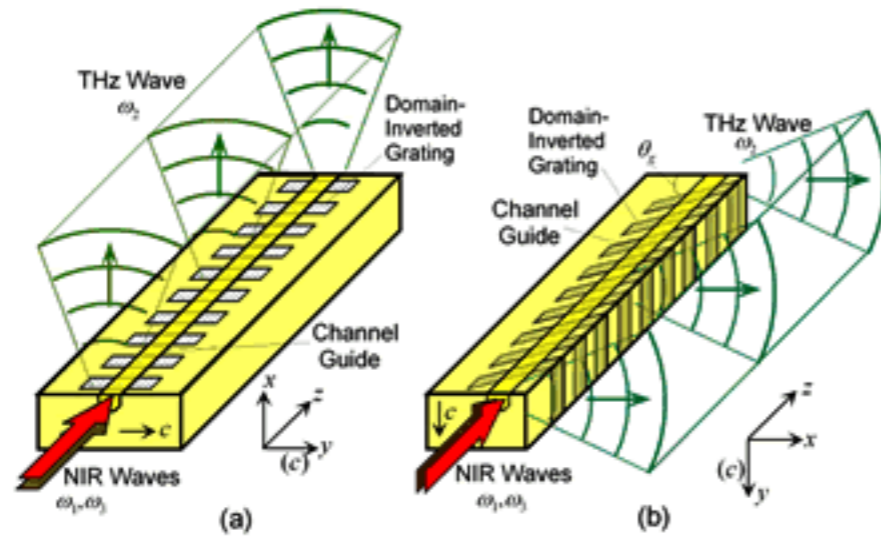


ラテラル結合DFBレーザー
出力19mW, 側モード抑圧比46dB

集積バイオ光電子センサ

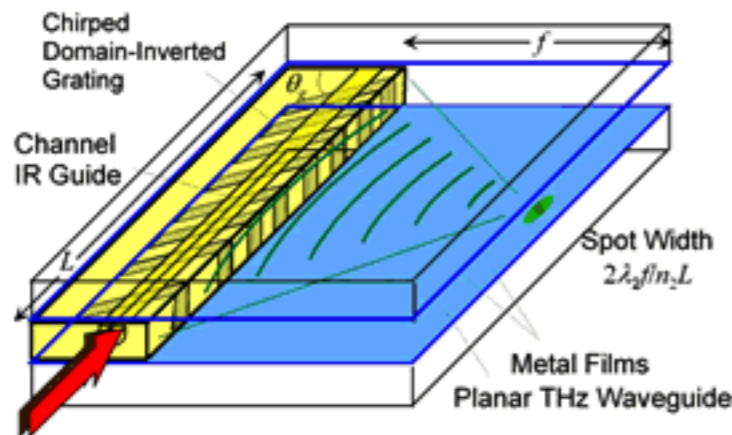


集積テラヘルツ(THz)波発生デバイス



導波型非線形光学THz波発生デバイス
T.Suhara, et al., IEEE J. Quantum Electron.,
39, p.166, 2003.

2波長赤赤色半導体DBRレーザ
+結合光学系+LTG GaAsフォトミクサによる
集積CWテラヘルツ光源の開発



集積THz波発生デバイス構成案

バイオセンシング・イメージング
に有用なテラヘルツ波を発生する
実用的な集積化光源を開発する

量子フォトニックデバイスの研究

背景

光エレクトロニクスデバイスの性能限界

量子雑音 限界打開の方策

新たな可能性・技術革新

レーザ光の**フォトン(光子)**としての特質の活用

量子情報通信 (量子暗号、量子テレポーテーション、----)

量子コンピューティング など新分野の(理論的)研究の活発化

デバイス化の研究は殆ど未着手
集積化技術重要

量子光学機能の将来応用

量子フォトリックデバイス *Quantum Photonic Devices*
(阪大フロンティア研究機構 研究プロジェクト)

非線形光学デバイスや集積半導体レーザにより
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？！

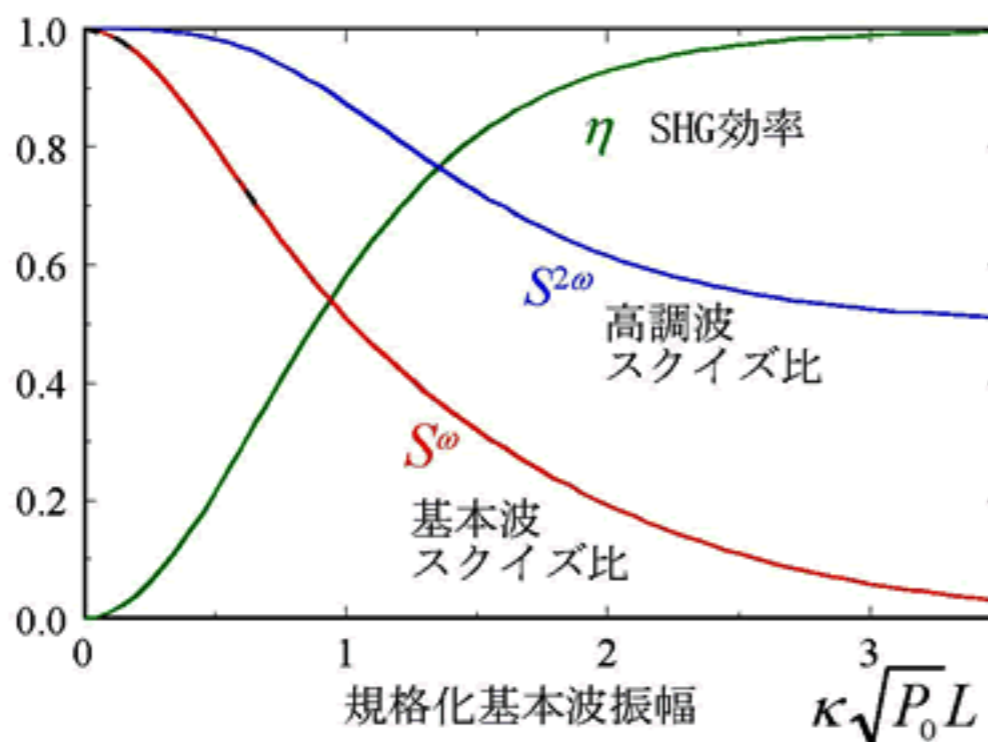
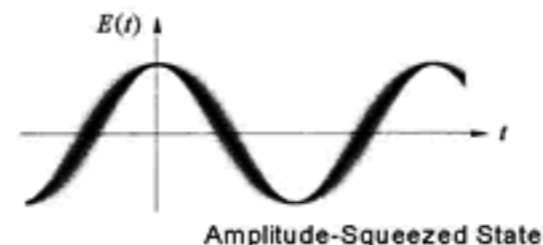
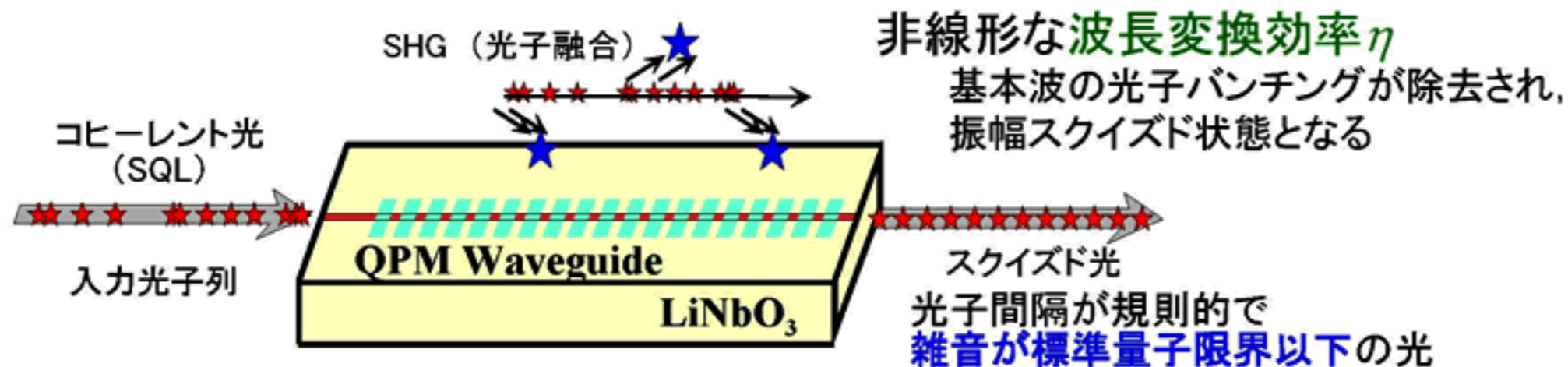
量子テレポーテーション

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？！

SHGによるスクイズド光発生

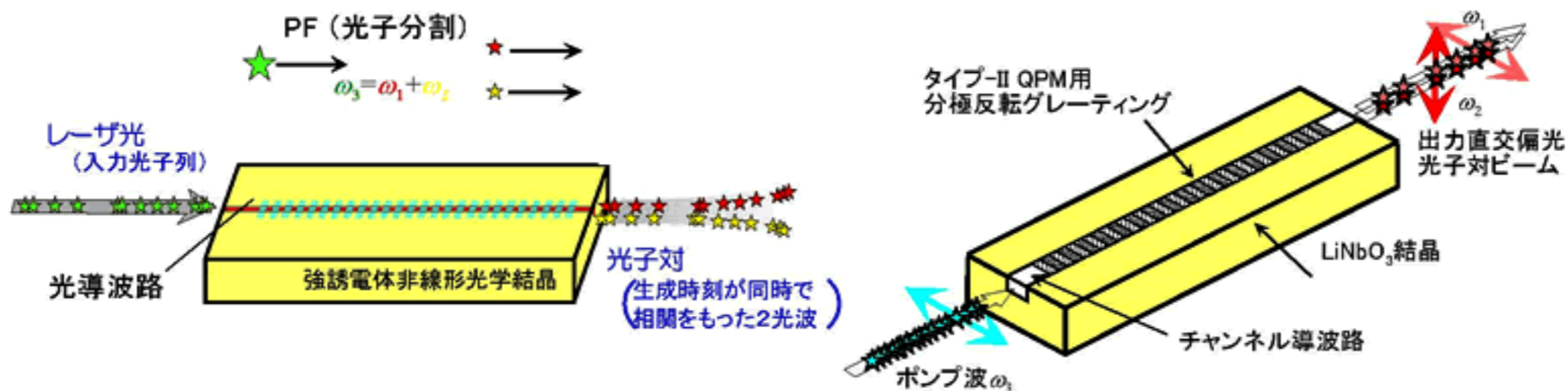


スクイズ比
(標準量子限界で規格化した強度雑音レベル)

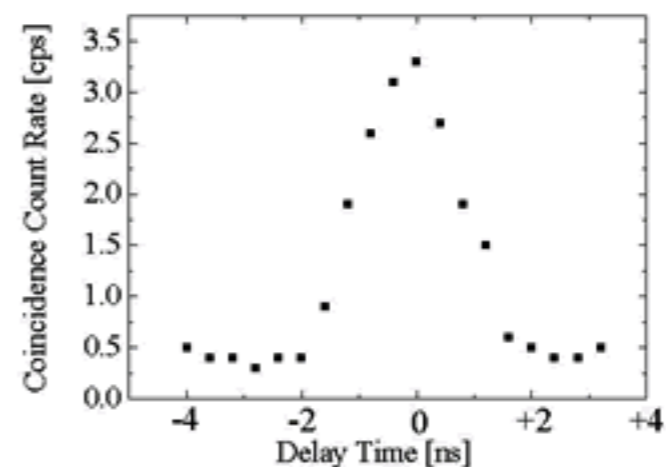
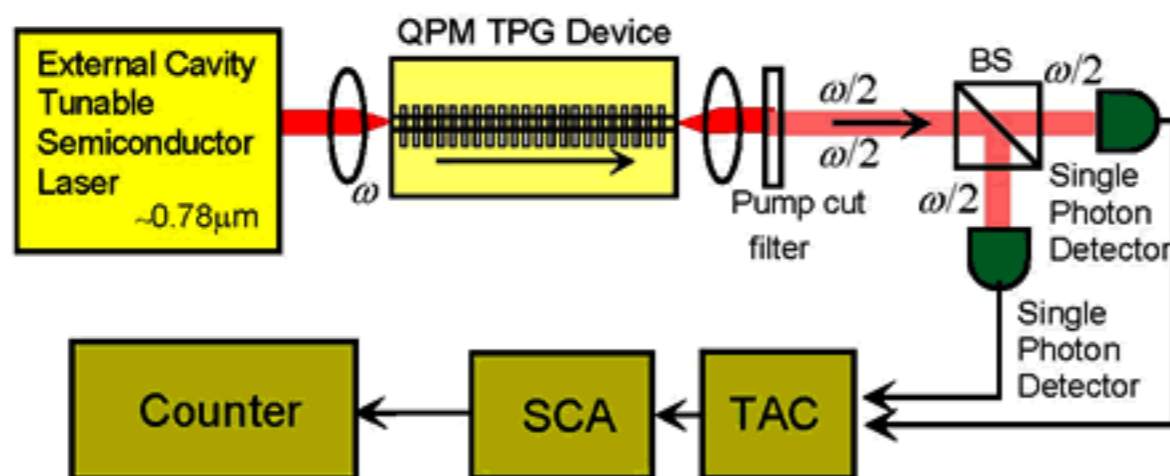
$$S^\omega \rightarrow 0$$

$$S^{2\omega} \rightarrow 1/2$$

非線形光学量子フォトリックデバイス



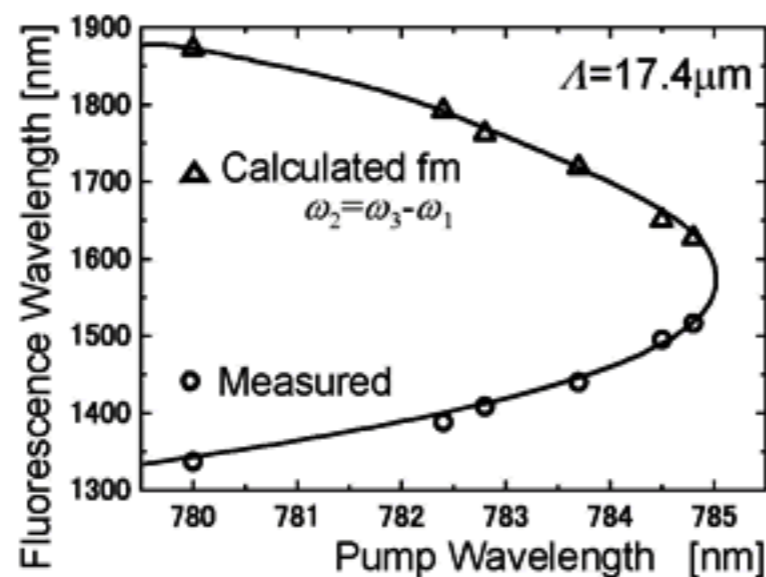
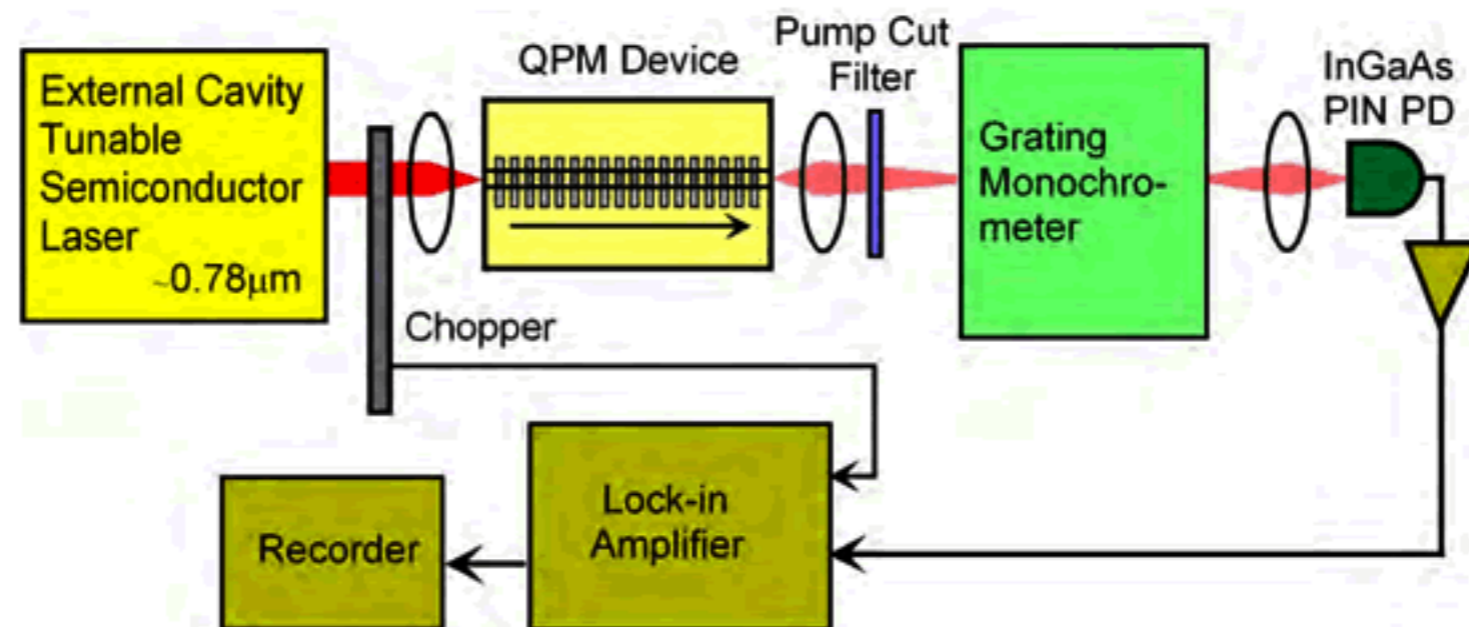
光子対発生デバイス



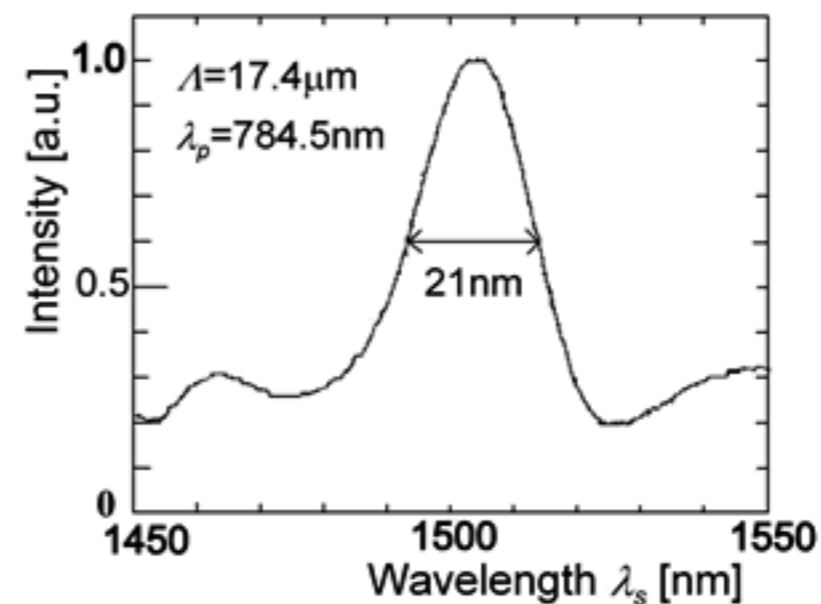
相関光子対発生を検証

パラメトリックフロレッセンス発生の実験

光子対発生・検出の予備実験

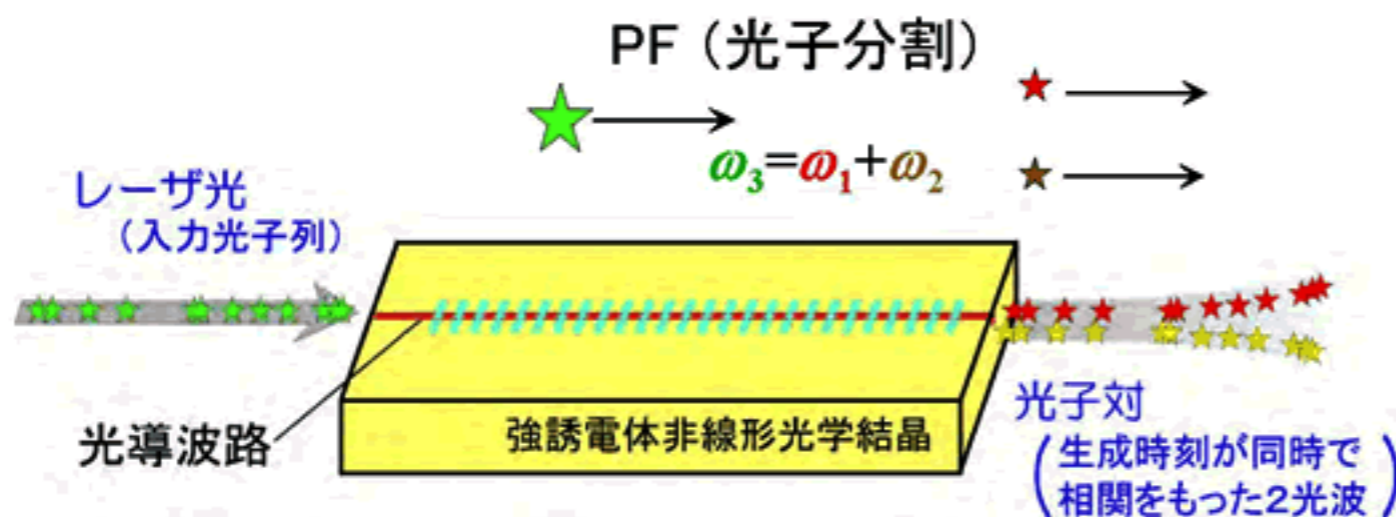


フロレッセンス波長の励起光波長依存性



フロレッセンススペクトル

パラメトリックフロレッセンスによる光子対発生



FPM 解析

$$\langle [\Delta\{N_1(L) - N_2(L)\}]^2 \rangle = 0$$

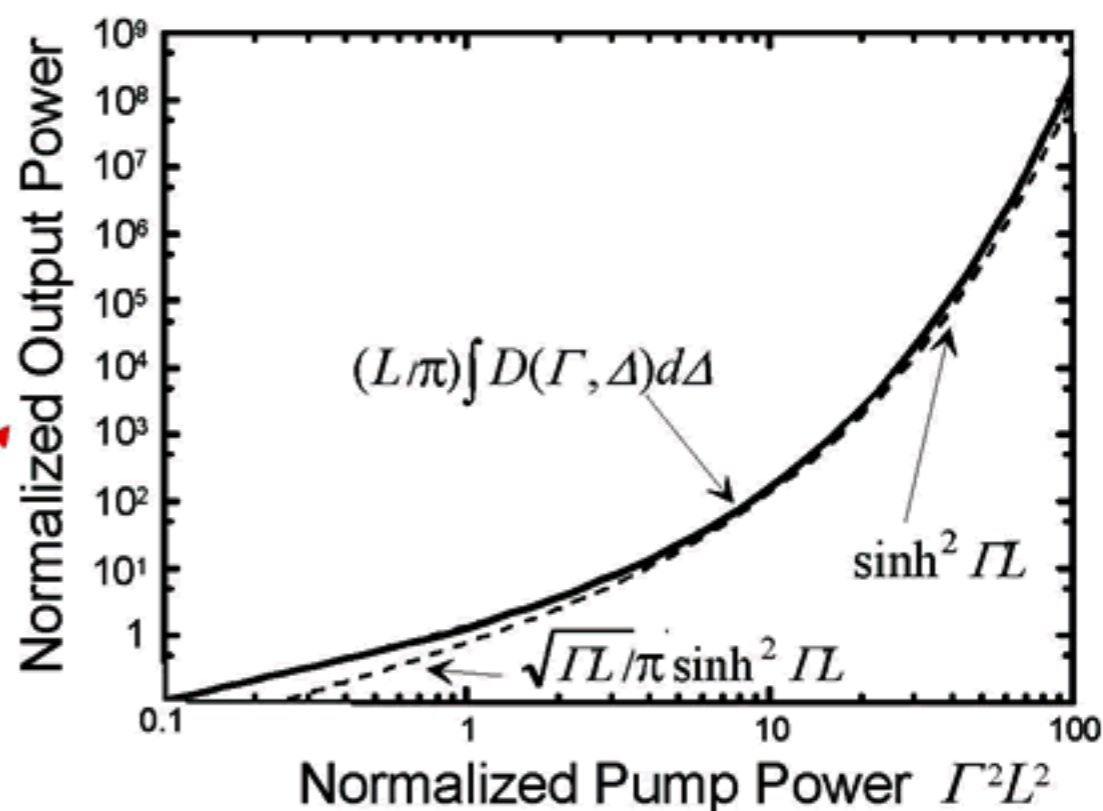
信号光子とアイドラ光子は
完全相関

各量子化モードの出力光子数

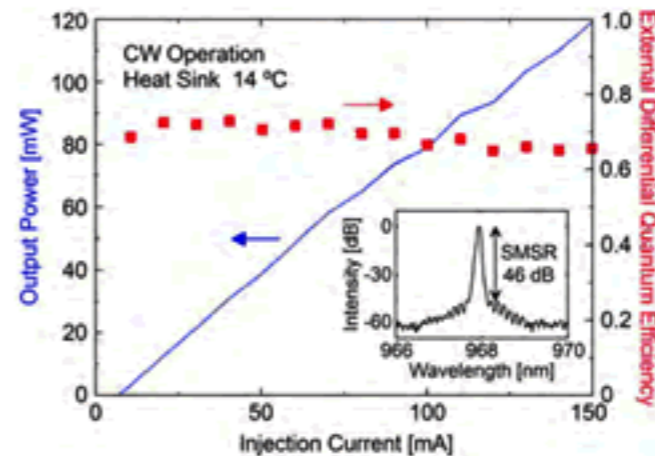
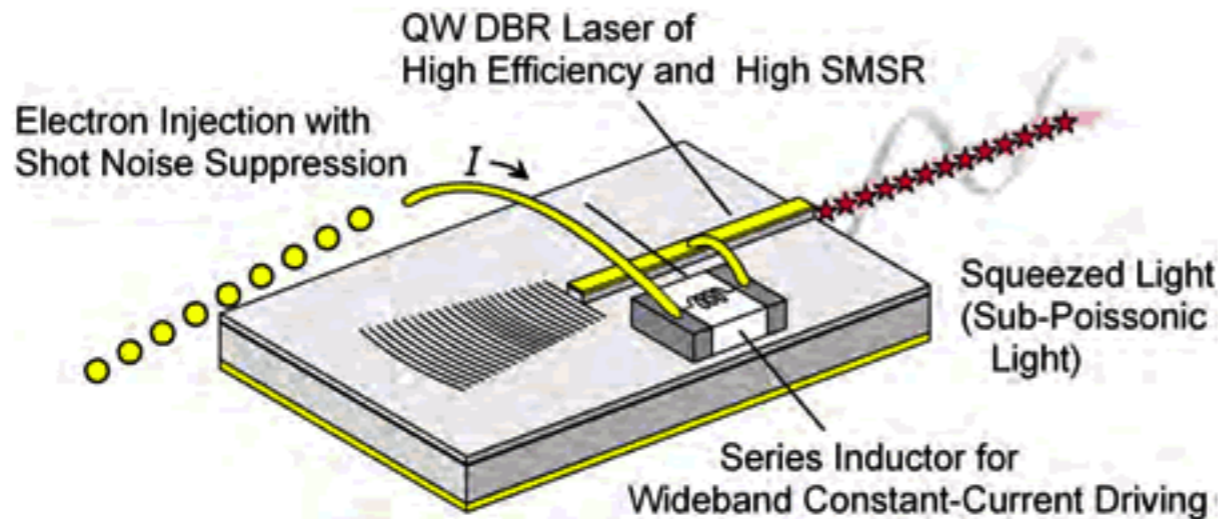
$$\langle N_1(L) \rangle = \langle N_2(L) \rangle = \sinh^2 \Gamma L$$

出力パワー

QPM 帯域内の積分

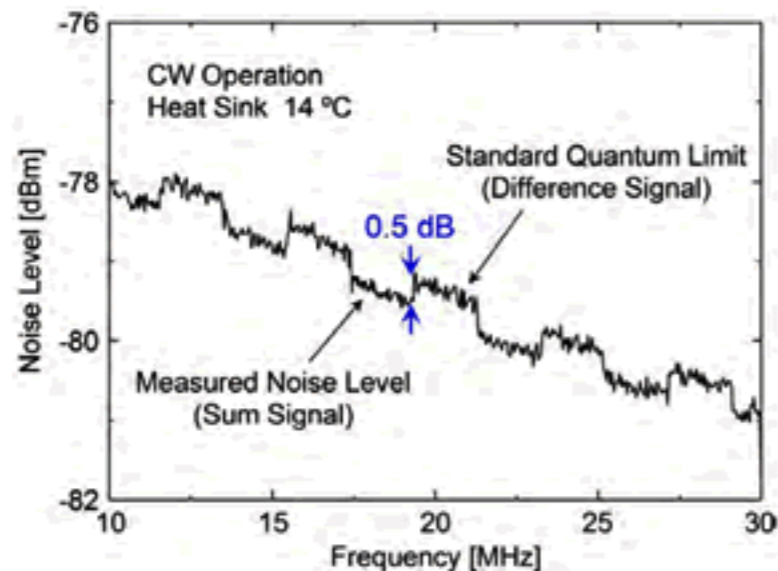


半導体量子フォトニックデバイス

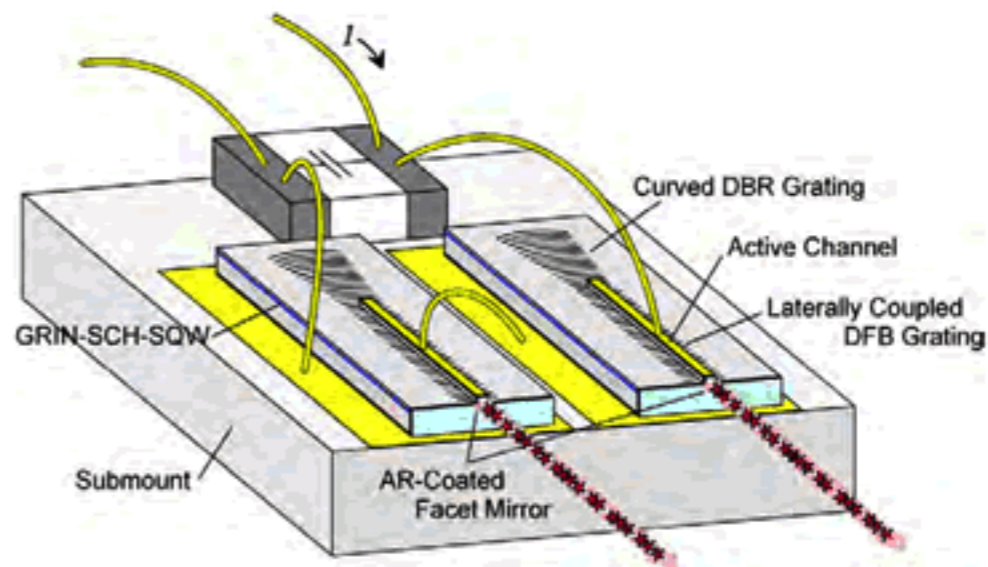


$I_{th}=7\text{mA}$ 量子効率 0.63 最大励起率 $I/I_{th}=21$

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

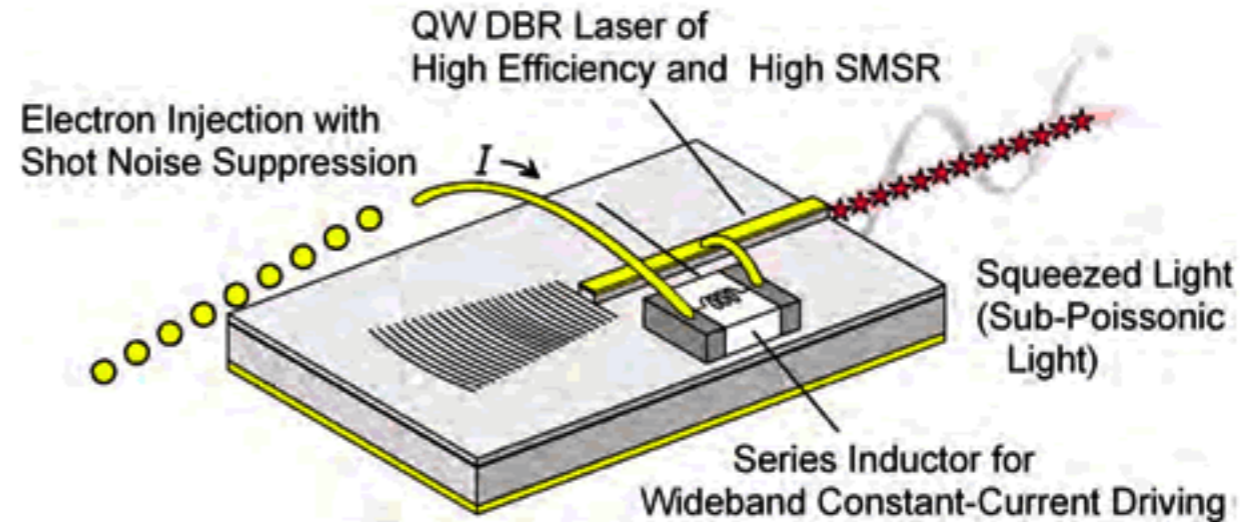
スクイズド光発生用半導体DBRレーザ

原理 Y.Yamamoto, et al. *Phys. Rev. A.* **34**, pp.4025-4042, 1986

高インピーダンス(RF定電流)駆動で注入電流のショット雑音抑制

応用拡大・実用性改善には 単一モード・室温動作

InGaAs 歪量子井戸DBRレーザ
外部共振器なしで高SMSR、
低閾値, 室温で高励起

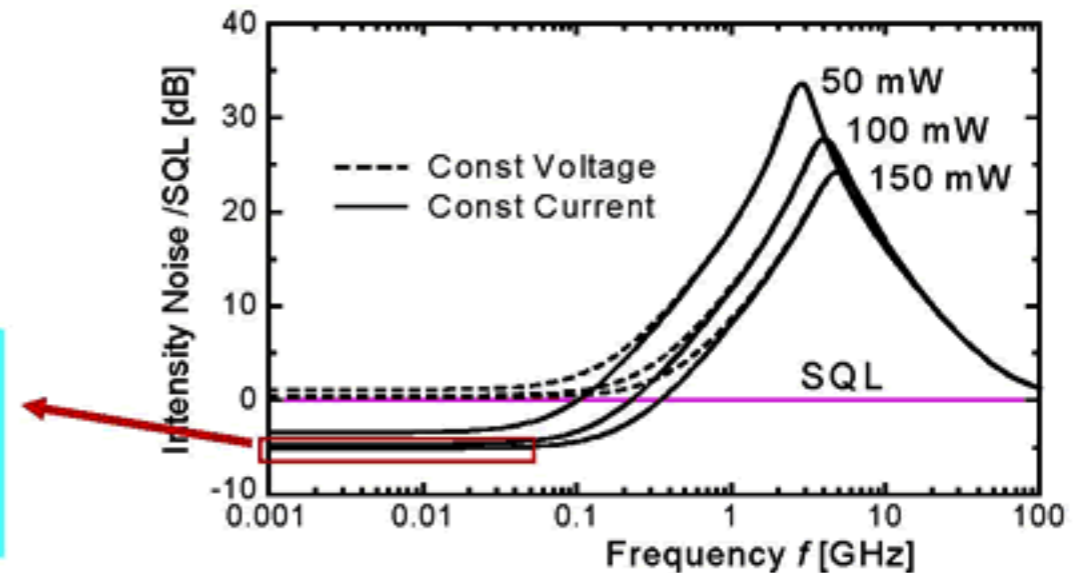


ランジュバン雑音源を含むレート方程式

→ 揺らぎ線形化レート方程式

出力光パワーの雑音スペクトル

SQL以下 ~5dB
($P > 100\text{mW}$, $f < 50\text{MHz}$)
のスクイズド光発生が期待できる

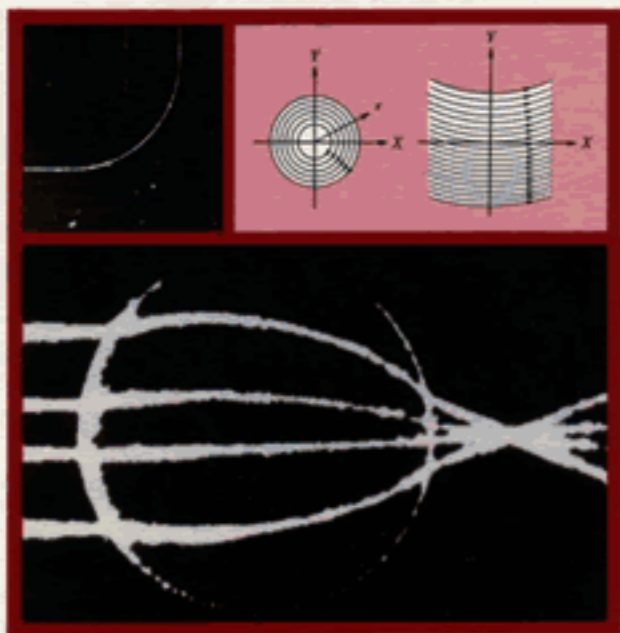


光集積回路

(改訂増補版)

工学博士 西原 浩・工学博士 春名正光・工学博士 橋原敏明 共著

Optical Integrated Circuits



オーム社

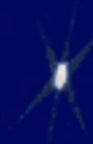
OHM 光通信/光電子系列

集成光路

(日) 西原 浩 春名正光 著
橋原敏明
梁瑞林 译



科学出版社
www.sciencep.com



McGRAW-HILL OPTICAL AND ELECTRO-
OPTICAL ENGINEERING SERIES

ROBERT E. FISCHER & WARREN J. SMITH, Series Editors

OPTICAL INTEGRATED CIRCUITS

HIROSHI NISHIHARA
MASAMITSU HARUNA
TOSHIAKI SUHARA

先端光 エレクトロニクス シリーズ ②
伊賀 健一・池上 昭彦・荒川 泰彦 / 編

半導体レーザーの 基礎

栖原 敏明 / 著

共立出版株式会社

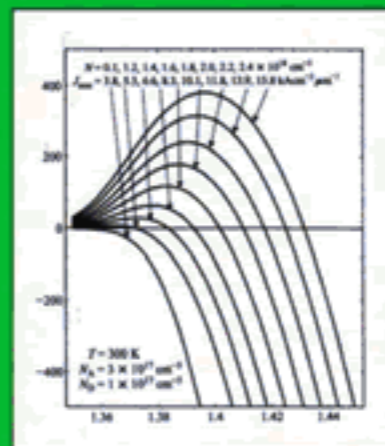
先端光 电子技术丛书 2
(日) 伊賀健一 池上昭彦 荒川泰彦 主编

半导体激光器

(日) 栖原敏明 著

科学出版社 共立出版

Semiconductor Laser Fundamentals



Toshiaki Suhara

T. Suhara
M. Fujimura

Waveguide Nonlinear-Optic Devices

pump wavelength in the same band as the signal wavelength, are then described. Finally, research activities on specific applications of waveguide DFG devices are reviewed and discussed.

9.1 Fundamental QPM-DFG Devices

9.1.1 Design and Theoretical Performances

The fundamental waveguide quasi-phase matched (QPM) difference-frequency generation (DFG) device configuration and the wave vector diagram for the QPM condition are shown in Fig. 9.1. When a signal wave of angular frequency ω_1 (wavelength λ_1) and a pump wave of ω_2 (λ_2) are mixed in a QPM-DFG device, a difference-frequency wave of frequency $\omega_3 = \omega_2 - \omega_1$ ($\lambda_3 = (\lambda_2^{-1} - \lambda_1^{-1})^{-1}$) is generated. On the frequency axis, the difference frequency ω_3 and the signal frequency ω_1 are at points symmetrical to each other with respect to the half pump frequency $\omega_2/2$. The DFG device can be considered a wavelength converter from λ_1 to λ_3 .

Since QPM offers an advantage that phase matching for an arbitrary combination of wavelengths within the transparency range of the crystal can be accomplished only if the grating period is appropriately chosen, devices for wavelengths in an extremely wide range can be implemented with a single NLO crystal. High conversion efficiency can be achieved by the use of the largest NLO tensor component and confinement of optical waves in a narrow waveguide channel.

The relation among the wavelengths of the input signal, pump wave, difference-frequency signal (output signal) and the QPM period, calculated by approximating the extraordinary mode indexes for a LiNbO₃ waveguide by the extraordinary indexes of the bulk crystal is shown in Figs. 9.2 and 9.3 [9.2]. Conversion of a signal wave in the 1.55 μm band (1.3 μm band) to a DF wave of another wavelength in the same band requires a pump wave of wavelength around 0.78 μm and a QPM structure of period around 18 μm (12 μm). Conversion between

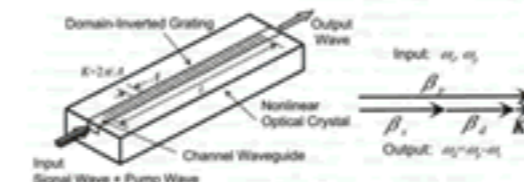


Fig. 9.1. Fundamental structure of QPM-DFG devices and the QPM condition

9.2 Prototype Waveguide QPM-SHG Devices 213

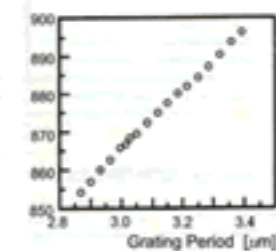


Fig. 8.12. Dependence of the QPM pump wavelength on the QPM grating period

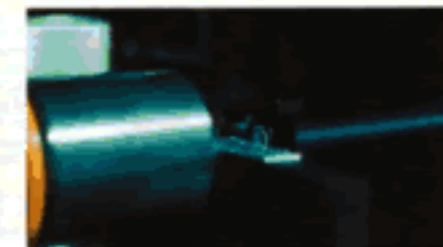


Fig. 8.13. Blue light generation by frequency doubling of a laser diode light in a LiNbO₃ waveguide QPM-SHG device; infrared light from a laser diode is coupled by the lens at the left hand side into the waveguide SHG device at the center of the photograph, and the generated harmonic wave is collimated by a small lens.

tained. This value is of the same order of magnitude as a theoretical estimation of $\sim 360\%/W$. The dependence of SH power on the pump wavelength for a device of QPM grating period of 3.00 μm is shown in Fig. 8.11 (a). The FWHM phase-matching bandwidth was measured as 0.23 nm, which was in good agreement with the theoretical prediction of 0.25 nm. The dependence of SH power upon the device temperature is shown in Fig. 8.11 (b); the FWHM temperature bandwidth was 3.2°C. Figure 8.12 shows the dependence of the QPM pump wavelength on the QPM grating period measured in a device consisting of a QPM grating of fan-out pattern [8.34] and an APE channel waveguide array. The

量子電子工学

西原 浩 監修 / 栖原 敏明 著

**量子電子の世界を
体系だててまとめた!!**

本書は、量子電子工学について、その基本的概念から最先端の量子デバイスの基礎理論までを、効率よく学べるようにまとめた教科書です。

オーム社

コロナ社創立70周年記念出版

光エレクトロニクス教科書シリーズ

2

光波工学

工学博士 栖原 敏明 著

コロナ社