

集積量子フォトニックデバイス

栖原 敏明

大阪大学大学院工学研究科
電気電子情報工学専攻

概要: 本グループは将来の光通信や量子情報処理、光センシングのための半導体レーザや非線形光学素子を要素とする集積量子フォトニックデバイスに関する研究を推進している。半導体レーザ関係では、曲線グレーティングを用いた分布ブラッグ反射型(DBR)レーザの高出力化(外部微分量子効率56%、出力112mW)、出力結合用モード変換器の設計と特性評価、バイオ蛍光センシング用励起光源としての応用を目指した多焦点グレーティング結合器集積GaInP DBRレーザの実現(閾値電流30mA、出力0.2mW)などの成果を得た。また量子情報処理への応用を目指した導波型非線形光学デバイスの研究を進め、単一光子検出用波長変換デバイスの効率改善、光子対発生量子論解析による設計手法確立、単一光子発生用非縮退光子対発生デバイスの作製と評価、導波型直交偏波光子対発生デバイスの世界最初の実現、偏波エンタングル状態発生の実証などの成果を得た。

1.はじめに

本研究室では、将来の光通信・光情報処理や光センシングの発展を支えるための先端的な光電子デバイスの研究を行っている。光技術と電子技術の融合により電子デバイスの限界を超える高性能や新機能を持つ多くのデバイスが実現できる。また光の量子論的特性の活用により量子情報通信や量子コンピューティングなど将来の可能性を開拓できると期待されている。このフォトニクス分野で実用的なデバイスを実現するには集積化技術が極めて重要である。我々は導波路を用いた各種の光機能デバイスや光集積回路[1]-[4]に関する長年の研究蓄積を持っている。現在はこの実績を基盤として、導波型非線形光学デバイス[5]-[7]と集積半導体量子井戸レーザ[8]-[10]に重点を置いて、種々の具体的な応用をもつ新たな集積量子フォトニックデバイスを考案し、理論解析と設計を行い、プロセス要素技術を確認・改善し、デバイスを実際に試作して実験を行うことにより可能性を実証することを目的として研究を行っている[11]。以下にこの2年間の成果の概要を報告する。

2.高出力分布ブラッグ反射型(DBR)レーザ

非線形光学デバイスや光ファイバ増幅器の励起光源や各種光集積回路光源としての応用を目指して、各波長域において高スペクトル純度で単一モード発振する高出力の半導体分布ブラッグ反射型

(DBR)レーザ、分布帰還形(DFB)レーザ、増幅器集積半導体レーザの研究を続けている。曲線DBRグレーティングとAlGaAs量子井戸リッジ構造活性チャンネルを用いた波長780nm帯DBRレーザの設計・作製・性能改善を行った(図1)。グレーティング領域量子井戸無秩序化による受動損失低減、1次結合グレーティング採用による反射率改善、窓構造形成と出力端面低反射被膜による光学損傷閾値改善で高出力化を図り、電子ビーム直接描画と反応性イオンエッチングを中心とするプロセスで作製し、外部微分量子効率を56%まで改善するとともに、閾値電流56mA、サイドモード抑圧比37dBの単一モード発振、最大出力112mWの性能を達成した。またこのレーザを励起光源としてLiNbO₃導波路擬似位相整合非線形光学デバイスに高効率結合するため、集積モードサイズ変換器の設計と基礎実験を行った(図2)。シミュレーションでリッジ構造に傾斜を設けることでレーザ部の垂直幅0.53mm対称分布から垂直幅1.64mm非対称分布に拡大変換でき結合効率を77%に改善できることを示し、実験でモードサイズ変換機能を確認した。



図1 曲線DBRグレーティングを用いた高出力DBRレーザ

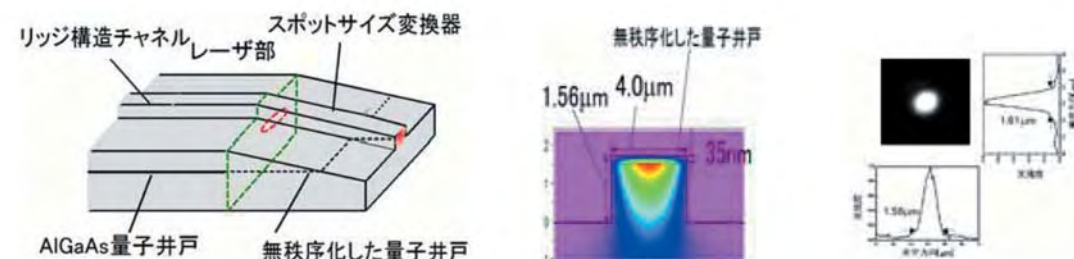


図2 非線形光学デバイスへの高効率結合のための傾斜リッジ型集積モードサイズ変換器

3.多焦点グレーティング結合器集積DBRレーザ

各種光センシングのための半導体レーザおよび半導体レーザを中心素子とする光集積回路の研究を行っている。マイクロビーズ検体配列と微小流路を用いたバイオ蛍光センシングのための励起光源としての応用を目指して、出力光を検体配列に合わせて2次元配列多焦点に集光する結合器を集積した赤色GaInP量子井戸DBRレーザを提案し設計・作製した(図3)。これまで研究してきた集光グレーティング結合器のパターンをセグメント分

割し2次元の周期的2値位相シフトを与えることにより、全出力効率を殆ど低減させることなく等強度の3×3スポットアレイを出力する結合器を実現できることを示した。この位相シフト多焦点集光グレーティング結合器を電子ビーム直接描画で作製し、理論予測に近い特性が得られることを確認した。さらに実際に結合器を集積化したGaInP量子井戸DBRレーザを作製し、閾値電流30mA、注入電流70mAで出力0.2mWの3×3焦点を得て、有効性を実証した。

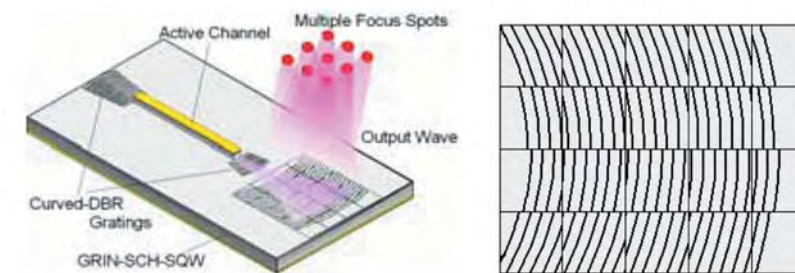


図3 多焦点グレーティング結合器集積DBRレーザの構造と位相シフト多焦点グレーティング結合器の概念

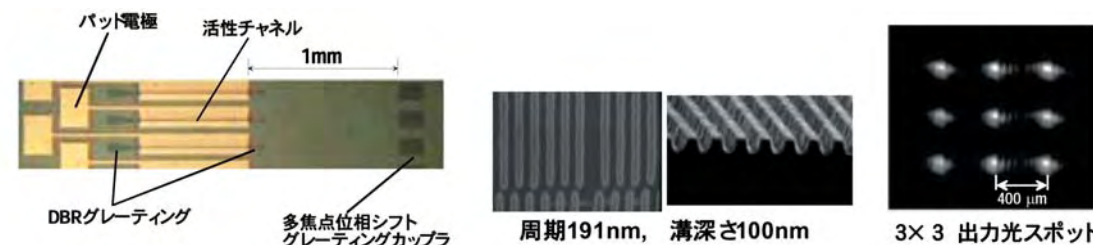


図4 作製した多焦点出力DBRレーザと結合器のSEM写真および出力スポット

4. 量子光学機能導波型非線形光学デバイス

将来の量子暗号伝送や量子計算などの量子情報処理への応用を目指した集積量子フォトニックデバイスとして、LiNbO₃導波路擬位相整合非線形光学デバイスの理論的・実験的研究を進めた。光ファイバ伝送される波長1.55 μ m帯単一光子を可視域の波長に変換して高効率に検出するための和周波発生型光子波長変換デバイス(光子アップコンバータ)(図5)を埋込型光導波路の採用により効率改善を図り量子効率30%を得た。パラメトリック相互作用による光子対発生についてユニタリー変換法を用いて量子論解析を行い、デバイス特性と伝搬損失の影響を解明してデバイス設計手法を確立した。伝令付単一光子発生用非縮退光子対発生デバイスの作製と評価、導波型直交偏波光子対発生デバイスの世界最初の実現、同デバイスによる偏波エンタングル状態発生の実証、集積偏波エンタングル光子対発生デバイス(図6)の提案・設計・作製と実証などの成果を得た。

参考文献

- [1] H.Nishihara, M.Haruna and T.Suhara, "Optical integrated circuits," McGraw-Hill, New-York 1989.
- [2] 西原浩,春名正光,栖原敏明, "光集積回路(改訂増補版)," オーム社, 1993.
- [3] 西原浩,春名正光,栖原敏明, "集成光路," 科学出版社, 北京, 2004-03.
- [4] T.Suhara, Integrated optics, in Y.B.Gianchandani, et al. eds., Comprehensive Microsystems, vol.3, Ch.9.02, pp.165-200, ISBN: 978-0-444-521941, Elsevier Limited, Oxford, 2007.
- [5] T.Suhara and M.Fujimura, "Waveguide Nonlinear-Optic Devices," Springer Verlag, Berlin, 2003.
- [6] 栖原敏明, "擬位相整合導波路を用いた非線形光学波長変換・信号処理デバイス," 応用物理, vol.72, No.11, pp.1381-1386, 2003.
- [7] 栖原敏明, "光通信用導波型非線形光学デバイス," レーザー研究, vol.31, No.4, pp.262-266, 2003.
- [8] 栖原敏明, "半導体レーザーの基礎," 共立出版, 1998.
- [9] 栖原敏明, "半導体激光器基礎," 科学出版社, 北京, 2002.
- [10] T.Suhara, "Semiconductor Laser Fundamentals," Marcel Dekker, New York, 2004.
- [11] T.Suhara, "Generation of quantum-entangled twin photons by waveguide nonlinear optic devices," Laser & Photon. Rev., DOI 10.1002/lpor.200810054, 2009.

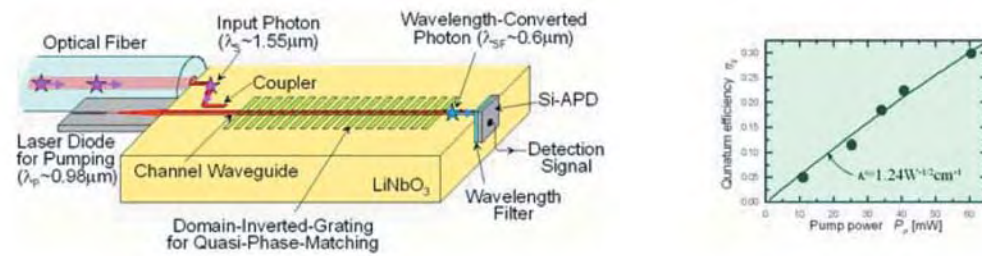


図5 単一光子検出用和周波発生型光子波長変換デバイスの構成と変換効率測定結果

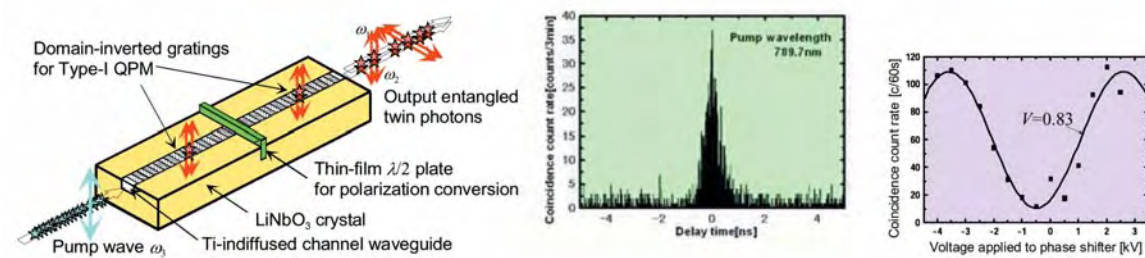


図6 集積偏波エンタングル光子対発生デバイスの構成と光子相関および量子干渉の実験結果