

## 論文内容の要旨

博士論文題目 高屈折率差サブ波長回折格子を用いたシリコン基板上  
新機能面発光半導体レーザに関する研究

氏名 常深 義博

### (論文内容の要旨)

近年、厚さ数百ナノメートルで分布ブラッグ反射鏡(DBR)に匹敵する広帯域な高反射率特性を示す高屈折率差サブ波長回折格子(HCG)が大きな注目を集めており、面発光半導体レーザ(VCSEL)の反射鏡にも適用されている。また、SOI基板上にHCGおよびHCGに連続した光導波路を形成し、HCGを片側反射鏡とした光導波路結合型HCG-VCSELが提案され、VCSELのレーザ光を基板面内の光導波路へ結合・伝搬できると考えられている。この構造を発展させ、本論文では下側反射鏡を井桁状の偏光無依存HCGとすることで2つの直交する発振偏光モードの間で双安定性を示すVCSELとし、HCGに連続して複数の光導波路を形成することで、VCSELの発振偏光方向により出力光導波路を切り替えることができるデバイスの実現に向けた知見を得ることを目的として行われ、以下に示す知見を得た。

①これまでに報告されているHCGの多くはストライプ状であり、格子に平行な偏光方向に高反射率を示すTE-HCGと垂直な偏光方向に高反射率を示すTM-HCGがある。まず、2次元有限時間領域差分(FDTD)法を用いて、HCGとそれに連続した光導波路から構成される光導波路結合型TE-HCGおよびTM-HCGの反射率および光導波路への結合効率の構造依存性を調べた。いずれの構造においても、HCGの構造パラメータが変化すると反射率は変化するが、結合効率はほとんど変化せず、光導波路始点における光強度が結合効率に最も影響することがわかった。次に、光導波路結合型HCG上に活性層およびDBRを配置した共振器構造に発展させ、両HCG-VCSELにおける共振器特性を比較した。TM-HCGに比べてTE-HCGの反射光は放射状に広がるため、反射鏡間で反射を繰り返す共振器構造では共振横モードが広がることがわかった。その結果、TE-HCG-VCSELではTM-HCG-VCSELに比べて共振器のQ値は1/3程度になるが、結合効率は30倍程度大きくなることがわかった。

②複数の光導波路を結合した偏光無依存HCGを片側反射鏡としたVCSELに対して3次元FDTD法により光出力特性の解析を行った。その結果、VCSELの共振モードの偏

光方向に垂直な光導波路へは、平行な光導波路よりも 11.9 倍大きなパワーが伝搬することがわかった。これは VCSEL の発振偏光方向によって出力光導波路を切り替えられることを示している。また、光導波路へは共振器内の 0.23% のパワーが伝搬することがわかった。

③ 光導波路結合型 HCG-VCSEL の実現に向け、まず光導波路構造のない HCG-VCSEL の光励起によるレーザ発振を目指した。異種材料を接着するボンディング技術をはじめとするデバイス作製プロセスを確立するとともに、HCG の反射率測定により偏光無依存な反射率を実証した。そして、InGaAsP 活性層と AlGaAs DBR をウェハ直接ボンディングした後、SOI 基板上に形成した偏光無依存 HCG の上に BCB (Benzocyclobutene) を用いて接着し、HCG-VCSEL を作製した。HCG-VCSEL をパルス光で励起し、室温において平均励起パワー発振閾値 11 mW、波長 1522 nm でのレーザ発振を達成した。

## (論文審査結果の要旨)

近年、厚さ数百ナノメートルで分布ブラッグ反射鏡(DBR)に匹敵する広帯域な高反射率特性を示す高屈折率差サブ波長回折格子(HCG)が大きな注目を集めており、面発光半導体レーザ(VCSEL)の反射鏡にも適用されている。また、SOI 基板上に HCG および HCG に連続した光導波路を形成し、HCG を片側反射鏡とした光導波路結合型 HCG-VCSEL が提案され、VCSEL のレーザ光を基板面内の光導波路へ結合・伝搬できると考えられている。この構造を発展させ、本論文では下側反射鏡を井桁状の偏光無依存 HCG とすることで 2 つの直交する発振偏光モードの間で双安定性を示す VCSEL とし、HCG に連続して複数の光導波路を形成することで、VCSEL の発振偏光方向により出力光導波路を切り替えることができるデバイスの実現に向けた知見を得ることを目的として行われた。

これまでに報告されている HCG の多くはストライプ状であり、格子に平行な偏光方向に高反射率を示す TE-HCG と垂直な偏光方向に高反射率を示す TM-HCG がある。まず、2 次元有限時間領域差分(FDTD)法を用いて、HCG とそれに連続した光導波路から構成される光導波路結合型 TE-HCG および TM-HCG の反射率および光導波路への結合効率の構造依存性を調べた。いずれの構造においても、HCG の構造パラメータが変化すると反射率は変化するが、結合効率はほとんど変化せず、光導波路始点における光強度が結合効率に最も影響することがわかった。次に、光導波路結合型 HCG 上に活性層および DBR を配置した共振器構造を発展させ、両 HCG-VCSEL における共振器特性を比較した。TM-HCG に比べて TE-HCG の反射光は放射状に広がるため、反射鏡間で反射を繰り返す共振器構造では共振横モードが広がることがわかった。その結果、TE-HCG-VCSEL では TM-HCG-VCSEL に比べて共振器の Q 値は 1/3 程度になるが、結合効率は 30 倍程度大きくなることがわかった。

複数の光導波路を結合した偏光無依存 HCG を片側反射鏡とした VCSEL に対して 3 次元 FDTD 法により光出力特性の解析を行った。その結果、VCSEL の共振モードの偏光方向に垂直な光導波路へは、平行な光導波路よりも 11.9 倍大きなパワーが伝搬することがわかった。これは VCSEL の発振偏光方向によって出力光導波路を切り替えられることを示している。また、光導波路へは共振器内の 0.23% のパワーが伝搬することがわかった。

光導波路結合型 HCG-VCSEL の実現に向け、まず光導波路構造のない HCG-VCSEL の光励起によるレーザ発振を目指した。異種材料を接着するボンディング技術をはじめとするデバイス作製プロセスを確立するとともに、HCG の反射率測定により偏光無依存な反射率を実証した。そして、InGaAsP 活性層と AlGaAs DBR をウェハ直接ボンディングした後、SOI 基板上に形成した偏光無依存 HCG の上に BCB(Benzocyclobutene)を用いて接着し、HCG-VCSEL を作製した。HCG-VCSEL をパルス光で励起し、室温において平均励起パワー発振閾値 11 mW、波長 1522 nm でのレーザ発振を達成した。

以上のように、本論文では、偏光無依存 HCG を共振器として用いた VCSEL の室温・光励起レーザ発振を実現した。又、VCSEL の発振偏光により出力光導波路の切り替えが

できる Si 基板上新機能 VCSEL の可能性を示した。よって、審査員一同は、本論文が博士(工学)の学位論文として価値あるものと認めた。