

論文の内容の要旨

論文題目 ドレスト光子フォノンを用いたpnホモ接合Si赤外レーザー

氏 名 田中 肇

本研究は発光には不適と従来考えられてきた間接遷移型半導体であるシリコン (Si) を、ドレスト光子フォノン (DPP) を用いることで高効率に発光させて Si 赤外レーザーを実現したものである。さらに Si は赤外光に対する吸収と透明化電流密度が非常に小さいため、従来型の直接遷移型半導体を用いるレーザーでは実現し得ないような低いしきい値電流密度と高出力を可能にさせる。

従来用いられてきた直接遷移型半導体は光増幅利得が大きく、小型化に利がある。発振波長の選択には半導体固有のバンドギャップエネルギー (E_g) で決定でき、 E_g を制御するために混晶の化合物半導体の作製が可能である。しかし二準位系のレーザーであるために光吸収が大きく高出力化が難しいこと。InGaN 系や AlGaInP 系の化合物半導体で緑の波長に対応する E_g (2.1 eV 程度) に近づけたときに、ピエゾ電界による発光再結合確率の低下や格子不整合から欠陥が多くなり結晶品質が悪化し発光効率が低下する問題 (グリーンギャップ問題) 等がある。さらに化合物半導体は Ga、In をはじめとしたレアアースと呼ばれる希少な材料を用いており、As も毒性が心配される。一方の Si は地球上に豊富な材料を持つこと、毒性の低さ、導電性の制御が容易なことから IC、CPU などの電子回路の材料として利用されてきた。広く大量に用いられた結果プロセス技術が発達し、純度が高く大口径な Si ウエハが作製されていることも優位点である。しかし間接遷移型半導体であるために、発光再結合する際にフォノンの介在が必要で発光効率が低いと従来考えられてきた。無論 Si を発光素子の材料として利用しようとする研究は存在し、シリコンフォトニクスと呼ばれる分野では Si の高い屈折率を活かした小型の光導波路を作製し、信号光を送受信する受光素子、発光素子を Si で作製し、それらを電子回路と統合 (光デバイスと電子デバイスとの融合) することで現在の集積回路が抱える電気配線による遅延やジュール熱による温度上昇などの問題を解決しようとしている。しかし、シリコンフォトニクスでは光デバイスと電子デバイスとの統合の達成と Si 光導波路による小型化に主眼が置かれている。その達成のためには、

従来型の直接遷移型半導体レーザーを Si 基板に直接貼り合わせる手法、直接成長によって Si 光導波路と統合する手法も有効とされており、直接遷移型半導体レーザーの置き換えとして Si 自体を発光させることの動機が小さい。

このような背景において我々のグループは DPP を用いることで間接遷移型半導体である Si であっても高効率に発光させることが可能で、先行研究にて Si レーザー（波長 1.3 μm 、しきい値電流密度 1.1-2.0 kA/cm^2 このしきい値は従来の半導体レーザーと同等である）を実現した。波長 1.3 μm は Si の E_g より小さい光子エネルギーであるが、これは DPP 援用アニール加工におけるアニール時の照射光波長により発光波長を E_g によらず制御することが可能なためである。そこで本研究では Si が発光する優位性を豊富な資源量だけでなく、Si は赤外光に対して吸収がほとんどなく透明であること、それに伴い赤外光に対しての透明化電流密度が非常に小さいことに着目して以下の 2 種類のレーザーが実現可能であることを示し、実現を試みた。1. 「低しきい値電流密度 Si レーザー」 2. 「高出力 Si レーザー」である。そのために筆者が実現した DPP を用いた光増幅型赤外 Si 光検出器（光増幅型赤外 Si-PD）を Si の光増幅特性評価に利用し、しきい値電流密度が非常に小さくなるよう SOI 基板を用いたレーザー構造（Si レーザー#1）を設計し、それを実現した。次にレーザー特性を光学的に評価するために SOI 基板を用いた評価用光導波路を作製し、評価した特性をもとに大出力化を目指した Si レーザー構造（Si レーザー#2, #3）を設計し、それを作製した。

論文は 5 章で構成されており、しきい値電流密度を低減させる観点と大出力化に観点とをおいた二本の柱が存在する。各章の内容を以下に示す。

第 1 章「本研究の背景」ではレーザー発展の歴史とその方向性、Si を発光素子材料として利用するための研究についても説明した。その後本研究では先行研究とは異にしており従来の半導体レーザーの置き換えではなく、Si が赤外光に対して吸収が小さく透明化電流密度が小さいこととドレスト光子フォノン（DPP）を利用して E_g によらずに Si に赤外光を発光させることで実現できる「低しきい値電流密度 Si レーザー」と「高出力 Si レーザー」について示した。

第 2 章「原理」では本研究の原理である準粒子 DPP の導出とその DPP によって発現する光学過程（DPP 援用過程）についての説明をした。その後、DPP が効率良く発生するような構造を作製する DPP 援用アニール加工法（レーザー光を pn 接合部に照射すると同時に順方向電流を流し、ジュール熱や非発光再結合による熱でアニールする手法）と DPP 援用アニール加工中に照射したレーザー光と同一の波長を発光する効果（フォトンブリーディング効果）について述べた。

第 3 章「低しきい値電流密度 Si レーザー」では Si が赤外光に対しての透明化電流密度が非常に小さいことから、しきい値電流密度が低い Si レーザーの実現を試みた。従来の直接遷移型半導体のレーザー特性の評価では、光導波路に外部から光を入射させ、出射した光とのパワー比を用いていた。しかし本研究で用いる pn ホモ接合 Si は赤外光（波長

1.3 μm) に対して透明であること、光閉じ込めが非常に小さいことから、従来の光増幅特性の評価方法を適用することが困難であった。そこで修士論文にてまとめた光増幅型赤外 Si-PD を用いた。この方法を採用した理由は極めて光閉じ込め係数の低い PD のような素子であっても、光増幅利得や透明化電流密度などのレーザー媒質としての特性を評価することが出来るためである。評価の結果、微分利得係数 $g = 38.4 \text{ cm/A}$ 、透明化電流密度 $I_{tr} = 5 \text{ A/cm}^2$ の値を得た。そしてこれらの値と等価屈折率法から導出した先行研究の Si レーザーの光閉じ込め係数とを併せてそのレーザーのしきい値電流密度を計算した値は、実測値に近い値が得られ光増幅型赤外 Si-PD による評価が妥当であることを示した。その後しきい値電流密度が 10 A/cm^2 以下となるような光閉じ込め係数を持つ、SOI 基板を用いた光導波路構造を設計した。このしきい値電流密度値は従来のダブルヘテロ接合を用いたレーザーの値の $1/100$ 程度である。設計した光導波路の作製のために SOI 基板のデバイス層に pn 接合を形成するとともに、空乏層部がドレスト光子の発生源となるように 700 keV の高い加速度電圧でイオン打ち込みを施し、ドライプロセスを中心とした新規の作製プロセスを確立した。このプロセスの下に作製した光導波路に対して DPP 援用アニールを施して完成させた Si レーザー#1 は室温 25 度、波長 $1.4 \mu\text{m}$ にて鋭いピークを示した。またスペクトルには増幅された自然放出光が確認できず、これはしきい値電流密度が低く電流を注入すると速やかに発振するためであった。しきい値電流密度の正確な評価のためにパルス電圧により測定した IV 特性を用いたところ、 40 A/cm^2 において微少な減少が見られたのでこれをしきい値電流密度とした。このような小さなしきい値電流密度値を得られた理由は先述の通り、Si が赤外光に対して非常に小さな透明化電流密度をもつ特性のためである。

第 4 章「高出力 Si レーザー」では Si の赤外光に対して吸収損失がほとんど無視できることから、高出力 Si レーザーの実現を試みた。SOI 基板を用いた光導波路作製のプロセス技術を用いて、光増幅特性の評価に適した導波路幅の広い光導波路を作製し、Si の光増幅特性を光学的に直接評価を行った。すなわち光導波路の一端にレーザー光を入射させ、光導波路への電流注入量を変化させながら他端からの出射光強度を測定した。この測定で実際に電流注入により光強度が変調されることを確認した。この光増幅特性評価により微分利得係数 $g = 2.6 \times 10^2 \text{ cm/A}$ 、透明化電流密度 $I_{tr} = 1 \text{ mA/cm}^2$ 、飽和光パワー密度 $P_{\text{sat}} = 30 \text{ kW/cm}^2$ の値を得た。入射光パワーによる利得飽和が確認できたことから、本測定方法による光増幅利得の評価が妥当であることを確認した。その特性をもとに高出力化 Si レーザーの新設計を行った。Si レーザー#2 は導波路幅を広くすることで出射光強度を大きくし、その結果増幅された自然放出光のスペクトルを得た。このスペクトルはアニール波長に一致したピークとフォノンエネルギーに対応した間隔の複数ピークの特徴があった。次に Si レーザー#3 の構造は共振器長を長くし、断面積を大きくした。断面積が大きくなることで光閉じ込め効果は小さくなるが、共振器長を伸ばして共振器で得られる利得を大きくすることでしきい値電流密度の増加を抑え、素子の大型化

により電流注入量を増やすことによって大出力を可能にさせた。また断面積が大きいことはその出力光パワー密度を抑えることによって光による破壊も防ぐ効果も存在する。その Si レーザー#3 は、しきい値電流密度約 12 A/cm^2 、 33.3 A/cm^2 にて両側出力パワー220 mW（外部量子効率 4.6%）、外部微分量子効率 7.2%と高出力 Si レーザーの実現を達成した。また投射板を用いてうろこ状のスポット光を確認したので、このレーザーからの出射光が干渉性の高い誘導放出光であることを確認した。この非常に小さいしきい値電流密度と大きな出力を兼ね備えた半導体レーザーは従来の化合物半導体での実現は非常に困難で、赤外光の吸収と透明化電流密度を持つ Si を利用することで初めて実現し得たものである。第 5 章「まとめ」では本論文のまとめとして、本研究のまとめと得られた知見、意義について示した後に今後の展望を記している。