

| | | | | |
|-------------------|---|-----------------------|--|--|
| | やま だ あつ し | | | |
| 氏 名 | 山 田 敦 史 | | | |
| 授 与 学 位 | 博 士 (工 学) | | | |
| 学 位 授 与 年 月 日 | 平 成 17 年 3 月 25 日 | | | |
| 学 位 授 与 の 根 拠 法 規 | 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 | | | |
| 研 究 科 , 専 攻 の 名 称 | 東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 電 子 工 学 専 攻 | | | |
| 学 位 論 文 題 目 | Si ベース光集積デバイス製作に関する研究 | | | |
| 指 導 教 員 | 東 北 大 学 教 授 室 田 淳 一 | | | |
| 論 文 審 査 委 員 | 主 査 東 北 大 学 教 授 室 田 淳 一 | 東 北 大 学 教 授 伊 藤 弘 昌 | | |
| | 東 北 大 学 教 授 中 沢 正 隆 | 東 北 大 学 助 教 授 櫻 庭 政 夫 | | |

論 文 内 容 要 旨

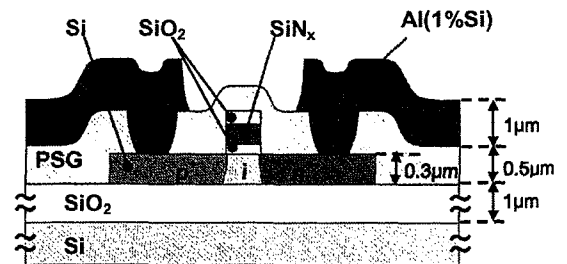
1. はじめに

LSI 技術のめざましい進歩により、素子寸法は縮小し、チップ面積は増大してきた。これに伴い、LSI システムにおける配線遅延の影響が顕在化してきた。この配線遅延の問題を解決するため、チップ上への光配線の導入が期待されている。

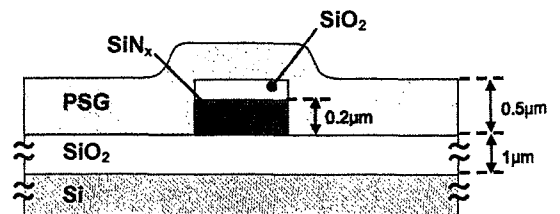
現在、一般的に用いられている光デバイスは化合物半導体をベースにしたものがほとんどである。Si はその間接遷移特性のため、光デバイスとしてはあまり適していない。しかしながら、Si ベース光デバイスは、成熟した LSI プロセス技術を使用することが出来るため大幅なコストの削減が可能であり、光デバイスの制御や駆動を行う電子デバイスとのシームレスな集積化が可能となるなどの利点がある。したがって、Si ベース光集積デバイスの実現は、次世代の光電子集積回路技術の中核を担うものと考えられる。そこで、光デバイスの最も基本的な要素素子である発光素子、受光素子、光導波路の Si 基板上への集積化について研究した。

2. Si ベース光集積デバイスの製作

発光、受光素子として最も基本的な光デバイスである p-i-n ダイオードを用いた。図 1 に製作したデバイスの断面図を示す。デバイスの製作には Si 基板への光の吸収を防ぐため、SOI 厚 320nm、BOX 厚 1000nm の SOI 基板を用いておこなった。光導波路に用いる Si 窒化膜は PECVD 法により堆積した。p-i-n ダイオードの p 領域、n 領域はそれぞれ B⁺、P⁺ のイオン注入により形成した。ここで、イオン注入時に Si 上の Si 窒化膜と CVD SiO₂ をマスクの一部として用いているため、intrinsic



(a) Si p-i-n ダイオード構造



(b) Si 窒化膜光導波路構造

図 1. Si ベース光集積デバイスの断面図

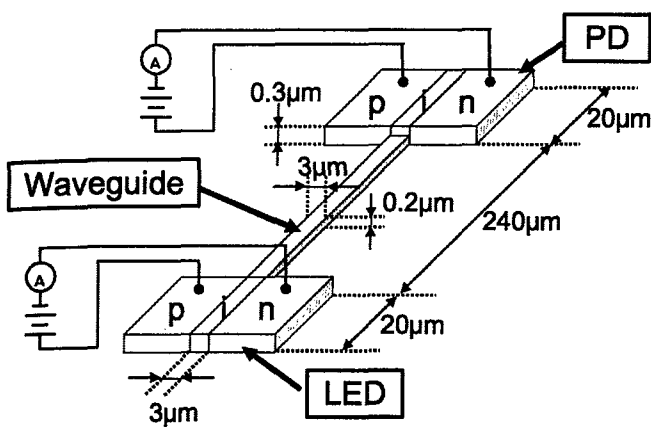


図2. Si ベース光集積デバイスと測定システム

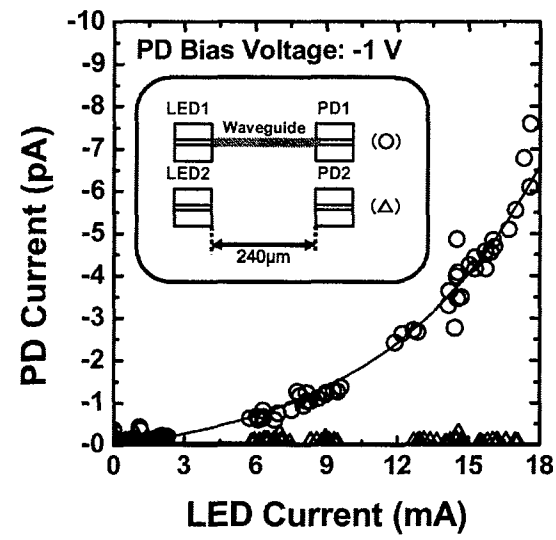


図3. PD 電流の LED 電流依存性 (光導波路の有無の比較)

領域の幅と位置は Si 窒化膜パターンによって決まる。したがって、intrinsic 領域の中心と光導波路の中心は自動的に一致する。光導波路はコアとして屈折率 2.00 の Si 窒化膜を用い、クラッドとして屈折率 1.46 の SiO₂ と屈折率 1.45 の PSG 膜を用いている。したがって、屈折率差が約 0.55 の光導波路ができ、コア内への強い光の閉じこめが可能となる。これにより低散乱損失、低損失な曲げ導波路が実現できる。

図2に製作した Si ベース光集積デバイスと測定システムの概略図を示す。2つの p-i-n ダイオードを向かい合わせて集積する。一方は LED として、もう一方は PD として用いる。素子間の距離は 240 μm とした。また、それぞれの intrinsic 領域は Si 窒化膜光導波路で光学的に接続されている。図3に光導波路の有無による PD 電流の LED 電流依存性の違いを示す。光導波路により接続されているデバイス対は LED 電流の増加にしたがって、PD 電流の増加が確認できる。一方、光導波路の無いデバイス対は LED 電流が増加しても、PD 電流はほとんど変化しない。したがって、LED から光が放出され、光導波路を通して、その光を PD により検出していると考えられる。以上の結果は、発光、受光素子が同一の材料、構造であっても、光の発光、受光が可能であることを示すものである。

3. Si ベース光集積デバイスの発光特性

受光素子の高性能化、光導波路の低損失化などを図る上での指針を得るため、Si p-i-n ダイオードの発光スペクトルを明らかにするとともに、発光に最適な構造を求めた。16個の p-i-n ダイオードが

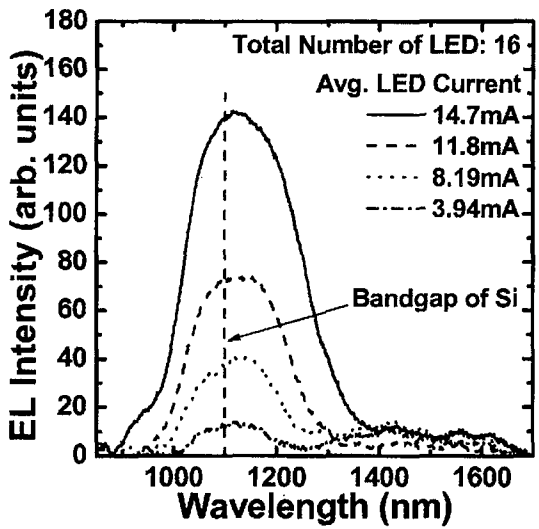


図4 室温における Si p-i-n ダイオードの発光スペクトルの LED 電流依存性

らの室温における発光スペクトルを図4に示す。Si バンドギャップに相当する波長にピークがあり、LED 電流の増加とともに、発光強度が増加し、発光ピークの幅が広がっていることがわかる。したがって、Si のバンドギャップ相当の波長より短波長の発光が含まれていることがわかる。前述の実験ではこの発光スペクトルの Si のバンドギャップ相当の波長以下の光を検出していると考えられる。

また、intrinsic 領域の幅と長さを変化させ、発光強度の変化を測定した。図5に示すように、LED の発光強度は intrinsic 領域が長くなるとともに強くなるが、20 μm 付近で増加量が減少する。これは LED 自身の光吸収が生じるためであると考えられる。発光効率と消費電力を考慮すると intrinsic 領域の長さは 20 μm が最適であると考えられる。また、Si-LED の発光強度は intrinsic 領域の幅が広いほど強くなることを確認した。

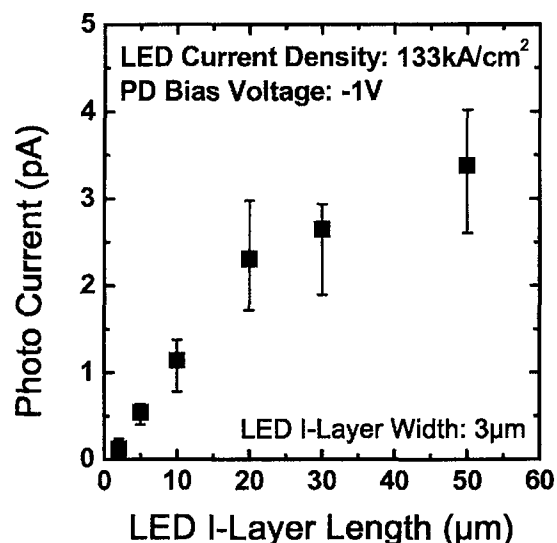
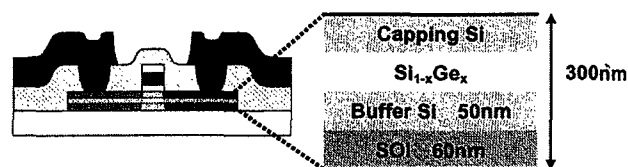


図5 光電流のLEDにおける intrinsic 領域長さ依存性



| | Ge 比率 (x) | Si _{1-x} Ge _x 膜厚 | Capping Si 膜厚 |
|---|-----------|--------------------------------------|---------------|
| 1 | 0.1 | 40nm | 150nm |
| 2 | 0.1 | 100nm | 90nm |
| 3 | 0.2 | 40nm | 150nm |

図6 SiGe p-i-n ダイオード構造

4. Si ベース光集積デバイスへの SiGe の導入

Si p-i-n ダイオードに SiGe を導入し、その特性を明らかにし、Si ベース光集積デバイスの高性能化を図った。図6に SiGe p-i-n ダイオードの構造を示す。光導波路と同じ高さに SiGe 層がくるように p-i-n ダイオードの中心付近に SiGe 層を導入した。熱酸化により薄膜化した 60nm 厚の SOI 層の上に Buffer Si 層を 50nm 厚堆積し、その上に歪み Si_{1-x}Ge_x 層と Capping Si 層を堆積した。

図7に SiGe p-i-n ダイオードを PD として、Si p-i-n ダイオードを LED として用いた場合の光電流の比較を示す。光導波路からの光が intrinsic 領域に均一に入っているとすると、光電流は Si 層と Si_{1-x}Ge_x 層の両方に流れることになる。Si PD における電流値を基準として、SiGe p-i-n ダイオードの光電流を Si 層と Si_{1-x}Ge_x 層に分割すると図6に示すようになる。これより、光電流の増加量は Si_{1-x}Ge_x 層の膜厚及び Ge 比率の増加にともなって大きくなっていることがわかる。ここ

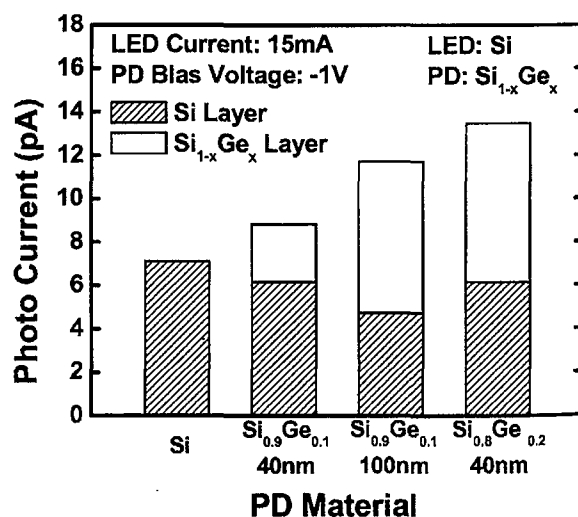


図7 Si 及び SiGe p-i-n ダイオードの光電流の比較

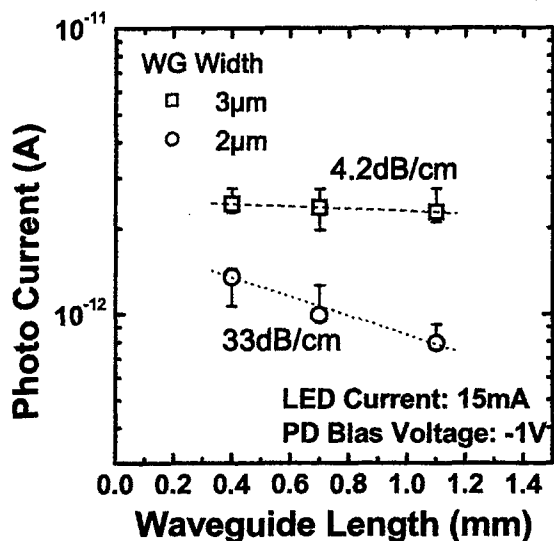


図8 光電流の光導波路長依存性

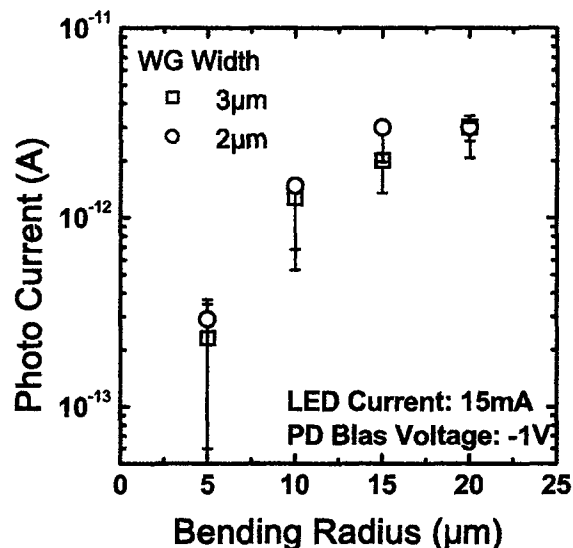


図9 光電流の90度光導波路曲がりにおける曲率半径依存性

で、Si 及び SiGe はそのバンドギャップに相当する波長 (Si、 $\text{Si}_{0.9}\text{Ge}_{0.1}$ 、 $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ はそれぞれ 1100nm、1280nm、1380nm) 以下の光を吸収すると考えられる。図4のEL強度の積分値と実験値の比較から SiGe の導入による光電流の増加は、バンドギャップが狭くなったことによる影響だけではなく、光電変換効率の向上による影響もあることがわかった。

5. 光導波路の導波特性

図8に光電流の光導波路長依存性を示す。これより Si 窒化膜光導波路の散乱損失は 3μm 幅で 4.2dB/cm、2μm 幅で 33dB/cm であることがわかる。また、図9に示すように、光導波路の90度曲がりによる減衰は、曲率半径が小さくなるにしたがって減衰が大きくなる傾向がある。光電流の光導波路曲がり数依存性から、曲率半径 20μm における曲げの減衰は 3μm 幅で 1.5dB/bend、2μm 幅で 1.0dB/bend で、半径 5μm 以下では 8dB 以上に損失が増大することを見いだした。

6. まとめ

Si チップ上に受光素子・発光素子として Si p-i-n ダイオード、光導波路として Si 窒化膜を集積したデバイスを製作し、発光、受光素子が同一の材料、構造であっても、光の発光、受光が可能であることを証明した。さらに、Si p-i-n ダイオードの発光特性を明らかにすると同時に、p-i-n ダイオードへの SiGe の導入により光電変換効率が向上することを見いだした。さらに、Si 窒化膜光導波路の基本的な特性を明らかにした。これにより Si ベース光集積デバイスの基礎となる重要な知見が得られた。

論文審査結果の要旨

Si プロセス技術のめざましい進歩により素子の極微細化・高速化が図られる一方で、集積回路の多機能化の要請から大規模集積回路のチップ面積は増大し、配線遅延が顕在化してきている。この問題を解決するためにオンチップ光配線の導入が期待され、Si 集積回路上に Si ベース光デバイスを搭載できれば、光デバイスの駆動・制御を行う電子デバイスとのシームレスな集積化が低コストで実現されることになり、次世代の光・電子集積回路技術の中核を担うことになる。そこで、本研究では、光デバイスの基本素子である発光素子、受光素子、光導波路の Si 基板上への集積化について研究した。本論文は、これらの成果をまとめたもので全文 6 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、Si p-i-n ダイオードを製作し、その順方向・逆方向電流特性を調べた結果を述べている。Si 基板上の 2 つの Si p-i-n ダイオードの i 領域を Si 窒化膜導波路で接続することにより、一方のダイオードの順方向電流増加とともに、他方のダイオードの逆方向電流が増加する現象を見いだしている。そして、順バイアスされたダイオードから発せられた光が導波路により導かれ、逆バイアスされたダイオード中でキャリア生成を誘起しているとして説明している。これは、同一の材料、同一の構造の受光・発光素子を用いて Si ベース光集積化を可能にするものである。

第 3 章では、Si p-i-n ダイオードの受光・発光特性について述べている。順バイアスされたダイオードからの発光スペクトルは、波長 1080 nm 付近に最大ピークがあり、順方向電流の増加にともない、発光強度が大きくなることを確認している。さらに、受光素子における光応答感度は、受光方向及び発光方向の i 領域が長くなるとともに大きくなるが、長さ 20 μm 以上で飽和する傾向があることを見いだしている。そして、各素子内部での光吸収に起因するものとして説明している。これらの結果は、受光素子並びに発光素子の構造設計に関する重要な指針を与えるものである。

第 4 章では、Si とはバンド構造の異なる SiGe 混晶層を導入した p-i-n ダイオードの受光・発光特性について述べている。受光素子に SiGe 混晶を導入した場合、光応答感度は SiGe 混晶層の膜厚及び Ge 比率に比例して大きくなる傾向を見だし、光応答感度を 2 倍に向上させることに成功している。また、発光素子に SiGe 混晶を導入した場合、長波長領域での発光強度が大きくなることを見いだすと同時に、光応答感度を 1.4 倍に向上させることに成功している。このような受光・発光特性の向上は、Si と SiGe 混晶のバンド構造の違いとそれに起因するキャリアの局在化によるものとして説明づけている。これらの結果は、Si p-i-n ダイオードの受光並びに発光特性が SiGe 混晶の導入で向上することを示す重要な知見である。

第 5 章では、Si 窒化膜光導波路の光導波特性について述べている。Si p-i-n ダイオード対を受光・発光素子として用いることにより、3 μm 幅の直線光導波路での光伝搬損失が 4.2dB/cm となり、一定曲率半径の 90 度曲がりを持つ光導波路では、半径 20 μm 以上で光伝搬損失が半径に依存せず 1.5dB であると評価している。さらに、半径 5 μm 以下では 8dB 以上に損失が増大することを見いだしている。これらは、曲がりを含む光配線を構成するために極めて重要な知見である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、同一 Si 基板上に Si p-i-n 受光素子・発光素子、Si 窒化膜光導波路を集積した Si ベース光集積デバイスについて研究し、Si 集積回路における光配線の基礎となる幾つかの重要な知見を得たもので、電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。