

【助成 38 -19】

シリコン技術を基盤とした高感度短波赤外光センサの研究開発

研究者 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 教授 石川 靖彦

〔研究の概要〕

光通信用に開発してきた Si 上 Ge 受光デバイス技術を基盤とし、波長 0.8-1.7 μm の短波赤外領域の Si 系高感度光センサの研究開発を行っている。課題は自由空間伝搬光(垂直入射)に対して受光効率が低いことにある。受光効率増大には厚膜化した Ge 層(数ミクロン)の利用が有効であり、新たに提案したトレンチ埋込結晶成長による厚膜 Ge 形成の有効性を実証した。格子ひずみを増強した Ge 層を用いた受光器の検討も進め、1.60 μm 以上の波長域で受光効率が増大する特性を得た。

〔研究経過および成果〕

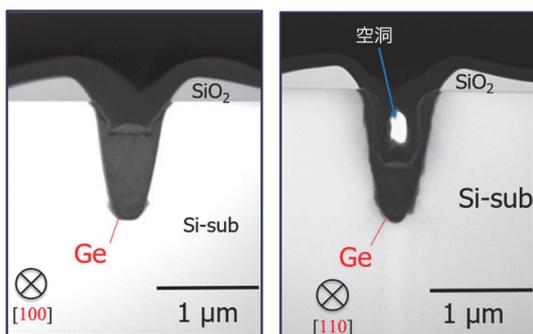
光通信用に開発してきた Si 上 Ge 受光デバイス技術を基盤とし、波長 0.8-1.7 μm の短波赤外(SWIR: short-wave infra-red)領域の Si 系高感度光センサの研究開発を行なっている。自動運転・監視用のレーザーレーダーや、非破壊の内部観測機能を活かしたセンサ展開が期待される。光通信用の導波路型 Ge 受光器では SWIR の典型波長 1.55 μm において 80%以上の受光効率を達成できるが、センサ応用で必要となる自由空間光(垂直入射)の受光に対しては効率が低い点に課題がある。受光効率増大の手法としては、(1)Ge 厚膜化、(2)バンドギャップ収縮による光吸収増大、(3)アバランシェ増倍、(4)多重反射やプラズモン共鳴を利用した光吸収増強が考えられる。本研究では、「(1)Ge 厚膜化」および「(2)バンドギャップ収縮による光吸収増大」を検討した。

「(1)Ge 厚膜化」に関しては、例えば受光効率を 70%に高めるには 3 μm の厚膜が必要であるが、Ge 層の結晶薄膜形成が長時間となることに課題がある。従来にない方法として、トレンチ埋込結晶成長による厚膜化を検討した。Si(001)ウエハ面内の[100]方向

(通常と 45 度傾いた方向)に沿って、サブミクロン幅・数ミクロン深さのトレンチを形成し、Ge の結晶成長を行う。側壁の(100)面でも、底面の(001)面と同様な速度の結晶成長が起こる(標準的な[110]方向に形成したトレンチ側壁では結晶成長は抑制される)。すなわち、横方向成長を積極的に利用することで、数ミクロン深さのトレンチを短時間で埋込むことができることになる。

実際にトレンチ埋込結晶成長を行った結果を図 1 に示す。透過電子顕微鏡(TEM)により断面を観察した。Si(100)ウエハ表面に幅が約 0.6 μm 、深さが約 1.0 μm のトレンチを形成し、超高真空化学基層堆積法により膜厚 0.5 μm ((001)平坦面の場合)の Ge をエピタキシャル成長した。図 1(a)の[100]トレンチでは内部が Ge で埋め込まれているのに対し、図 1(b)の[110]トレンチでは 0.5 μm ほどに制限されている。図 1(a)の[100]トレンチでは、期待していたとおり、側壁の(100)面でも底面の(001)面と同様な速度の結晶成長が起こり、短時間で厚い Ge を形成できることが実証できた。Ge 中の結晶欠陥(転位)は、従来の膜状の Ge 層と同様、成長後の高温熱処理(800°C程度)で低減

できることもわかった。受光器応用では Ge の占有面積を増大する必要があるため、トレンチを隣接・繰り返し形成したアレイ構造を準備している。Ge 結晶成長後の構造を確認するとともに、pin 接合を形成した受光器へ応用し、受光特性の取得を進める予定である。



(a) [100]トレンチ (b) [110]トレンチ

図 1 トレンチ埋込 Ge 層の断面 TEM 像

「(2)バンドギャップ収縮による光吸収増大」に関しては、Si-on-quartz (SOQ)ウエハ上 Ge 層の利用を実施した。石英を下地基板とすることで、Ge 層中の引張格子ひずみが 0.3%以上に増強される(熱膨張係数差に起因:標準的な Si 基板を用いた場合は約 0.2%)。光吸収端が約 1.65 μm に長波長化する結果、受光の高効率化が期待できる。図 2 に受光スペクトル(Ge 膜厚:0.5 μm)を示す。Si 上 Ge 受光器に比べ、SOQ 上 Ge 受光器は測定した全波長域(1.46-1.64 μm)で受光効率が増加した。1.50 μm 以上での受光効率増加はひずみ増強による光吸収増大の効果である。1.50 μm 以下では多層構造による反射率抑制が寄与している解釈できる。Ge 上へ無反射膜を形成することで 1.50 μm 以上の波長域でもさらに受光効率を向上できることを示唆している。

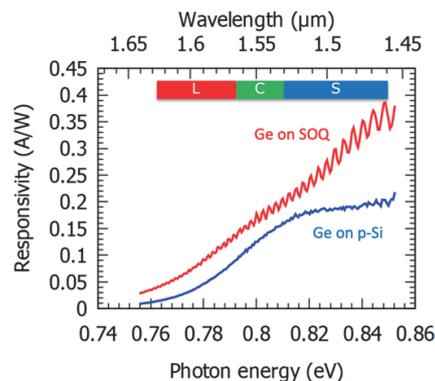


図 2 SOQ および Si 上 Ge 受光器の受光特性

上記の成果は、応用物理学会学術講演会で口頭発表しており、データを補強して学術誌へ論文投稿することを予定している。詳細は割愛するが、Ge 結晶成長および受光器応用に関して 2021 年に以下の論文を発表した。支援に感謝する。

[発表論文]

1. Riku Katamawari, Kazuki Kawashita, Takeshi Hizawa, and Yasuhiko Ishikawa: “Si-capping-induced surface roughening on the strip structures of Ge selectively grown on an Si substrate”, J. Vac. Sci. Technol. B 39 (4), 042204 (2021).
2. Yasuhiko Ishikawa, Kyosuke Noguchi, Mayu Tachibana, Kazuki Kawashita, Ryota Oyamada, Kazumi Motomura, Shuhei Sonoi, Riku Katamawari, and Takeshi Hizawa: “Selective Epitaxy of Submicron Ge Wire Structures for Photodetectors and Optical Modulators in Si Photonics”, ECS Trans. 104 (4), pp. 147 - 155 (2021).