

次世代半導体材料 Ge の浅接合形成を可能にするイオン注入技術

Shallow Junction Formation of Next-Generation Germanium Semiconductor Using Ion Implantation

和田 涼太*
Ryota Wada

永山 勉
Tsutomu Nagayama

黒井 隆
Takashi Kuroi

池尻 忠司
Tadashi Ikejiri

シリコンに変わる次世代半導体材料としてゲルマニウム (Ge) 半導体が注目されている。Ge 半導体は高速動作が実現できる一方、プロセス技術については多くの課題がある。課題の一つが接合形成技術であり、本稿では、Ge 基板中にドーパントと錫 (Sn) を共イオン注入することで拡散を制御し浅接合を形成できることを報告する。

Germanium (Ge) attracts much attention as a next-generation semiconductor material that can replace silicon. However, several challenges still remain in Ge manufacturing process, and shallow junction formation is one of them. This paper reports that the dopant profile in Ge can be controlled by tin (Sn) ion co-implantation.

キーワード：Ge、Sn、共イオン注入

1. 緒言

シリコン (Si) 半導体は、トランジスタ性能向上のため、微細化やブースター技術の導入といったプロセス技術からの改善、および FIN・ナノワイヤーなどのトランジスタ構造からのアプローチが精力的に続けられている。しかし、Si 材料の物性的問題から、デバイスの性能限界が近づいている。その問題を解決する手法として、歪み Si や III-V 族、ゲルマニウム (Ge)、SiGe 半導体を用いて、キャリア移動度を向上させることが注目を浴びている。中でも、Ge 半導体は Si よりも 4 倍の正孔移動度、2.5 倍の電子移動度を有しており、Si の代替材料として期待されている⁽¹⁾。しかし、Ge の metal-oxide-semiconductor-field-effect transistor (MOSFET) の作製には、Ge 基板とゲート酸化膜の界面準位低減や、浅い pn 接合の実現、コンタクト抵抗低減などの課題が残っている。特に、Ge 結晶中では、n 型ドーパントの異常拡散がおこるため、浅い接合形成が難しい⁽²⁾。この問題を解決するために、アルミニウム (Al) の共イオン注入や millisecond Flash Lamp Annealing (ms-FLA) のようなプロセス提案がなされている^{(3),(4)}。Si デバイスでは、ドーパントの拡散抑制のため、共イオン注入技術がよく知られており、Ge でも期待できる。また、FLA は浅い接合には必要不可欠な技術である。本論文では、Sn の共イオン注入および FLA 技術を用いることで、ドナーのプロファイルを制御できたことについて報告する。

2. 実験

p 型 Ge 基板に対し、n 型ドーパントであるリン (P) を

イオン注入した。注入条件を表 1 に示す。P の注入深さは、それぞれ 4nm に統一し、ドーズ量は 1.0×10^{15} atoms/cm² とした。また、拡散抑制のため、一部のサンプルにカーボン (C)、Al、Sn の共イオン注入を行った。これらのイオンの注入深さは n 型ドーパントと同様とし、ドーズ量は 5×10^{14} atoms/cm² に設定した。Sn の共イオン注入に関しては、注入深さを 3nm のサンプルも準備した。注入後の活性化アニールには ms-FLA を利用し、基板温度を 300°C に保った状態でピーク熱処理温度を 640~800°C に設定し、1.4ms の熱処理を行った。電気特性、ドーパントの挙動、結晶欠陥を調べるために、シート抵抗測定、Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS)、断面 Transmission Electron Microscope (TEM)、ラマン分光測定を行い、評価した。

表 1 注入条件

イオン種	Rp : 注入深さ (nm)	ドーズ (atoms/cm ²)
P (ドーパント)	4	1.0×10^{15}
C (共注入)	4	5.0×10^{14}
Al (共注入)	4	5.0×10^{14}
Sn (共注入)	4	5.0×10^{14} , 1.0×10^{15}
Sn (共注入)	3	5×10^{14}

3. 評価

3-1 Ge 基板中の共イオン注入による接合深さ

図 1 は、シート抵抗の共イオン注入種依存性を示してい

る。同一熱処理温度で比較した場合、共イオン注入によりシート抵抗が増大している。またシート抵抗値は共イオン注入種に依存し、Sn、C、Alの順に高くなっている。

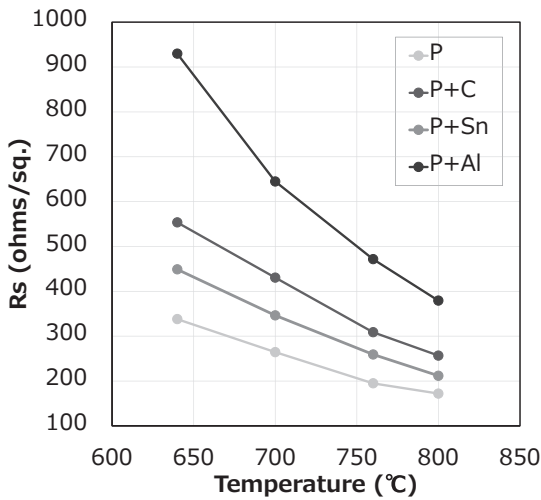


図1 シート抵抗の共イオン注入種依存性

図2に760°Cで熱処理した後のサンプルの接合深さとシート抵抗のトレードオフ関係を示す。接合深さは濃度が 5.0×10^{18} atoms/cm³となる深さで定義している。P注入したサンプルが最も低い抵抗値を示しているが、比較的深い接合となっている。一方、共イオン注入サンプルはPイオン注入サンプルより抵抗値が高い。しかし、浅い接合が実現できていることがわかる。特に、Snを共イオン注入したサンプルは、抵抗値も低く抑えたまま、浅い接合が形成できている。Cを共イオン注入したサンプルの拡散は最も抑制で

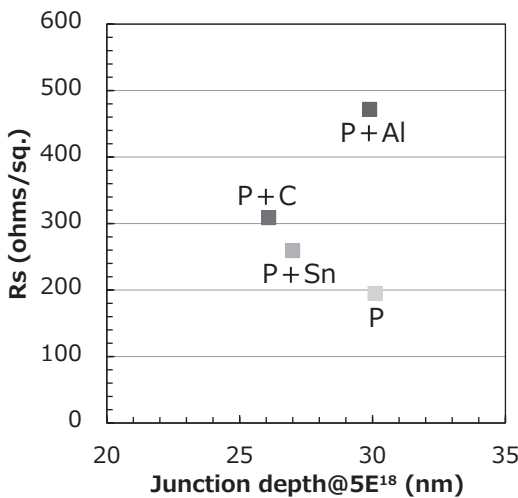


図2 接合深さとシート抵抗の関係 (760°C熱処理後)

きているものの、抵抗値は高くなっている。これはGe結晶中のCはドーパントの異常拡散を抑制できるが、ドーパントの活性化を妨げるためである⁽⁵⁾。

図3に760°Cで熱処理した後のPのSIMS深さプロファイルを示す。Pイオン注入サンプルは熱処理後の拡散が顕著で裾を引くプロファイルとなっている。また、CやAlを共イオン注入することでPの高濃度領域の拡散を抑制できているが、分布のテール部分（低濃度領域）の裾引きが見られる。一方、Snの共イオン注入サンプルの場合、Pイオン注入サンプルと同様、高濃度領域の拡散がみられるが、テール部分の拡がりが抑えられており、ボックスプロファイルになっている。

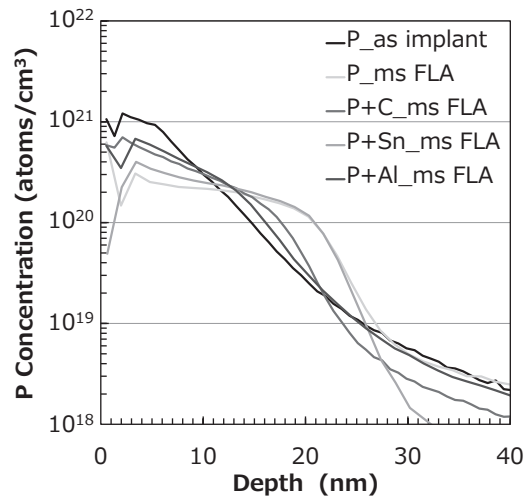


図3 PのSIMS深さプロファイル (760°C熱処理後)

3-2 Ge基板中のドーパントにSnが与える影響

Snが他の共イオン注入サンプルと異なり、ドーパントのプロファイルをコントロールできることから、詳細評価を実施した。図4に熱処理を640°Cに低温化した場合のPおよびSnのSIMS深さプロファイルを示す。比較的低い熱処理温度によりPの拡散が抑制できている。一方、Snを共イオン注入した場合、テール部のプロファイルは注入後のプロファイルよりも浅くなり、PのプロファイルがSnのプロファイルに近付いている。

さらに、Snの位置がドーパントにおよぼす影響を確認するため、Snの注入深さを3nm、ドーズ量を 5.0×10^{14} atoms/cm²とした場合のPおよびSnのSIMS深さプロファイルを図5に示す。Snの位置を浅くすることで高濃度領域の拡散は抑制されているが、その反面テール部分の拡散は抑制されていない。これらの結果から、PとSnのプロファイル位置関係が拡散抑制に強く依存していることがわかる。

A. Chronos氏たちは、シミュレーションを用いて、Ge

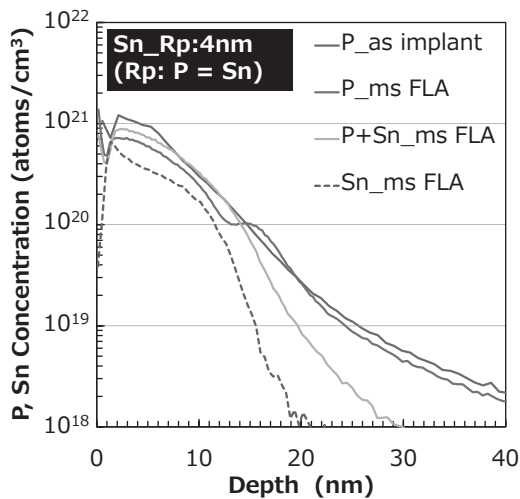


図4 PおよびSnのSIMS深さプロファイル (760°C熱処理後)

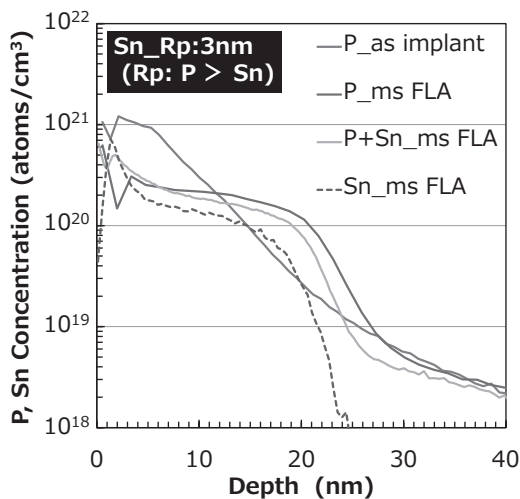


図5 PおよびSnのSIMS深さプロファイル (760°C熱処理後)

抵抗値が高くなり、活性化が不十分であることがわかる。

イオン注入によって発生した結晶欠陥は熱処理により回復されるが、残留欠陥はpn接合のリーク電流の要因となるため注意が必要である。図7に760°Cで熱処理した後の断面TEM画像を示す。Snの共イオン注入の有り無しに関わらず、熱処理をすることで残留欠陥は見られず、結晶が回復していることがわかる。Ge基板中のSnの固溶度は非常に高いことから、効率よく結晶回復されたと考えられる(760°Cのとき、 10^{20} atoms/cm³)⁽⁶⁾。

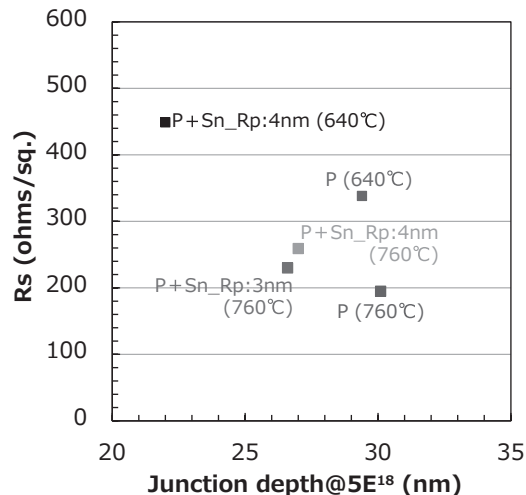


図6 シート抵抗と接合深さの関係 (Sn共注入の比較)

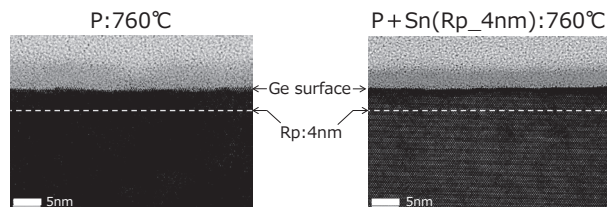


図7 断面TEM像 (760°C熱処理後)

基板中のP、Sn、空孔 (V) のクラスター (PSnV)⁻¹がPの拡散を抑制できる、ことを報告している⁽⁵⁾。負にチャージした (PSnV)⁻¹の拡散エネルギーは1.54eVであるが、Pと空孔で形成された (PV)⁻¹の拡散エネルギーは0.91eVより大きいため拡散が抑制できる。SnをGe基板中にイオン注入することでP、Sn、Vのクラスターが形成されるが、Snのイオン注入深さによって、クラスター化される領域が異なっていたため、Pの拡散を抑制できる箇所も異なると考えられる。このことから、SnとPのプロファイルの位置関係が非常に重要である。

図6にSnの共注入したサンプルの熱処理した後を比較したシート抵抗と接合深さの関係を示す。Snを共イオン注入することで、浅い接合が実現できている。640°Cまで熱処理温度を低温化することで接合深さは浅くなるが、シート

Snの共イオン注入による結晶歪みを確認するため、760°Cで熱処理したサンプルのラマン分光測定を行った。図8と図9にその結果を示す。図8のラマンスペクトルから、Ge-P結合に基づくピークが確認できる。このことから、イオン注入されたPがGeの格子位置に置換していることがわかる。また図9のラマンスペクトルから、Snのドーズ量の増加に伴い、Geに基づくピークが、低波数側へシフトしていることがわかる。この現象は、Ge結晶にSnを注入することで、引っ張り歪みが発生している。図9の挿入図に示すように、Snのドーズ量が 1.0×10^{15} atoms/cm²で、歪みの量は約0.16%である。引っ張り歪みの発生はSnの格

子半径がGeよりも大きいことに起因し、電子移動度を向上させる。

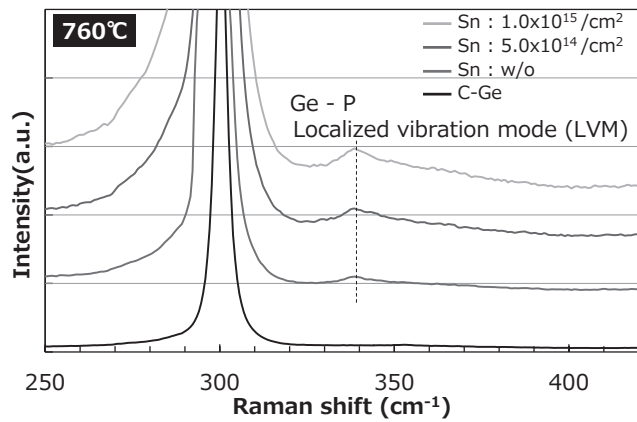


図8 Ge-Pに基づくラマンスペクトル (760°C熱処理後)

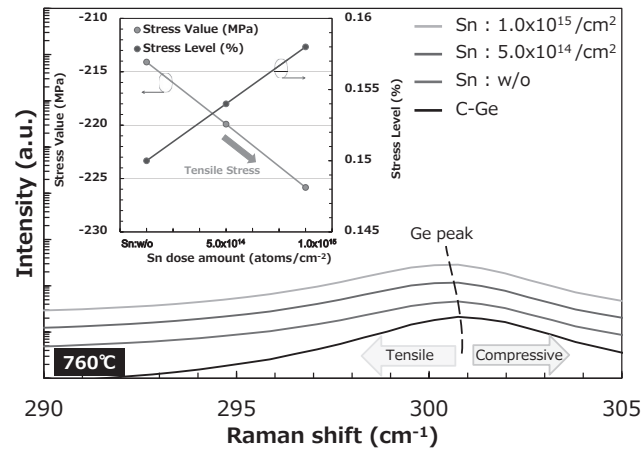


図9 Geに基づくラマンスペクトル (760°C熱処理後)
(挿入図: Snのドーズ量に伴う歪み量)

4. 結 言

Ge基板に対し、n型ドーパントであるPイオンとC、Al、Snの共イオン注入を行い、FLA後に詳細な評価を行った。共イオン注入することで、Pの拡散を抑制でき、浅い接合の形成が可能なが確認できた。その中でも、Snの共イオン注入は、シート抵抗が低く、かつ浅い接合が形成でき、抵抗と接合深さのトレードオフ関係を改善できることを見出した。これはSnのプロファイルに依存して、Pの拡散が制御できているためである。また、Snの共イオン注入による結晶回復への悪影響は見られない。この結果から、Snの共イオン注入技術が次世代半導体材料であるGe半導体の浅い接合を実現できる可能性がある。

5. 謝 辞

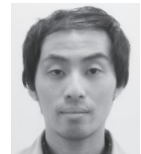
本研究を実施するにあたり、(株)SCREENセミコンダクターソリューションズの谷村英昭氏、青山敬幸氏、加藤慎一氏にFLA処理および結果の議論を通じてご協力していただいた。ここに深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) S. Takagi, "Motivation to high mobility material FETs," 2011 IEDM Short Course
- (2) Eddy Simoen and Cor Claeys. Germanium-based technologies, oxford, ELSEVIER (2007)
- (3) H. Onoda et al., Proceedings of 21st Int. Conf. on Ion Implantation Technology (2016) p. 267
- (4) H. Tanimura et al., Abstract of 16th Int. Work. on Junction Technology (2016) S4-4
- (5) A. Chroneos and H. Bracht, APPLIED PHYSICS REVIEW 1, 011301 (2014)
- (6) The bell System technical journal, January 1960, P208

執 筆 者

和田 涼太* : 日新イオン機器(株)



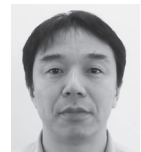
永山 勉 : 日新イオン機器(株) グループ長



黒井 隆 : 日新イオン機器(株) グループ長



池尻 忠司 : 日新イオン機器(株) 部長



*主執筆者