

超高感度赤外線イメージセンサのための熱電変換 ナノ材料における電子・フォノン輸送制御

[1] 組織

代表者：鎌倉 良成
(大阪大学大学院工学研究科)
対応者：池田 浩也
(静岡大学電子工学研究所)
分担者：ファイズ サレ
(静岡大学電子工学研究所)

[2] 研究経過

サーモパイル型赤外線イメージセンサの感度はサーモパイル部に用いる熱電変換材料の熱電変換特性に強く依存しており、センサの超高感度化にはゼーベック係数の向上と熱コンダクタンスの低減が不可欠となる。ゼーベック係数はフェルミエネルギーから測ったキャリアのエネルギーで決まるため、n型半導体では伝導帯端とフェルミエネルギーの位置制御が重要になる。また、Siにおいてはゼーベック係数に与えるフォノンドラッグの寄与も大きく、熱伝導率と併せてフォノンの振る舞いを制御する必要がある。

本プロジェクトでは、Si ナノワイヤ構造、ドナーとアクセプターの共ドーピング、さらには SiGe 混晶を用いて電子およびフォノンの輸送を制御することにより、熱起電力および熱伝導特性の飛躍的改善を目的とする。

本プロジェクトは、本年度が2年目であった。昨年度得られた室温近傍での p 型 SiGe 混晶のゼーベック係数について、フォノンドラッグ効果の解析をさらに進めた。また、将来的に SiGe ナノワイヤを形成するのに必要な極薄 SGOI (SiGe on insulator) 基板を作製するための Ge 蒸着装置を構築し、Ge 蒸着を試みた。

以下、研究活動状況の概要を記す。

研究打ち合わせ：1回 (9/15)

研究討論会：3回 (7/14, 2/15, 3/7-8)

[3] 成果

(3-1) 研究成果

本年度は、以下に示す研究成果を得た。

【1】 SiGe 混晶のゼーベック係数

一般的に半導体のゼーベック係数 (S_{total}) は、キャリアの拡散に起因する項 (S_d) とフォノンドラッグに起因する項 (S_{ph}) から成る。Siでは室温近傍において S_{ph} の寄与が顕著なため、室温近傍で使用するデバイスではフォノンドラッグの効果を考慮する必要がある。SiGe混晶を導入することにより熱伝導率の低減とそれに伴う性能指数の向上が期待されているが、 S_{ph} への影響も解明する必要がある。

昨年度の測定により得られた p 型 Si, Ge, SiGe の S_{ph} について解析を進めた結果、 S_{ph} を支配する因子がフォノン速度、フォノンの平均自由行程、キャリア移動度であることを明らかにした。他の文献の報告値も含めた S_{ph} と Ge 組成の関係を、図1に示す。図中の実線は、SiGeのフォノン速度、フォノンの平均自由行程、キャリア移動度の値を、SiとGeの値から単純に内挿して計算した場合の理論値である。この理論値が実験データをよく再現できていることがわかる。したがって、SiとGeの物性パラメータを内挿することにより、SiGe混晶のゼーベック係数が予測できることが示された。

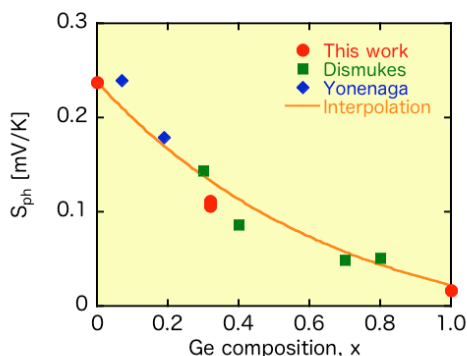


図1：SiGe混晶のゼーベック係数

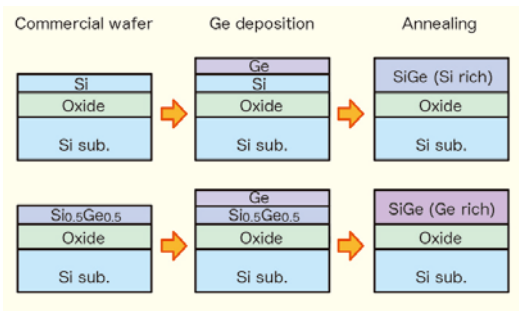


図2：極薄SGOI層の作製工程

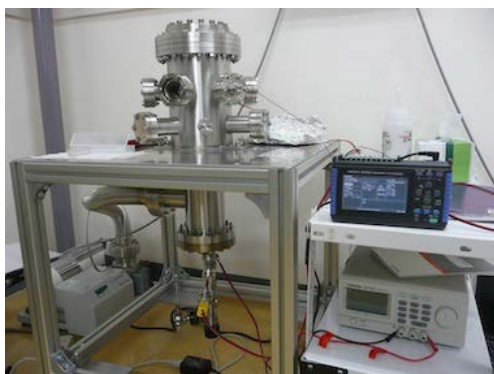


図3：Ge蒸着装置

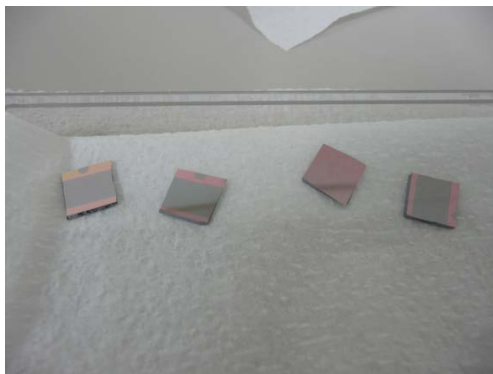


図4：蒸着後のGe/SOI基板

【2】極薄SGOI層の作製

リソグラフィ技術を用いて SiGe ナノワイヤ構造を作製するためには、極薄SGOI層を持つ基板を用意する必要がある。市販のウェハは高額な上に Ge 組成の自由度も低いため、研究遂行上、自作できることが望ましい。我々は、図2に示すような手法にて、極薄SGOI基板の作製を試みている。すなわち、厚さ 100nm の極薄 SOI 基板および極薄 SGOI 基板 (Ge 組成 $x=0.5$) を初期基板として、Ge 蒸着を行う。蒸着後に熱処理を行い、SiGe 混晶層を形成する。

この手法により、広い範囲の Ge 組成に対応可能となる。

Ge 蒸着工程を行うために、新たに薄膜形成装置を構築した。いわゆる K セルを用いた蒸着装置であり (図3)、るつぼや加熱用ヒーターなどはすべて自作した。この装置を使って実際に Ge の蒸着を行ったところ、ほとんど蒸着されなかった。るつぼの温度が十分上がっていない可能性が考えられるが、元々このタイプの装置はエピタキシャル成長のような成長速度を必要としない膜成長に適しており、本実験ではもう少し速い成長速度が必要である。

W ポートを用いた一般的な真空蒸着装置にて Ge 蒸着を行ったところ、図4のように Ge が蒸着された。この結果を受けて、現在は図3の装置を、W ポート仕様の蒸着装置に改造している。また、図4の試料について、結晶学的特性の評価も並行して進めている。

(3-2) 波及効果と発展性など

本プロジェクトの遂行により、多元素系ナノワイヤ構造の導入による熱電変換特性の大幅な向上が期待されるとともに、理論的性能予測に基づくセンサの設計指針が構築される。これらの成果が赤外線イメージセンサの高感度化に大きく寄与するのはもちろんであるが、自然エネルギーとして期待される熱電発電の分野に対しても世界で先駆けの結果が期待され、高効率発電システムの実現に貢献できる。

[4] 成果資料

- (1) F. Salleh, T. Oda, Y. Suzuki, Y. Kamakura, H. Ikeda, "Seebeck coefficient of SOI layer induced by phonon transport", *Makara J. Technol.*, **19**, 1-4 (2015).
- (2) V. Manimuthu, S. Yoshida, Y. Suzuki, F. Salleh, M. Arivanandhan, Y. Kamakura, Y. Hayakawa, H. Ikeda, "Phonon-drag contribution to Seebeck coefficient of Ge-on-insulator substrate fabricated by wafer bonding process", *Makara J. Technol.*, **19**, 21-24 (2015).
- (3) V. Manimuthu, M. Omprakash, Y. Suzuki, F. Salleh, M. Arivanandhan, Y. Kamakura, Y. Hayakawa, H. Ikeda, "Seebeck coefficient of Ge-on-insulator layers fabricated by direct wafer bonding process", *Adv. Mater. Res.*, **1117**, 94-97 (2015).

出張報告

氏名：鎌倉良成

所属：大阪大学大学院工学研究科

期間：平成27年7月14日（火）

用務先：静岡大学電子工学研究所

用務内容：研究会に出席して、成果発表・議論を行った

主たる対応者：池田浩也