

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020年度～2024年度
課題番号：20H05649
研究課題名：無欠陥ナノ周期構造によるフォノン場制御を用いた高移動度半導体素子
研究代表者氏名（ローマ字）：寒川 誠二（SAMUKAWA Seiji）
所属研究機関・部局・職：東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号：30323108

研究の概要：無欠陥ナノ構造作製技術・フォノンバンドナノオーダー評価解析技術・ナノオーダートランジスタ作製技術を融合することで、ナノ構造によりトランジスタチャンネル領域でのフォノン場を制御するナノスケールサーマルマネジメントを実現して、高移動度プレーナー型半導体素子の開発に挑戦する。また、フォノン生成・輸送特性制御に有効であることを実験的・理論的解析から明らかにする。

研究分野：電子デバイスおよび電子機器関連

キーワード：無欠陥ナノ周期構造複合材料、フォノン場制御、高移動度半導体素子、フォノンバンド、エレクトロンバンド、ナノスケールサーマルマネジメント

1. 研究開始当初の背景

情報処理を支える LSI は CMOS トランジスタの微細化によって性能向上を果たしてきた。しかし、ゲート長が 50 nm を切るあたりからは単なる微細化では性能向上が難しくなっている。そこで、technology booster を活用して性能向上が行われてきた。現在これらによる性能向上に限界が見えており、次の新しい technology booster が必要不可欠になっている。本提案では、第4の technology booster として、周期的で無欠陥な半導体ナノピラー(NP)をマトリックス材料で埋め込んだ複合構造の導入を提案する。これにより材料やナノピラーサイズ、間隔によってキャリアのフォノン散乱を抑制し、移動度の劇的な向上と発熱の少ないトランジスタチャンネル層が実現可能となる。この technology booster を 50 nm 程度のプレーナー型トランジスタに適用し、10 nm 程度の Fin 型トランジスタを凌駕する特性を実証する。

2. 研究の目的

本研究提案の大きな特徴は、研究代表者・寒川の無欠陥ナノ構造作製技術、研究分担者・福山および野村のフォノンバンドナノオーダー評価解析技術、研究分担者・遠藤のナノオーダートランジスタ作製技術を融合させることにある。これにより、ナノスケールのサーマルマネジメントによって本質的にキャリア移動度のフォノン散乱を極限まで抑えた NP 複合構造を設計する。具体的には、室温でバルク材料より 3 倍以上高いキャリア移動度のチャンネル層(液体窒素温度環境と同等)を創出することを目標とする。同構造をトランジスタチャンネルとして採用することで革新的な高移動度半導体素子を実現する。最終的には、チャンネル長 30-50 nm 程度のプレーナー型構造トランジスタにおいて 10 nm 程度のフィン型トランジスタを超えるキャリア移動度を実現できる新構造半導体素子を提案する。

3. 研究の方法

研究代表者・東北大・寒川 Gr では、フォノン/エレクトロンバンド制御によるナノ構造形成技術の確立および最適化を行う。

研究分担者・宮崎大・福山 Gr では、レーザーヘテロダイナ光熱変換法により非接触でナノスケールの熱波/熱弾性波伝搬の時間分解測定を可能とし、発生した熱がどこまで拡散するかというフォノンの伝搬距離を高感度・高精度に検出する新しい技術を実現する。

研究分担者・東京大・野村 Gr では、チャンネル部に設けるフォノンニックナノ構造のパラメータ（周期、ピラー直径、ヤング率など）を系統的に変化させることでフォノン輸送特性を理論的に解析するとともに、フォノンニック結晶における電子-フォノン相互作用を研究するにあたり、非平衡グリーン関数法を用いた熱伝導解析法の構築を行う。

研究分担者・産総研・遠藤 Gr では、各 Gr の成果で明らかとなった最適パラメーターを用いて作製した半導体ナノピラー複合構造をチャンネル層としてシリコン集積化プロセスと融合する技術を確立する。

4. これまでの成果

(1) Si NP/SiGe 中間層の複合チャンネル構造を実現

研究代表者・東北大学・寒川 Gr および研究分担者・産総研・遠藤 Gr は、Si NP 構造と SiGe 中間層によるチャンネル構造の作製に向けて、NP 間隔高精度制御技術の確立および SiGe 中間層埋め込み CVD 技術の確立、および SiGe 中間層の化学的機械研磨(CMP)による平坦化技術の確立を実現した。

(2) NP 複合構造膜の電気特性の計測

研究分担者・産総研・遠藤 Gr では厚み約 100 nm の Si NP/SiGe 複合構造膜を形成し、膜面内の電気抵抗率を決定した。最大 1 nA の電流を流す条件の範囲においてオーミックコンタクトが得られ、室温で約 4000 Ωm と極めて高抵抗であるが、複合構造膜の面内電気特性の計測に成功した。結果的に不純物や欠陥の影響がない高い抵抗を有しているものと理解することができる。また、バンドギャップを計算すると $E_g = 0.84 \text{ eV}$ が得られた。本構造において量子効果が影響している可能性がある。埋め込みによるヘテロ界面のミクロな分析により、歪量が決定できれば理論的にバンドオフセットを見積もることができる。

(3) ナノピラー複合構造膜の熱特性の計測

研究分担者・宮崎大学・福山 Gr は、励起レーザー照射によって発生した熱による表面変位量をヘテロダイナミクス計で計測するレーザーヘテロダイナミクス熱変位（以下、LH-PD）法の構築を行った。更に、COMSOL を用いた計算で、一次元熱伝導方程式に基づく理論計算も行い、実験結果と非常によく一致が得られた。また、計算から試料表面の上昇温度も明確になった。よって、本研究課題で構築した LH-PD 法は、表面変位量をサブナノメートルオーダーで高感度測定できることが実証された。

(4) フォノンバンドシミュレーション

研究分担者・東大・野村 Gr は、フォノン結晶における電子-フォノン相互作用に関する知見を深めることを目的とし、初段階として、一次元の Si/Ge フォノン結晶構造において非平衡グリーン関数法を用いた熱伝導解析法を確立した。その結果、Si/Ge からなる一次元フォノン結晶が直列した構造におけるフォノン輸送特性を計算し、その周期に応じたフォノンの透過スペクトルおよび局在フォノンスペクトルを得た。また、本シミュレーションから累積熱伝導率スペクトルも計算可能になった。

5. 今後の計画

研究代表者・東北大・寒川 Gr は Si、Ge、SiGe 等材料を用いた周期的 NP 構造および、複数の Matrix 材料を用いた基本構造体の検討、および研究分担者・産総研・遠藤 Gr とシリコン集積化プロセスとの融合を行い、NP 材料・構造、埋め込み材料と集積化デバイス構造における実際のフォノン場およびキャリア移動度との関係を明らかにし、NP 材料・構造および埋め込み材料の最適化を行う。

研究分担者・産総研・遠藤 Gr は、今後の集積化デバイス試作の計画に関して、2021 年度に確立した CMP 技術により、実際に Si NP/SiGe 複合構造に対して表面平坦化を行い、続いてゲート絶縁膜および電極を形成し、予定通り Si 集積化プロセスとの融合によるデバイス試作を行い、特性評価を実施する。

研究分担者・東京大学・野村 Gr は、フォノン結晶系におけるフォノン輸送計算を継続し、フォノンバンド解析、状態密度、輸送特性解析を行う。現在、PoC の観点から一次元フォノン結晶の解析を行っているが、計算リソースが許容する範囲で二次元フォノン結晶に拡張可能かを検討する。

キャリア移動度の解析においては、研究協力者・徳増(東北大)および研究協力者・李(台湾交通大)と連携して、これらの小規模の第一原理量子化学計算における電子軌道や電子状態密度の計算結果を、Tight-Binding 法による量子分子動力学計算に必要な電子軌道の解析関数やパラメータを決定し、このシミュレータを用いて大規模かつ複雑な NP 構造のエレクトロンバンド計算を行う

研究分担者・宮崎大学・福山 Gr は、ナノオーダーステージを自動制御することで検出レーザー照射位置のみをスキャンさせて、材料内で発生したフォノンがどこまで輸送されるかの 2 次元マッピングを測定するための装置およびソフトウェアの改造を行う。更に、LH-PD 法を NP 複合材料に初めて適応し、非破壊・非接触で熱波/熱弾性波伝搬の時間分解測定を行う。熱発生用の励起レーザーの照射位置を変えることで、ナノピラーに垂直/成長方向の熱伝搬特性を分離することも試みる。

最終的に、半導体素子の室温におけるキャリア移動度向上を目的として、半導体ナノピラー構造プロセス、シリコン集積化プロセスを融合およびその最適化をして、本質的に熱の発生が少ない、新構造高移動度トランジスタを設計する。また、理論計算では、ナノピラーの材料、サイズやバンドオフセット等が散乱現象に与える影響を定量的に予測するモデルを構築し、フォノン輸送の制御による音響フォノンの発生抑制と高キャリア移動度の実現の方向性を明らかにする。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

1. M. Nomura, R. Anufriev, Z. Zhang, J. Maire, Y. Guo, R. Yanagisawa, and S. Volz, “Review of thermal transport in phononic crystals,” Mater. Today Phys. 22, 100613 (2022).
2. D. Otori, M. H. Chuang, A. Sato, S. Takeuchi, M. Murata, A. Yamamoto, M. Y. Lee, K. Endo, Y. Li, J. H. Tarnag, Y. J. Lee, and *S. Samukawa, “Management of Phonon Transport in Lateral Direction for Gap-Controlled Si Nanopillar/SiGe Interlayer Composite Materials”, IEEE Open J. Nanotech. 2, 148 (2021).
3. M. H. Chuang, Y. Li, and *S. Samukawa, “On the energy band of neutral-beam etched Si/Si_{0.7}Ge_{0.3} nanopillars”, Jpn. J. Appl. Phys. 60 (2021).
4. *Y. Guo, M. Bescond, Z. Zhang, S. Xiong, K. Hirakawa, *M. Nomura, and *S. Volz, “Thermal conductivity minimum of graded superlattices due to phonon localization,” APL Mater. 9, 091104 (2021).
5. *Y. Guo, Z. Zhang, M. Bescond, S. Xiong, *M. Nomura and *S. Volz, “Anharmonic phonon-phonon scattering at the interface between two solids by non-equilibrium Green's function,” Phys. Rev. B 103, 174306 (2021).
6. *Y. Guo, M. Bescond, Z. Zhang, M. Luisier, *M. Nomura and *S. Volz, “Quantum mechanical modeling of anharmonic phonon-phonon scattering in nanostructures,” Phys. Rev. B 102, 195412 (2020).
7. M.-H. Chuang, D. Otori, *Y. Li, K.-R. Chou, and *S. Samukawa, “Fabrication and simulation of neutral-beam-etched silicon nanopillars”, Vacuum 181 (2020).

7. ホームページ等

<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/samukawa/japanese/index.html>