

最先端・次世代研究開発支援プログラム
事後評価書

研究課題名	ナノ半導体におけるキャリア輸送・熱輸送の統合理解によるグリーンLSIチップの創製
研究機関・部局・職名	慶應義塾大学・理工学部・教授
氏名	内田 建

【研究目的】

ナノ半導体は次世代エレクトロニクスの基盤材料として注目されている。半導体がナノスケールにまで小さくなると、量子効果などによりバルク結晶とは異なる性質を持ち、新しい機能を持った電子デバイスの実現が期待される。ところが従来、このような新機能の検証は、外場が極めて小さな平衡状態を仮定することでなされてきた。一方で、ナノ半導体を使いこなしていくためには、電界が大きく非平衡状態となったナノ半導体内部のキャリア輸送と発熱現象を理解すること、また発生した熱の輸送現象を理解することが不可欠である。

本課題では、以下の4項目を目標として掲げた。すなわち、(A) ナノ半導体デバイスの熱的特性の評価、(B) ナノ半導体におけるフォノン特性の特異性の検証、(C) 電界が高い場合のナノ半導体におけるキャリア輸送特性の基礎学理の確立、(D) これらを統合的に理解することで、ナノ半導体を用いた高性能・超低消費電力の大規模集積回路（グリーンチップ）を創製するための設計指針の構築、以上の4項目を研究目的とした。

【総合評価】

	特に優れた成果が得られている
○	優れた成果が得られている
	一定の成果が得られている
	十分な成果が得られていない

【所見】

① 総合所見

所期の目標である「ナノ半導体におけるキャリア輸送・熱輸送の統合理解によるグリーンLSIチップの創製」はほぼ達成されたと考えられる。14 nm 世代のデバイスで消費電力を1/3に低減できることを定量的に示して、消費電力を1/10に低減するという数値目標の実現の見通しを得た。トランジスタのサイズがより小さくなり、本研究で微細化が進むほど、熱配慮設計が有効に働き、消費電力をより大幅に削減できることを示されており、これに基づき消費電力の低減効果を評価した。よって、

14 nm 世代以降の将来世代では、本研究課題で確立した方法を利用することで、所期の数値目標であった消費電力 1 / 10 は達成できると考えられる。

以上、ナノデバイスで最も重要とされる発熱とリーク電流の問題に積極的に取り組み熱的現象の理解、解明が進み、新しい知見が得られ、大幅な省電力化の可能性が示された。よって、本研究はかなりの成果を挙げたと考えられる。

② 目的の達成状況

・ 所期の目的が

(全て達成された ・ 一部達成された ・ 達成されなかった)

本課題目標として掲げた 4 項目は、(A) ナノ半導体デバイスの熱的特性の評価、(B) ナノ半導体におけるフォノン特性の特異性の検証、(C) 電界が高い場合のナノ半導体におけるキャリア輸送特性の基礎学理の確立、(D) これらの統合的に理解に基づき、高性能・超低消費電力の大規模集積回路 (グリーンチップ) の設計指針の構築である。(A) に関して、ナノ材料の熱伝導を測定するだけでなく、ゲート長 40 nm のナノ半導体デバイスを作製し、その熱的特性を評価することに成功した。(B) に関して、膜厚 5 nm 以下の極薄膜ナノシリコンのフォノン特性を測定することに成功した。ナノシリコン中で、電子と強く相互作用するフォノンのエネルギーが減少することを見出した。(C) に関して、電界が高い状況での電子の非平衡輸送特性を測定・解析することで、酸化膜-シリコン界面近傍において電子-フォノン相互作用が強くなることを見出した。(D) に関して、これらの知見を統合的に活用し、14 nm 世代のナノ構造トランジスタに熱配慮設計を施すことで、消費電力を 1 / 3 程度に低減可能であることを示した。トランジスタをさらに微細化することで、より大幅な消費電力の削減が可能になると期待される。

以上により、所期の目的は達成されたと考える。

③ 研究の成果

・ これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が (ある ・ ない)

・ ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が (創出された ・ 創出されなかった)

・ 当初の目的の他に得られた成果が (ある ・ ない)

ナノデバイスを試作する技術及びその熱伝導特性を評価するために計測系を一体化する技術、ベースとなるものづくりを基盤としてナノデバイスの発熱低減を目指していることは先進性・優位性がある。

実験と計算を対応させながら多くの研究成果を見出しており、極薄 BOX を有する SOI トランジスタの自己加熱に対し、研究成果から実現した測定方法を用いて定量的に評価できたこと、熱配慮設計によりアナログ特性を 40% 程度改善できた点は評価できる。

非弾性トンネル分光法によりナノシリコン中では電子と強く相互作用するフォノ

ンのエネルギーが低くなることを実験的に見出した。これは、電子デバイスの評価では見出せなかった現象でナノ材料が光デバイスに応用できる物性値であると評価できる。

抵抗変化型不揮発性メモリを実現できることを提案している。

このように、ナノスケールにおける熱物性を探索した点は、ナノ材料の新たな可能性を開くことになるため今後の成果が期待される。

④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が

(見込まれる ・ 見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が

(見込まれる ・ 見込まれない)

ナノデバイスはデバイス間の漏れ電流の影響が大きく、それを低減させるためにSOI構造にすることが必要となる。しかし、絶縁層上にナノデバイスを構築することは、ナノデバイスからの発熱を放熱できない。そのためナノデバイスではバルクデバイスに比べてデバイス構造を最適化させ、如何に外部に放熱させるかがナノトランジスタ実用化の鍵である。本研究では発熱の問題を計算と実験からチャレンジし、ナノデバイスの最適設計を試みようとしており、この研究成果は関連する研究分野の進展に大きく寄与するものと思われる。

デバイスの自己加熱による温度上昇は、LSIの高集積化及び信頼性を阻害する大きな要因であり、本研究はこれの解析・評価と対策のための具体的な提案を行っている。本研究成果がLSIの高信頼性に繋がる。また、ナノデバイスの消費電力が22nm世代のデバイスに対して1/10になる見通しを得ており、本研究の成果はグリーン・イノベーションに貢献するものと考えられる。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが (行われた ・ 行われなかった)

研究途中で所属先が東京工業大学から慶應義塾大学に変更になったにもかかわらず、半導体の製造設備が十分な東京工業大学との更なる連携、共同研究を推進し研究の成果を上げており、実施体制、研究実施マネジメントは適切であると考えられる。

雑誌論文12件(査読なし1件を含む)、会議発表61件があり、また、プレスリリースも行い、大学のオープンキャンパス、学園祭、技術展などの場も活用し、広く国民に対する理解を醸成するよう務めており、研究の成果の積極的な公表は適切に行われており、また国民との科学技術対話への努力は認められる。