

課題番号	GR034
------	-------

**先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム)
実施状況報告書(平成25年度)**

本様式の内容は一般に公表されます

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

1. 当該年度の研究目的

本年度は、以下を推進する。

- (1) ゲート長 40nm 程度の極微細トランジスタを作製し、発熱(チャネル温度の上昇)を定量的に評価する。
- (2) 微細トランジスタにおける熱配慮設計の指針を確立する。
- (3) グラフェンなどの原子層材料を用いた新電子デバイス(抵抗変化型メモリ)が、低エネルギーで動作する条件を明らかにする。

2. 研究の実施状況

平成 25 年度は以下の進捗があった。

- (1) 独立行政法人産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門とつくばイノベーションアリーナ推進本部と共同で、ゲート長が 40 nm 程度の微細トランジスタを作製し、トランジスタの動作中の温度を測定した。特に、トランジスタの動作温度測定に適した材料・構造を採用することで、これまで実現できなかった非常に高い精度でチャネル温度を測定することに成功した。その結果、以下のことを世界に先駆けて明らかにした。(a)トランジスタチャネル下部の絶縁膜の膜厚が薄くなると動作時温度は下がるものの、5nm 程度にまで極薄膜化しても無視できない程度の温度上昇は依然存在する。(b) チャネル温度の上がりやすさは、チップ全体の温度に依存する。(c)バルク結晶上に作製されたトランジスタ(従来主流のトランジスタ構造)では、チャネル近傍の局所的な温度上昇は無視できると考えられていたが、ゲート長が 40 nm 程度の微細トランジスタでは有意な温度上昇が生じる。
- (2) 埋め込み絶縁膜上に作製されたトランジスタにおける自己加熱(電流が流れたことによってトランジスタのチャネル近傍が加熱する現状)を抑制するためには以下の方針が有効であることが明らかになった。(a)埋め込み絶縁膜を薄くする、(b)ソース/ドレイン領域の厚さを厚くする、(c)埋め込み絶縁膜下部のシリコンへのドーピング濃度を下げる、(d)チャネルのドーピング濃度を下げる。
- (3) 前年度までにナノ領域での局所加熱を利用することで、グラフェン抵抗変化型メモリが実現できることを示した。本年度は、(a)このグラフェン抵抗変化型メモリは、3端子動作が可能であること、(b)この3端子動作を利用することで、高抵抗状態から低抵抗状態への遷移に必要なエネルギーを 1/3 以下に低減できることを明らかにした。

これらの研究成果は、低エネルギーLSIを実現するために幅広く活用されることが期待される。

3. 研究発表等

<p>雑誌論文 計 5 件</p>	<p>(掲載済み一査読有り) 計 3 件</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. T. Ohashi, S. Oda, and K. Uchida, "Impact of Deformation Potential Increase at Si/SiO₂ Interfaces on Stress-Induced Electron Mobility Enhancement in Metal/Oxide/Semiconductor Field-Effect Transistors," <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i>, vol. 52, 04CC12 April, 2013. (6pages) doi:10.7567/JJAP.52.04CC12 2. T. Takahashi, S. Oda, and K. Uchida, "Methodology for Evaluating Operation Temperatures of Fin-Type Field-Effect Transistors Connected by Interconnect Wires," <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i>, vol. 52, 064203, May 2013. (7pages) doi:10.7567/JJAP.52.064203 3. A. Shindome, T. Takahashi, S. Oda, and K. Uchida, "Experimental study on SET/RESET conditions for graphene resistive random access memory," <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i>, vol. 53, 04EN02, February 2014. (5 pages) doi:10.7567/JJAP.52.04CC03 <p>(掲載済み一査読無し) 計 1 件</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. 内田建, "シリコンナノ構造デバイスのキャリア輸送特性と熱配慮設計," <i>応用物理</i>, vol. 83, no. 4, pp262-267, April, 2014. <p>(未掲載) 計 1 件</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. M. Yamada, K. Uchida, and Y. Miyamoto, "Delay Time Component of InGaAs MOSFET Caused by Dynamic Source Resistance," <i>IEICE Trans. Elec.</i>, vol. E97-C, pp419-422, May 2014. (4 pages) doi:10.1587/transele.E97.C.419
<p>会議発表 計 16 件</p>	<p>専門家向け 計 16 件</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. A. Shindome, T. Takahashi, S. Oda, and K. Uchida, "Experimental Study on SET/RESET Conditions for Graphene ReRAM," <i>International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM)</i>, C-4-4, Fukuoka, Japan, Sep 25-27, 2013. 2. T. Takahashi, T. Matsuki, T. Shinada, Y. Inoue, and K. Uchida, "Comparison of Self-Heating Effect (SHE) in Short-Channel Bulk and Ultra-Thin BOX SOI MOSFETs: Impacts of Doped Well, Ambient Temperature, and SOI/BOX Thicknesses on SHE," <i>Technical Digest of IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)</i>, Washington D.C., USA, Dec 9-11, pp7.4.1-7.4.4, 2013. 3. K. Uchida, "Low Voltage -How Low Can We Go?," Technology Rump Session at 2013 <i>Symposium on VLSI Technology</i>, Kyoto, Japan, June 11, 2013. (Rump Session Moderator) 4. K. Uchida, "How can we enhance LSI functionalities through Material/Device/Architecture Innovations?" Rump Session at 2013 <i>International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM)</i>, Fukuoka, Japan, Sep 26, 2013. (Rump Session Moderator) 5. K. Uchida, "Nanoscale Materials for LSI interconnects," <i>International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC' 2013)</i>, Las Vegas, Dec 2-6, 2013. (Invited). 6. K. Uchida, "Extending the FETs," Short Course at <i>IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)</i>, Washington D.C., USA, Dec 8, 2013. (Short Course Lecture) 7. 内田 建, 「立体構造トランジスタ:短チャネル効果・自己加熱・ばらつき」, STARC アドバンス講座(川崎市産業振興会館), 2013年5月14日(依頼講演). 8. 内田 建, 「ナノスケール MOSFET のキャリア輸送」, 電子情報通信学会 2013 年ソサイエティ大会(福岡工業大学), C-12-26, 2013 年 9 月 18 日(受賞講演). 9. 高橋 綱己, 小田 俊理, 内田 建, 「熱特性モデル化による回路中の FinFET 動作温度評価手法」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会(2013 秋 同志社大学)13.6 Si デバイス/集積化技術, 20a-C8-10, 2013 年 9 月 16-20 日(一般講演). 10. 新留 彩, 高橋 綱己, 小田 俊理, 内田 建, 「グラフェン抵抗変化型メモリの SET/RESET 条件に関する研究」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会(2013 秋 同志社大学)17.3 新機能探索・基礎物性評価, 18a-B1-9, 2013 年 9 月 16-20 日(一般講演). 11. 黒澤裕也, 角谷尚哉, 高橋綱己, 大橋輝之, 小田俊理, 内田建, 「不純物のイオン化エネルギー増大によるナノワイヤトランジスタの電気的特性に与える影響」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会(2013 秋 同志社大学)13.6 Si デバイス/集積化技術, 19p-C8-15, 2013 年 9 月 16-20 日. (一般講演) 12. 高橋綱己, 松木武雄, 品田賢宏, 井上靖朗, 内田建, 「ナノスケールバルクおよび極薄膜 BOX SOI

様式19 別紙1

	<p>MOSFET 動作温度の評価」, 電気学会 ナノエレクトロニクス集積化・応用技術調査専門委員会「原子層材料デバイスとナノスケール熱輸送」, 早稲田大学, 2014年3月14日(依頼講演).</p> <p>13. 内田 建, 「ナノデバイスの熱配慮設計:高性能化と新機能創出」, 第61回応用物理学関係講演会(2014春 青山学院大学), 13.半導体A(シリコン)分科企画シンポジウム「ナノエレクトロニクスの新展開と国際連携」, 17a-E1-3, 2014年3月17日(招待講演).</p> <p>14. 高橋綱己, 松木武雄, 品田賢宏, 井上靖朗, 内田建, 「4端子ゲート抵抗法によるナノスケールバルク/極薄膜 BOX SOI MOSFET 動作温度の評価」, 第61回応用物理学関係講演会(2014春 青山学院大学), 13.4 半導体A(シリコン) デバイス/集積化技術, 19a-F12-2, 2014年3月19日(一般講演).</p> <p>15. 高橋綱己, 別府伸耕, 陳君ろ, 小田俊理, 内田建, 「バルク/SOI FinFET の自己加熱およびアナログ特性の最適化」, 第61回応用物理学関係講演会(2014春 青山学院大学), シリコンテクノロジー分科会論文賞および奨励賞記念講演, 19a-E4-5, 2014年3月19日(受賞講演).</p> <p>16. 新留彩, 高橋綱己, 小田俊理, 内田建, 「グラフェン抵抗変化型メモリの3端子動作に関する研究」, 第61回応用物理学関係講演会(2014春 青山学院大学), 17.4 ナノカーボン デバイス応用, 20a-E2-5, 2014年3月20日(一般講演).</p>
<p>図書 計0件</p>	<p>特になし.</p>
<p>産業財産権 出願・取得状況 計0件</p>	<p>(取得済み) 計0件 (出願中) 計0件</p>
<p>Webページ (URL)</p>	<p>1. 慶應義塾大学 内田研究室 www.ssn.elec.keio.ac.jp</p> <p>2. Youtube 慶大 内田研究室 http://www.youtube.com/watch?v=wO_eDt4Gqg0</p> <p>3. プレスリリース 「ナノメートル・スケールトランジスタ動作中温度の正確な測定に成功～次世代半導体集積回路の長期間安定動作へ道～」 http://www.keio.ac.jp/ja/press_release/2013/kr7a4300000csw4.html http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2013/pr20131209_2/pr20131209_2.html</p>
<p>国民との科学・技術対話の実施状況</p>	<p>1. 慶應義塾大学 理工学部 オープンキャンパス 表題: 「スマホのデータ処理をつかさどる電子デバイスの最先端/未来技術」 実施日: 平成25年8月21日 9:30~16:00 場所: 慶應義塾大学 矢上キャンパス 対象者: 一般(主として高校生) 参加者数: 約1800名(オープンキャンパス全体) 内容: 身近なスマートフォンに使われている半導体技術の紹介にはじまり, 今後スマートフォンをより高性能化していくためには, ナノ素子の活用とその特性の電氣的・熱的観点からの最適化が必要であることを説明. 質疑応答形式で参加者との対話も行った.</p> <p>2. 慶應義塾大学 理工学部 矢上祭 表題: 「ナノスケール半導体を用いた電子デバイスの研究」 実施日: 平成25年10月12日, 13日 対象者: 一般(主として大学生および高校生) 参加者数: 約10000名(矢上祭全体) 内容: 身近なスマートフォンに使われている半導体技術の紹介にはじまり, 今後スマートフォンをより高性能化していくためには, ナノ素子の活用とその特性の電氣的・熱的観点からの最適化が必要であることを, ポスター展示を中心に説明した. 質疑応答形式で参加者との対話も行った.</p> <p>3. 慶應テクノモール 表題: 「ナノスケール熱管理工学による新デバイスの創造と機能向上」 実施日: 平成25年12月13日 10時~18時 場所: 東京国際フォーラム 地下2階 展示ホール2</p>

様式19 別紙1

	<p>対象者： 一般 参加者数： 約 1000 名 内容： ナノスケールの電子デバイスは、ナノスケールの小さな空間に電流を流すことと微細化による熱伝導率の劣化により、自己加熱とよばれる発熱現象の影響を強く受けていることを説明。我々は、この自己加熱によって生じた熱をマネージメントすることで、既存デバイスの性能を良くしたり、新機能デバイスを創出することを目指している研究活動について説明。質疑応答形式で参加者との対話も行った。また、ラウンドテーブルセッションⅡ「新機能性材料から育つ夢」で登壇し、ナノデバイスの将来像と熱マネージメントの重要性について講演を行った。</p>
<p>新聞・一般雑誌等掲載 計 3 件</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. マイナビニュース(2013年12月11日)「IEDM2013- 慶應大など、ナノスケールトランジスタの精密な温度測定に成功」 http://news.mynavi.jp/news/2013/12/10/066/ 2. 化学工業日報(2013年12月11日)「微細トランジスタ 動作中温度を正確測定 慶大／産総研」 3. 日刊工業新聞(2013年12月27日)「ナノ素子 動作温度 正確に測定 慶大 回路の信頼性向上へ」
<p>その他</p>	

4. その他特記事項

・授賞

エレクトロニクスサイエティ賞, 内田建, 「ナノスケール MOSFET のキャリア輸送に関する先駆的研究」, 電子情報通信学会, 平成 25 年 9 月

実施状況報告書(平成25年度) 助成金の執行状況

本様式の内容は一般に公表されず

1. 助成金の受領状況(累計)

(単位:円)

	①交付決定額	②既受領額 (前年度迄の 累計)	③当該年度受 領額	④(=①-②- ③)未受領額	既返還額(前 年度迄の累 計)
直接経費	132,000,000	115,040,000	16,960,000	0	0
間接経費	39,600,000	34,512,000	5,088,000	0	0
合計	171,600,000	149,552,000	22,048,000	0	0

2. 当該年度の収支状況

(単位:円)

	①前年度未執 行額	②当該年度受 領額	③当該年度受 取利息等額 (未収利息を除 く)	④(=①+②+ ③)当該年度 合計収入	⑤当該年度執 行額	⑥(=④-⑤) 当該年度未執 行額	当該年度返還 額
直接経費	910,246	16,960,000	0	17,870,246	17,870,246	0	0
間接経費	0	5,088,000	0	5,088,000	5,088,000	0	0
合計	910,246	22,048,000	0	22,958,246	22,958,246	0	0

3. 当該年度の執行額内訳

(単位:円)

	金額	備考
物品費	13,615,723	コンパクトエッチャー他
旅費	1,099,126	米国IEDM他
謝金・人件費等	556,904	
その他	2,598,493	TEM分析他
直接経費計	17,870,246	
間接経費計	5,088,000	
合計	22,958,246	

4. 当該年度の主な購入物品(1品又は1組若しくは1式の価格が50万円以上のもの)

物品名	仕様・型・性能 等	数量	単価 (単位:円)	金額 (単位:円)	納入 年月日	設置研究機関 名
コンパクトエ ッチャー	FA-1	1	4,599,000	4,599,000	2013/5/31	慶應義塾大学
ガス供給設備装置	なし	1	2,698,500	2,698,500	2013/6/13	慶應義塾大学
液体窒素デュワー	PS-LN2/J	1	604,800	604,800	2013/9/20	慶應義塾大学
8チャンネルメインフ レーム	MS-523	1	585,480	585,480	2013/12/25	慶應義塾大学