

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23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	東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
氏名	内田 建

1. 当該年度の研究目的

平成23年度は以下の項目を実施することを研究目的とした。

(1) ヒーターおよびセンサーとして利用する金属細線に最適な金属材料を選定する。さらに、  
 (2) 金属ナノ細線付きナノ構造デバイスの作製と評価を行う。  
 (3) デカナノ半導体における熱輸送特性を評価する。  
 特に、デカナノ半導体の熱伝導率のサイズ依存性、不純物濃度依存性を明らかにする。また、  
 (4) トンネル酸化膜を有する超薄膜SOI-MOS構造を作製する。  
 作製した超薄膜SOI-MOS構造を利用して、  
 (5) 非弾性トンネル分光法によりナノ構造シリコンにおけるフォノン特性を明確化する。さらに、  
 (6) 有限要素法による熱解析を実施、デバイスシミュレーションなども実施する。  
 実験と計算の比較を行いながらナノ構造半導体における熱輸送の理解深耕を進める。

2. 研究の実施状況

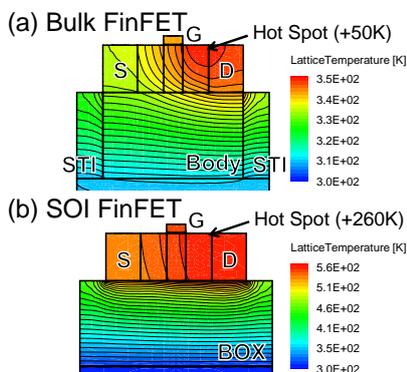
ナノ半導体におけるキャリア輸送・熱輸送の統合理解を目指し、平成23年度は、(A)ナノスケール温度計(金属細線)の開発、(B)ナノ温度計を取り付けたナノ半導体デバイスの作製と評価、(C)ナノ構造半導体における電子-フォノン相互作用の定量的評価、(D)計算機シミュレーションによりデバイス構造ナノ半導体デバイスの発熱特性に及ぼす影響を明らかにした。

(A)ナノスケール温度計の開発では、ナノスケール温度計の材料として、昨年度までのアルミニウムに変えて、熱的安定性が高い金を採用した。その結果、昨年度まで問題であった温度計の不安定性を解消することに成功した。さらに、金を利用したナノ温度計をナノ半導体デバイスに取り付け、ナノ半導体デバイスの発熱を観測することに成功した。また、(B)ナノ温度計を取り付けた半導体デバイスを作製し、ナノデバイスにおける発熱効果を観測することに成功した。

ナノデバイスに電流を流すと、電流の担い手である電子が自らのエネルギーを半導体に供給し、その結果として半導体が発熱する。電子から半導体へのエネルギーの供給は、半導体格子の振動(フォノン)を引き起こすことで発生する。そのため、(C)ナノ構造半導体における電子-格子振動(フォノン)相互作用を理解することが非常に重要である。平成23年度は、この分野で特に大きな進捗があった。ナノスケール半導体では格子振動と電子の相互作用が強くなること、すなわち電子から格子へのエネルギーの供給がより容易に行われることを実験的に世界に先駆けて示すことに成功した。

ナノデバイスのキャリア輸送・熱輸送の統合理解のためには、実験的なアプローチだけでなく、計算によ

るアプローチも重要である。(D) 計算機シミュレーションでは、平成 23 年度は、有限要素法によるキャリア輸送と熱輸送の錬成シミュレーションを行い、デバイス構造を工夫することで、ナノデバイスの内部温度を劇的に下げることが可能であることを示し(下図)、電子デバイス分野で最高峰の国際会議 (IEEE IEDM) で発表した。



デバイス構造のわずかな違いにより、室温から 50 度程度の温度の上昇が得られる場合(a)と、室温から 260 度程度の温度の上昇が得られる場合(b)があることが明らかになった。高い温度はエネルギーの消費が大きく、電子デバイスも長期間の使用により壊れてしまう可能性が高くなる。構造を工夫することで温度上昇が抑えられることの意味は大きい。

### 3. 研究発表等

<p>雑誌論文 計 3 件</p>	<p>(掲載済み一査読有り) 計 3 件</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. N. Kadotani, T. Takahashi, T. Ohashi, S. Oda, and K. Uchida, "Electron mobility enhancement in nanoscale silicon-on-insulator diffusion layers with high doping concentration of greater than <math>1E18 \text{ cm}^{-3}</math> and silicon-on-insulator thickness of less than 10 nm," <i>J. Appl. Phys.</i>, vol. 110, no. 3, 034502 (7 pages), 2011. doi:10.1063/1.3606420</li> <li>2. N. Kadotani, T. Ohashi, T. Takahashi, S. Oda, and K. Uchida, "Experimental Study on Electron Mobility in Accumulation-Mode Silicon-on-Insulator Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors," <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i>, vol. 50, 094101 (4 pages), September 2011. doi:10.1143/JJAP.50.094101</li> <li>3. N. Beppu, T. Takahashi, T. Ohashi, and K. Uchida, "Impact of Gate Poly Depletion on Evaluation of Channel Temperature in Silicon-on-Insulator Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors with Four-Point Gate Resistance Measurement Method," <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i>, vol. 51, 02BC15 (5 pages), February 2012. doi:10.1143/JJAP.51.02BC15</li> </ol> <p>(掲載済み一査読無し) 計 0 件</p> <p>(未掲載) 計 0 件</p>
<p>会議発表 計 19 件</p>	<p>専門家向け 計 19 件</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. K. Uchida and T. Takahashi, "Thermal-Aware Device Design of Nanoscale MOS Transistors," 16th International Workshop on Physics of Semiconductor Devices (IWPSD), MS-1-1, Kanpur, India, December 21, 2011 (Invited).</li> <li>2. K. Uchida, "Carrier mobility in heavily-doped nanoscale SOI films," G-COE PICE International Symposium and IEEE EDS Minicolloquium on Advanced Hybrid Nano Devices: Prospects by World's Leading Scientists, Tokyo, Japan, October 5, 2011 (Invited).</li> <li>3. K. Uchida, N. Kadotani, T. Takahashi, "Carrier Transport in Ultrathin-body SOI FETs: Mobility in Channel and Diffusion Layers," IEEE 4th International Nanoelectronics</li> </ol>

	<p>Conference, Tao-Yuan, Taiwan, June 21-24, 2011 (Invited).</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. T. Takahashi, N. Beppu, K. Chen, S. Oda, and K. Uchida, "Thermal-Aware Device Design of Nanoscale Bulk/SOI FinFETs: Suppression of Operation Temperature and Its Variability," Technical Digest of IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), Washington D.C., WA, USA, pp809-812, Dec 5-7, 2011. doi:10.1109/IEDM.2011.6131672</li> <li>5. T. Ohashi, T. Takahashi, N. Beppu, S. Oda, and K. Uchida, "Experimental Evidence of Increased Deformation Potential at MOS Interface and Its Impact on Characteristic of ETSOI FETs ," Technical Digest of IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), Washington D.C., WA, USA, pp390-393, Dec 5-7, 2011. doi:10.1109/IEDM.2011.6131566</li> <li>6. T. Ohashi, T. Takahashi, S. Oda and K. Uchida, "Mechanism of Electron Mobility Enhancement in Junctionless SOI MOSFETs," G-COE PICE International Workshop, October 4-5, 2011</li> <li>7. N. Beppu, T. Takahashi, T. Ohashi, and K. Uchida, G-COE PICE International Workshop, October 4-5, 2011.</li> <li>8. N. Beppu, T. Takahashi, T. Ohashi, and K. Uchida, "Impact of Poly Depletion on Accurate Evaluation of Self-Heating Effects in SOI MOSFETs with Four-point Gate Resistance Measurement Method", International Conference on Solid-States Devices and Materials (SSDM), P-3-21L, pp124-125, September 28-30, 2011.</li> <li>9. T. Takahashi, T. Kadera, S. Oda, and K. Uchida, "Experimental Study on Subband Structures and Hole Transport in (110) Si pMOSFETs under High Magnetic Field," The Seventh International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation, Albany, NY, USA, May 16-19, 2011.</li> <li>10. 高橋 綱己, 別府 伸耕, 陳 君璐, 小田 俊理, 内田 建, 「デバイスシミュレータを用いたナノスケール Bulk/SOI FinFET の熱設計」, 第 59 回応用物理学関係講演会(2012 春 早稲田大学)13.6 Si デバイス/集積化技術, 17a-A1-9, 2012 年 15-18 日.</li> <li>11. 大橋 輝之, 高橋 綱己, 小田 俊理, 内田 建, 「MOS 界面における変形ポテンシャルの上昇」, 第 59 回応用物理学関係講演会(2012 春 早稲田大学)13.6 Si デバイス/集積化技術, 17a-A1-3, 2012 年 15-18 日.</li> <li>12. 陳 君璐, 高橋 綱己, 別府 伸耕, 内田 健, 「High-k ゲートスタック構造における熱伝導の比較」, 第 59 回応用物理学関係講演会(2012 春 早稲田大学)13.3 絶縁膜技術, 15p-GP1-5, 2012 年 15-18 日.</li> <li>13. 新留 彩, 福田 裕樹, 小田 俊理, 内田 建, 「架橋多層グラフェンナノリボンにおける電荷数の温度依存性」, 第 59 回応用物理学関係講演会(2012 春 早稲田大学) 17 ナノカーボン, 15a-A3-31, 2012 年 15-18 日.</li> <li>14. 別府 伸耕, 小田 俊理, 内田 建, 「AC コンダクタンス法及びパルス IV 法による自己発熱抑制時の SOI MOSFET ドレイン電流評価」, 第 59 回応用物理学関係講演会(2012 春 早稲田大学) 13.6 Si デバイス/集積化技術, 17a-A1-8, 2012 年 15-18 日.</li> <li>15. 内田 建, 「STRJ Extended CMOS コンセプト」, 第 72 回応用物理学会学術講演会(2011 秋 山形大学)シンポジウム "Extended CMOS のための Deterministic ドーピング, 単ドーパントデバイス", 2011 年 8 月 29 日-9 月 2 日.</li> <li>16. 内田 建, 「ナノ半導体のデバイス応用:トランジスタ応用を中心として」, 第 72 回応用物理学会学術講演会(2011 秋 山形大学)チュートリアル, 2011 年 8 月 29 日-9 月 2 日.</li> <li>17. 陳 君璐, 高橋 綱己, 別府 伸耕, 内田 健, 「High-k ゲートスタック構造における熱伝導に関する研究」, 第 72 回応用物理学会学術講演会(2011 秋 山形大学)13.1 基礎物性・評価, 1p-J-11, 2011 年 8 月 29 日-9 月 2 日.</li> <li>18. 大橋 輝之, 高橋 綱己, 小寺 哲夫, 小田 俊理, 内田 建, 「低温・強磁場環境を利用した極薄膜 SOI 中の変形ポテンシャルの評価」, 第 72 回応用物理学会学術講演会(2011 秋 山形大学)13.1 基礎物性・評価, 2a-J-11, 2011 年 8 月 29 日-9 月 2 日.</li> <li>19. 別府伸耕, 高橋綱己, 大橋輝之, 陳 君璐, 内田 建, 「SOI MOSFET における自己加熱の実験的評価:電子熱伝導は寄与するか?」, 第 72 回応用物理学会学術講演会(2011 秋 山形大学), 13.6 Si デバイス/集積化技術, 1a-P7-11, 2011 年 8 月 29 日-9 月 2 日.</li> </ol> <p>一般向け 計 0 件</p>
<p>図書</p>	<p>特になし</p>
<p>計 0 件</p>	

様式19 別紙1

<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>内田研究室ホームページ: <a href="http://www.ssn.elec.keio.ac.jp">http://www.ssn.elec.keio.ac.jp</a></p>
<p>国民との科 学・技術対話 の実施状況</p>	<p>表題 「半導体とナノテクノロジー:ナノスケールの電気抵抗」 実施日 平成23年10月29日 場所 東京工業大学 大岡山キャンパス 西2号館4階1号室 対象者 高校生・一般 参加者数 58名 内容 携帯電話やパソコンの高性能化は、半導体電子デバイスを小さくすることで実現されてきました。導体の長さを短くすると電気抵抗が小さくなるように、電子デバイスを小さくし電気抵抗を抑えることで、半導体集積回路のスピードを向上してきたのです。対話講演会では、このようなオームの法則が成り立たないほど小さくなった近年の電子デバイスを、高性能かつ低消費電力化するための最先端の戦略について紹介しました。</p>
<p>新聞・一般雑 誌等掲載 計0件</p>	<p>特になし。</p>
<p>その他</p>	<p>特になし。</p>

4. その他特記事項

## 実施状況報告書(平成23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	77,540,000	0	54,460,000	0
間接経費	39,600,000	23,262,000	0	16,338,000	0
合計	171,600,000	100,802,000	0	70,798,000	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	72,369,000	0	6,697	72,375,697	68,797,110	3,578,587	0
間接経費	21,710,700	0	0	21,710,700	20,639,133	1,071,567	0
合計	94,079,700	0	6,697	94,086,397	89,436,243	4,650,154	0

## 3. 当該年度の執行額内訳

(単位:円)

	金額	備考
物品費	60,449,924	高速パルス電圧駆動型電気特性評価システム、高真空低温フローバー
旅費	1,547,018	IEDM参加ほか
謝金・人件費等	772,861	
その他	6,027,307	装置利用料、学会参加費ほか
直接経費計	68,797,110	
間接経費計	20,639,133	
合計	89,436,243	

## 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
精密インピーダンス アナライザ	米国アジレント・ テクノロジー社製	1	5,217,555	5,217,555	20110527	東京工業大学
ハイパフォーマンス コンピュータ	HPCシステムズ (株)製	1	2,174,487	2,174,487	20110607	東京工業大学
膜厚モニター式	インフィコン(株) 製・SQM-160(真	1	1,059,439	1,059,439	20110627	東京工業大学
半導体検査顕微鏡	オリンパス(株) 製・MX61-	1	2,501,100	2,501,100	20110620	東京工業大学
BA4850 高速バイ ポーラ電源	BA4850	1	648,375	648,375	20110708	東京工業大学
高速パルス電圧駆 動型電気特性評価	アジレント・テクノ ロジー社製	1	16,927,575	16,927,575	20111007	東京工業大学
高真空低温フロー バー	米国レイクショア 社製・CPX-HV	1	15,996,750	15,996,750	20111221	東京工業大学
低リークスイッチ	アジレント・テクノ ロジー社製	1	2,625,000	2,625,000	20111213	東京工業大学
半導体パラメータ アナライザ	米国アジレント・ テクノロジー社	1	2,310,000	2,310,000	20120215	東京工業大学
液体ヘリウム容器/ トランスファーライ	クライオーサム社 製	1	1,478,400	1,478,400	20120220	東京工業大学
デルタモードシステ ム	ケースレーインス ツルメンツ	1	997,500	997,500	20120210	東京工業大学