

ナノワイヤ型シリコンデバイスで観測された逆向きの熱起電力

Reverse Thermoelectric Power Generation of A Silicon Nanowire Device

早大理工¹, 産総研² ○橋本 修一郎¹, 麻田 修平¹, 徐 泰宇¹, 大場 俊輔¹, 松川 貴², 渡邊 孝信¹

Waseda Univ.¹, AIST² ○S. Hashimoto¹, S. Asada¹, T. Xu¹, S. Oba¹, T. Matsukawa², T. Watanabe¹

E-mail: shuichiro.h@aoni.waseda.jp

【はじめに】熱や振動など環境の微小なエネルギーから電気を生み出すエネルギー・ハーベスティングは、あらゆるモノがワイヤレス通信でつながった IoT (Internet of Things) 社会を実現するキーテクノロジーとして注目されている。近年、シリコンナノワイヤ (Si-NW) が電気伝導率を維持したまま低い熱伝導率を示すことが明らかにされ[1]、CMOS プロセスで製造可能な微小熱電発電デバイス (Thermoelectric Device : TED) に対する期待が高まっている[2,3]。当グループでも、これまで培った Si-NW トランジスタ製造技術を用いて TED の開発に取り組んでいる。今回、n 型 Si-NW を用いた TED の熱電発電性能を評価したところ、本来の負のゼーベック係数ではなく正のゼーベック係数が観測された。本講演では、実験の詳細と、逆向きの熱起電力が観測された機構について検討した結果を報告する。

【実験方法】試作した Si-NW-TED の概要および熱電特性の評価方法の概要を Fig.1 に示す。Si-NW は Si パッドに挟まれ、パッド上に電極として TiN 薄膜、熱極として Al 薄膜を成膜している。作製手順は以下の通りである。まず、p 型(100)SOI 基板上に電子線リソグラフィとドライエッチングにより<110>Si-NW 構造 (幅 $W_{NW}=100\text{nm}$, 長さ $L_{NW}=10\mu\text{m}$) を形成する。NW 両端には電極用 Si パッドを設けてある。パターンニング後にドライ熱酸化 ($850^\circ\text{C}, 1\text{hr}$) を行った後、P イオンを注入し ($1.0 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$, 25keV)、活性化アニールを施した ($950^\circ\text{C}, 10\text{min}$)。最後に TiN 薄膜 ($t_{TiN}=165\text{nm}$) および Al 薄膜 ($t_{Al}=300\text{nm}$) を成膜した。作製したデバイスの Al 熱極に、AlN セラミックス製温度プローブを接触させ、約 45°C の温度勾配を付与し、負荷電圧 V_{load} をデバイスに印加しながら熱起電流を計測した。

【実験結果】Fig.2(a)に電流密度-電圧特性 ($J_{TE}-V_{load}$ 特性)、Fig.2(b)に電力密度-電圧特性 ($P_{TE}-V_{load}$ 特性)を示す。短絡電流は $I_{SC}=-1.7\text{nA}/\mu\text{m}$ 、開放電圧は $V_{OC}=221\mu\text{V}$ であった。n 型 Si が本来もつ負のゼーベック係数では説明できない、正方向の開放電圧が発生している。これは、n 型 Si の多数キャリアの拡散ではなく熱的に励起された少数キャリアの拡散が支配的であることを示している。この異常な現象は、Si-NW 内部でポテンシャル障壁が生じていると仮定すれば説明できる。つまり、ポテンシャル障壁により熱励起された多数キャリアの拡散が妨げられ、熱励起された少数キャリアの拡散が支配的になったと考えれば辻じつまが合う。活性化アニールの過程でドーパントイオンが外縁の SiO_2/Si 酸化膜界面に偏析[4]し NW 内部の実効的な不純物濃度が低下している可能性があり、これが NW 内部のポテンシャル障壁の原因として挙げられる。講演会当日は、Technology CAD (TCAD) シミュレーションによる解析も示しながら、より定量的な議論を行う。

【謝辞】本研究は JST-CREST の支援により実施された。デバイス作製は早稲田大学ナノ・ライフ創新研究機構の装置設備群を用いて実施した。

【参考文献】[1] D.Li et al., Appl. Phys. Lett., 83 (2003) 2934. [2] A.Boukai et al., Nature, 451.7175 (2008) 168. [3] K.J.Norris et al., Energy Convers. Manag., 96 (2015) 100. [4] N.Fukuta et al., Nano Lett., 11 (2011) 651.

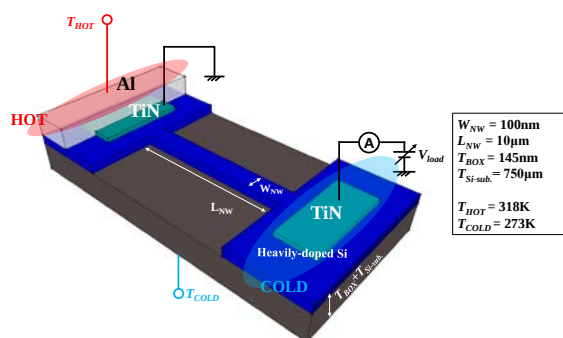


Fig. 1 Schematic of Si-NW thermoelectric device (TED).

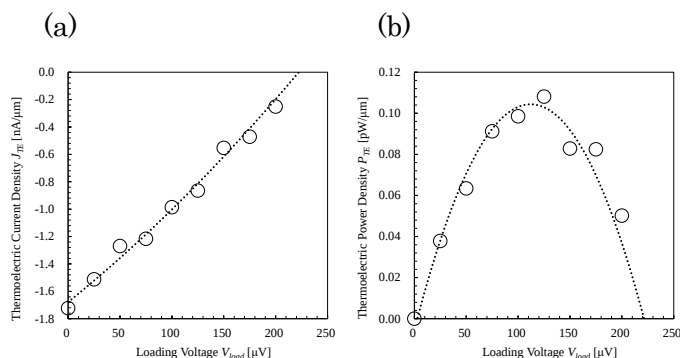


Fig. 2 Thermoelectric characteristics of Si-NW-TED
(a) $J_{TE}-V_{load}$ characteristic (b) $P_{TE}-V_{load}$ characteristic.