

エネルギー緩和速度が Ge および Si ナノワイヤの 準バリスティック正孔輸送能力に与える影響

Impacts of energy relaxation rates on quasi-ballistic hole transport capability in Ge and Si nanowires

○田中 一、須田 淳、木本 恒暢 (京大院工)

○Hajime Tanaka, Jun Suda, Tsunenobu Kimoto (Kyoto Univ.)

E-mail: tanaka@semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp

背景 Si ナノワイヤ (NW) MOSFET は、優れた短チャネル効果耐性により次世代 CMOS デバイスの有力候補と考えられている。一方、高い正孔移動度を持つ Ge を p チャネル材料として用いることも検討されている。そのため、Ge および Si の NW における正孔輸送特性について深く理解することが重要となる。我々は、前回、フォノン散乱を考慮してボルツマン輸送方程式を解くことで、Ge および Si NW における高電界下での正孔輸送を解析し、Ge NW におけるエネルギー緩和が Si NW と比べ遅いことにより、高電界における Ge NW の正孔ドリフト速度が Si より低くなりうることを報告した[1]。本研究では、このエネルギー緩和速度の違いが準バリスティック輸送特性に与える影響について検討する。

計算方法 NW の価電子帯構造および波動関数の計算には $sp^3d^5s^*$ 強束縛法[2]を、フォノンの分散関係および振動モードの計算には原子価力場 (Valence Force Field) モデル[3]を用いた。これらからフェルミの黄金律によって求めたフォノン散乱の遷移確率を考慮して、Fig. 1 に示すようなポテンシャルの下でボルツマン輸送方程式により分布関数の時間発展を定常状態に達するまで計算した。温度は 300 K とした。本研究で検討した NW の方位および側壁面は高電流が得られる $[110]/(\bar{1}10)/(001)$ であり、断面形状は一辺の大きさが 2 nm (Ge) および 1.9 nm (Si) の正方形とした。注入電流が 2×10^{-10} A となるようなフェルミ準位を両端 (ソース/ドレイン) に仮定した場合を OFF 状態、Ge で 2.53×10^{-5} A, Si で 2.03×10^{-5} A (0.6 nm 厚の SiO_2 を介し NW 全周のゲートに OFF 状態と比べて -0.6 V を印加した時の top of the barrier モデルによるバリスティック電流) の注入電流となるようにした場合を ON 状態と定義した。

結果 Fig. 2 に、Ge NW の OFF 状態において計算した定常状態の電流を、前進 $I_f(x)$ ・後進 $I_b(x)$ ・合計 I_t について示す。定常状態であるため、合計電流 ($I_t = I_f(x) - I_b(x)$) は一定となっている。ポテンシャルが平坦な領域 (両端 5 nm) においては、前進と後進の電流は線形に減少する振る舞いをしている。ソース (左) 側での減少率 $dI_f/dx \approx dI_b/dx$ と I_t の関係から平均自由行程 $\lambda = I_t/(-dI_f/dx)$ を求め、ソース側における後進電流 I_b を外挿して 0 となる位置を L_{eff} と定義した (Fig. 2)。この時、 $I_t \approx I_f(0) - I_t \times L_{\text{eff}}/\lambda$ より、左端からの注入電流 $I_f(0)$ と I_t の関係は $I_t \approx \lambda/(L_{\text{eff}} + \lambda) \times I_f(0)$ となるため、 L_{eff} は実効的なチャネル長に相当する[4]。Fig. 3 に、Ge NW・Si NW の OFF 状態・ON 状態それぞれについて、同様に求めた λ , L_{eff} , $\lambda/(L_{\text{eff}} + \lambda)$ を示す。これらから、Ge は Si より長い λ を持つものの、 L_{eff} も長いので、 $\lambda/(L_{\text{eff}} + \lambda)$ が同程度となることが分かる。その結果、Ge の ON 電流 I_t は Si と比べ 5% 程度しか大きくないという結果が得られた。このような振る舞いはエネルギー緩和時間の違いを用いて半定量的に説明することができ、この結果は、Ge NW におけるエネルギー緩和の遅さが、準バリスティック正孔輸送能力を (移動度や注入速度から期待されるものと比べて) 大きく低下させる可能性を示唆する。

参考文献 [1] 田中一 他, 第63回応物春季学術講演会 (2016) 20a-S422-8. [2] Y. M. Niquet *et al.*, *Phys. Rev. B*, **79** (2009) 245201. [3] Z. Sui *et al.*, *Phys. Rev. B*, **48** (1993) 17938. [4] M. Lundstrom, *Fundamentals of Carrier Transport*, 2nd (2000).

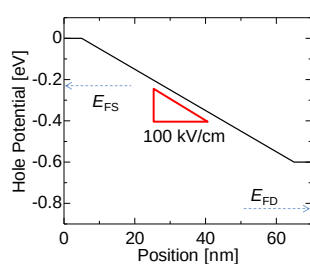


Fig. 1: Assumed potential with Fermi levels at the boundaries in a Ge NW at OFF state.

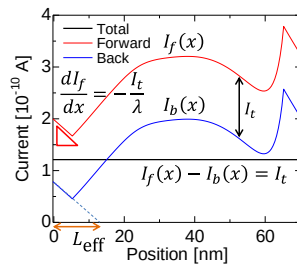


Fig. 2: Position dependence of current in the Ge NW at OFF state.

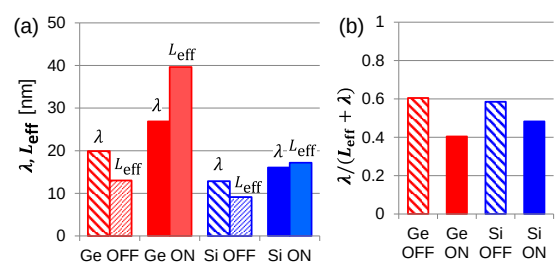


Fig. 3: Comparison of (a) λ and L_{eff} , and (b) transmission $\lambda/(L_{\text{eff}} + \lambda)$ between the Ge NW and the Si NW, and OFF and ON states.