

Ge ナノワイヤの高電界正孔輸送における負性微分抵抗特性の発現

Appearance of negative differential resistance in high-field hole transport in Ge 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 Ge ナノワイヤ (NW) は, Ge の高い正孔移動度と, NW 構造の高い静電制御性により, 次世代 CMOS デバイスの p チャネル材料の有力な候補と考えられている. そのため, Ge NW における正孔輸送特性について研究が進められているが, 輸送方向へ高電界が印加された条件下でのキャリア輸送については報告されていない. そこで本研究では, 散乱過程としてフォノン散乱とラフネス散乱を考慮してボルツマン輸送方程式を解くことで, Ge NW における高電界下での正孔輸送を解析した.

計算方法 まず $sp^3d^5s^*$ 強束縛 (TB) 法[1]により価電子帯構造および波動関数を, 原子価力場 (Valence Force Field) モデル[2]によりフォノンの分散関係および振動モードを計算した. さらに, NW の側壁の変位によるサブバンドのエネルギー変化に基づき, NW におけるラフネス散乱を TB の枠組みで記述した[3]. 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およびラフネス散乱の遷移確率を考慮して, ボルツマン輸送方程式を線形化せず反復的に解くことで, 高電界下での正孔分布関数を求めた. 本研究で検討した NW の方位および側壁面は, $[001]/(010)/(100)$, $[110]/(1\bar{1}0)/(001)$, $[111]/(1\bar{1}0)/(\bar{1}\bar{1}2)$, $[112]/(1\bar{1}0)/(\bar{1}\bar{1}1)$ の 4 種類であり, 断面形状は一辺の大きさが 2 nm の正方形とした. 正孔密度は $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 格子温度は 300 K とした. ラフネスの相関長は 1.3 nm, RMS は 0.48 nm を仮定した.

結果 図1に $[001]$ および $[110]$ NW における正孔の平均ドリフト速度の電界強度依存性の計算結果を示す. 各方位について, フォノン散乱のみを考慮した場合, およびフォノン散乱とラフネス散乱 (SRS) の両方を考慮した場合の二種類について示している. 図1より, ドリフト速度が方位に強く依存していることがわかる. 特に $[110]$ NW においては, 電界の増加に伴いドリフト速度が減少する負性微分抵抗を示す領域が見られている. 負性微分抵抗は, 通常 GaAs のような複数種の伝導帯を持つ半導体において, 電子が有効質量の軽い谷から重い谷へ移行することにより生じる[4]. $[110]$ Ge NW の価電子帯には, 有効質量の軽いサブバンドと重いサブバンドが存在する (図2) ため, 軽いサブバンドから重いサブバンドに正孔が移行することによって負性微分抵抗が生じたと考えられる.

そこで, $[110]$ NW においてフォノン散乱のみを考慮した場合の, 平衡状態および様々な電界印加時における正孔占有率を図3に示す. 図3より, 低電界時には有効質量の軽い価電子帯頂上に集中していた正孔が, 高電界時には重いサブバンドへと広がっていることが確かめられる. また, サブバンド数が多く状態密度の大きいエネルギー領域へ正孔分布が広がることに伴い, 散乱頻度が増加するため, 平均的な緩和時間も減少する. この有効質量の増加と緩和時間の減少が負性微分抵抗を生じる. 発表においては $[111]$ および $[112]$ 方位との比較や, ラフネス散乱の影響についても議論する.

Reference [1] Y. M. Niquet *et al.*, *Phys. Rev. B*, **79** (2009) 245201. [2] Z. Sui *et al.*, *Phys. Rev. B*, **48** (1993) 17938. [3] H. Tanaka *et al.*, 2015 Silicon Nanoelectronics Workshop 3-5. [4] H. Kroemer, *Proc. IEEE*, **52** (1964) 1736.

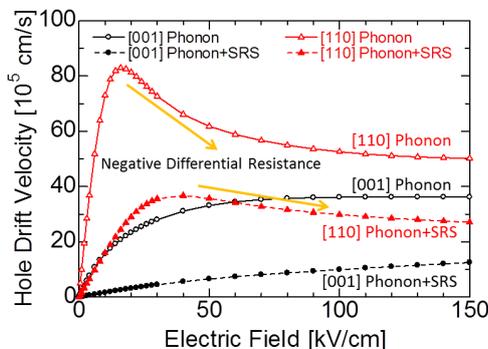


Fig. 1: Field dependence of average drift velocity of holes in $[001]$ and $[110]$ Ge NWs. Considered scattering mechanisms are phonon only or both phonon and SRS.

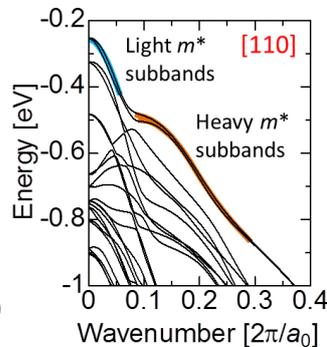


Fig. 2: Valence band structure of the $[110]$ Ge NW. Energy is referenced from valence band maximum of bulk Ge.

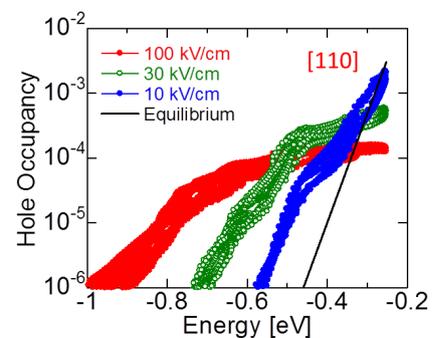


Fig. 3: Distribution functions of holes in the $[110]$ Ge NW at various electric fields (case of phonon scattering only).