GeSn/GeSiSn 共鳴トンネルダイオードの室温動作に向けた構造設計

Design of GeSn/GeSiSn resonant tunneling diodes toward room temperature operation

名大院工 [1]，名大未来研 [2]　○石本 修斗 [1]，坂下 満男 [1]，黒澤 昌志 [1]，中塚 理 [1,2]，柴山 茂久 [1]

Grad. Sch. Eng., Nagoya Univ. [1], IMaSS, Nagoya Univ. [2], ◦Shuto Ishimoto[1], Mitsuo Sakashita[1], Masashi Kurosawa[1], Osamu Nakatsuka[1,2] and Shigehisa Shibayama[1]

E-mail: ishimoto.shuto.f3@s.mail.nagoya-u.ac.jp, s-shibayama@nagoya-u.jp

［研究背景］共鳴トンネルダイオード（RTD）は量子効果を利用した機能性デバイスの一つであり，テラヘルツ波光源として，イメージングや大容量無線通信への応用が期待されている．我々は IV 族混晶による RTD 実現に着目している．GeSiSn 三元混晶は，格子定数とエネルギーバンドギャップを組成比によって独立に制御できるため，バンドエンジニアリングに適している[1]．電子型 GeSn/GeSiSn RTD の理論報告はあるものの，我々のこれまでの報告から，より大きなバンドオフセットのとれる正孔型の方が動作実証において有利と考えられる[2，3]．我々はこれまでに，障壁層および井戸層を 2 nm とする正孔型 GeSn/GeSiSn RTD を試作し，10 K での電流密度–電圧（*J–V*）特性において非線形で明瞭なハンプを確認している[4]．

本研究では，正孔型 GeSn/GeSiSn RTD の室温での負性微分抵抗発現に向けて，価電子帯オフセットの組成依存性や *J–V* 特性の理論計算を行い，デバイス構造設計を行った結果を報告する．

［結果および議論］半導体ナノ構造デバイス設計用シミュレーションソフトウェア nextnano を用いて $Ge_{0.90}Sn_{0.10}/Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ RTD のバンド構造を計算した結果を図 1 に示す．$Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ の組成条件により，0.3–0.4 eV の価電子帯オフセットを実現できることがわかる．また $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ が Ge 基板に格子整合する条件下で，0.3–0.4 eV のバンドオフセットを実現するためには，Si 組成: 40–60%，Sn 組成: 0–10%に設計すればよいことが明らかとなった．

次に，転送行列法により入射波の透過率を求め，Tsu-Esaki モデルを用いて *J–V* 特性のシミュレーションを行った[5]．図 2 に $Ge_{0.90}Sn_{0.10}/Ge_{0.50}Si_{0.40}Sn_{0.10}$ RTD の 300 K での *J–V* 特性を示す．$Ge_{0.50}Si_{0.40}Sn_{0.10}$（障壁）層の厚さを 1.5 nm に固定し，$Ge_{0.90}Sn_{0.10}$（井戸）層の厚さを 1, 2, 3 nm と変化させた場合の結果を示している．いずれの場合においても，RTD 特有の負性微分抵抗の発現が確認できる．一方，井戸層厚さの減少にともない，Peak to valley ratio，PVR（$=J_{peak}/J_{valley}$）が増大することが分かった．

このことから，正孔型 GeSn/GeSiSn RTD の室温動作は理論的には可能であり，動作実証に向けては，井戸層の薄膜化など，各層の膜厚制御が重要であることが明らかとなった．

［謝辞］本研究の一部は，JST さきがけ（JPMSJPR21B6）および JST CREST（JPMJCR21C2）の支援を受けて実施された．

[1] P. Moontragoon *et al.*, J. Appl. Phys. **112**, 073106 (2012). [2] M. Fukuda *et al.*, Semicond. Sci. Technol. **32**, 104008 (2017). [3] K.-Y. Wu *et al.*, IEEE Electron Dev. Lett. **34**, 951 (2013). [4] G. R. Suwito *et al.*, Appl. Phys. Lett. **117**, 232104 (2020). [5] R. Tsu *et al.*, Appl. Phys. Lett. **22**, 562 (1973).

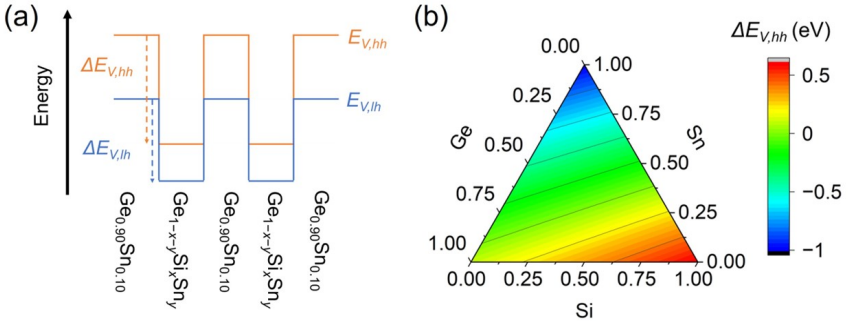

Fig. 1 (a) Schematic of energy band alignment of $Ge_{0.90}Sn_{0.10}/Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ heterostructure. (b) Valence band offset, $\Delta E_{V,hh}$ of $Ge_{0.90}Sn_{0.10}/Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ heterostructure with various Si and Sn contents in $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$.

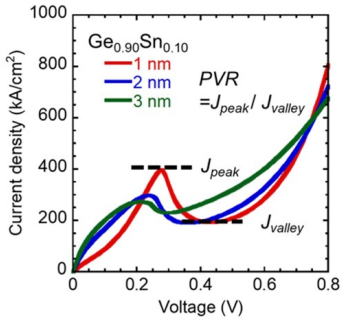

Fig. 2 *J–V* characteristics of $Ge_{0.90}Sn_{0.10}/Ge_{0.50}Si_{0.40}Sn_{0.10}$ RTD at 300 K.