高濃度ドープ 4H-SiC ショットキー障壁ダイオードにおける順方向熱電界放出電流の解析と障壁高さの評価

Forward Thermionic Field Emission Transport and Characterization of Barrier Height in Heavily-Doped 4H-SiC Schottky Barrier Diodes

京大工 [1]，京大院工 [2] ○原 征大 [1]，浅田 聡志 [2]，前田 拓也 [2], 木本 恒暢 [2]
Kyoto Univ. [1], Dept. of Electron. Sci. & Eng., Kyoto Univ. [2],
°M. Hara[1], S. Asada[2], T. Maeda[2] and T. Kimoto[2]
E-mail: hara@semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp

ショットキー障壁ダイオード(SBD)において，障壁高さは立ち上がり電圧や逆方向リーク電流を決定する重要なパラメータである．高濃度ドープ SBD では，接合界面の電界強度が強くなり，鏡像力効果により障壁高さが低下すると予想される．本研究では，高濃度ドープ試料を含む様々なドーピング密度を有する 4H-SiC SBD の障壁高さを詳細に調べたので報告する．

n 型 4H-SiC (0001)基板上 n 型 SiC エピ層に Ni ショットキー電極を形成し，3 種のドーピング密度を有する SBD を作製した．エピ層の実効ドナー密度はそれぞれ 8×10^{15}, 1×10^{17}, 2×10^{19} cm^{-3} である．これらの SBD に対して室温で電流-電圧(*I-V*)，容量-電圧(*C-V*)測定および内部光電子放出(IPE)測定を行い，障壁高さ(ϕ_b)のドーピング密度依存性を調べた．

室温における SBD の順方向 *I-V* 特性を図 1 に示す．ドーピング密度の増加に従い，より低電圧で電流が流れていることが確認できる．熱電子放出(TE)理論に基づいて飽和電流密度から求めた障壁高さを図 2 に示す．図 2 には，*C-V* 測定および IPE 測定から求めた障壁高さも示している．TE 理論に基づいて求めた障壁高さは他の手法により求めた値と大きく乖離している．また，n 値は 1.05, 1.31, 2.07 と増加した．これらの結果は，高いドーピング密度を有する SBD の電流輸送機構が TE 理論では説明できないことを示唆している．この理由として，接合界面の高電界に起因した熱電界放出(TFE)による輸送の影響を考えた．TFE 理論による順方向電流は次式で表される[1].

$$J_{\mathrm{TFE}} = \frac{A^{**}T\sqrt{\pi E_{00}(\phi_{\mathrm{b}} - \Delta E_{\mathrm{F}} - eV_{\mathrm{F}})}}{k\cosh(E_{00}/kT)} \exp\left[-\frac{\Delta E_{\mathrm{F}}}{kT} - \frac{\phi_{\mathrm{b}} - \Delta E_{\mathrm{F}}}{E_0}\right] \exp\left(\frac{eV_{\mathrm{F}}}{E_0}\right)$$

$$E_{00} = \frac{e\hbar}{2}\sqrt{\frac{N_{\mathrm{d}}}{m^{*}\varepsilon_{\mathrm{s}}}}\ ,E_0 = E_{00}\coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)\ ,\Delta E_{\mathrm{F}} = E_{\mathrm{C}} - E_{\mathrm{F}}$$

上式において ϕ_b をパラメータとし，$N_d = 2\times10^{19}$ cm^{-3} の SBD に対して *I-V* 特性のフィッティングを行った．実験および計算結果を図 3 に示す．計算結果が実験結果を精度良く再現できており，フィッティングから求めた障壁高さは 1.47 eV であった．これは，*C-V* 測定による値(1.49 eV)，IPE 測定による値(1.37 eV)とよく一致する．これらの値は，$N_d = 8\times10^{15}$ cm^{-3} の SBD における障壁高さより 0.18 eV 小さい．なお，鏡像力効果による障壁高さの低下量は，低濃度ドープ試料では 0.03 eV であるのに対し，高濃度ドープ試料では 0.23 eV である．したがって，障壁高さのドーピング密度依存性は，鏡像力効果により定量的に説明できる．

[1] S. M. Sze and K. K. Ng., *Physics of Semiconductor Devices, Third Edition* (Wiley-Interscience, 2007).

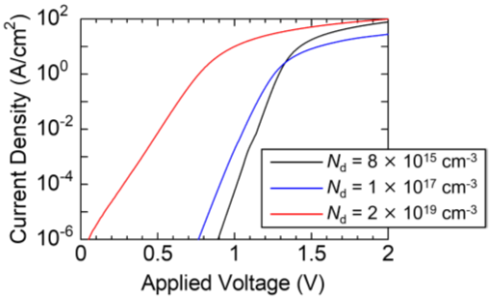

Fig. 1: Experimental current-voltage characteristics of Ni/SiC SBDs.

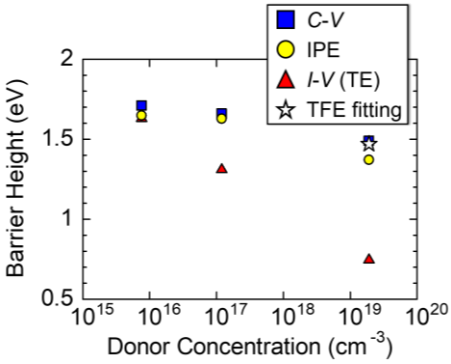

Fig. 2: Schottky barrier height versus donor concentration of Ni/SiC SBDs.

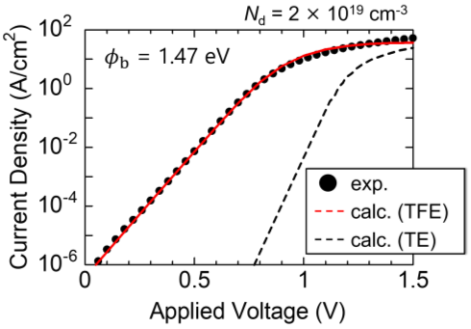

Fig. 3: Calculated and experimental current-voltage characteristics of Ni/SiC SBD ($N_d = 2\times10^{19}$ cm^{-3}).

© 2019年 応用物理学会