

(001)GOI 薄膜化による nMOSFET の電子移動度向上機構に関する考察

Study on physical origin of electron mobility enhancement
of (001) GOI nMOSFET with thinning GOI thickness東大院工, °高木信一, K.-W. Jo, C.-M. Lim, トーブラサートポン・カシディット, 竹中充
Univ. Tokyo, °Shinichi Takagi, K.-W. Jo, C.-M. Lim, Kasidit Toprasertpong, Mitsuru Takenaka

E-mail: takagi@ee.t.u-tokyo.ac.jp

【背景】(001)面 GOI nMOSFET は、将来技術ノードに向けた素子として期待されている。特に最近、GOI 膜厚の薄膜化により nMOSFET の電子移動度が向上することが報告[1,2]されており、素子物理の観点でも興味深いチャンネル構造である。我々も最近、引張りひずみをもつ(001)面 GOI nMOSFET において、GOI 薄膜化による顕著な電子移動度の増大を実験的に見出しており[3]、その機構の解明は重要である。

(001) GOI 薄膜化による電子移動度向上の起源として、L バレーから Δ_2 バレー (Δ 点の k_z 軸に沿った二重縮退バレー) への電子の遷移が関与している可能性が指摘されている[2]。一方、バルク Ge nMOSFET では、 Δ_2 バレーの電子の移動度は L バレー電子の移動度より低いことが報告されており[4]、上記の移動度向上の機構は明らかでない。本研究では、各バレーの有効質量と散乱機構の観点から、移動度向上の起源を考察したので報告する。

【サブバンド構造と移動度に関する考察】Fig. 1 に 3 次元と(001)面 2 次元での Ge 伝導帯の等エネルギー面を示す。また、伝導帯各バレーの有効質量等の物理量を Table 1 に纏める。GOI 薄膜化に伴う量子効果により、垂直方向の有効質量 m_z が軽いバレーはサブバンドエネルギーが、より大きく上昇し、電子の占有率が減少する。結果として、L バレーから Δ_2 バレーへ電子が遷移し始める。特に、引張りひずみを印加した場合には、ひずみ Si MOSFET と同様に Δ_2 バレーの電子の占有率が高まると考えられる[4,5]。

単に導電率有効質量 m_e を見れば、L バレーの方が Δ_2 バレーよりも軽いため、 Δ_2 バレーの占有率上昇では移動度向上を説明できない。一方、移動度に影響を与える因子として、2 つのバレー間での m_z の大きな違いがある。我々は、GOI pMOSFET の正孔移動度の実験結果から、膜厚揺らぎ散乱が薄膜 GOI での重要な散乱機構であることを報告している[6]。Fig.2 に、単一サブバンドを仮定した場合の L バレーと Δ_2 バレーの電子の存在確率および反転層の厚みの表面キャリア濃度依存性の計算結果を示す。 m_z が重い Δ_2 バレーは、反転層の幅が狭く電子が表面に閉じ込められていることが分かる。一方 L バレーは、反転

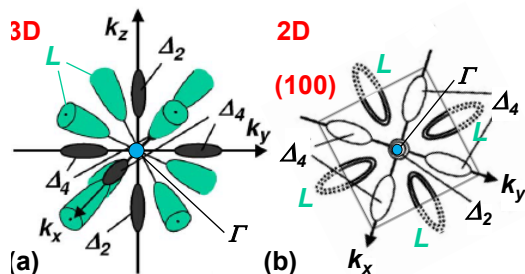


Fig. 1 Equivalent energy surfaces of electrons in (a) bulk Ge and (b) (001) Ge MOS interfaces

層の広がりが大きく、実験的にピーク移動度を示す $N_s=2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 近傍では、10nm 程度の広がりをもつ。移動度の向上が、GOI 膜厚が 10nm 以下で観測されていることを考えると、この膜厚範囲での L バレー電子は、膜厚揺らぎ散乱の影響を大きく受けて移動度が低下していることが予想される。一方、 Δ_2 バレーの電子移動度は、少なくとも 10-5nm の GOI 膜厚範囲では、揺らぎ散乱の影響は限定的である。この散乱機構で決まる移動度は、単一サブバンド近似の下では、

$$\mu_{\text{fluctuation}} = \frac{2q}{\pi^5 \hbar^3} \cdot \frac{m_z^2}{m_e} \cdot \frac{T_{\text{GOI}}^6}{\Delta^2 L^2}$$

と記述できる[7]。ここで、 T_{GOI} , Δ , L は、GOI 膜厚、膜厚揺らぎ量、揺らぎ相関長である。移動度は m_z の 2 乗に比例することから、L バレーの電子の移動度は非常に低い値となり、同じ T_{GOI} , Δ , L の下では、 Δ_2 バレーの電子移動度は L バレーの移動度より約 10 倍も大きくなる。以上のことから、GOI 膜厚の低下による移動度の増大は、10nm 近傍で膜厚揺らぎ散乱の影響を受け移動度が低下している L バレーの電子が、GOI 薄膜化により、移動度低下の少ない Δ_2 バレーに遷移することで、もたらされたと考えられる。

【まとめ】(001)GOI 薄膜化に伴う電子移動度向上は、 m_z が軽く膜厚揺らぎ散乱の影響が大きい L バレーから、その影響が小さい Δ_2 バレーに電子が遷移する事で引き起されていると考えられる。

【謝辞】本研究は、科学研究費補助金 19K15021 及び JST CREST JPMJCR1332 の支援により実施した。

【参考文献】[1] W. H. Chang *et al.*, VLSI symp., T192 (2017) [2] W. H. Chang *et al.*, TED **64**, 4615 (2017) [3] K.-W. Jo *et al.*, IEDM, 673 (2019) [4] M. Kobayashi *et al.*, TED **57**, 1037 (2010) [5] S. Takagi *et al.*, JAP **80**, 1567 (1996) [6] X. Yu *et al.*, IEDM, 20 (2015) [7] H. Sakaki *et al.*, APL **51**, 1934 (1987)

Ge (001) surface, along <011> (unit: m_0)							
band	valley	m_x	m_y	m_z	M_v	m_c	m_d
L		0.082	1.12	0.12	2	0.153	0.303
		1.12	0.082		2		
Δ	Δ_2	0.2	0.2	0.95	2	0.2	0.2
		0.2	0.95		2		
	Δ_4	0.95	0.2	0.2	2	0.33	0.436
		0.95	0.2		2		
Γ		0.044	0.044	0.044	1	0.044	0.044
							0.135-0.145eV

Table 1 Effective mass, valley degeneracy and the energy difference from L valleys on (00) Ge

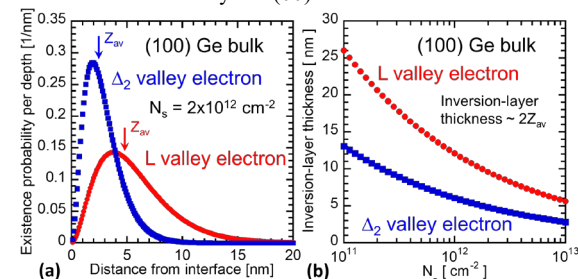


Fig. 2(a) Calculated distributions of existence probability and (b) inversion-layer thickness of electrons in L and Δ_2 valleys