GaN ナノパイプ *m* 面側面への酸素偏析が表面エネルギーを減じる可能性

Possible Influence of Oxygen Segregation on Reducing Specific Surface Energies for *m*-Plane Sides of Nanopipes in GaN

法政大 [1]，サイオクス [2]　　○望月 和浩 [1]，堀切 文正 [2]，太田 博 [1]，三島 友義 [1]

Hosei Univ. [1], SCIOCS [2]　　○K. Mochizuki[1], F. Horikiri[2], H. Ohta[1], T. Mishima[1]

E-mail: kazuhiro.mochizuki.66@hosei.ac.jp

はじめに 側面が *m* 面からなり，半径 *r* が nm サイズの中空螺旋転位(ナノパイプ)は，縦型 GaN デバイスの逆方向リーク電流を増加させる[1]。Frank によると[2]，螺旋転位はバーガース・ベクトルの大きさ *b* が，表面エネルギーσ (1.93 J m^{-2} [3])及びせん断弾性率 *G* (122.5 GPa [4])を用いて

$$b > 20\pi\sigma/G\ (= 0.99\ \mathrm{nm}), \tag{1}$$

の時に中空化する。よって，$n \equiv b/c$ (c = 0.5178 nm)は 2 以上と推定される。また，MOVPE[5]並びに HVPE[6]成長 GaN ナノパイプへの酸素偏析，及び GaN 中酸素濃度 [O] 増 [5×10^{17} cm^{-3} ($\sigma \equiv \sigma_1$) → 4×10^{18} cm^{-3} ($\sigma \equiv \sigma_2$)]に伴う *r* 増 [3.25±1.75 nm ($\equiv r_1$) → 4.5±1.5 nm ($\equiv r_2$)] [7] 等の実験結果がある。一方，σ が *r* に依存する Gibbs−Thomson 効果から，次式が成立する[8]。

$$\Delta\sigma \equiv \sigma_2 - \sigma_1 = (Gb^2/8\pi^2)\ [(1/r_2) - (1/r_1)]. \tag{2}$$

そこで, ナノパイプへの酸素偏析が σ を減少させ *r* を増加させると仮定し, $\Delta\sigma$ 及び *n* を推定した。

解析 式(2)から得られた $\Delta\sigma$ の *nc* 依存性(Fig. 1)において，$n \geqq 4$ では $\Delta\sigma$ が−1.93 J m^{-2} [3]を下回り，σ が負となると，ナノパイプ側面は安定な *m* 面表面を保てなくなる[9]。そこで，本研究では *n* を 2 または 3 と考えた。この値は観察された値[10]に一致することから，$\Delta\sigma$ を−1.25 から−0.06 J m^{-2} の範囲と推定した。

考察 [O]の *m* 面オフ角 θ 依存性[11]を説明したステップ端偏析モデル[12]に基づき，酸素の偏析係数を 1 未満と仮定した[13]。θ が増加すると，平均ステップ速度 V_{step} が減少し，表面位置からより多くの酸素原子が吐き出されることから，$\Delta\sigma$ ばらつきは θ ばらつきに起因すると考えた。

謝辞 本研究の一部は環境省「GaN 技術による脱炭素社会・ライフスタイル先導イノベーション事業」の委託を受けて行われた。

[1] S. Usami et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, SCCB24 (2019).
[2] F. C. Frank, *Acta Cryst.* **4**, 497 (1951).
[3] J. Northrup and J. Neugebauer, *Phys. Rev. B* **53**, R10477 (1996).
[4] A. Polian et al., *J. Appl. Phys.* **79**, 3343 (1996).
[5] I. Arslan and N. D. Browning, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 165501 (2003).
[6] M. E. Hawkridge and D. Cherns, *App. Phys. Lett.* **87**, 221903 (2005).
[7] Z. Liliental-Weber et al., *Mater. Sci. Forum* **258-263**, 1659 (1997).
[8] K. Mochizuki et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **60**, 078001 (2021).
[9] Y. Wang et al., *Chem. Comm.* **47**, 2829 (2011).
[10] M. Tsukakoshi et al., *Appl. Phys. Express* **14**, 055504 (2021).
[11] H. Yamada et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 04FG01 (2018).
[12] K. Mochizuki et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **60**, 018002 (2021).
[13] K. Mochizuki et al, *Jpn. J. Appl. Phys.* **60**, 098002 (2021).

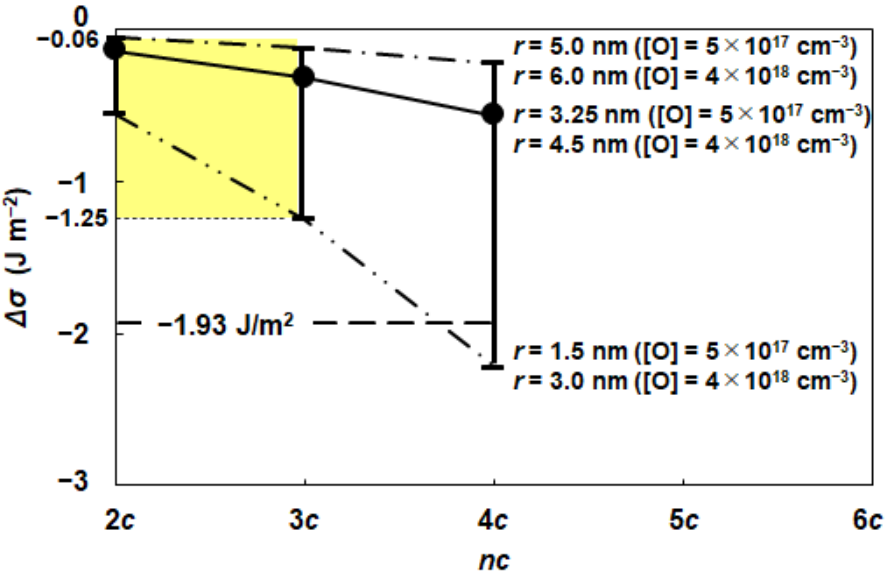

Fig. 1. Reduction of specific surface energy ($\Delta\sigma$) calculated using Eq. (2) as a function of magnitude of Burgers vector *nc* (n = 1, 2, 3, …; c = 0.5178 nm).

© 2022年 応用物理学会