

概算要求 PIQFUM 中間報告書（酒井研）

我々のグループでは、高輝度光科学研究センター（SPring-8）と連携し、BL-13XUにて、X線マイクロ回折による表面構造解析の技術開発を行なってきた。現在では、ビーム径 $0.5 \times 1.0 \mu\text{m}^2$ 以下のサブミクロンサイズの X線ビームが使用可能であり、ビーム走査しながら各位置での X線回折データを取得することで、歪や格子面傾斜といった構造特性のマッピングが可能になっている。具体的には、まずは基本的な電子・光学材料を対象に本解析技術を応用するところから始めており、IV族半導体（Si、Ge）と窒化物半導体（AlN や GaN）を中心に局所歪分布や格子面傾斜分布の測定などを行なっている。例えば、Si に関しては、直接接合 Si（DSB）基板作製プロセスで引き起こされる界面酸化膜消滅過程とそれに付随する Si(011)ハイブリッド結晶層の結晶品質劣化をサブミクロンスケールの歪・格子面傾斜揺らぎの観点から明らかにした。図 1 は、DSB 基板作製プロセスにおいて、チャンネル層側の Si 022 回折ロックアップカーブの[0-11]方位への変化を示したものであり、貼り合わせ界面酸化膜の酸素外方拡散が起きる 1000°C アニールにおいて結晶性が劣化するが、 1200°C アニール後は再び結晶性が良くなるものの、格子面傾斜揺らぎが顕著になっていることを示している。Ge に関しては、Si 基板上の Ge 細線中の結晶ドメインの傾斜やサイズが最線幅によって変化すること等を明らかにした。図 2 は、幅 100 nm の Ge 細線からの 113 回折ロックアップカーブ（図 2(a)）示しており、透過型電子顕微鏡像（図 2(b)）に見られる転位で分離された結晶ドメインに対応する、ピーク構造が観測された。細線幅が小さくなると、貫通転位が減少するとともに、シングルドメイン化する傾向があることがわかった。サファイア周期溝構造テンプレート上に成長した AlN 厚膜中の 3 次元的な歪量の分布を明らかにした。 -2201 逆格子マップを取得することで、AlN 結晶格子の c 軸方位（[0001]方位）の歪量の変化を検出することに成功し、c 軸方位には引張歪が残存し、サファイアとの格子定数差による面内圧縮歪や AlN 厚膜に形成されたボイドによる一軸性歪緩和と関連して変化していることが示唆された。これは、基板側面において成長方向に沿った結晶構造特性を解析する手法として有効であり、今後、種々のデバイス材料解析に応用できるといえる。

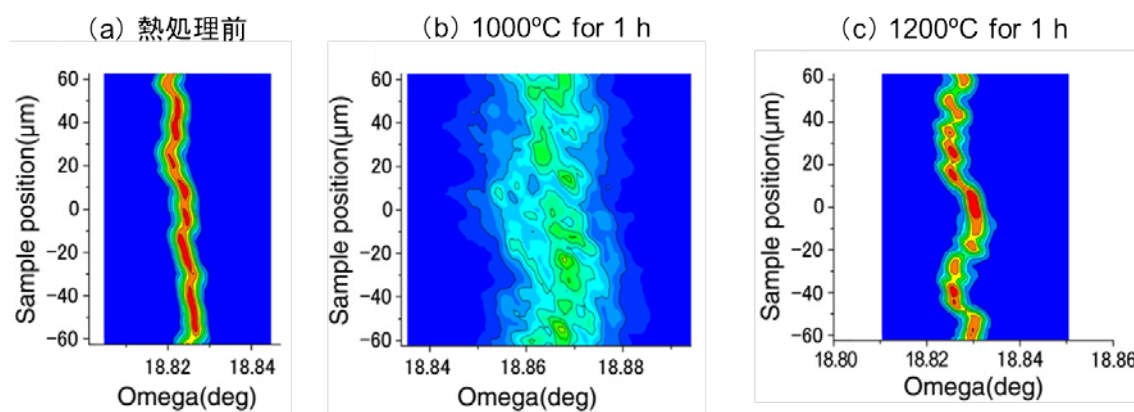


図 1：直接接合 Si（DSB）基板作製プロセスにおける、Si(110)チャンネル層の結晶性変化。熱処理に伴う、022 回折ロックアップカーブの[0-10]方位への変化を示している。

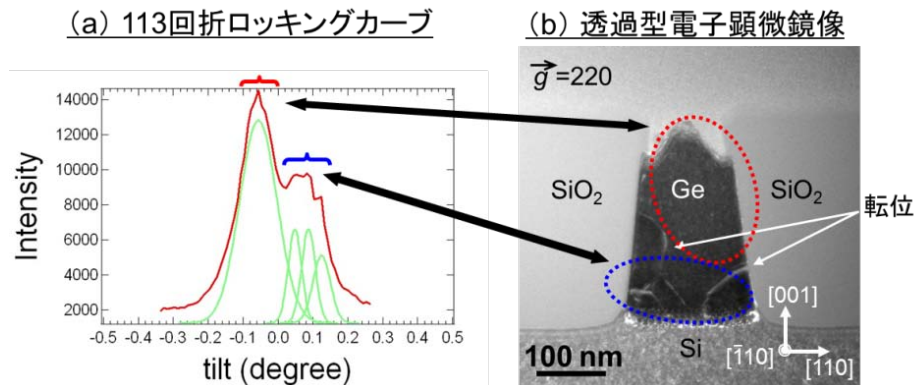


図 2 : 幅 100 nm の Ge 細線から取得した、(a) 113 回折ロックングカーブ (赤 : 実験値、緑 : フィッティング) と (b) 透過型電子顕微鏡像。

文献

1. K. Ebihara, J. Kikkawa, Y. Nakamura, A. Sakai, G. Wang, M. Caymax, Y. Imai, S. Kimura, and O. Sakata, "X-ray microdiffraction investigation of crystallinity and strain relaxation in Ge thin lines selectively grown on Si(001) substrates", *Solid-State Electron.*, **60**, 26 (2011).
2. T. Kato, Y. Ohara, T. Ueda, J. Kikkawa, Y. Nakamura, A. Sakai, O. Nakatsuka, M. Ogawa, S. Zaima, E. Toyoda, H. Isogai, T. Senda, K. Izunome, H. Tajiri, O. Sakata, and S. Kimura, "Microscopic structure of directly bonded silicon substrates", *Key Eng. Mater.* **470**, 164 (2011).
3. T. Kato, Y. Nakamura, J. Kikkawa, A. Sakai, E. Toyoda, K. Izunome, O. Nakatsuka, S. Zaima, Y. Imai, S. Kimura, and O. Sakata, "Structural change of direct silicon bonding substrates by interfacial oxide out-diffusion annealing", *Thin Solid Films* **518**, S147 (2010).
4. K. Ebihara, S. Harada, J. Kikkawa, Y. Nakamura, A. Sakai, G. Wang, M. Caymax, Y. Imai, S. Kimura, and O. Sakata, "X-ray microdiffraction study on crystallinity of micron-sized Ge films selectively grown on Si(001) substrates", *ECS Trans.* **33**, 887 (2010).

学会発表

1. D. T. Khan, S. Harada, J. Kikkawa, Y. Nakamura, H. Miyake, K. Hiramatsu, Y. Imai, S. Kimura, O. Sakata, and A. Sakai, "X-ray microdiffraction study of three-dimensional distribution of local strain in thick AlN film grown on a trench-patterned AlN/ α -Al₂O₃ template", 15th International Conference on Thin Films (ICTF-15), Kyoto, Nov. 6-11, 2011.
2. A. Sakai, "Characterization of wafer-bonded substrates for advanced channels in Si-based MOSFET", International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, Shanghai, China, Nov. 1-4, 2010 [Invited].
3. K. Ebihara, J. Kikkawa, Y. Nakamura, A. Sakai, G. Wang, M. Caymax, Y. Imai, S. Kimura, and O. Sakata, "X-ray microdiffraction investigation of crystallinity and strain relaxation in Ge thin lines selectively grown on Si(001) substrates," 5th International Conference on SiGe Technology and Device Meeting (ISTDM), Stockholm, Sweden, May

24-26, 2010.

4. K. Ebihara, S. Harada, J. Kikkawa, Y. Nakamura, A. Sakai, G. Wang, M. Caymax, Y. Imai, S. Kimura, and O. Sakata, "X-ray microdiffraction study on crystallinity of micron-sized Ge films selectively grown on Si(001) substrates," 218th ECS meeting, LasVegas, Oct. 10-15, 2010.
5. T. Kato, T. Ueda, Y. Ohara, J. Kikkawa, Y. Nakamura, A. Sakai, O. Nakatsuka, S. Zaima, E. Toyoda, K. Izunome, Y. Imai, S. Kimura, and O. Sakata, "Structural change during the formation of directly bonded silicon substrates", International Symposium on Technology Evolution for Silicon Nano-Electronics (ISTESNE), (p-23, 2010.6.4)
6. タンカンディン, 原田進司, 渡邊翔太, 吉川純, 中村芳明, 酒井 朗, 三宅秀人, 平松和政, 今井康彦, 木村滋, 坂田修身, "Distribution of three-dimensional local strain in thick AlN film grown on a trench patterned AlN/ α -Al₂O₃ template", 25p-BY-6, 2011年春季・第58回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学, 2011年3月24-27日.
7. 渡邊翔太, 原田進司, Thanh Khan Dinh, 吉川純, 中村芳明, 三宅秀人, 平松和政, 今井康彦, 木村滋, 坂田修身, 酒井朗, "X線マイクロ回折を用いたGaN自立基板の格子面傾斜ゆらぎの解析", 27p-BZ-2, 2011年春季・第58回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学, 2011年3月24-27日.
8. T. Kato, T. Ueda, Y. Ohara, J. Kikkawa, Y. Nakamura, A. Sakai, O. Nakatsuka, S. Zaima, E. Toyoda, K. Izunome, Y. Imai, S. Kimura, and O. Sakata, "Structural change of direct silicon bonding substrates by interfacial oxide out-diffusion annealing", The 6th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures (ICSI-6), Los Angeles, May 17-22, 2009.
9. Vishal Soam, 吉武修, 海老原洪平, 吉川純, 中村芳明, 酒井朗, 三宅秀人, 平松和政, 今井康彦, 木村滋, 坂田修身, "Distribution of local strain in thick AlN layers grown on a trench-patterned AlN/sapphire template", 17a-TB-10, 第70回秋季応用物理学学会学術講演会, 東海大学, 2010年3月17-20日.
10. 海老原洪平, 原田進司, 吉川純, 中村芳明, 酒井朗, Gang Wang, Matty Caymax, 今井康彦, 木村滋, 坂田修身, "Si基板上に選択エピタキシャル成長したGe細線の歪緩和過程", 17p-TJ-6, 第57回応用物理学関係連合講演会, 東海大学, 2010年3月17-20日.
11. 海老原洪平, 山下鎮, 吉川純, 中村芳明, 酒井朗, Gang Wang, Matty Caymax, 今井康彦, 木村滋, 坂田修身, "Si(001)基板上に選択エピタキシャル成長したGe薄膜における歪緩和過程", 10a-P6-16, 第70回秋季応用物理学学会学術講演会, 富山大学, 2009年9月8-11日.