

## 平成18年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究終了報告書

◆記入に当たっては、「平成18年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究終了報告書記入要領」を参照してください。

ローマ字	SAKURAI TOSHIO					
①研究代表者氏名	櫻井 利夫			②所属研究機関・部局・職	東北大学・金属材料研究所・教授	
③研究課題名	和文	GaN系半導体ヘテロ構造における表面界面の原子レベル評価と物性制御				
	英文	Atomic level characterization and property control of surface and interface in nitride semiconductor heterostructures				
④研究経費 金額単位：千円	平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度		総合計
	52,900	20,800	14,500	6,200		94,400
⑤研究組織（研究代表者及び研究分担者） *平成18年3月31日現在						
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）			
櫻井 利夫	東北大学・金属材料研究所・教授	表面物性学	研究計画全体の設定・実験データの解析・研究の総括 窒化物薄膜成長および窒化物薄膜作成用ZrB2基板のSTMによる構造解析 LEEMによるZrB2基板の成長過程の解析  窒化物薄膜のAFM観察による構造解析			
藤川 安仁	東北大学・金属材料研究所・助教授	表面科学				
J・T サドウスキー	東北大学・金属材料研究所・助手	表面科学				
高村 由起子 (山田 由起子)	東北大学・金属材料研究所・助手	材料科学				
⑥当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）						
<p>本プロジェクトでは、GaN系ヘテロエピタキシーのプロセスを原子レベルで解析し理解を進め、この構造・組成情報と対応付けてヘテロ層内もしくは界面に発現する物性を原子レベルで測定・評価することで、新たなデバイス材料創製に向けた基礎的知見、指導原理を得て行くことを目指す。本プロジェクトでは以下の具体的プロジェクトを設定し、MBE成長実験と密接に連携を取りながら、研究を推進する。</p> <p><b>[I] GaN系半導体のドライエッチング</b> エッチングの際に付随する表面欠陥はその上への良好なオーム性接触形成の阻害要因となってしまう、そのためオーム接触との両立が可能なエッチングプロセスの開発が強く望まれている。本項目ではエッチングにおけるこれまでの予備研究をベースとして原子プロセスを系統的に調べ、ヘテロ構造の微細加工技術に関する基礎的知見・指針を得てゆく。</p> <p><b>[II] 金属-III-V窒化物半導体接触界面の構造と特性評価</b> GaN系半導体と金属とのコンタクト界面の問題はLED、FET、バイポーラトランジスタ等全てのデバイス構造に関わる大変重要な課題である。金属-半導体接合はまず半導体最表面から始まるため、所望の機能・性能を達成するためにはまず、これら窒化物の“表面”における原子プロセスの理解と構造の規定が必要不可欠となる。ここではその成長表面の構造安定性や成長後に埋め込まれた金属-窒化物半導体界面と膜構造を評価するとともに、電気的特性の評価を行い、より良いコンタクトの実現に向けてパラメータの最適化を進める。</p> <p><b>[III] ヘテロ構造の機能物性</b> ヘテロ層における不純物や組成の局所構造情報と物性発現機構との対応関係は十分ではなく、局所（ナノスケール）構造と物性とを曖昧さなく対応させた研究が強く望まれている。本項目では、InGaN/AlGaN/GaNヘテロ構造を研究対象として、ナノスケールで分解されたショットキ障壁高さや発光特性、さらに2次元電荷密度・移動度とその深さ方向分布などを、積層の過程で逐次精度良く評価・分析し、ヘテロ構造とそれにより誘起される機能物性発現の微視的メカニズムを調べてゆく。</p>						

## ⑦ 研究成果の概要 (研究目的に対する研究成果を必要に応じて図表等を用いながら、簡潔に記入してください。)

本研究では研究開始とほぼ同時に窒化物半導体成長に対して雰囲気中の砒素が重大な影響を与える事が判明したため、研究の基礎となるGaN成長自体について砒素フリーの環境を構築し直す必要性が生じた。そのため、GaNに対する金属コンタクトやエッチングについては研究計画に沿った形での基礎的研究が行われたが、より多くの努力がGaNの結晶成長制御自体に注がれた。特に、近年のGaN系デバイスの成熟化やZnO系の青色デバイスの登場などによるコスト削減圧力の増加に対応して、Siに対する窒化物半導体の成長制御について重点的に研究を行った。

### 1. 超高真空分子線エピタキシー-走査プローブ顕微鏡システムの構築

本研究では、GaNの成長とその表面のin situ観察を可能とする超高真空分子線エピタキシー-走査プローブ顕微鏡(UHVMBE-SPM)システムを新たに完成させ、砒素フリー環境での成長を可能にした。日本真空製のMBE装置と日本電子製の温度可変UHV走査トンネル顕微鏡(STM)/非接触原子間力顕微鏡(NC-AFM)装置を一体化させ、光電子分光装置等で拡充した独自のデザインのUHVMBE-SPMシステム(Fig. 1)であり、base pressureは $1.0 \times 10^{-9}$ Paである。除振台1に設置されているSPMシステムと除振台2に設置されているMBEシステムは連結ベローズを介して接続されており、超高真空下での試料受け渡しを可能にするとともに、ベローズと二つの除振台を適切に機能させることでSTMとNC-AFMによる原子分解能観察を可能とした。

### 2. Si基板上へのGaNの成長とその極性の成長条件依存性

高品質で大面積かつ経済的なSiウェハ-をGaN成長基板上にと望む声は多いが、無極性結晶上への極性結晶の成長は通常困難を伴う。そのためSi(111)上に成長させたGaN膜の極性制御について研究を行った。Si(111)を超高真空中で1250℃に加熱して酸化膜を取り除き、(7x7)構造をRHEEDで確認した後に窒素プラズマを用いて窒化した。窒化後のRHEED像にはスポットやストリークは認められず、アモルファスな窒化物層が生成したと考えられるが、その上にGaNを成長させて得られるRHEED像は $\text{GaN}\langle 0001 \rangle // \text{Si}\langle 111 \rangle$ 、 $\text{GaN}\langle 1120 \rangle // \text{Si}\langle 110 \rangle$ の方位関係にあるウルツァイト構造のGaNのスポットを示した。このことから界面における結晶性の部分から優先的に核生成し、エピタキシャル成長したと考えられる。窒化処理の後、核生成層成長をGa-richな条件、又はN-richな条件で行い、その後平坦な膜を得るためにGa-richな条件で成長させ、室温まで冷却してGaを堆積して得られた再構成構造を観察した結果、以下の様な傾向が得られた。N-richな条件で核生成を行った試料については、Ga-richな $\text{GaN}(0001)$ の再構成構造である(3x3)、(6x6)、c(6x12)構造のRHEED像とSTM像(Fig. 2)が得られ、N極性膜が成長していることが分かった。一方、Ga-richな条件で核生成を行った試料については、堆積するGaの量を増やしても不鮮明な(3x3) RHEEDパターンしか得られず、STM観察の結果(Fig. 3)、この膜はfluid構造を示すGa極性領域とc(6x12)構造を示すN極性領域が混在していることが明らかとなった。以上の我々の実験から、窒化したSi(111)上に平坦かつ単一N極性のGaNを成長させるためには、平坦な薄膜が成長可能なGa-rich条件での成長の前に、N-rich条件による核生成過程が欠かせないことが明らかとなった。プラズマ支援MBEによるGaN成長では、N-richな成長条件はGa極性結晶の成長速度を上げて増大させることが知られており、今回得られた結果はN-richな条件がSi(111)上にN極性のGaN結晶のみを選択的に核生成させる事によって説明される(論文2,6)。さらに、Si(111)表面に対して $\text{ZrB}_2$ を緩衝層として成長したGaN薄膜の成長制御についても研究を行い、緩衝層の効果によりGaNに対するSiのドーピングが抑えられ、かつ極性がN極性に揃った高品質な薄膜成長が可能になることを示した(論文2,5、詳細は特記事項で後述)。

### 3. 金属-GaNコンタクトの作製

GaN表面に対して代表的な貴金属である金及び銀を成長させ、金属-GaNコンタクトの形成過程をSTMを用いて観察した。新たに発見されたh-GaN(0001)表面に常温で金を蒸着して得られるc(2x12)再構成表面のSTM像から、金-GaN界面が秩序を保った構造を取っている可能性が示唆される。銀蒸着のケースに於いては成長初期には銀のナノクラスターが乱雑に成長するが、膜厚を増加させていくと共に徐々にクラスター同志が結合して均一な薄膜に変化していき、最終的には層状成長様式により平坦な薄膜が成長する事を明らかにした(論文29)。

### 4. GaN表面のハロゲンによるエッチング

GaN表面のドライエッチングによる加工の可能性を探索するため、GaN(0001)表面に対する塩素吸着及び熱処理を行い、表面形状をSTMにより観察した。その結果、表面の組成をGa-richにした状態からは連続的にエッチングが進行してステップ形状の変化やエッチピットの生成が観察されたが、表面の組成をN-richの場合では全くエッチングは進行せず表面形状に変化は見られなかった。この現象は塩素がガリウムのみと選択的に反応するため、表面に於ける窒素の割合が多い場合には反応サイトの密度が減少してエッチングに必要な塩素原子の密度が得られないためであると考えられる(論文23)。このような情報はGaNをエッチングするための最適条件を決定するに当たって重要な指針を与えるものと考えている。

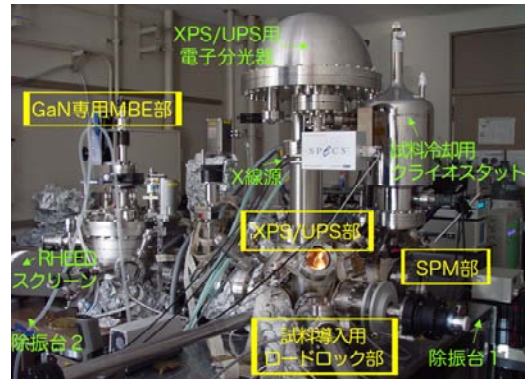


Fig. 1 GaN 成長とその in situ 分析が可能な UHV MBE-SPM システム。

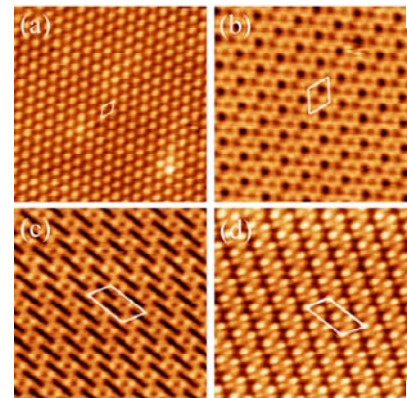


Fig. 2 N-richな核生成条件でSi(111)上に直接成長したGaN膜にGaを堆積して得られた再構成構造の $15 \times 15 \text{ nm}^2$  STM像: (a) (3x3), (b) (6x6), (c) (d) c(6x12)。全てN極性GaN由来の構造である。

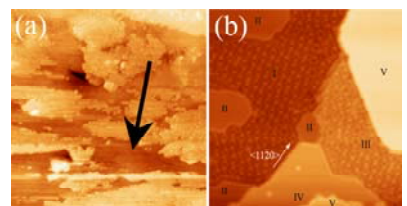


Fig. 3 Ga-richな核生成条件でSi(111)上に直接成長したGaN膜にGaを堆積して得られた(a)  $720 \times 720 \text{ nm}^2$  と(b)  $30 \times 30 \text{ nm}^2$ のSTM像。(a) 荒い表面に矢印で示す平坦な部分が観察され、(b) N極性GaN由来のc(6x12)とGa極性GaN由来のfluid構造が観察される。

⑧特記事項 (この研究において得られた独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、当該研究分野及び関連研究分野への影響等、特記すべき事項があれば記入してください。)

本研究によって、特にシリコンに対するGaNの接合に関して有望なZrB<sub>2</sub>バッファ層を介した成長について極性が安定して配向する原理が明らかにされた。さらにSiを介した多種多様なデバイス材料の接合という観点から様々な系に関する研究を行い、多くの新奇な知見を得たので詳細を以下に記す。

### 1. ZrB<sub>2</sub>薄膜をバッファ層としたGaNのSi(111)上への成長 (論文2, 5)

ZrB<sub>2</sub>は金属とホウ素の層が交互に重なるAlB<sub>2</sub>型構造をとる高融点セラミックスであり、半金属性を示す。その格子定数が $a=0.317\text{nm}$ とwurtzite型GaNの格子定数 $a=0.319\text{nm}$ と良く一致することから、GaN成長用基板として期待される物質である。このZrB<sub>2</sub>の薄膜を、テトラヒドロボレートジルコニウム (Zr(BH<sub>4</sub>)<sub>4</sub>) を用いてSi(111)基板上に低温でエピタキシャル成長させる技術がアリゾナ州立大学Tsongグループで開発され、この膜上にGaNを成長させた結果、上記の格子定数の一致によるGaN結晶の質向上と、ZrB<sub>2</sub>膜の金属性によるSi基板への可視・紫外域発光吸収の防止などが実証されている。本研究で基板として用いた厚さ約15nmのエピタキシャルZrB<sub>2</sub>膜は予め上記の方法でSi(111)上に成長させたもので、清浄表面を得るためにMBE-SPMシステムに導入した後に加熱による表面酸化膜の除去を行った。その後GaNの成長を行った結果、六方晶GaNの三次元的な核生成を経て、最終的にはストリーク状のRHEED像を示す平坦なGaN{0001}-(1x1)表面が得られた。室温に冷却したGaN{0001}-(1x1)上にGaを堆積すると、Fig. 4に示したように堆積量の増加とともにN極性由来の再構成構造である(3x3)、(6x6)、及びc(6x12)構造がRHEEDとNC-AFMで確認された。ここでは基板Si原子等の混入が無いGaN膜が導電性を持たず、STMが不可能であったためにNC-AFMを用いた。GaN成長に先立ちZrB<sub>2</sub>(0001)-(1x1)表面をGa或いは活性窒素に曝した場合や、核生成時の成長条件をGa-richにした場合、N-richにした場合についても同様の実験を行ったが、いずれもN極性由来の再構成構造のみが観察された。Si(111)上に直接成長させた場合と異なり、ZrB<sub>2</sub>を介して成長させた場合は成長条件に関わらずに単一極性膜を得ることが可能であった。

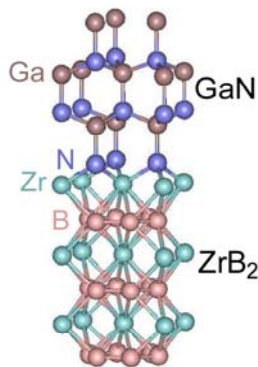


Fig. 5. 第一原理計算により広い範囲の実験条件で最も安定であるとの結果が得られたGaN(0001)-ZrB<sub>2</sub>(0001)界面構造。界面はZrとNの結合により形成されている。

ZrB<sub>2</sub>を介して成長させた場合に容易に単一極性膜が得られた理由を明らかにするために、ZrB<sub>2</sub>(0001)-GaN(0001)界面構造を密度汎関数法による第一原理計算によって検討した結果、Fig. 5に示すZr終端ZrB<sub>2</sub>上にN極性GaNが成長し、界面はZr-N結合を持つ構造が考慮したあらゆる条件下で最も安定であった。このことは核生成条件がGa-richかN-richかに関わらずN極性のGaN膜が得られたという実験結果と良く一致し、膜成長の極性制御における界面構造の重要性を示した。

### 2. Si(001)表面上のGe量子ドットを構成する表面の構造解析とその性質の解明 (論文8, 22, 33)

GaN同様に光デバイスや量子コンピュータ等のナノスケール電子デバイスへの応用が期待されているSi(001)-2x1表面上へのGeまたはSiGe合金量子ドットについては、数多くの研究報告があるが、ヘテロ構造生成の初期過程には未解決な問題が残されている。その一つに量子ドット側面を構成するGe(105)表面の構造があり、我々はその構造のSTMを用いた解明に成功した(論文33)。この構造の正当性を高分解能AFMによって確認すると共に表面に於ける電位分布の原子分解能且つ定量的な観察に成功した(論文22)。さらにこの表面固有の歪み構造が水素吸着を行う事によって制御可能である事を示し(論文8)、量子ドットの構造・物性制御の新たな手段として期待されている。

### 3. Biを介したSi(111)表面へのペンタセン成長 (論文7, 9, 21)

高いキャリア移動度から液晶ディスプレイのドライブ用トランジスタ等の用途にアモルファスシリコンに取って代わる材料として注目されているペンタセンについて、結晶性の高い薄膜成長が課題となっている。我々は研究室において研究が進んでいたSi表面上のBi薄膜(論文21)を基板に用いる事でそのような成長が可能となる事を明らかにした。ピスマス薄膜上に成長されたペンタセンは、半金属であるBiとの適度な相互作用と格子整合の良さから初層から殆どバルクの格子定数を保ったまま層状成長をすることがSTM及びLEEDによる観察から判明した(論文7, 9)。右に示したLEEM像(Fig. 6)に観察されているように、そのドメインサイズはLEEM装置の最大視野である50ミクロンを大きく越えてミリメートルオーダーにも及ぶ事が分かった。

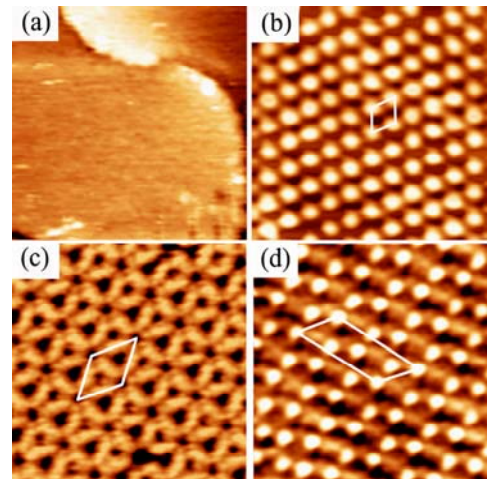


Fig. 4. ZrB<sub>2</sub>(0001)膜上にエピタキシャル成長したGaN(0001)表面のNC-AFM像。(a)らせん転位が観察される100x100nm<sup>2</sup>像。N-polar Ga-rich再構成表面構造の原子分解能像(10x10nm<sup>2</sup>) (b) (3x3)、(c) (6x6)、(d) c(6x12)。

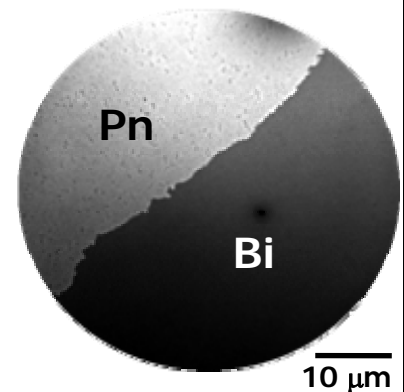


Fig. 6. Si基板上Bi薄膜表面に成長したペンタセン(Pn)ドメインのLEEM像。

⑨研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会、特許等の発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

原著論文・解説など

1. Zhi-Tao Wang, Y. Yamada-Takamura, Y. Fujikawa, Q. K. Xue, J. Tolle, J. Kouvetakis, I. S. T. Tsong, and T. Sakurai, "Effect of nitridation on MBE growth of GaN on ZrB<sub>2</sub>(0001)/Si(111)," *J. Appl. Phys.*, in press.
- ② 高村(山田)由起子, 王治涛, 藤川安仁, 櫻井利夫, "シリコン基板への単一極性GaN成長を可能にするエピタキシャルZrB<sub>2</sub>薄膜," *日本物理学会誌*, in press.
3. J. T. Sadowski, T. Nagao, S. Yaginuma, Y. Fujikawa, T. Sakurai, A. Oreshkin, M. Saito, and T. Ohno, "Stability of the quasicubic phase in the initial stage of the growth of bismuth films on Si(111)-7x7," *J. Appl. Phys.* **99**, 014904 (2006).
4. Y. Fujikawa, T. Sakurai, and M. G. Lagally, "Charge transfer in the atomic structure of Ge(105)," *Appl. Surf. Sci.*, in press.
- ⑤ Yukiko Yamada-Takamura, Z. T. Wang, Y. Fujikawa, T. Sakurai, Q. K. Xue, J. Tolle, P.-L. Liu, A. V. G. Chizmeshya, J. Kouvetakis, and I. S. T. Tsong, "Surface and Interface Studies of GaN Epitaxy on Si(111) via ZrB<sub>2</sub> Buffer Layers," *Phys. Rev. Lett.* **95**, 266105 (2005).
- ⑥ Z. T. Wang, Y. Yamada-Takamura, Y. Fujikawa, T. Sakurai, and Q. K. Xue, "Atomistic study of GaN surface grown on Si(111)," *Appl. Phys. Lett.* **87**, 032110 (2005).
7. G. E. Thayer, J. T. Sadowski, F. Meyer zu Heringdorf, T. Sakurai, and R. M. Tromp, "Role of Surface Electronic Structure in Thin Film Molecular Ordering," *Phys. Rev. Lett.* **95**, 256106 (2005).
8. Yasunori Fujikawa, T. Nagao, Y. Yamada-Takamura, T. Sakurai, T. Hashimoto, Y. Morikawa, K. Terakura, and M. G. Lagally, "Hydrogen-Induced Instability of the Ge(105) Surface," *Phys. Rev. Lett.* **94**, 086105 (2005).
9. J. T. Sadowski, T. Nagao, S. Yaginuma, Y. Fujikawa, A. Al-Mahboob, K. Nakajima, T. Sakurai, G. E. Thayer, and R. M. Tromp, "Thin bismuth film as a template for pentacene growth," *Appl. Phys. Lett.* **86**, 073109 (2005).
10. T. Nagao, S. Yaginuma, M. Saito, T. Kogure, J. T. Sadowski, T. Ohno, S. Hasegawa, and T. Sakurai, "Strong lateral growth and crystallization via two-dimensional allotropic transformation of semi-metal Bi film," *Surf. Sci.* **590**, L247-L252 (2005).
11. Jun-Zhong Wang, Ke-Hui Wu, Wei-Sheng Yang, Xing-Jun Wang, J.T. Sadowski, Y. Fujikawa, and T. Sakurai, "Structural transition of pentacene monolayer on Ga bilayer: From brick-wall structure to herringbone pattern of molecular dimers," *Surf. Sci.* **579**, 80-88 (2005).
12. Kehui Wu, Y. Fujikawa, T. Briere, V. Kumar, Y. Kawazoe, and T. Sakurai, "Dynamics and nano-clustering of alkali metals (Na, K) on the Si(111)-(7x7) surface," *Ultramicroscopy* **105**, 32-41 (2005).
13. Ke-hui Wu, Y. Fujikawa, Y. Takamura, and T. Sakurai, "Alkali Metal Adsorption on the Si(111)-(7x7) Surface," *Chinese J. Phys.* **43**, 197-211 (2005).
14. M. W. Chen, A. Inoue, T. Sakurai, E. S. K. Menon, R. Nagarajan, and I. Dutta, "Redistribution of alloying elements in quasicrystallized Zr<sub>65</sub>Al<sub>7.5</sub>Ni<sub>10</sub>Cu<sub>7.5</sub>Ag<sub>10</sub> bulk metallic glass," *Phys. Rev. B* **71**, 092202 (2005).
15. Kotone Akiyama, T. Eguchi, T. An, Y. Fujikawa, Y. Yamada-Takamura, T. Sakurai, and Y. Hasegawa, "Development of a metal-tip cantilever for noncontact atomic force microscopy," *Rev. Sci. Instrum.* **76**, 033705 (2005).
16. J.F. Jia, G.C. Dong, L.L. Wang, X.C. Ma, Q.K. Xue, Y. Hasegawa, and T. Sakurai, "Local work function measurement on Cu(111)-Au and Cu(111)-Pd surfaces," *Acta Physica Sinica* **54**, 1523-1527 (2005).
17. 藤川安仁, 櫻井利夫, "半導体ヘテロ構造における表面・界面歪み制御," *固体物理* **40**, 615-625 (2005).
18. 藤川安仁, 櫻井利夫, "半導体ナノ構造の構成要素としての表面構造—高指数表面の研究を通じて—," *日本物理学会誌* **60**, 641-644 (2005).
19. 秋山琴音, 江口豊明, 藤川安仁, 安東秀, 小野雅紀, 橋本保, 森川良忠, 寺倉清之, 櫻井利夫, Max G. Lagally, 長谷川幸雄, "Ge/Si(105)表面の原子間力顕微鏡観察," *表面科学* **26**, 486-491 (2005).
20. 長尾忠昭, 柳沼晋, J.T. Sadowski, 齊藤峯雄, 藤川安仁, 大野隆央, 長谷川修司, 櫻井利夫, "シリコン表面上の半金属Bi超薄膜の同素変態," *表面科学* **26**, 344-350 (2005).
21. T. Nagao, J.T. Sadowski, M. Saito, S. Yaginuma, Y. Fujikawa, T. Kogure, T. Ohno, Y. Hasegawa, S. Hasegawa, and T. Sakurai, "Nanofilm Allotrope and Phase Transformation of Ultrathin Bi Film on Si(111)-7x7," *Phys. Rev. Lett.* **93**, 105501 (2004).
22. T. Eguchi, Y. Fujikawa, K. Akiyama, T. An, M. Ono, T. Hashimoto, Y. Morikawa, K. Terakura, T. Sakurai, M. G. Lagally, and Y. Hasegawa, "Imaging of All Dangling Bonds and Their Potential on the Ge/Si(105) Surface by Noncontact Atomic Force Microscopy," *Phys. Rev. Lett.* **93**, 266102 (2004).
23. S. Kuwano, Q. -Z. Xue, Y. Asano, Y. Fujikawa, Q. -K. Xue, Koji S. Nakayama, T. Nagao, and T. Sakurai, "Bilayer-by-bilayer etching of 6H-GaN (0001) with Cl," *Surf. Sci.* **561**, L213-L217 (2004).
24. Kehui Wu, A. I. Oreshkin, Y. Takamura, Y. Fujikawa, T. Nagao, T. Briere, V. Kumar, Y. Kawazoe, R. F. Dou, Q. K. Xue and T. Sakurai, "Step-by-step cooling of a two-dimensional Na gas on the Si(111)-(7x7) surface," *Phys. Rev. B* **70**, 195417 (2004)

⑨研究成果の発表状況(続き) (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会、特許等の発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

25. R. Z. Bakhtizin, Q. Z. Xue, K.H. Wu, T. Sakurai and Q.K. Xue, "Scanning tunneling microscopy studies of III-nitride thin film heteroepitaxial growth", *Physics-Uspekhi* **174**, (2004) 384-405 (in Russian).
26. G. Sazaki, T. Fujino, J. T. Sadowski, N. Usami, T. Ujihara, K. Fujiwara, Y. Takahashi, E. Matsubara, T. Sakurai and K. Nakajima, "Epitaxial relation and island growth of perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic dianhydride (PTCDA) thin film crystals on a hydrogen-terminated Si(111) substrate," *J. Cryst. Growth* **262**, 196-201 (2004).
27. Yukio Hasegawa, Toyooki Eguchi, Toshi An, Masanori Ono, Kotone Akiyama and Toshio Sakurai, "Calculation of Noise Intensity in the Frequency Demodulation for Atomic Force Microscopy," *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L303-L305 (2004).
28. D. Jeon, T. Sakurai, K.D. Lee, J.W. Chung, "Enhanced oxidation of Ge(111) surface precovered with Na: scanning tunneling microscopy and X-ray photoemission spectroscopy study," *Surf. Sci.* **559**, 141-148 (2004).
29. Kehui Wu, Q. Z. Xue, R. Z. Bakhtizin, Y. Fujikawa, X. Li, T. Nagao, Q. K. Xue, and T. Sakurai, "Layer-by-layer growth of Ag on GaN(0001) surface", *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1389-1391 (2003) [Erratum: **82**, 3991 (2003)].
30. Kehui Wu, Y. Fujikawa, T. Nagao, Y. Hasegawa, K. S. Nakayama, Q. K. Xue, E. G. Wang, T. Briere, V. Kumar, Y. Kawazoe, S. B. Zhang, and T. Sakurai, "Na Adsorption on The Si(111)-(7x7) Surface: From Two Dimensional Gas to Nanocluster Array", *Phys. Rev. Lett.* **91**, 126101 (2003).
31. K. Raviprasad, C.R. Hutchinson, T. Sakurai, and S.P. Ringer, "Precipitation processes in an Al-2.5Cu-1.5Mg (wt. %) alloy microalloyed with Ag and Si", *Acta Mater.* **51**, 5037-5050 (2003).
32. J. T. Sadowski, T. Nagao, M. Saito, A. Oreshkin, S. Yaginuma, S. Hasegawa, T. Ohno and T. Sakurai, "STM/STS studies of the structural phase transition in the growth of ultra-thin Bi films on Si(111)", *Acta Phys. Pol. A* **104**, (2003) 381-387.
33. Y. Fujikawa, K. Akiyama, T. Nagao, T. Sakurai, M.G. Lagally, T. Hashimoto, Y. Morikawa, and K. Terakura, "Origin of the Stability of Ge(105) on Si: A New Structure Model and Surface Strain Relaxation", *Phys. Rev. Lett.* **88**, 176101 (2002).
34. Y. Fujikawa, J.T. Sadowski, K.F. Kelly, K.S. Nakayama, E.T. Mickelson, R.H. Hauge, J.L. Margrave, and T. Sakurai, "Adsorption of Fluorinated C60 on the Si(111)-(7 x 7) Surface Studied by Scanning Tunneling Microscopy and High-Resolution Electron Energy Loss Spectroscopy", *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 245-249 (2002).
35. Y. Fujikawa, J.T. Sadowski, K.F. Kelly, K.S. Nakayama, T. Nagao and T. Sakurai, "Fluorine etching on the Si (111)-7x7 surfaces using fluorinated fullerene", *Surf. Sci.* **521**, 43-48 (2002).
36. J.T. Sadowski, Y. Fujikawa, K.F. Kelly, K. Nakayama, T. Sakurai, E.T. Mickelson, R.H. Hauge, and J.L. Margrave, "Fluorinated fullerene thin films on Si(111)-7x7 surface", *Materials Characterization* **48**, 127-132 (2002).
37. T. Hashimoto, Y. Morikawa, Y. Fujikawa, T. Sakurai, M.G. Lagally, and K. Terakura, "Rebonded SB step model of Ge/Si(105)1x2: A first-principles theoretical study", *Surf. Sci.* **513**, L445-L450 (2002).
38. R.G. Zhao, Zheng Gai, Wenjie Li, Jinlong Jiang, Y. Fujikawa, T. Sakurai and W. S. Yang, "Nanofaceting of unit cells and temperature dependence of the surface reconstruction and morphology of Si(1 0 5) and (1 0 3)", *Surf. Sci.* **517**, 98-114 (2002).
39. Y. Hasegawa, Takayuki Suzuki and T. Sakurai, "Modification of electron density in surface states: standing wave observation on Pd overlayers by STM", *Surf. Sci.* **514**, 84-88 (2002).

#### 招待講演

1. 藤川 安仁, "半導体界面における格子不整合歪みの表面構造への影響と構造緩和," 日本物理学会第61回年次大会, 松山, March 27-30, 2006.
2. J. T. Sadowski, "In situ" LEEM and STM study of the growth of thin organic films", Symposium on Surface Physics 2006 SSP'06, Shizukuishi, Japan, January 10-13, 2006.
3. J. T. Sadowski, "Growth of pentacene films investigated by LEEM and STM", Polish Vacuum Society Meeting, Cedzyna, Poland, September 17-27, 2005.
4. Y. Fujikawa, T. Sakurai and M.G. Lagally, "Strain control of quantum dot surface via adsorption," 13th International Congress on Thin Films and 8th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ICTF13/ACSIN8), Stockholm, Sweden, June 19-23, 2005.
5. T. Sakurai, "Field-ion scanning tunneling microscopy," the 50th Anniversary of Atomic Resolution, State College, PA, USA, June 15-17, 2005.
6. Y. Fujikawa and T. Sakurai, "Surface Structure as a Building-Block of Nanostructures," China International Conference on Nanoscience & Technology (China NANO 2005), Beijing, China, June 9-11, 2005.

- ⑨研究成果の発表状況(続き) (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会、特許等の発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)
7. T. Sakurai, "Alkali metals adsorption on the Si (111)-7x7 surface: From 2D gas to magic clusters," Functionality of Organized Nanostructures (FON'04), Tsukuba, Japan, November 30 - December 2, 2004.
  8. T. Sakurai, "Alkali Metal Adsorption on the Si(111)-(7x7) Surface," The Sixth Taipei Symposium on Surfaces, Thin Films, and Nano Sciences, Taipei, Taiwan, August 17-19, 2004.
  9. Y. Fujikawa, T. Sakurai, T. Hashimoto, Y. Morikawa, K. Terakura, and M. G. Lagally, "Role of strained surface structure in the growth of Ge quantum dot," Swiss-Japanese Nanoscience Workshop, Nara, Japan, June 23-25, 2004.
  10. R. Z. Bakhtizin, K.-H. Wu, Q.-Z. Xue, T. Nagao and T. Sakurai, "Direct atomic scale characterization of adsorption and growth of noble metal films on the GaN(0001) surface," XII International Symposium "NANOSTRUCTURES: Physics and Technology", St.-Petersburg, Russia, June 21-25, 2004.
  11. R. Z. Bakhtizin, K.-H. Wu, Q.-Z. Xue, T. Nagao and T. Sakurai, "Direct atomic scale characterization of adsorption and growth of noble metal films on the GaN(0001) surface," All-Russia Conference, "III-nitride semiconductors, Materials, Devices, Applications," Moscow, Russia, June 7-9, 2004.
  12. T. Sakurai, "Dynamics and Nano-clustering of Alkali Metals Adsorbed on the Si(111)-(7x7) Surface," Beijing -TEDA 2004 Scanning Probe Microscopy, Sensors and Nanostructures, Beijing -TEDA, China, May 23-27, 2004.
  13. R. Z. Bakhtizin, K.-H. Wu, Q.-Z. Xue, T. Nagao and T. Sakurai, "Atomic scale characterization of adsorption and growth of noble metal films on the GaN(0001) surface", International Workshop "Scanning Probe Microscopy - 2004", Nizhny Novgorod (on the boat), May 2-6, 2004.
  14. Y. Fujikawa, "Role of strained surface structure in the growth of Ge quantum dots," Second Japan-Australia Workshop on Advanced Materials, Sydney, Australia, December 6-7, 2004.
  15. Y. Fujikawa, "The Strained Surface Structure of Ge Quantum Dots", American Physical Society March Meeting 2004, Montreal, Canada, March 22-26, 2004.
  16. Y. Fujikawa, T. Sakurai, K. Terakura and M.G. Lagally, "Strained atomic structure of the Ge(105) surface", International Symposium on Physical Chemistry of Surface Nanostructures and Related Nanomaterials, Xiamen, China, October 18-21, 2003.
  17. T. Sakurai, Ke-Hui Wu, Qi-Kun Xue, "Na Adsorption on the Si(111)-(7x7) Surface: From a Two Dimensional Gas to Magic Clusters", International Symposium on Physical Chemistry of Surface Nanostructures and Related Nanomaterials, Xiamen, China, October 18-21, 2003.
  18. Y. Fujikawa, T. Sakurai, K. Terakura and M.G. Lagally, "Role of strained surface structure in self-organized growth of Ge on Si", International Workshop on Smart Interconnects (IWSI), Atami, Japan, November 6-8, 2003.
  19. R.Z. Bakhtizin, K.-H. Wu, T. Nagao, T. Sakurai, "STM Study of Ag and Au Films Initial Stages Growth on A GaN(0001) Surface," VI All-Russia Conference on Semiconductor Physics, St.-Petersburg, October 27-31, 2003.
  20. Y. Fujikawa, "STM study on the atomic structure of Ge(105) surface", 4th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices (ALC '03), Kauai, HI, USA, October 5-10, 2003.
  21. R.Z. Bakhtizin, K.-H. Wu, Q.-Z. Xue, Q.-K. Xue, T. Nagao, T. Sakurai, "STM Study of Noble Metal Films Initial Stages Growth on A GaN(0001) Surface Grown by MBE," XIII All-Russia Symposium on Scanning Electron Microscopy, Scanning Probe Microscopy and Analytical Techniques, Chernogolovka, Moscow region, June 13-16, 2003.
  22. T. Nagao, "Plasmons in Quantum Nanofilms Detected by Highly Collimated Slow Electron Beam", The 23rd Werner Brandt Workshop on Electronic Excitations of Solids, Cancun, Mexico, June 5 2003.
  23. J. T. Sadowski, T. Nagao, T. Sakurai, G. E. Thayer and R. M. Tromp, "Influence of the Interface Structure on the Growth of Thin Pentacene Films", 第50回応用物理学関係連合講演会, 横浜 March 27-30, 2003.
  24. Y. Fujikawa, T. Sakurai, K. Terakura and M.G. Lagally, "Strained atomic structure of the Ge(105) surface", Symposium on Surface Physics 2003 (SSP '03), Shizukuishi, Japan, March 10-13, 2003.
  25. R.Z. Bakhtizin, K.-H. Wu, Q.-Z. Xue, Q.-K. Xue, T. Nagao, T. Sakurai, "STM STUDY OF Ag FILM INITIAL STAGES GROWTH ON A GaN(0001) SURFACE GROWN BY MBE," International Workshop "Scanning Probe Microscopy - 2003", Nizhny Novgorod, March 2-5, 2003.
  26. R.Z. Bakhtizin, K.-H. Wu, Q.-Z. Xue, Q.-K. Xue, T. Nagao, T. Sakurai, "Initial Stages of Noble Metals Adsorption on the GaN(0001) surface," All-Russia Conference "III-nitride semiconductors Materials, Devices, Applications", St.-Petersburg, February 3-4, 2003.
  27. Kehui Wu, Y. Fujikawa and T. Sakurai, "Mobile Invisible Alkali Metal Atoms and the Magic Clusters on Si(111)-7x7 Surface", Asia SPM4 & Taipei Symposium on Nanotechnology, Taipei, Taiwan, August 12-15, 2002.