

平成21年 3月31日現在

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2006～2008
課題番号：18560020
研究課題名（和文）ボンドエンジニアリングによる表面状態図予測とナノ構造形成への応用

研究課題名（英文）Bond Engineering in Prediction of Surface Phase Diagram and Its Application to Nano-Structure Formation

研究代表者 伊藤 智徳（ITO TOMONORI）
三重大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80314136

研究成果の概要： ボンドエンジニアリング概念に基づく量子論的アプローチにより、ナノ構造形成に重要な「場」としての半導体表面を対象に、成長条件である温度、分子線圧力の関数としての表面状態図の理論予測を行った。具体的には、GaAs(001)表面構造予測と計算手法の妥当性の検証、GaAs(111)表面構造予測と Si ドーピング機構、GaN(0001)表面構造予測と GaN 成長初期過程、化合物半導体ナノワイヤにおける構造多形の成因、積層欠陥四面体形成機構、SiC(11-20)表面上の AlN 薄膜形成過程および構造多形等について検討を行い、ボンドエンジニアリング概念に基づく表面状態図予測のナノ構造形成機構解明への有用性を示した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2006 年度	1,900,000	0	1,900,000
2007 年度	700,000	210,000	910,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総 計	3,500,000	480,000	3,980,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・薄膜・表面界面物性

キーワード：量子論的アプローチ、半導体表面構造、状態図、計算科学、ナノ構造、成長機構

1. 研究開始当初の背景

半導体表面は多様な再構成構造を呈すること、ナノ構造形成における重要な「場」でもあることから、科学的、技術的視点を問わず実験、理論の両面から多くの研究が行われている。実験的には 高エネルギー電子線回折 (RHEED)、走査型トンネル顕微鏡 (STM) 観察を併用することで、特に Si, GaAs における代表的な表面については、それらの構造と成長条件（温度、分子線圧力）の関連も詳細に調べられている。しかしながら、GaN に代表される重要な半導体表面に関して、系統

的な検討が不十分な例も多い。一方、理論的には量子論に基づく第一原理計算手法による研究が行われており、方法論さえ確立されれば、任意の半導体についての系統的予測が可能である。しかしながら、通常的第一原理計算手法は、絶対零度での議論にのみ適用可能であり、実験結果を追認するものでしかない。したがって、ナノ構造形成過程への応用も含めて、温度、分子線圧力といった成長条件の関数として半導体表面構造を予測する理論手法、とりわけ量子論に基づくアプローチの開拓が重要である。

2. 研究の目的

温度、分子線圧力等のエピタキシャル成長条件の関数としての半導体表面状態図予測に向けた手法の確立、それらの表面上に形成されるナノワイヤ (NW)、積層欠陥四面体 (SFT) 等のナノ構造形成過程への展開を研究の目的とする。温度、分子線圧力を考慮するために、気相原子、分子の化学ポテンシャルを新たに計算手法に導入し、第一原理計算と組み合わせて半導体表面での原子、分子の安定性を評価することで半導体表面状態図を作成する。さらに第一原理計算のみならず、経験的原子間ポテンシャルを用いたナノ構造形成エネルギー計算、モンテカルロシミュレーションから、各種ナノ構造の安定性を検討し、安定なナノ構造形成の指針を探る。以上の結果を、ボンドエンジニアリングの視点から総括し、ナノテクノロジー分野における新ナノ物質創製に資する。

3. 研究の方法

(1) 表面状態図

ナノ構造形成において重要な表面である GaAs(001), GaAs(111), InP(111), GaN(0001) 表面を対象として、我々が提案した量子統計化学手法に基づく気相原子、分子の化学ポテンシャル計算と吸着エネルギーの第一原理計算 (量子論的アプローチ) により、半導体表面上での原子、分子の吸着・脱離を温度 T 、分子線圧力 p の関数として評価する (図 1)。吸着・脱離による表面原子種と原子配列の変化が生じる T , p を相境界として状態図を作成する。この手法を用いることで、各種半導体における表面状態図および GaAs(111)B 面上での成長機構に関する検討を行う。また GaAs(111)A 面上の Si ドーピング機構への適用についても検討する。表面構造安定性の物理的解釈においては、ボンドエンジニアリングの観点から、経験的原子間ポテンシャルおよび表面ダングリングボンド中の電子数に注目した電子計数モデル (ECM) を用いて議論を行う。

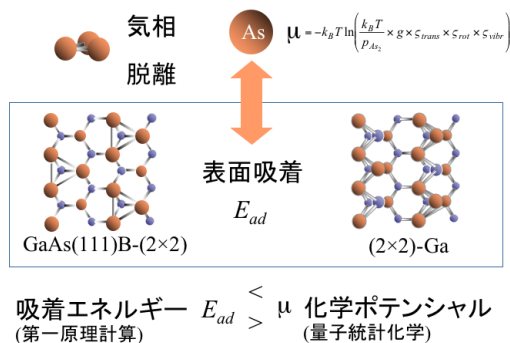


図 1 量子論的アプローチ

(2) ナノ構造形成機構

上記経験的原子間ポテンシャルおよび ECM に基づき、表面を含む系のエネルギーを評価することで NW 構造の NW 径依存性について詳細に検討する。上記エネルギー項に基づくモンテカルロ (MC) シミュレーションにより、有限温度 T における回転双晶形成の動的過程と NW 径、さらには選択成長、気相-液相-固相 (VLS) 成長との関連について検討を行う。また VLS 成長における Au 触媒と GaAs-NW 間の界面エネルギーを第一原理計算により計算することで、VLS 成長における回転双晶形成機構解明を図る。

さらに NW に加えて、量子ドット応用が期待されている GaAs(111) 面上に形成される InAs-SFT を対象に、経験的原子間ポテンシャルによる大規模計算から、系のエネルギーの膜厚依存性を評価し、その形成機構を明らかにする。具体的には、コヒーレント成長、界面転位形成、SFT 形成の InAs 薄膜のエネルギー比較を行い、特にひずみ緩和に注目して形成機構を議論する。

(3) 薄膜多形構造形成機構

これまでに示してきた量子論的アプローチ、経験的原子間ポテンシャル、MC シミュレーションを用いて、4H-SiC(11-20) 表面上の AlN 薄膜原子配列について検討を行う。具体的には、量子論的アプローチにより表面上の Al 原子、N 原子の吸着・脱離に関する状態図作成、吸着条件下でのマイグレーションポテンシャル計算を行い、成長素過程の基礎データを集積する。これらのデータを経験的原子間ポテンシャル、ECM に基づくエネルギー項に変換することで MC シミュレーションを実施し、AlN 単原子層内の原子配列予測を行う。特に、新たな成長条件として III/V 比を導入して、実験結果と比較可能にすると共に、4H-SiC(11-20) 表面上の AlN 薄膜における構造多形の成因を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 表面状態図

GaAs(001) 表面状態図計算の結果、(2×4) 表面と c(4×4) 表面の相境界を半定量的に再現すると共に、As₂ 雰囲気下で出現する表面 As ダイマーから成る c(4×4) β 表面が As₄ 雰囲気下では出現しないことを見いだした。これは実験結果と定性的に一致している。さらに、昇温に伴う c(4×4) α 表面から (2×4) β 表面への変化において中間相としての (2×4) γ 表面が重要な役割を果たしていることを明らかにし、表面構造相転移の過程で Ga 原子の供給が不可欠であることを示した。

さらに As₂ 雰囲気下での GaAs(111)B 表面状態図について検討を行った (図 2)。図 2(a) から As トライマーを含む (2×2) 表面は、基板

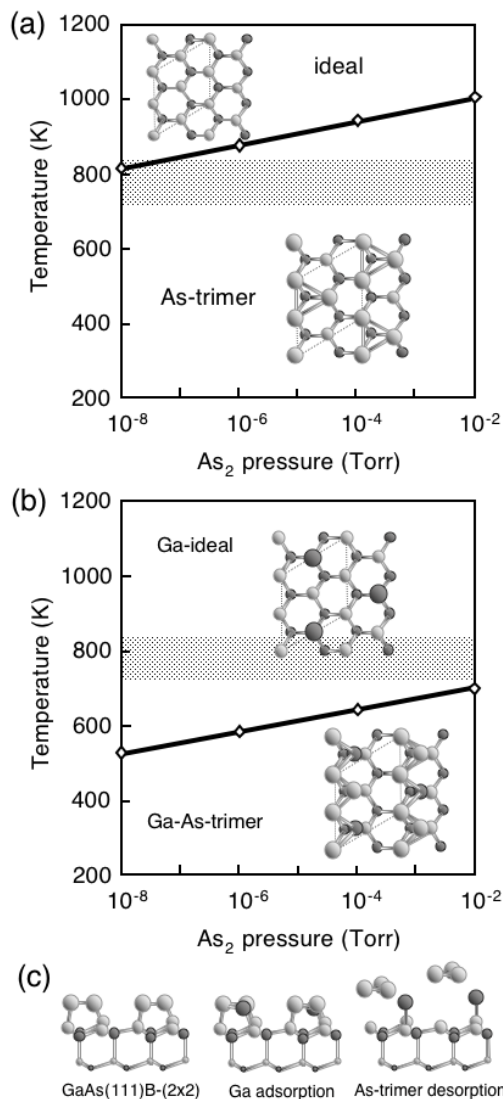


図2 GaAs(111)B 表面状態図

温度~800-1000 K 以下の領域において安定であり、As トライマーを含む(2×2)表面が観察される基板温度領域 (図中陰影部) とよく一致している。この温度領域が MBE 成長の温度領域と一致することを考えると、この過剰な As トライマーは、アンアチサイト欠陥を誘起して理想的な GaAs 形成を阻害すると考えられる。一方図 2 (b) は、 As_2 雰囲気中で Ga 原子が吸着した状態での As トライマーの吸着、脱離の状況を示したものである。Ga 原子が吸着した状態では、As トライマーが保持される基板温度領域の上限が、Ga 原子が存在しない場合の~800-1000 K から~560-710 K へと大きく低下している。これは、Ga 原子が吸着した場合の As トライマーの脱離エネルギー (3.6 eV) が、Ga 原子が存在しない場合の値 (5.4 eV) に比べて小さいことに起因している。この結果は、MBE 成長温度領域において、最早 As トライマーは保持されないことを示唆しており、GaAs 成長においては Ga

原子の吸着が As トライマーの脱離という形でストイキオメトリを調整 (セルフサーフアクタント) していると考えられる。その様子を模式的に図 2 (c) に示す。

これらに加えて P_2 , H_2 雰囲気下での InP (111)A 表面状態図計算を行い、STM 像のシミュレーションも含めて、 H_2 による表面の安定化を指摘し、従来の実験結果の解釈に新たな知見を見いだした。さらに Ga 雰囲気下での GaN (0001) 表面状態図計算では、成長条件の下で安定構造と考えられていた pseudo-(1×1) 表面と (2×2) 表面の中間に新たな (1×1) 表面の出現を予測し、STM 観察により実験的に見いだされた ghost island の出現と密接に関連していることを明らかにした。また GaAs(111)A 表面上での Si ドープ GaAs 薄膜における成長条件による n, p 伝導形制御についても有意な知見を得ている。以上のように量子論的アプローチによる表面状態図計算を行うことで、これまで物理的解釈が困難であった表面関連の現象を現実的な成長条件下で定量的に理解することを可能とした。

(2) ナノ構造形成機構

InP ナノワイヤ (NW) におけるウルツ鉱 (WZ) 構造と閃亜鉛鉱 (ZB) 構造のエネルギー差の NW 径依存性を計算した結果、バルクでは ZB 構造をもつ InP を NW とすることで約 7 nm のワイヤ径まで準安定構造である WZ 構造が安定となることを明らかにした。これは選択成長 InP-NW が WZ 構造をもつという実験結果と一致している。この現象は、安定形状である六角柱 NW において、エネルギー的に不利な表面ダングリングボンド数が ZB 構造で多く、WZ 構造で少ないという幾何学的制約から定性的に理解することができる。一方 VLS 成長では、WZ 構造ではなく NW 径に依存した回転双晶を形成することが TEM 観察および計算結果から明らかにされている。図 3 は、MC シミュレーションにより得た、回転双晶周期 P の結果である。我々の第一原理計算結果に基づく Au 触媒の周縁が成長を支配するという VLS 成長モデルを仮定したシミュレーション結果 (Type C) は、実験結果 (Expt.) と定量的に一致している。

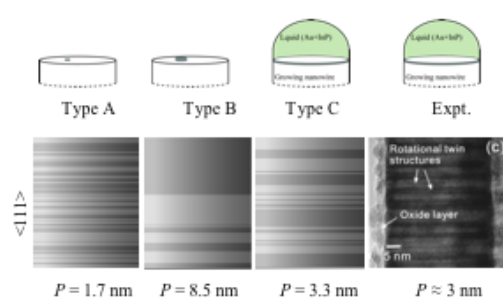


図3 InP-NW における回転双晶周期

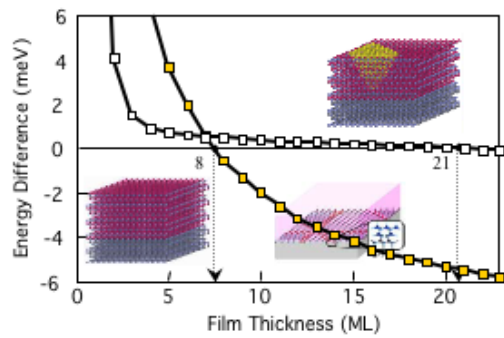


図4 GaAs(111)基板上のInAs-SFT形成

図4は、GaAs(111)基板上InAs薄膜における積層欠陥四面体(SFT)形成を、コヒーレント成長InAs薄膜、ミスフィット転位ネットワークを含むInAs薄膜との相対的な安定性の立場から検討した結果である。GaAs(111)基板上InAs薄膜においては、膜厚8 MLまではコヒーレント成長薄膜が、9 MLを超えるとミスフィット転位を含む薄膜が安定となることがわかる。一方、SFTを含む薄膜は21 MLを超えた時点でコヒーレント成長薄膜より安定となる。これは、積層欠陥を形成してSFT領域を表面方向に持ち上げることで、格子不整合に伴うひずみを緩和することに起因している。すなわちSFTは、薄膜中のひずみを表面に局在させることで安定化されており、ミスフィット転位と同様にひずみ緩和の結果形成され则认为することができる。また10 ML付近でのSFTを含む薄膜とコヒーレント成長、ミスフィット転位を含む薄膜とのエネルギー差が1 meV/atom程度であることを考えると、SFTは準安定状態として出現していると考えられる。

(3) 薄膜多形構造形成機構

4H-SiC(11-20)表面上のAlN薄膜はIII/V比により、構造が4Hあるいは2Hとなることが実験的に見いだされている。量子論的アプローチによる4H-SiC(11-20)表面上の1個のAl原子あるいはN原子の吸着・脱離の計算結果は、Al原子は4H格子位置近傍に安定に存在するのにに対し、N原子は特定の格子間位置以外では脱離することを示唆している。図5(a)は、4H-SiC(11-20)表面上に1個のN原子が予め格子間位置に存在している際のAl原子のマイグレーションポテンシャルエネルギーを、図5(b)は、1個のAl原子が予め格子間位置に存在しているときのN原子のエネルギーを、それぞれ示している。図5(a)からAl原子はN原子が予め吸着していても、容易にマイグレーションして依然として4H格子位置近傍を占有する可能性が大きいことがわかる。一方Al原子が予め吸着している場合には、N原子はマイグレーションが困難で、

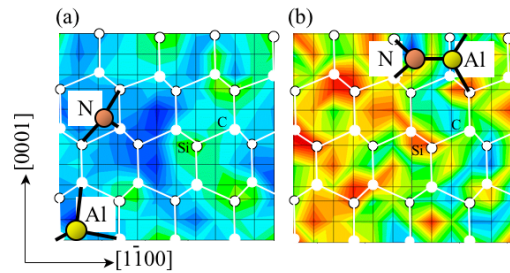


図5 4H-SiC(11-20)上吸着原子のマイグレーションポテンシャル

格子間位置でAl原子とダイマー構造を形成して安定化することが予測される。これらの知見に基づいたMCシミュレーション結果は、Al-rich条件において4H-AlN薄膜が形成されること、一方N-rich条件下では4H-SiC(11-20)表面にもかかわらず2H-AlN薄膜が出現することを示唆している。これらの結果は実験結果と定性的に一致しており、表面状態図計算で用いた量子論的アプローチの薄膜形成過程ひいてはナノ構造形成過程への有用性を示す結果である。

(4) まとめ

ボンドエンジニアリング概念に基づく量子論的アプローチを核とした計算科学手法により、半導体表面状態図予測、ナノ構造形成機構、薄膜多形構造形成機構に関する検討を行った。その結果、成長条件である温度、分子線圧力の関数として各種半導体について表面構造予測を可能とした。またナノ構造としてNW、SFTにおける構造形成機構を明らかにするとともに、以上のアプローチの統合として4H-SiC(11-20)表面上のAlN薄膜における多形の出現を、温度、分子線圧力に加えて新たにIII/V比を考慮することで予測することを可能とした。これにより、ボンドエンジニアリング概念に基づく量子論的アプローチがナノ構造形成機構解明に有効な手法であることを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計19件)

1. T. Ito, T. Akiyama, and K. Nakamura, "Ab initio-based approach to structural change of compound semiconductor surfaces during MBE growth", J. Cryst. Growth 311, 698-701 (2009) 査読有.
2. T. Akiyama, T. Kondo, H. Tatematsu, K. Nakamura, and T. Ito, "Ab initio-based approach to reconstructions of the InP(111)A surface: Role of hydrogen atoms passivating surface

- dangling bonds", Phys. Rev. B 78, 205318-1-7 (2008) 査読有.
3. T. Ito, T. Kanno, T. Akiyama, K. Nakamura, A. Konno, and M. Suemitsu, "Empirical potential approach to the formation of 3C-SiC(111)/Si(110)", Appl. Phys. Express 1, 111201-1-3 (2008) 査読有.
 4. T. Akiyama, K. Nakamura, and T. Ito, "Structures and electronic properties of Si nanowires grown along the [110] direction: Role of surface reconstruction", Surf. Sci. 602, 3033-3037 (2008) 査読有.
 5. Y. Haneda, T. Akiyama, K. Nakamura, and T. Ito, "Theoretical investigations for zinc blende-wurtzite polytypism in GaAs layers at Au/GaAs(111) interfaces", Appl. Surf. Sci. 254, 7746-7749 (2008) 査読有.
 6. T. Yamashita, K. Sano, T. Akiyama, K. Nakamura, and T. Ito, "Theoretical investigations on the formation of wurtzite segments in group III-V semiconductor nanowires", Appl. Surf. Sci. 254, 7668-7671 (2008) 査読有.
 7. T. Ito, T. Akiyama, and K. Nakamura, "An *ab initio*-based approach to phase diagram calculations for GaAs (001)-(2x4) γ surfaces", Appl. Surf. Sci. 254, 7663-7667 (2008) 査読有.
 8. T. Ito, T. Nakamura, T. Akiyama, and K. Nakamura, "An *ab initio*-based approach to phase diagram calculations for GaN(0001)", Appl. Surf. Sci. 254, 7659-7662 (2008) 査読有.
 9. H. Tatematsu, K. Sano, T. Akiyama, K. Nakamura, and T. Ito, "Ab initio-based approach to initial growth processes on GaAs(111)B-(2 \times 2) surfaces: Self-surfactant effect of Ga adatoms revisited", Phys. Rev. B 77, 233306-1-4 (2008) 査読有.
 10. T. Akiyama, A.J. Freeman, K. Nakamura, and T. Ito, "Electronic structures and optical properties of GaN and ZnO nanowires from first principles", J. Phys.: Conference Series 100, 052056-1-4 (2008) 査読有.
 11. T. Akiyama, K. Sano, K. Nakamura and T. Ito, "An empirical interatomic potential approach to structural stability of ZnS and ZnSe nanowires", Jpn. J. Appl. Phys. 46, 1783-1787 (2007) 査読有.
 12. T. Ito, T. Akiyama, and K. Nakamura, "A simple systematization of structural stability for A^NB^{8-N} compounds", Jpn. J. Appl. Phys. 46, 345-347 (2007) 査読有.
 13. S. Maeda, T. Akiyama, K. Nakamura and T. Ito, "Orientation and size dependence on structural stability in silicon nanowires: A transferable tight-binding calculation study", J. Cryst. Growth 301-302, 871-875 (2007) 査読有.
 14. K. Sano, T. Akiyama, K. Nakamura and T. Ito, "A Monte Carlo simulation study of twinning formation in InP nanowires", J. Cryst. Growth 301-302, 862-865 (2007) 査読有.
 15. H. Joe, T. Akiyama, K. Nakamura, K. Kanisawa and T. Ito, "An empirical potential approach to the structural stability of InAs stacking-fault tetrahedron in InAs/GaAs(111)", J. Cryst. Growth 301-302, 837-840 (2007) 査読有.
 16. T. Akiyama, K. Nakamura, and T. Ito, "Stacking sequence preference of pristine and hydrogen-terminated Si nanowires on Si(111) substrates", Phys. Rev. B 74, 033307-1-4 (2006) 査読有.
 17. T. Akiyama, K. Nakamura, and T. Ito, "Structural stability and electronic structures of InP nanowires: Role of surface dangling bonds on nanowire facets", Phys. Rev. B 73, 235308-1-6 (2006) 査読有.
 18. T. Ito, K. Sano, T. Akiyama, and K. Nakamura, "A simple approach to polytypes of SiC and its application to nanowires", Thin Solid Films, 508, 243-246 (2006) 査読有.
 19. T. Akiyama, K. Nakamura, and T. Ito, "An empirical potential approach to zinc blende polytypism in group III-V semiconductor nanowires", Jpn. J. Appl. Phys. 45, L275-L278 (2006) 査読有.
- [学会発表] (計 22 件)
1. 秋山亨, 中村浩次, 伊藤智徳, 蟹澤聖, "InAs(111)A 表面上の In 吸着原子に起因する電子状態の理論検討", 日本物理学会第 63 回年次大会, 2009 年 3 月 28 日, 東京.
 2. T. Akiyama, K. Nakamura, T. Ito, J.H. Song, and A.J. Freeman, "Stability of Mg-incorporated InN surfaces: First-principles study", American Physical Society March Meeting, 2009 年 3 月 18 日, Pittsburgh.
 3. T. Yamashita, T. Akiyama, K. Nakamura, and T. Ito, "Theoretical investigation on the structural stability of GaP nanowires with {111} facets", The 4th Vacuum and Surface Science Conference of Asia and Australia, 2008 年 10 月 29 日, 松江.
 4. T. Akiyama, T. Kondo, K. Nakamura, and T. Ito, "An *ab initio*-based approach to reconstructions of the InP(111)A surfaces", The 4th Vacuum and Surface Science Conference of Asia and Australia, 2008 年 10 月 29 日, 松江.
 5. T. Ito, T. Akiyama, K. Nakamura, and T. Ito, "Systematic theoretical investigation for adsorption behavior of Al and N atoms on 4H-SiC(11-20) surfaces", The 4th Vacuum and Surface Science Conference of Asia and Australia, 2008 年 10 月 28 日, 松江.
 6. H. Tatematsu, T. Akiyama, K. Nakamura, and

- T. Ito, "An ab initio-based approach to adsorption-desorption behavior of Si atoms on GaAs(111)A-(2×2) surfaces", The 4th Vacuum and Surface Science Conference of Asia and Australia, 2008 年 10 月 28 日, 松江.
7. 秋山 亨, 羽田 優也, 中村 浩次, 伊藤 智徳, "Au/GaAs(111)界面における GaAs 層の構造安定性に関する理論検討", 2008 年秋季第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008 年 9 月 3 日, 春日井.
 8. T. Ito, H. Joe, T. Akiyama, and K. Nakamura, "An empirical potential approach to the formation of InAs stacking-fault tetrahedron in InAs/GaAs(111)", International Conference on Electronic Materials 2008, 2008 年 7 月 30 日, Sydney.
 9. T. Ito, T. Akiyama, and K. Nakamura, "An ab initio-based approach to the stability of GaN(0001) surfaces under Ga-rich conditions", The 2nd International Symposium on Growth of III-Nitrides, 2008 年 7 月 7 日, 修善寺.
 10. T. Ito, T. Akiyama, and K. Nakamura, "Ab initio-based approach to structural change of compound semiconductor surfaces during MBE growth", The 4th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology, 2008 年 5 月 23 日, 仙台.
 11. 秋山 亨, 羽田 優也, 中村 浩次, 伊藤 智徳, "Au/GaAs(111)界面におけるウルツ鉱構造 GaAs 層の形成に関する理論検討", 2008 年春季第 55 回応用物理学関係連合講演会, 2008 年 3 月 27 日, 船橋.
 12. 伊藤 智徳, "ナノエピタキシーの物理的理解", 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 23 日, 東大阪.
 13. T. Akiyama, K. Nakamura, and T. Ito, "Structure and electronic properties of silicon nanowires grown along the [110] direction: Role of surface reconstructions", American Physical Society March Meeting, 2008 年 3 月 10 日, New Orleans.
 14. T. Yamashita, K. Sano, T. Akiyama, K. Nakamura, and T. Ito, "Theoretical investigations on the formation of wurtzite segments in group III-V semiconductor nanowires", 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, 2007 年 11 月 13 日, 東京.
 15. T. Ito, T. Akiyama, and K. Nakamura, "An ab initio-based approach to phase diagram calculations for GaAs(001)-(2×4) γ surfaces", 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, 2007 年 11 月 13 日, 東京.
 16. T. Akiyama, K. Nakamura, T. Ito, and A.J. Freeman, "First-principles study of electronic structures and optical properties of GaN and ZnO nanowires", 13th International Conference on Surface Science, 2007 年 7 月 4 日, Stockholm.
 17. 秋山 亨, 佐野 孝典, 中村 浩次, 伊藤 智徳, "InP ナノワイヤにおける回転双晶形成に関する理論検討", 2007 年春季第 54 回応用物理学関係連合講演会, 2007 年 3 月 28 日, 相模原.
 18. 伊藤 智徳, 秋山 亨, 佐野 孝典, 中村 浩次, "GaAs(001)-(2×4) γ 表面構造安定性に関する基本検討", 2007 年春季第 54 回応用物理学関係連合講演会, 2007 年 3 月 28 日, 相模原.
 19. T. Akiyama, K. Nakamura, T. Ito, and A.J. Freeman, "Electronic structures and optical properties of GaN and ZnO nanowires", American Physical Society March Meeting, 2007 年 3 月 7 日, Denver.
 20. S. Maeda, T. Akiyama, K. Nakamura, and T. Ito, "Orientation and size dependence on structural stability in silicon nanowires: A transferable tight-binding calculation study", 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, 2006 年 9 月 5 日, 東京.
 21. H. Joe, T. Akiyama, K. Nakamura, and T. Ito, "An empirical potential approach to the structural stability of InAs stacking-fault tetrahedron in InAs/GaAs(111)", 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, 2006 年 9 月 5 日, 東京.
 22. 伊藤 智徳, 秋山 亨, 中村 浩次, "イオン性を用いた $A^{8-N}B^N$ 化合物の安定構造状態図作成への簡単なアプローチ", 2006 年秋季第 67 回応用物理学学会学術講演会, 2006 年 8 月 29 日, 相模原.
 22. T. Akiyama, K. Nakamura, and T. Ito, "Structures and energetics of ZnO, ZnS and ZnSe nanowires: An empirical interatomic potential approach", 26th International Conference on the Physics of Semiconductors, 2006 年 7 月 26 日, Vienna.
- 〔図書〕(計 1 件)
1. 妹尾 允史, 伊藤 智徳, "材料デバイス工学", 分担執筆 2 章(16-47), 4 章, 5 章(91-147), コロナ社, 2008 年.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
伊藤 智徳 (ITO TOMONORI)
三重大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 80314136
 - (2) 研究分担者
秋山 亨 (AKIYAMA TORU)
三重大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 40362363