GaAs 表面における Ga 原子のふるまい： 量子論的アプローチ

伊藤智徳・秋山 亨・中村浩次

三重大学大学院工学研究科 ☎ 514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

(2008 年 8 月 27 日受理)

An Ab Initio-based Approach to the Behavior of Ga Atoms on the GaAs Surfaces

Tomonori ITO, Toru AKIYAMA and Kohji NAKAMURA

Department of Physics Engineering, Mie University
1577 Kurima-Machiya, Tsu, Mie 514-8507

(Received August 27, 2008)

Adsorption-desorption behavior of Ga on GaAs surfaces such as (001) and (111)B is systematically investigated using our ab initio-based approach, which incorporates chemical potentials in the gas phase of Ga atom or As molecules as a function of temperature and their beam equivalent pressure. Surface phase diagram calculations of the (001)-c(4×4) reveal that the c(4×4) α consisting of Ga-As dimers independently appears on As₂ and As₄ in the gas phase, whereas the c(4×4) β with As dimers is destabilized under As₄. On the basis of this finding, surface phase transition between c(4×4) and (2×4) β 2 is discussed in terms of 0.5 monolayer of Ga predeposition. Furthermore, surface phase diagram calculations of the (111)B-(2×2) imply that Ga adsorption induces As trimer desorption on the (2×2) surface. This suggests that Ga adatom acts as a self-surfactant atom to maintain layer-by-layer growth of GaAs without anti-site defect formation.

KEYWORDS : GaAs, surface phase diagram, adsorption-desorption behavior of Ga, self-surfactant, ab initio-based approach

1. はじめに

ちょうど 10 年前「GaAs(001) 表面薄膜成長初期過程の量子論的シミュレーション」¹⁾と題する拙文を本会誌に寄稿させていただいた。そこでは、第一原理計算とモンテカルロ法を組み合わせ、GaAs(001) 表面での Ga 原子の振る舞いと成長初期過程の関係を議論している。その 5 年後には、寒川氏との共著で「GaAs 表面構造の安定性に対する量子論的アプローチ」²⁾と題して、当時新たに提案した気相中原子の化学ポテンシャルを考慮した研究紹介をしている。そのまた 5 年後に今回の依頼をいただいたわけで、「5 年くらいが研究の節目なのかなあ」と妙な感慨を抱きながら筆を執っている。閑話休

題。

半導体とりわけ化合物半導体は多様な表面構造をもつことが知られている。これは、カチオン原子とアニオン原子という相異なる原子が存在することに加えて、温度、分子線圧力に代表される雰囲気にも敏感であることに起因している。化合物半導体表面の中でも特に GaAs(001) 表面は、表面科学のみならずデバイス応用の観点から、実験的にも、理論的にも精力的に研究が行われてきた表面である。その一般的な GaAs(001) 表面ですら、構造に関する 10 年前の常識が今日では覆ってしまっている例がいくつかある。その代表的な事例として、c(4×4) 表面の最表面ダイマー種があげられる。この c(4×4) 表面は As 過剰雰囲気で見いだされる表面であることもあって、D.K. Biegelsen らによる初期の表面構造の解析³⁾、その後の走査型トンネル顕微鏡 (Scan-

ning Tunneling Microscopy, STM) 等による観察⁴⁻⁶⁾, 第一原理計算結果⁷⁻⁹⁾から, $c(4 \times 4)$ 表面の最表面ダイマーは As 原子から構成されていると信じられてきた。しかしながら, Ohtake らによる STM 観察は, むしろ Ga 原子と As 原子から構成される最表面ダイマーが一般的で, 雰囲気依存して従来の As 原子から構成されるダイマーも出現することを明らかにした¹⁰⁾。このことは, As 過剰雰囲気であっても Ga 原子が最表面に存在する可能性があること, ひいては表面における雰囲気を考慮することの重要性を示唆している。

翻って筆者らが本会誌に寄稿した内容を見ると, 10 年前は GaAs(001) 表面構造を予め仮定した Ga 原子の振る舞いに関する研究, 5 年前は表面構造を予め仮定してはいるものの, 温度, Ga 分子線圧力といった雰囲気を考慮した Ga 原子の吸着, 脱離に関する研究について紹介している。本稿では, 温度, As 分子線圧力も考慮した研究を対象にその後の進展について紹介する。具体的には, Ga 原子の吸着, 脱離から表面構造予測, さらに Ga 原子吸着に誘起される表面構造変化ひいては GaAs 成長過程予測等, 量子論的アプローチに基づく最近の研究内容を紹介する¹¹⁻¹⁴⁾。

2. 計 算 方 法

原子 (分子) の表面上の吸着, 脱離は, 1 原子 (分子) 当たりの理想気体の自由エネルギー, すなわち気相中の原子 (分子) の化学ポテンシャル μ_{gas} と基板表面の原子 (分子) の化学ポテンシャル μ_{solid} を比較することで議論することができる。すなわち μ_{gas} が μ_{solid} より小さければ吸着原子 (分子) は気相中でより安定となるため脱離が生じ, 一方 μ_{gas} が μ_{solid} より大きければ吸着原子 (分子) は表面でより安定となるため吸着が優位になる。ここで, 気相中の Ga 原子, As_n 分子 ($n=2, 4$) の化学ポテンシャルは, 量子統計化学に基づいて次式で与えられる^{2, 13, 15-18)}。

$$\mu_{\text{Ga-gas}} = -kT \ln[g \times \xi_{\text{trans}}] \quad (1)$$

$$\mu_{\text{As}_n\text{-gas}} = -kT \ln[g \times \xi_{\text{trans}} \times \xi_{\text{rot}} \times \xi_{\text{vibr}}] \quad (2)$$

$$\xi_{\text{trans}} = \frac{kT}{p} \left(\frac{2\pi m k T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

ここで, ξ_{trans} , ξ_{rot} , ξ_{vibr} はそれぞれ並進, 回転, 振動の分配関数である。また式中の定数 k , g , m , h はそれぞれボルツマン定数, 電子の基底状態に存在する量子重度, 原子 (分子) の質量, プランク定数である。式 (3) は並進の分配関数であり, 温度 T (以降基板温度と表記) と共に原子 (分子) の圧力 p (以降分子線圧力と表記) の関数として表される。 ξ_{rot} , ξ_{vibr} の詳細については参考文献^{15, 16)}を参照されたい。一方, 基板表面の原

子 (分子) の化学ポテンシャル μ_{solid} は, その脱離エネルギー E_{de} を用いて $\mu_{\text{solid}} = -E_{\text{de}}$ として与えられる。ここで E_{de} は第一原理密度汎関数法を用いて, 基板表面に原子 (分子) が吸着している状態での系のエネルギーと, 原子 (分子) を基板表面から真空側に引き離してエネルギー変化がなくなった状態での系のエネルギーを算出し, 両者を比較することで求められる。本研究では E_{de} の算出において, 局所密度近似 (Local Density Approximation, LDA) に基づく非経験的擬ポテンシャル法を用いた。これら μ_{gas} と μ_{solid} を比較することで Ga 原子の吸着, 脱離を基板温度 T ならびに Ga あるいは As 分子線圧力 p の関数として調べ, 表面原子配列の変化を明らかにする。さらに必要に応じて, エレクトロンカウンティングモンテカルロ (Electron Counting Monte Carlo, ECMC) 法^{1, 19)}, 非経験的擬ポテンシャル法による全エネルギー計算も併用して最終的な原子配列を決定する。

3. GaAs(001) 表面における Ga 原子のふるまい: 表面ダイマー種の変化

GaAs(001) 表面は, 基板温度と As 分子線圧力に依存して, 多様な表面構造をもつことが知られている。それらの内, $c(4 \times 4)$ 表面と (2×4) 表面は, 分子線エピタキシー (Molecular Beam Epitaxy, MBE), 有機金属気相エピタキシー (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, MOVPE) において重要な表面であることから, $c(4 \times 4)$ 表面と (2×4) 表面間の構造相転移も含めて実験, 理論の両面から研究が行われてきた。代表的な $c(4 \times 4)$ 表面と (2×4) 表面の模式図を Fig. 1 に示す。これらの内 Fig. 1 (a) は, Ga 原子と As 原子から構成される最表面ダイマーをもつ $c(4 \times 4)\alpha$ 表面の模式図である。この表

Fig. 1. Schematic of GaAs(001) surface structures such as (a) $c(4 \times 4)\alpha$, (b) $c(4 \times 4)\beta$, and (c) $(2 \times 4)\beta_2$ considered in this study. Open and closed circles denote As and Ga, respectively.

Fig. 2. Calculated surface phase diagram for the GaAs(001)-c(4×4) surfaces as functions of temperature and (a) As₂ pressure and (b) As₄ pressure. Experimental results (Expt.) are also shown in this figure. Open and closed circles denote As and Ga, respectively.

面における最表面ダイマーは、当初 Fig. 1 (b) に示す As 原子のみから構成される c(4×4)β 表面と信じられていた。しかしながら、既述の通り Ohtake らの STM 観察から、むしろ c(4×4)α の方が一般的であることが示されている¹⁰⁾。一方、Fig. 1 (c) は c(4×4) 表面よりも高温で出現する (2×4)β₂ 表面であり、最表面ダイマーは As 原子のみから構成されている。

Fig. 2 は、c(4×4) 最表面ダイマー種の基板温度と As₂ および As₄ 分子線圧力依存性の計算結果を示したものである¹³⁾。Fig. 2 (a) に示す As₂ 雰囲気では、基板温度 400～500 K 以下において c(4×4)β 表面が、400～500 K から 700 K の領域で c(4×4)α 表面が安定であることがわかる。高温領域での As ダイマーの不安定化、Ga-As ダイマーの安定化は、As ダイマーの脱離エネルギー (1.78 eV) が Ga-As ダイマーの脱離エネルギー (4.31 eV) よりも小さいことに起因している。一方 Fig. 2 (b) に示す As₄ 雰囲気では、c(4×4)β 表面は出現しない。これは、As₄ 雰囲気では気相中での As₄ 分子が安定となることから、相対的に最表面 As ダイマーが不安定化さ

Fig. 3. Calculated surface phase diagram for GaAs(001)-c(4×4)α, γ, δ and ε with different surface dimers (a) and schematic of the simulated results for the surface transition from three kinds of the c(4×4) to (2×4) surfaces (Type 1 and Type 2) appearing via a 0.5 ML of Ga deposition (b). Open and closed circles denote As and Ga, respectively.

れることに起因しており、実験結果とも定性的に一致している^{20,21)}。さらに c(4×4) の対称性を保ったまま昇温していくと、狭い領域に存在する一つの Ga ダイマーと二つの Ga-As ダイマーから成る γ 表面を経由して、二つの Ga ダイマーと一つの Ga-As ダイマーから成る δ 表面、三つの Ga ダイマーから成る ε 表面へと遷移していく (Fig. 3 (a) 参照)。この過程において、c(4×4) 表面が (2×4)β₂ 表面へと相転移すると考えられる。

4. GaAs(001) 表面における Ga 原子のふるまい：表面構造相転移

Sasaki と Yoshida は四重極質量分析計 (Quadrupole Mass Spectrometry, QMS) と高エネルギー反射電子線回折 (Reflection High Energy Electron Diffraction, RHEED) を用いて、基板温度 465°C において GaAs(001) 表面に

おけるトリメチルガリウム (Trimethylgallium, TMG) の振る舞いを調べた²²⁾。そこで彼らは、 $c(4 \times 4)$ 表面に 0.46 原子層分の Ga を供給した表面における TMG の振る舞いが、 (2×4) 表面に 0.018 原子層分の Ga を供給した表面における振る舞いと等価であることを見いだした。また Shiraishi らは、 $c(4 \times 4)$ 表面と (2×4) 表面の共存状態においては、 (2×4) 表面の方が $c(4 \times 4)$ 表面よりも高い位置に存在することを STM 観察と第一原理計算から明らかにしている²³⁾。さらに Ito と Shiraishi は ECMC シミュレーションにより、 $c(4 \times 4)\beta$ 表面に Ga を供給すると (2×4) 表面に相転移する可能性を示している^{24, 25)}。これらの結果は、Ga の供給が $c(4 \times 4)$ 表面と (2×4) 表面間の構造相転移と密接に関連していることを示唆している。

以上の知見と Fig. 3 (a) に示す状態図の計算結果に基づいて、相転移が生じると考えられる基板温度 ~ 700 K 近傍における三種類の $c(4 \times 4)$ 表面 (α , γ , δ 表面と表記) に、0.5 原子層分の Ga を供給したときの表面構造変化を ECMC シミュレーションにより予測した。その結果を Fig. 3 (b) に示す¹²⁾。いずれの場合も (2×4) 表面として、原子配列の相異なる Type 1 と Type 2 の構造が出現する。非経験的擬ポテンシャル計算により得たこれらの構造のエネルギー差 ΔE (eV/atom) から、負の値をもつ Ga-As ダイマーから成る $c(4 \times 4)\alpha$ 表面のみが、Type 2 に対応する通常の $(2 \times 4)\beta_2$ 表面への構造相転移をもたらす可能性があることがわかる。実験的にも $c(4 \times 4)\alpha$ 表面から (2×4) 表面へと変化することが示されており^{20, 21)}、本計算結果は妥当な結果と考えられる。ただし、この (2×4) Type 2 表面ダイマーには表面 3 層目に Ga-As ダイマーが含まれる点が、通常の $(2 \times 4)\beta_2$ 表面と異なる点に注意されたい。この不一致の原因については、 $c(4 \times 4)\alpha$ 表面と $(2 \times 4)\beta_2$ 表面の中間領域に出現する $(2 \times 4)\gamma$ 表面の理解が重要である²⁶⁾が、ここでは紙数の制約からこれ以上は立ち入らない。

5. GaAs (111)B 表面における Ga 原子のふるまい：セルフサーファクタント

GaAs(111)B 表面は、ナノドットやナノワイヤといったナノ構造形成に用いられる表面として注目されている^{27~32)}。Fig. 4 に過剰な As トライマーから成る GaAs(111)B- (2×2) 表面の模式図を示す。この表面に GaAs を形成しようとするとき、過剰な As トライマーの上に Ga 原子層と As 原子層が交互に積層することになり、アンチサイト欠陥が形成されストイキオメトリの維持が不可能となる。したがって GaAs 成長過程におい

Fig. 4. Schematic of top and side views of the GaAs(111)B- (2×2) surface. Gray and black circles denote As and Ga, respectively.

て、この過剰な As トライマーがどのように変化するかを明らかにすることは、エピタキシャル成長ひいてはナノ構造形成の理解において重要である。このために、 (2×2) 表面での As トライマーの吸着、脱離に注目して、 As_2 雰囲気下で表面状態図を作成した。その結果を表面構造の模式図を含めて Fig. 5 (a) に示す¹⁴⁾。この図から As トライマーを含む (2×2) 表面は、基板温度 $\sim 800 \sim 1000$ 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)^{33~36)}とも良く一致している。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 Fig. 5 (b) は、 As_2 雰囲気下で 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¹⁴⁾。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 $\sim 800 \sim 1000$ K から $\sim 560 \sim 710$ 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いる。したがって 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 (セルフサーファクタント)³⁷⁾していると考えられる。その様子を模式的に Fig. 5 (c) に示す。さらに Ga 吸着原子が増加した場合にも、As トライマーが保持される温度領域の上限は 20 K 程度しか変化せず、一個の Ga 原子の吸着がセルフサーファクタントとして十分に機能することがわかる。以上のように量子論的アプローチを用いることで、これまで GaAs(001) 表面、

Fig. 5. Calculated phase diagrams of (a) GaAs(111)B-(2×2) and (b) -(2×2) with Ga adsorbed surfaces as functions of temperature and As₂ pressure. Shaded area denotes stable region for GaAs(111)B-(2×2) obtained experimentally. Schematic of top view of various surface structures is also shown with respect to those stable regions, where gray and black circles denote As and Ga, respectively. Self-surfactant effect is schematically shown in (c).

GaAs(111)A 表面における吸着，脱離エネルギー計算から，定性的に指摘されてきたセルフサーファクタント効果を現実的な成長条件下で定量的に理解することが可能になった。

6. お わ り に

気相中原子，分子の化学ポテンシャルを考慮した量子論的アプローチに基づいて得られた，GaAs 表面における Ga 原子の振る舞いに関する最近の研究の一端を紹介してきた。この他にも (001) 表面，(n11)A 表面，さらに両者から構成される複合ファセット表面における Ga 原子の吸着，脱離，表面拡散についても系統的に検討し^{11, 38, 39)}，実験結果^{40~45)}と比較しうる示唆的な結果を得

ている。10 年前には，非経験的擬ポテンシャル計算による吸着，脱離エネルギー，マイグレーションポテンシャルの評価，それらを基礎データとして基板温度をパラメータとしたモンテカルロシミュレーションの実行が，量子論的アプローチによる研究の典型的な処方箋であった。また 5 年前には本アプローチの提案とその有用性を指摘するにとどまっていたが，今日では現実の MBE 成長条件に対応する基板温度と分子線圧力の関数として，表面上原子の振る舞いを定量的に理解することが可能になっている。同様のアプローチは GaN, SiC 等他の半導体表面にも適用可能であり，現在ドーピング過程，ナノ構造形成過程をも視野に入れた研究を進めている^{46~50)}。さてさて 5 年後はどうなっているであろうか。将来の進展に想いを馳せつつ本稿の結びとしたい。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究 (No. 18560020) によるものである。また計算の一部は自然科学研究機構計算科学研究センターおよび東京大学物性研究所の計算機を用いて実行された。

文 献

- 1) 伊藤智徳：表面科学 **19**, 43 (1998).
- 2) 寒川義裕，伊藤智徳，白石賢二，大鉢 忠，瀬瀬明伯：表面科学 **24**, 642 (2003).
- 3) D. K. Biegelsen, R. D. Bringans, J. E. Northrup and L. E. Swartz : Phys. Rev. B **41**, 5701 (1990).
- 4) A. R. Avery, D. M. Homes, J. Sudijono, T. S. Jones and B.A. Joyce : Surf. Sci. **323**, 91 (1995).
- 5) G. R. Bell, J. G. Belk, C. F. McConville and T. S. Jones : Phys. Rev. B **59**, 2947 (1999).
- 6) A. Nagashima, M. Tazima, A. Nishimura, Y. Takagi and J. Yoshino : Surf. Sci. **493**, 227 (2001).
- 7) J. E. Northrup and S. Froyen : Phys. Rev. Lett. **71**, 2276 (1993).
- 8) J. E. Northrup and S. Froyen : Phys. Rev. B **50**, 2015 (1994).
- 9) N. Moll, A. Kley, E. Pehlke and M. Scheffler : Phys. Rev. B **54**, 8844 (1996).
- 10) A. Ohtake, J. Nakamura, S. Tsukamoto, N. Koguchi and A. Natori : Phys. Rev. Lett. **89**, 206102 (2002).
- 11) T. Ito, K. Tsutsumida, K. Nakamura, Y. Kangawa, K. Shiraishi, A. Taguchi and H. Kageshima : Appl. Surf. Sci. **237**, 194 (2004).
- 12) H. Ishizaki, T. Akiyama, K. Nakamura, K. Shiraishi, A. Taguchi and T. Ito : Appl. Surf. Sci. **244**, 186 (2005).
- 13) T. Ito, H. Ishizaki, T. Akiyama, K. Nakamura, K. Shiraishi and A. Taguchi : e-J. Surf. Sci. Nanotech. **3**, 488 (2005).
- 14) H. Tatematsu, K. Sano, T. Akiyama, K. Nakamura and T. Ito : Phys. Rev. B **77**, 233306 (2008).

- 15) Y. Kangawa, T. Ito, A. Taguchi, K. Shiraishi and T. Ohachi : Surf. Sci. **493**, 178 (2001).
- 16) Y. Kangawa, T. Ito, Y.S. Hiraoka, A. Taguchi, K. Shiraishi and T. Ohachi : Surf. Sci. **507-510**, 285 (2002).
- 17) 寒川義裕, 伊藤智徳, 田口明仁, 白石賢二, 平岡佳子, 入澤寿美, 大鉢 忠 : 日本結晶成長学会誌 **29**, 57 (2002).
- 18) Y. Kangawa, T. Ito, A. Taguchi, K. Shiraishi, T. Irisawa and T. Ohachi : Appl. Surf. Sci. **190**, 517 (2002).
- 19) T. Ito and K. Shiraishi : Surf. Sci. **357/358**, 486 (1996).
- 20) A. Ohtake and N. Koguchi : Appl. Phys. Lett. **83**, 5193 (2003).
- 21) A. Ohtake, M. Ozeki, T. Yasuda and T. Hanada : Phys. Rev. B **65**, 165315 (2002).
- 22) M. Sasaki and S. Yoshida : J. Vac. Sci. Technol. B **10**, 1720 (1992).
- 23) K. Shiraishi, T. Ito, Y. Suzuki, H. Kageshima, K. Kanisawa and H. Yamaguchi : Surf. Sci. **433-435**, 382 (1999).
- 24) T. Ito and K. Shiraishi : Jpn. J. Appl. Phys. **37**, L262 (1998).
- 25) T. Ito and K. Shiraishi : Jpn. J. Appl. Phys. **37**, 4234 (1998).
- 26) T. Ito, T. Akiyama and K. Nakamura : Appl. Surf. Sci. **254**, 7663 (2008).
- 27) K. Hiruma, T. Katsuyama, K. Ogawa, M. Koguchi, H. Kakibayashi and G. P. Morgan : Appl. Phys. Lett. **59**, 431 (1991).
- 28) K. Hiruma, H. Yazawa, T. Katsuyama, K. Ogawa, K. Haraguchi, M. Koguchi and H. Kakibayashi : J. Appl. Phys. **77**, 447 (1995).
- 29) B. J. Ohlsson, M. T. Björk, M. H. Magnusson, K. Deppert, L. Samuelson and L. R. Wallenberg : Appl. Phys. Lett. **79**, 3335 (2001).
- 30) K. Kanisawa, M. J. Butcher, Y. Tokura, H. Yamaguchi and Y. Hirayama : Phys. Rev. Lett. **87**, 196804 (2001).
- 31) J. Motohisa, J. Noborisaka, J. Takeda, M. Inari and T. Fukui : J. Cryst. Growth **272**, 180 (2004).
- 32) J. Noborisaka, J. Motohisa and T. Fukui : Appl. Phys. Lett. **86**, 213102 (2005).
- 33) D. K. Biegelsen, R. D. Bringans, J. E. Northrup and L. -E. Swartz, : Phys. Rev. Lett. **65**, 452 (1990).
- 34) J. Fu, J. Kim, M. C. Gallagher, R. F. Willis and D. L. Miller : Surf. Sci. **318**, 349 (1994).
- 35) A. R. Avery, E. S. Tok and T. S. Jones : Surf. Sci. **376**, L397 (1997).
- 36) A. Ohtake, J. Nakamura, T. Komura, T. Hanada, T. Yao, H. Kuramochi and M. Ozeki : Phys. Rev. B **64**, 045318 (2001).
- 37) K. Shiraishi and T. Ito : Phys. Rev. B **57**, 6301 (1998).
- 38) K. Asano, Y. Kangawa, H. Ishizaki, T. Akiyama, K. Nakamura and T. Ito : Appl. Surf. Sci. **237**, 206 (2004).
- 39) T. Ito, K. Asano, T. Akiyama, K. Nakamura, K. Shiraishi and A. Taguchi : Appl. Surf. Sci. **244**, 178 (2005).
- 40) K. Asai, J. M. Feng, P. O. Vaccaro, K. Fujita and T. Ohachi : Appl. Surf. Sci. **159/160**, 301 (2000).
- 41) H. Yasuda and H. Ohno : Appl. Phys. Lett. **74**, 3275 (1999).
- 42) R. Nötzel, M. Ramsteiner, J. Menniger, A. Trampert, H. Schönherr, L. Däweritz and K. H. Ploog : J. Appl. Phys. **80**, 4108 (1996).
- 43) G. Biasiol, F. Reinhardt, A. Gustafsson and E. Kapon : Appl. Phys. Lett. **71**, 1831 (1997).
- 44) W. Zhou, Z. M. Zhu, F. Q. Liu, B. Xu, H. Z. Xu and Z. G. Wang : J. Cryst. Growth **200**, 608 (1999).
- 45) K. H. Ploog and R. Nötzel : Physica E **11**, 78 (2001).
- 46) Y. Kangawa, Y. Matsuo, T. Akiyama, T. Ito, K. Shiraishi and K. Kakimoto : J. Cryst. Growth **300**, 62 (2007).
- 47) Y. Kangawa, Y. Matsuo, T. Akiyama, T. Ito, K. Shiraishi and K. Kakimoto : J. Cryst. Growth **301/302**, 75 (2007).
- 48) 寒川義裕, 秋山 亨, 伊藤智徳, 白石賢二, 柿本浩一 : 日本結晶成長学会誌 **34**, 213 (2007).
- 49) T. Ito, T. Nakamura, T. Akiyama and K. Nakamura : Appl. Surf. Sci. **254**, 7659 (2008).
- 50) T. Ito, T. Akiyama and K. Nakamura : J. Cryst. Growth (in press).