

Measurement of nitrogen atom flux and growth of β -Si₃N₄ on Si(111) by rf-discharge (II)

Tadashi Ohachi, Nobuhiko Yamabe, and Motoi Wada

(Received March 25, 2010)

Indirect exposure of nitrogen (N) atoms to a surface of Si(111) substrate was realized by adsorbed (ADS) N atoms, which were in a state of local equilibrium. The ADS flux was measured by a parallel plates electrode (atom probe), which was biased negatively by the self ionization of N atoms on negatively the biased electrode. The power and pressure dependences of inductively coupled rf discharge for direct and indirect N fluxes from the rf discharge tube were measured by the atom probe. The surface steps on Si(111) were controlled by the decomposition of an SiO₂ layer and phase transformation from 1x1 to 7x7 surface reconstruction states of Si(111). The ADS N atoms reacted with Si and formed β -Si₃N₄ by interface reaction epitaxy (IRE). The surface morphology of β -Si₃N₄ was affected by the nitridation temperature and time. Flat β -Si₃N₄ surfaces on Si(111) were obtained by successive IPE of AlN with Al and N in the β -Si₃N₄.

Key words : MBE, rf-discharge, Nitridation, β -Si₃N₄, AlN,

キーワード : 分子線エピタキシー, RF 放電, 窒化, 窒化シリコン, 窒化アルミニウム

窒素原子フラックス計測と rf プラズマによる Si(111) 上 β -Si₃N₄ の成長 (II)

大鉢 忠・山邊 信彦・和田 元

1.はじめに

界面現象研究センター (Research center for interface phenomena : Recip)プロジェクト「界面微細構造制御により発現する物性の評価研究」の分担グループとしてナノ薄膜G (微細構造を制御した薄膜の物性評価) の取り組みで, 我々の研究課題を「シリコン上へのⅢ族窒化物系 (GaN, AlN, InN とそれらの混晶) 半導体ナノヘテロ界面量子井戸構造の結晶成長と物性評価」と掲げた「異種半導体界面の結晶学的構造評価と電気・光学的特性評価」研究分担の第4年目の報告である。

異なる結晶表面上へのヘテロエピタキシャル成長というテーマとして, シリコン上へのⅢ族窒

化物系半導体量子井戸構造を分子線エピタキシー法(molecular beam epitaxy : MBE)にて作製する際の準備を行ってきた¹⁻⁴⁾。2006年度にMBE成長法に必要な活性窒素の生成と放電現象, 窒化物半導体の結晶成長に必要な窒素原子生成に関した研究成果, 励起窒素分子の働きと結晶成長への応用に関する報告を行った¹⁾。2007年度の第2年目においては, 2つの放電モードの制御によって窒素励起分子 N₂^{*}と放電解離窒素原子 N+N^{*}の化学活性度の違いを利用する活性度変調マイグレーションエンハンスドエピタキシー(AM-MEE : Activity modulation migration enhanced epitaxy)を提案し, それを利用した Si 基板上への六方晶 AlN

*Department of Electrical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6329, FAX: +81-774-65-6811, E-mail: tohachi@eml.doshisha.ac.jp

と GaN エピタキシャル成長の結果についてまとめた²⁾。2008 年度第 3 年目として、放電により生成した窒素原子フラックス計測法の改良を行い、Si 表面での窒化反応による固相界面反応エピタキシャル (Interface reaction epitaxy: IRE)法による β - Si_3N_4 成長に必要な Si 表面清浄化法の開発を報告し、加え別で β - Si_3N_4 に Al を照射して IRE 法による AlN テンプレート成長⁴⁾を報告した。

本研究の対象とする Si 上に III 族窒化物を成長させる意味は、持続可能な社会システム構築を目指した研究が進む中、安価であり、大口径 Si 基板上での窒化物半導体の役割は大きい。現在利用されているサファイア基板に比し熱伝導率が 高く高出力に対応し、かつ GaN 半導体はエネルギーギャップが大きくかつ絶縁破壊電圧が大きいところから高周波、大電力対応電子素子の実現が期待されている。さらに、窒素高周波放電を利用する

Plasma assisted (PA)-MBE 成長法での成長の利点は直接照射のフラックスが超音速ジェット流になっており運動エネルギーを持つところから MOCVD 法による成長法に比し低温で成長させることができ、さらに、窒素ガスを使用することから有害化学物質を排出しない事など環境にも易しい結晶成長法と言える。また、PA-MBE 成長法は電子デバイスや光デバイスとして必要なヘテロ界面や量子井戸構造作製に際しシャープな界面を作製することが可能である点も特徴であり、出発基板の Si より出発し、一貫して同一の MBE 装置内で GaN 系量子電子、光デバイスを実現出来る可能性を持つ方法と言える。

本報告では第 3 年度に続き、窒素原子を間接に照射する吸着 N 原子の発生方法と測定方法、それを利用した Si の表面処理、ダブルバッファテンプレート用 β - Si_3N_4 の IRE による作製への応用を報告する。

2.窒素原子フラックス計測

2.1 N 高周波放電と N 原子直接及び間接照射

窒化物成長に必要な窒素原子を生成する目的で 13.56MH の誘導結合 (ICP) 高周波放電 (rf) が最も適していることは既に報告した³⁾。窒素源はアリオス社製 IRF-501IF を用い、窒素ガスは窒素ボンベか

ら供給し流量調節は Mass flow コントローラーで行う。パワーは rf 電源からマッチングボックスを介し自動マッチングをさせ出力最大に調節された後で放電コイルに投入される。

ICP-rf による放電に 2 つの放電モードが存在することも既に報告している^{2,3)}。明るい高輝度 (High Brightness : HB) 放電と暗い (Low Brightness : LB) で、放電電力と圧力 (流量) により決まる²⁾。放電では窒素分子イオン N_2^+ 、励起分子 N_2^* 、解離原子 (基底原子 N と励起原子 $\text{N}^* : \text{N} + \text{N}^*$) が生成され、LB 放電では窒素分子イオン N_2^+ と励起分子 N_2^* が生成し窒素原子は発生しない特徴がある。

ICP-rf による HB 及び LB の窒素放電いずれの場合でも、放電セルのオリフィス出口から流出して基板へ直接照射される流れは、放電管内圧力が約 50Pa であり成長室は 10^{-4} から 10^{-3} Pa であるため、超音速ジェット流 (Supersonic jet flow : SS-jet) として基板へ到達するため、MOCVD に比較してその運動エネルギー分だけ低温で成長が出来る。これを Fig. 1 に示すように、直接照射フラックスと呼ぶことにしている。また放電解離した基底レベル窒素原子 N と励起窒素原子 N^* の寿命が長く、シャッターや壁に反射して、局所平衡の原子分圧が定まり、表面に吸着 (ADS) する原子として間接的に照射させる事ができ、これ

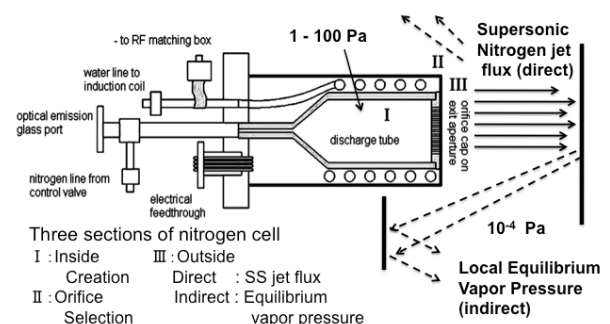


Fig. 1 Schematic drawing of three sections of a rf nitrogen source: Section I : inside ; creation of N , N^* , N_2^* , ions N^+ , N_2^+ and electrons. Section II : Orifice with small holes ; effusion of active species through orifice holes as a SS-jet, and Section III : elimination and deflection of charged particles for the SS-jet as a direct exposure flux and reflection from a wall of growth chamber as an indirect exposure flux with equilibrium vapor pressure.

を間接照射フラックスと呼ぶ。ADS による緩慢な表面反応を利用する事が出来る特徴が出てくる。この様に PA-MBE 法は窒素フラックスとして直接照射と間接照射の 2 つの方式を選べることの特徴がある。

直接照射とは窒素セルのシャッターを開けて SSjet 直接フラックスが成長基板へ照射される方式であり、間接照射とは、窒素セルから放出された窒素原子が直接基板にあらず、壁に一度以上衝突と反射をくり返し成長基板へ照射させるものである。照射量は放電電力と放電圧力により制御する。間接照射は窒素放電管の前面にあるシャッターを閉じた場合に於いても、シャッターの隙間からの漏れにより、成長室の成長基板へ窒素原子が照射される場合や、シャッターを開き成長基板はマニプレータを回転させセル等、直接フラックスが照射されないで、壁からの反射より照射されるように配する場合に実現出来る³⁾。

窒素原子フラックス測定は負電位を有する電極上の窒素原子からの自己電離現象を利用して行う。本報告では、直接照射の窒素原子測定に関して放電スペクトル計測と共に比較計測した結果を示し、間接照射の ADS 原子フラックス測定結果を報告する。

2.2 直接照射 N 原子フラックス計測

直接照射の窒素原子測定はラングミュア様電極に荷電粒子が到達しないように、荷電粒子除去電極 (eliminator) をセル出口に配して、荷電粒子が直接電極へ入射しないようし、電極へは中性の粒子 (解離窒素原子+励起と中性窒素分子) のみが入射するようにすることにより、ラングミュア様電極を用いて負電位電極への付着窒素分子の自己電離による電流測定から可能なことを提案した^{2,3)}。

成長室に取り付けのアリオス社製 IRF-501IF の放電スペクトルを放電管内圧力とスペクトルの関係を求めるため、放電管の入り口に取り付けた MKS Baratron (Type626) を利用して流量に対する圧力測定を行った結果を Fig. 2 に示す。発光スペクトルはペルチエ冷却 CCD 利用の Hamamatsu Photonics PMA-11 により計測し、1.38 sccm (80 Pa) で 500W 電力の際の HB 放電スペクトルは Fig.3 のように計測されるが、そのスペクトルの積分強度を各スペクトル

に付いて計算し、放電電力依存性を求めたのが Fig. 4 (a) でありその値の窒素原子の総計と励起窒素分子の総計を Fig. 4 (b) に示した。電力に対して原子スペクトルは基底準位への転移にあたる 747 nm 以外はほぼ直線的に増加しているのに対し、励起窒素分子スペクトル積分値は 1st ポジティブは低電力で大きく 2nd ポジティブは HB 放電ではほぼ直線的に増加していることが分かる。

直接照射 SS jet フラックス測定は Fig.5 に示す様に MBE 装置のフラックス測定用の電離真空系のグリッドを利用し、ラングミュア様電極として、セルの出口に設けた荷電粒子除去電極 (エリミネータ) に 1000 V 電位差を与えて電極に中性原子のみが到達するようにして計測し、Fig.6 に直接照射 SSjetN フラックスの原子電流測定結果を示す。電力増加に対して、Fig. 4 に示されたように生成原子量が電力に対し直線状に増加した如く、HB 放電では直線状に増加していることから原子電流を計測していることを示している。圧力を 40 Pa (0.6 sccm), 80, Pa (1.38 sccm), 110 Pa (2 sccm), 130 Pa (3 sccm) と変化させた場合の原子電流は圧力が増すと減少していることが

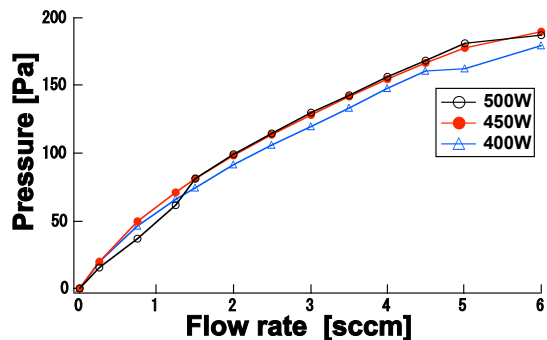


Fig. 2 Calibration curve for inner pressure of the discharge tube and flow rate.

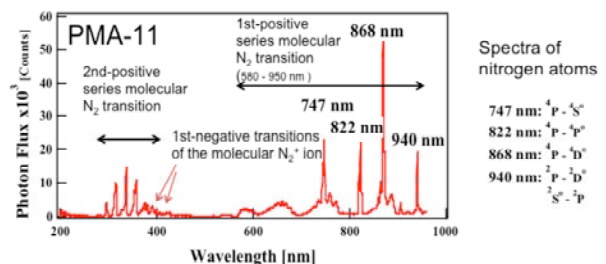
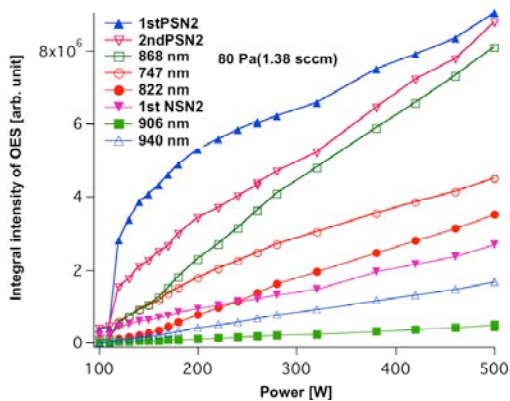
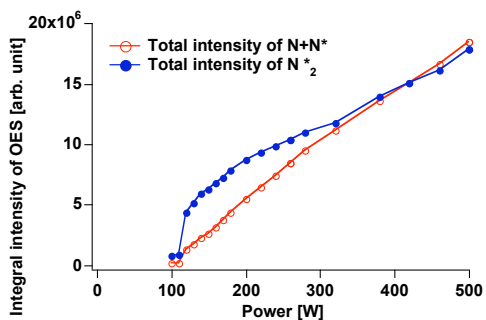


Fig. 3 OES of atoms and molecules of the HB discharge at 80 Pa and 400 W.



(a)



(b)

Fig. 4 (a) The integral intensity of OES for each atoms' spectrum and molecules' spectrum depending rf power as the same experiment of 80 Pa (1.38 sccm). (b) The total intensity for atoms and molecules in Fig. 4 (a).

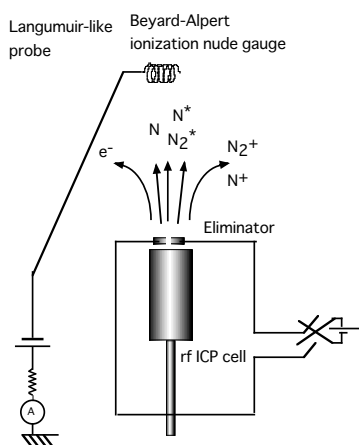


Fig. 5 Schematic drawing of a Langmuir-like probe using a grid electrode of flux monitor installed on a V80H. The probe is biased negatively and eliminates charged particles using an eliminator.

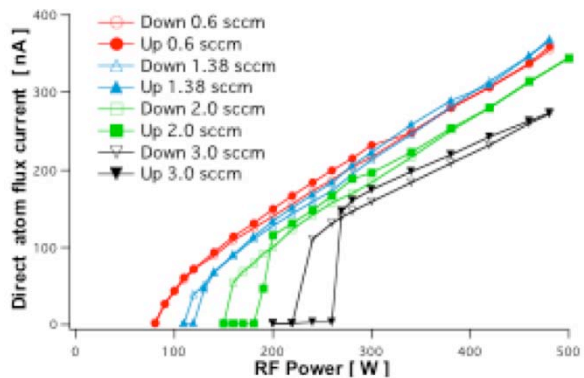


Fig. 6 Direct atom flux current depending rf power as a parameter of pressure measured by a Langmuir-like probe.

分かる。また圧力が高くなると電力変化に対してHB, LB相転移にヒステリシスが生じることがわかり, その大きさは圧力が多いほど大きくなることが図から分かる。

2.3 間接照射 N 原子フラックス計測

間接照射の場合は Fig.7 に示す如く平行平板電極を用い, Fig.8 に示す様な負電位の2電極間に流れる電流を計測する。原理は2つの負電極内部に付着した窒素原子の自己電離現象にあり, この場合は電極間内での現象のため, 直接照射フラックス計測のように荷電粒子を除去するための工夫は不要である。壁からの反射により局所的な平衡蒸気圧を持ち, 電極に入射するのは中性な寿命の長い N 原子ラジカルのみであると考えられる。この場合, 壁からの反射は壁の温度依存性と壁に吸着する吸着量に依存するため制御には工夫が必要である。

80M 装置 (成長室でなく壁の温度は室温に保たれている) に取り付けた2電極原子プローブ (ステン



Fig. 7 An atom probe of two parallel stainless electrodes.

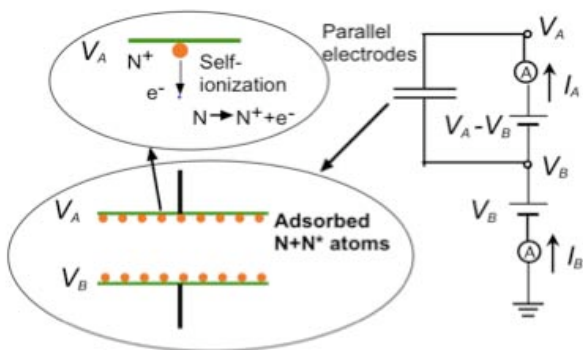


Fig. 8 An electric circuit of atom current for ADS nitrogen atoms in a parallel electrode. The current between the two parallel plates with applied voltage $V_A - V_B = -108$ V corresponds to a self-ionization current from adsorbed nitrogen atoms.

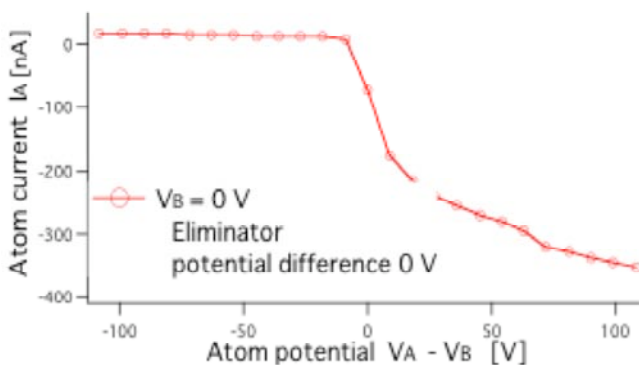


Fig. 9 Indirect atom flux measured by a parallel plate probe of 60×110 mm² as shown in Fig.6.

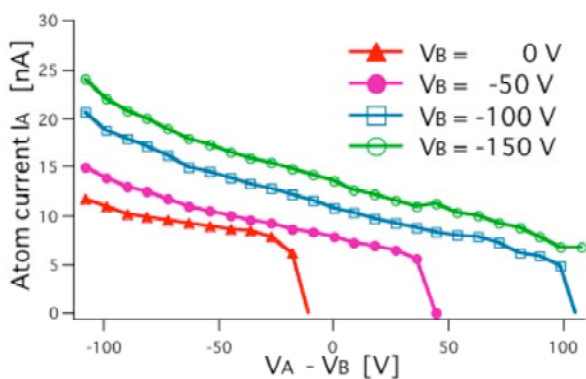


Fig. 10 Langmuir-like probe characteristics vs. potential difference $V_A - V_B$. (b) Langmuir-like probe characteristics vs. potential difference $V_A - V_B$, where V_B changed from 0 to -150 V.

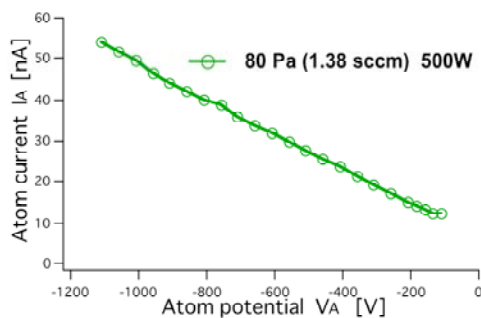


Fig. 11 Indirect atom flux current changing bias potential to 1000 V that is the negative potential of the electrode for self ionization, V_A changes from -108 to -1108 V.

レス板、電極間隔 2 mm 面積は 50×180 mm²) を用いて電圧電流特性を測定した結果を Fig.9 から 11 に示す. Fig.9 に $V_B=0$ の場合に V_A の電極電位差と流れる電流の結果で、正のバイアスの場合は周りの電子による電流が流れ、負バイアスの場合は負の電位に対応して直線的に電流が増えているのが分かる. 2 つの電極の中で負電位の絶対値が大きい方の電極の電位により自己電離電流が増加するのを示している. Fig. 10 は V_B を -50, -100, -150 V と変化させて Fig.8 と同様の測定を行った結果であり、 V_A の負電位に依存していることが明らかである. それぞれの直線部分が平行でなく、負の電位の値の絶対値が増すに従って傾きが増加している. これは 2 電極間の電位差 $V_A - V_B$ による電流が V_A にも依存していることを示していることを示している. Fig.11 は $V_A - V_B = -108$ V に固定して V_B を -1000 V まで変化させた場合の 2 電極間の原子電流で電位に直線的に変化していることが分かる.

実際に成長に利用する 80H MBE 装置成長室内セルシャッターポートに設置した原子プローブを用い液体窒素により成長室の壁を冷却した成長時と同じ条件で測定を行った. $V_B = 0$ の条件で $V_A = -108$ V の条件で、窒素 ICP 放電の放電電力を変化させて、電極へ到達する間接照射吸着原子フラックス測定を行った結果を Fig. 12 に示す. 壁の窒素原子の吸着量が電力を大きくして Fig.4 に示した如く発生 N 原子を増した場合にも、間接照射の窒素原子は Fig.12 のように小さいことが判明した.

前報告³⁾において、2 電極間に電位をかけた場合

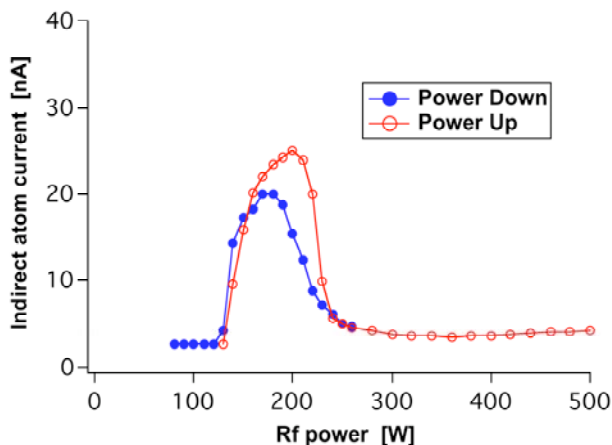


Fig.12 rf power dependence of adsorbed atom flux at wall cooled with liquid nitrogen and liquid nitrogen temperature of shroud wall in the growth chamber.

に流れる電流が成長室の中に漂う窒素分子イオンの存在と考察したが、その際、LB 放電を 5sccm の流量で 100W の放電と 300W の 2 種類の放電を起こさせ、1 と 2 の電極間の電流電圧特性を測定した。LB 放電は原子を発生せず励起分子は原子電流に寄与しないためであり、電流電圧特性傾きから電極間に存在する N_2^+ イオンによる導体の抵抗値が 100W 放電の時は $100/20 \times 10^{-9} = 5 \text{ G}\Omega$ 、300W 放電では $100/60 \times 10^{-9} = 1.67 \text{ G}\Omega$ と計算された⁵⁾。本報告に於ける場合は成長室内に設置した原子プローブの HB での N 原子吸着による自己電離に基づく電流値であるところが異なっている。

3. Si 清浄表面平坦化

3.1 Si(111) 1x1 から 7x7 再構成層転移利用

ヘテロエピタキシャル法によって 2 インチもしくは 3 インチ Si 基板上へ III 族窒化物半導体の結晶成長をさせるために、最初に取り組むべき事が Si 表面の平坦化を行うに事にある。Si 清浄表面として Si(111) は 7 x 7 表面再構成層が知られ、高温では "1x1" 表面構造に可逆的に変化する規則-不規則の 1 次の相転移として知られている。しかし、その転移温度 T_c は 827⁶⁾, 830⁷⁾, 856⁸⁾, 860⁹⁾, 867¹⁰⁾, 868¹¹⁾, 875¹²⁾ の値が報告されている。我々は転移温度 T_c として 856⁶⁾ のものを採用し、実験温度の熱電対指示値の校正に利用している。

我々の目的とする出発基板としては多くの検討課

題が残っている。本年は昨年と同様の実験法で Si 基板処理を行い、新しいこころみとして 856⁶⁾において Si 清浄表面として Si(111) は 7 x 7 表面再構成層の低温相と "1x1" 再構成層構造の高温相の間の可逆的に変化する規則-不規則の 1 次の相転移を利用して、表面ステップの移動を利用する事を試みた。高温相ではステップは直線状であり、ステップの上側の端から 7x7 のドメインが形成されて、テラス全面が 7x7 構造になりステップ端はジグザグ模様となる事^{7,8)}が知られておりこの現象を利用してステップの移動を促進することを考えた。

Si の洗浄法としては、セミコクリーンにて 5 分間の超音波洗浄、流水洗浄後、塩酸酸化法として HCl:H₂O (4:1) と H₂O₂(1) 混合液は 73⁰C まで自然に昇温するため、この温度にて 5 分間の酸化膜を形成した。450⁰C でのガス出しのプロセスを経た後に 10⁻⁶Pa 程度の超高真空下の MBE の成長室内で 1x1 表面構造になる相転移温度 856⁰C 以上の温度へ 1⁰C / 秒の速度で基板温度を上げ、高温アニールにて SiO₂ を分解

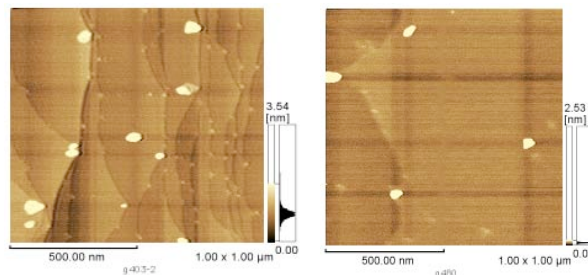


Fig. 13 Si(111) surfaces after one Phase transformation from 1x1 to 7x7 surface reconstruction. (a) and (b) are different crystals. Small white dots are observed at step edges.

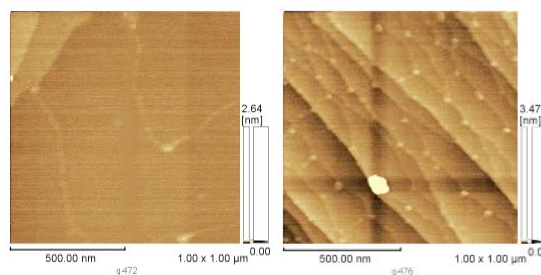


Fig. 14 Si(111) surfaces after twice phase transformations from 1x1 to 7x7 surface reconstruction. (a) and (b) are different crystals.

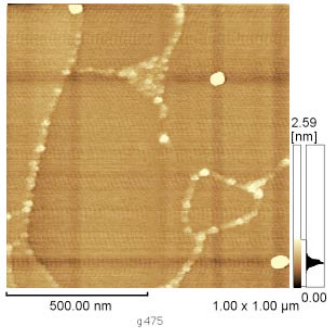


Fig. 15 Si(111) surfaces after three times phase transformations from 1x1 to 7x7 surface reconstruction.

蒸発させ Si 清浄表面を露出させる¹²⁾. SiO₂ の蒸発は穴が形成されその周囲から内部の Si を取り込んで Si+SiO₂→2SiO のプロセスで分解することが知られており、7x7 構造で酸化膜が無くなると SiC と思われる析出物が形成され、AFM 像では白色粒子として観測される。

結果は Fig.13 から 15 に 1x1 → 7x7 相転移回数をそれぞれ 1 から 3 回までの後、室温へ下ろしたものの AFM 像である。Si 表面ステップは初期の犠牲酸化膜作製の際に出来る酸化膜とシリコン界面の形状が出現すると考えられ、そのステップバンチングの様子は変わらず、SiC 粒子の析出は酸化膜ステップ進行を阻止した場所に生じていることが推察出来る。相転移を繰り返すとその大きな SiC 析出物以外にステップ端に新たに小さな SiC もしくは Si の 3 次元粒子析出物が形成され、Fig.13~15 に示す如く相転移回数が増すとこの小さな析出物が増えることが分かる。

3.2 Si(111)表面平坦化への窒素原子の影響

別報告⁵⁾で報告する III 族窒化物成長基板に Si を用いる場合表面を窒化し、Al 照射後に固相界面反応エピタキシャル法により薄い AlN テンプレートとしたダブルバッファータンプレート AlN/ β -Si₃N₄/Si を作製¹³⁾、その上に AlN、AlGa₃N、Ga₃N 結晶を成長させる目的を考えると Si 表面の粗さを小さくするためにはステップ間隔を出来るだけ大きくした平坦なテラス構造の実現する方法を考える必要があり、犠牲酸化膜作製は重要なものの一つである。他の可能性として、初期表面窒化した β -Si₃N₄ を前節の相転移

を低温から高温相へ起こすことにより、Si 表面構造に影響を与えることが出来る。窒素フラッシングと称しているもので、7x7 相の低温で間接照射の窒素原子を吸着させて昇温し 1x1 相へ転移させて変化させる方法と、1x1 相の高温で間接照射の窒素原子を照射する方法を検討する。

Fig. 16 に 7x7 相の低温 300^oC で間接照射の窒素原子を吸着させて (200W1.38sccm10 分間照射するが吸着量が飽和しているため時間は参考データである) 昇温し 1x1 相 870^oC へ転移させて 10 分間保持後室温へ移動させた実験結果を示す。XPS 観察では N ピークが認められるが、AFM 像からはステップ端の小さな白い点は無くなっており、酸化膜作成時と関係する白い点が観られるのみである。

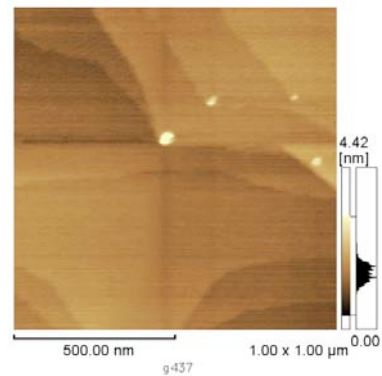


Fig. 16 Si(111) surfaces after nitrogen flushing for 10 min at 300^oC one phase transformations from 1x1 to 7x7 surface reconstruction. (a) and (b) are different crystals.

4. Si(111)上への IRE β -Si₃N₄ の成長

4.1 Si(111)の β -Si₃N₄ 成長用活性窒素種の選択と照射方法

前節で示した窒素フラッシングの場合も Si 表面を窒素で窒化し β -Si₃N₄ を成長させる場合にも窒素原子フラックス量は大きくある必要はなく、表面一様に照射させることが必要のため、間接照射による吸着窒素原子利用が適している。

4.2 7x7 表面構造での β -Si₃N₄ の IRE

ヘテロエピタキシャル成長で、基板と成長結晶の格子定数差が問題となる。Si 基板と β -Si₃N₄ の格子

定数比 $d_{\beta\text{-Si}_3\text{N}_4(0001)}/d_{\text{Si}(111)}$ は 1:2 の CSL により整合し、さらに続けて AlN を成長させる際に $d_{\text{AlN}(0001)}/d_{\beta\text{-Si}_3\text{N}_4(0001)}$ が 5:2 となっている¹³⁾こともダブルバッファテンプレート AlN/ $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ /Si に $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ を用いる利点である。

Fig. 17 と 18 に前節の方法で Si 表面処理をした後 7x7 構造の 740 と 800^oC において作製した $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ であり、平坦な表面テラス構造が得られていることが分かる。

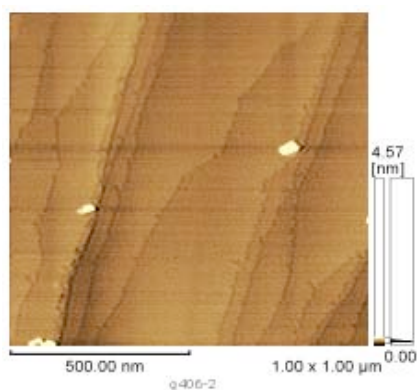


Fig. 17 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ surfaces after 3 min nitridation at 740^oC.

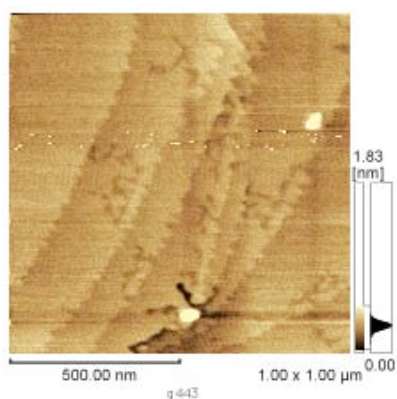


Fig. 18 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ surfaces after 5 min nitridation at 800^oC after N flushing at 300^oC.

5. 結論

4年目のまとめとしてⅢ族窒化物作製に必要な窒素原子を生成する高周波誘導結合放電の間接照射窒素原子を計測する方式の成果を示し、ヘテロエピタキシャル成長に必要な Si 表面の平坦化と清浄化に対する検討を行い、AlN テンプレート成長に必要な $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 作製に成功した。続く5年目にダブルバッファ

テンプレート AlN/ $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ /Si の最適化後、目的とする量子構造の成長実験を遂行する予定である。

謝辞:本研究は文部科学省私立大学学術高度化推進事業「私立大学ハイテク・リサーチセンター整備事業」による「界面現象研究センター」プロジェクトにより行われた。電気電子材料研究室の学生諸氏、アリオス株式会社有屋田修博士の協力に対して心から感謝します。

参考文献

- 1) 大鉢忠, 和田元, 同志社大学界面現象研究センター2006年度研究成果報告書, pp.29 (2007).
- 2) 大鉢忠, 和田元, 同志社大学界面現象研究センター2007年度研究成果報告書, pp.27 (2008).
- 3) 大鉢忠, 和田元, 同志社大学界面現象研究センター2008年度研究成果報告書, pp.89 (2009).
- 4) 山邊信彦, 大鉢忠 同志社大学界面現象研究センター2008年度研究成果報告書, pp.57 (2009).
- 5) 山邊信彦, 大鉢忠 同志社大学界面現象研究センター2009年度研究成果報告書, (本報告書) (2010).
- 6) W. Telieps, and E. Bauer, Surf, Sci. 162, 163-168 (1985).
- 7) N. Osakabe, Y. Yanishiro, K. Yagi and G. Honjo, Surf, Sci. 109, 353-366 (1981).
- 8) C. W. Hu, H. Hibino, T. Ogino, and I.S.T. Tsong, Surface Sci. 487, 191-200 (2001)
- 9) N. Aizawa and Y. Homma, Surf, Sci. 340, 101-108 (1995).
- 10) P. A. Bennet and M.W. Webb, Surf, Sci. 104 74-104 (1981).
- 11) K. Miki, Y. Morita, H. Tokumoto, T. Sato, M. Iwatsuki, M. Suzuki and T. Fukuda, Ultramicroscopy 42-44 851-857 (1992)
- 12) M. Tabe and T. Yamamoto, Surf. Scie. 376, 99-112(1997).
- 13) C. L. Wu, J. C. Wang, M. H. Chan, T. T. Chen, and S. Gwo, Appl. Phys. Lett. 83, 4530 (2003).