

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

Tadashi Ohachi, Nobuhiko Yamabe, and Motoi Wada

(Received February 24, 2011)

During rf discharge adsorbed (ADS) N atoms, which were in a state of local equilibrium, were able to be measured by a self-ionization of ADS atoms on a negatively biased electrode. The ADS flux was measured by a parallel plates electrode or parallel mesh electrode (atom probe), which were biased negatively by the self ionization of N atoms. The atom flux current I_A is give by the following equation, $I_A = -\gamma S F_N E_A V_A + I_0$, where γ is the self ionization coefficient [A/Vm^2], S [m^2] is the surface area of the atom electrode, and V_A [V] ($V_A = -E_A + V_B = -E_A - E_B < 0$) is the atom potential, which is negatively biased for the self ionization, E_A [V] is potential difference between two plate electrodes, and E_B [V] is a bias potential to increase the absolute value of the atom potential.

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 (III)

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」研究分担の最終報告である.¹⁻⁴⁾

当初の目標とした「量子井戸構造評価と電気光学評価」のテーマを, 研究途中において窒素原子の計測法と窒素原子の間接照射方式を利用した

ダブルバッファー層 (Double buffer layer: DBL) 開発の必要性が新に加わったことから研究テーマを「Ⅲ族窒化物系 (GaN, AlN, InN とそれらの混晶) 半導体のシリコン基板上へのヘテロエピタキシャル成長」に変更し, ナノヘテロ界面量子井戸構造利用のデバイス作製の基盤となる結晶成長に重点を置く研究に方針を変更した.

DBL は間接照射の窒素原子を用いて Si を窒化する界面反応エピタキシャル (Interface reaction epitaxy: IRE) 法により, Si 上に単結晶窒化シリコン β -Si₃N₄ 成長を行い, 続いてその β -Si₃N₄ と蒸着 Al 原子との間に IRE を行わせて AlN 単結晶薄膜を成長させるものであり, GaN をはじめⅢ族窒化物系半導体のヘテロ成長は AlN をテンプレートに行われるのが常であるところから, Si 上への

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

ヘテロエピタキシャル成長のテンプレートには AlN/DBL/Si を用いることが最適である。MOCVD^{7,8)}、スパッタ法⁹⁾の例は Kappers ら⁷⁾により、MBE 法については淀達の報告¹⁰⁾がある。

最終年度に当たり、本報告でプラズマ支援分子線エピタキシー(Plasma Assisted Molecular Beam Epitaxy: PA-MBE)法に必要な rf プラズマによる窒素原子発生と計測、窒素原子間接照射法による β -Si₃N₄ ダブルバッファ層 (Double buffer layer: DBL) の成長、山邊等による III 族窒化物 PA-MBE 成長用 AlN/ β -Si₃N₄ DBL の界面反応エピタキシー成長を分離して¹⁾報告する。

成果を振り返ると、初年度 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する研究成果、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²⁾。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トエピタキシー(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 と GaN エピタキシャル成長の結果についてまとめた³⁾。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⁴⁾、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 -Si₃N₄ 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 -Si₃N₄ に Al を照射して IRE 法による AlN テンプレート成長⁵⁾を報告した。2009 年の報告では第 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⁶⁾、ダブルバッファ層 AlN テンプレート用 β -Si₃N₄ の IRE による作製への応用を報告した⁷⁾。

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低環境負荷対応技術に関する研究が進む中、Si は安価であり、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、大口径であるところから大量に利用する半導体デバイスにとって有利であり、窒化物半導体例えば GaN 半導体はエネルギーギャップ 3.4 eV と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ところにある。さらに、窒素高周波放電を利用する Plasma assisted (PA)-MBE 成長法を結晶成長に利用する利点は直接基板へ照射される窒素原子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ることと、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、出発基板の Si より、同一の MBE 装置内で窒素を用いて AlN-DBL 成長、AlN テンプレート成長を経由して GaN 系量子電子、光デバイス作製を一貫して実現出来る可能性を持つ方法と言える。また、MBE 成長法は原子層エピタキシャル (Atomic layer epitaxy: ALE) 成長をシャッター制御において実現可能であり、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を持っている。

本報告では初年度からのまとめとして、窒素原子間接照射法による β -Si₃N₄DBL の成長、 β -Si₃N₄ 上の IRE-AlN をテンプレートとした ALE の一つとして活性度変調マイグレーションエンハンスト成長 (Activation modulation migration enhanced epitaxy) 法を報告すると共に PA-MBE 法に必要な rf プラズマによる窒素原子発生と計測、窒素原子フラックス計測に関する最終年度の成果である多層平行メッシュ電極原子束プローブ (Multiple parallel mesh electrodes atom flux probe: M-PME atom flux probe) を報告する。

2. 窒素原子発生と原子束計測

2.1 誘導結合 (ICP) 高周波放電

13.56MHz の誘導結合 (Induction coupling plasma: ICP) 高周波放電 (rf) が窒素化合物を合成する際に必要となる窒素原子を最も効率よく生成

するものであ、アンモニアなどに比し除外装置も必要としない最適の窒素源と言える⁴⁾。実験で利用した窒素源はアリオス社製 IRF-501IFで、6 Nの高純度窒素ガスは窒素ボンベから供給し、Saes getter社の150 PSIG 純化装置を通し、流量調節はMass flowコントローラーで行い、圧力はセル入り口に取り付けたMKS Baratron (Type626)圧力計でモニタした。rf電力は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。

複数の細孔のあるオリフィスを有する放電セルのICP-rf 放電の第1の特徴は2つの放電モードが存在すること^{2,3)}で、明るい高輝度(High Brightness: HB)放電と暗い(Low Brightness: LB)と称し、放電電力と圧力(流量)により決まる相図で特徴を表現する²⁾。HB放電により窒素分子イオン N_2^+ 、励起分子 N_2^* 、解離原子(基底原子Nと励起原子 N^* : $N+N^*$)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。放電スペクトルは前報 Fig.3 に示した⁶⁾。発光スペクトルはペルチエ冷却 CCD 利用の Hamamatsu Photonics PMA-11 により計測した。

ICP-rf 放電の第2の特徴はHB及びLBの窒素放電いずれの場合にも、放出される粒子束(フラックス)は超音速ジェット流(Super sonic jet flow: SS-jet)として基板へ到達する事である。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(Super sonic jet: SS-jet)流として基板へ到達する。そのためPA-MBE法の結晶成長法はMOCVDに比較してSS-jetの運動エネルギー分だけ低温で成長が可能となる。

放電セルのICP-rf放電の第3の特徴はオリフィスの細孔の形状と個数により放電セル内の圧力が定まり、生成される活性粒子が定まり、放電の相図が定まる。セル内で生成された活性粒子(放電管後方の窓から光学スペクトルとして観察)とオリフィス細孔を通して放出される活性粒子(成長や表面反応に関係し、各種プローブを用いて観察)は異なり、成長面近くでの活性粒子の情報が必要となる。

放電セルのICP-rf放電の第4の特徴は窒素原子が一度以上壁と衝突と反射をくり返し成長基板へ照射される間接照射と、成長基板へ照射される直接照射方式の2種類の照射方式を選べることである。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、シャッターや成長室壁に窒素原子が一度以上衝突と反射をくり返し成長基板へ照射され、局所平衡の原子分圧により表面に吸着(ADS)する原子として間接的に照射させる事ができる。一方、窒素セルのシャッターを開けてSS-jetフラックスが直接成長基板へ照射される直接照射方式の場合には、LB放電とHB放電を制御することにより、2種類の物理活性度の高い励起窒素分子と化学活性度の高い解離窒素原子のフラックスを照射出来る特徴があり、活性度変調マイグレーションエンハンストエピタキシャル成長法(Activity modulation migration enhanced epitaxy: AM-MEE)として利用されており、2007年度成果報告書で報告している³⁾。間接照射の場合には、窒素セルから放出された窒素原子が直接基板にあたらず、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成長表面へ広い面積にわたって均一に照射される特徴がある。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、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、シャッターを開いた場合に於いても成長基板のあるマニユプレータを後方へ回転させる事により、壁からの反射により間接照射させることができる出来る³⁾。ダブルバッファ層の作製にSiの窒化を界面反応エピタキシャル成長法(Interface reaction epitaxy: IRE)により β - Si_3N_4 を成長させる際に応用されことを2009年度報告書⁶⁾にて報告した。

2.2 N原子束計測

2.2.1 負電位電極上N原子の自己電離現象

Fig. 1 に示す様に MBE 装置のフラックス測定用の電離真空計(BA ゲージ)のグリッドを利用し、ラングミュア様電極として、放電セル出口に設けた荷電粒子除去電極(エリミネータ: eliminator)に0~±1000 Vの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する. Fig. 2 に示す様に負電位電極へは中性の解離窒素原子束が到達して吸着 (ADS) 原子として定常状態にあれば ADS 窒素原子から電子放出が観測されるため, その電子放出による電流を計測することで原子フラックスに対応した電流が得られる. これを自己電離緒現象 (Self ionization phenomenon) と称している. 中性の他の吸着励起分子や中性窒素分子の場合には電子放出は起こらない. この電極をラングミュアー様電極と呼ぶが, これはプラズマ診断でプラズマ中へ挿入してプラズマパラメータを計測するラングミュアー電極と同様に電位-電流特性を得ることができる. ADS 原子量を増すため電極面積を大きくする目的で平板電

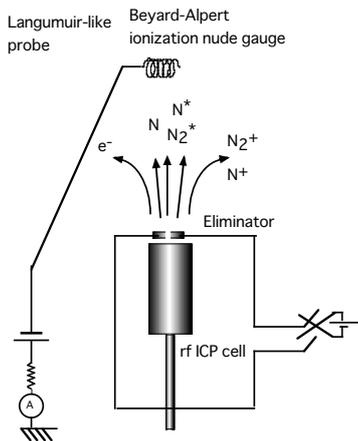


Fig. 1. Schematic drawing of a Langmuir-like probe using a grid electrode of flux monitor installed on a V80H. The probe is biased negatively and eliminates charged particles using an eliminator.

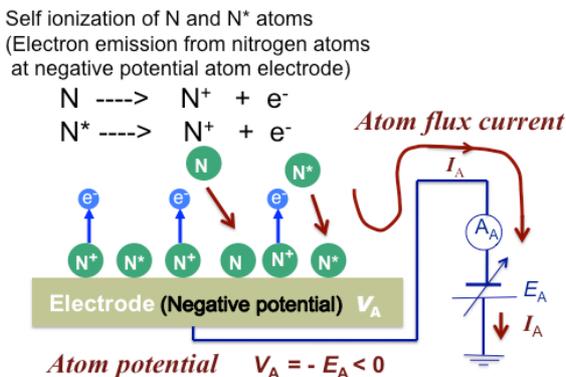
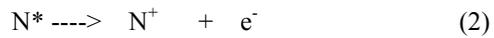
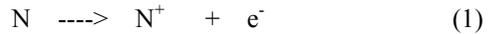


Fig. 2. Schematic self-ionization model for active nitrogen atoms from negatively biased electrode V_A , the atom potential. The atom flux current I_A is dependent on the surface area and V_A . The current does not correspond to the atom flux current if $V_A > 0$, because self-ionization does not occur on the electrode surface.

極を用いることもでき, Fig.3 に示す図により測定原理を説明する.

負電位電極を原子電極 (Atom electrode) と称しその電位を V_A として Atom potential と呼ぶ. この電位はラングミュアー様電流電圧特性を測定するところから V_B としてラングミュアーバイアス電位 (Langmuir-like potential) と呼ぶ. 解離窒素原子の基底状態の窒素原子 N と励起窒素原子 N* はそれぞれ以下の式で自己電離して電子放出を行う.



観測出来る原子電流 I_A は電極表面の自己電離係数を γ 有効電極面積を S 表面の ADSN 原子束を F_N 原子電極の電位を V_A として次式で表される. I_0 は電位 0 において流れる電流である. 負号は負電位の電極からの電子放出電流であるためであり, プラズマパラメータ測定のラングミュアー電流と符号が逆になっている.

$$I_A = -\gamma S F_N V_A + I_0, \quad (3)$$

Fig.4 に特性の一例を示す. 原子電流として意味のあるのは $V_A < 0$ の第 4 象限のグラフであり, その場合を拡大すると Fig.5 の様になり V_A に対して (3) 式に従っていることが示されている.

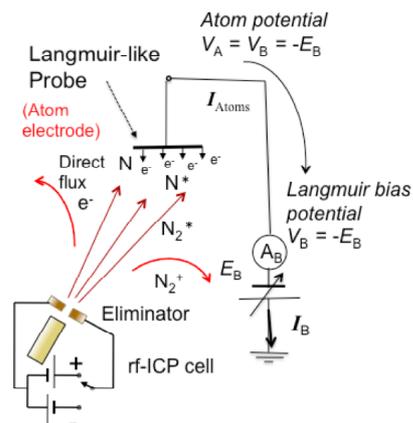


Fig. 3 Schematic drawing of a Langmuir-like probe using a plate electrode or a grid electrode of a flux monitor installed in a V80H. The probe is biased negatively and charged particles are eliminated using an eliminator.

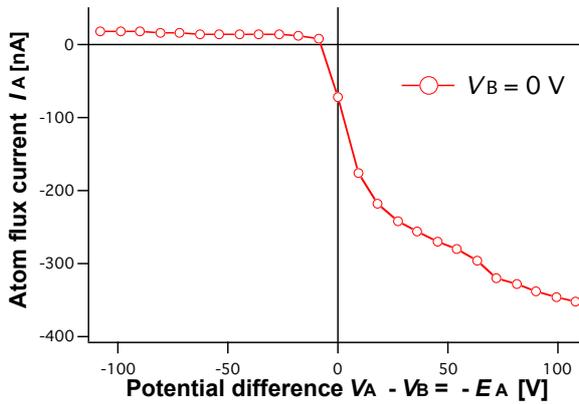


Fig.4 Langmuir-like probe characteristics vs. potential difference $V_A - V_B$, where $V_B = 0$.

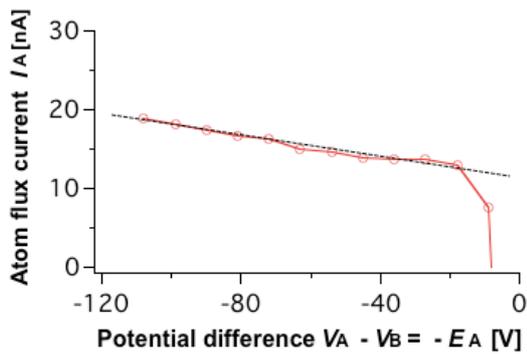


Fig.5 Langmuir-like probe characteristics vs. potential difference $V_A - V_B$, where $V_B = 0$ and $V_A < 0$ region of Fig. 4.

2.2.2 2 電極原子プローブ¹⁴⁾

1 電極のラングミュア様原子プローブの電極を Fig. 6 に示す様に 2 つの電極としてその電極間に原子電流測定用の電源を負に与え、 V_A と V_B とに分け V_A を原子電位、 V_B をラングミュアバイアス電位と呼ぶ。両電極表面が負電位であると自己電離現象は起こるが 2 電極間には電位の低い V_A の電極の自己電離により電流は定まる。 V_A は

$$V_A = -E_A + V_B = -E_A - E_B, \quad (4)$$

原子電位はバイアス電位により変化し、電位差 E_A によっても増加することから、(3) 式が 2 電極の場合は (5) 式のように表される。

$$I_A = -\gamma S F_N E_A V_A + I_0, \quad (5)$$

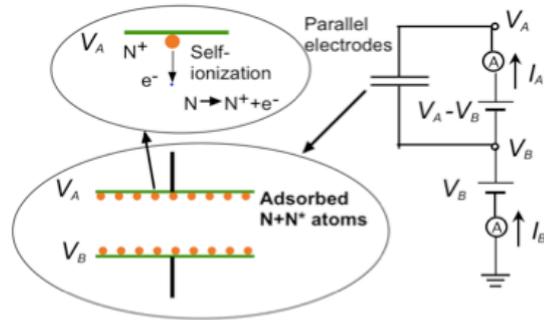


Fig. 6 An electric circuit of atom current for ADS nitrogen atoms in a parallel electrode. The current between the two parallel plates with applied voltage $V_A - V_B = -108$ V corresponds to a self-ionization current from adsorbed nitrogen atoms.

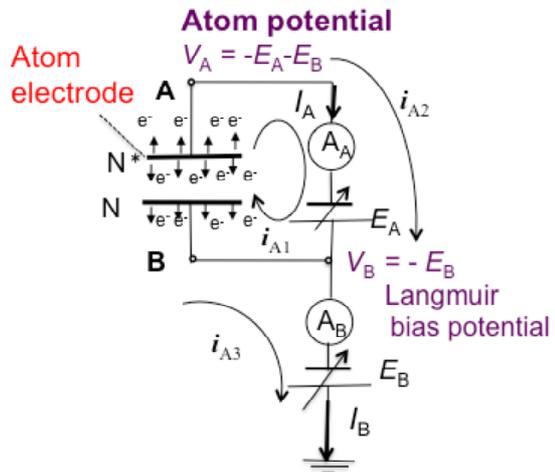


Fig. 7 Schematic drawing of an electrical circuit using two parallel plate electrodes measuring ADS nitrogen flux. The current between the two parallel plates with applied voltage $V_A - V_B = -E_A$ corresponds to a self-ionization current from adsorbed nitrogen atoms.

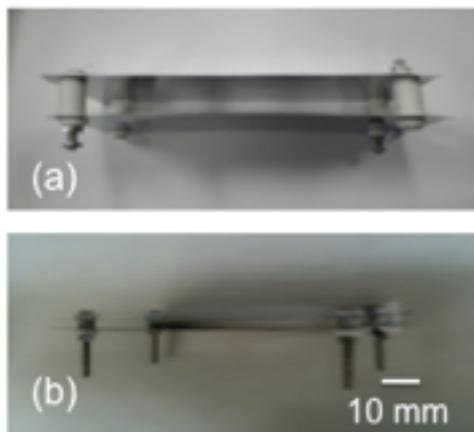


Fig. 8 Photographs of PEEs, of which area of 60×110 mm² and distances of two electrodes are 20 mm for Fig. 1(a) and 6 mm for Fig. 1(b).

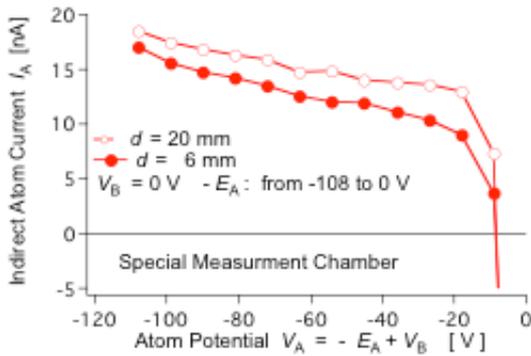


Fig. 9 Atom flux current for parallel plate electrode atom probe as shown in Fig. 8.

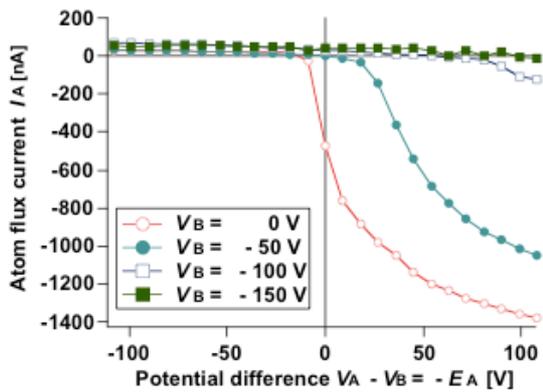


Fig. 10 Atom flux current between two parallel electrode vs. potential difference corresponding different Langmuir bias voltage.

Fig.8 に示す平行平板電極の間隔を 20mm と 6mm とした場合の原子束電流測定結果を Fig.9 に示す。VG80M 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（ステレス板、電極間隔 2 mm 面積は 50 x 180 mm²）を用いて電圧電流特性を測定した結果を示す。Fig. 9 に $V_B=0$ の場合に V_A の負の場合の特性を示す。間隔が大きいほど内部に入る原子フラックスが多いと予想され電流値が増しており、(3) 式を支持する結果である。

Fig.10 には V_B を変化させた場合の 2 電極間電極電位差と流れる電流の結果で、 V_B により電位差が正の場合でも V_A の値は負になる場合があり、 V_A が正の場合には電極の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電子放出による電流が (3) 式に従い直線的に増えているのが分か

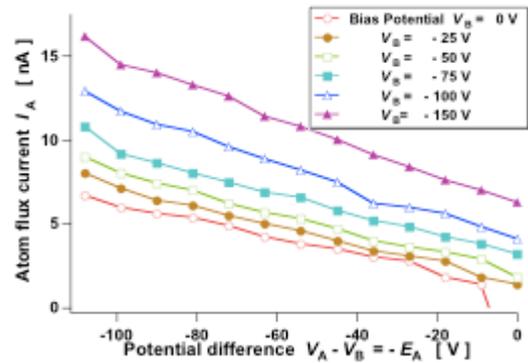


Fig. 11 Langmuir-like probe characteristics vs. potential difference V_A-V_B , where V_B changed from 0 to -150 V.

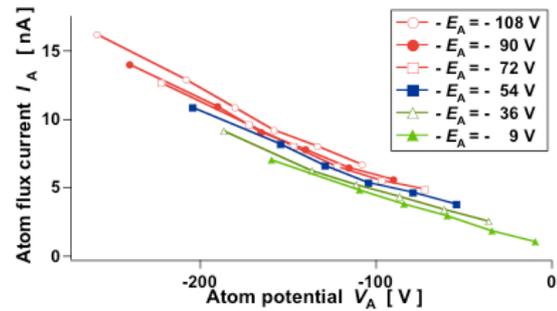


Fig. 12 Atom flux current depending potential difference $-E_A$ between two atom plate electrodes against atom potential V_A .

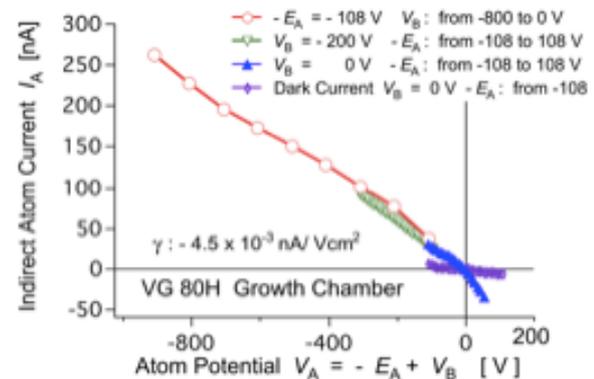


Fig. 13 Indirect atom flux current vs. atom potential V_A changing V_B and E_A .

る。 V_B の電位を負に大きくすると原子電位 V_A は負となるため電流は原子電流が計測可能で正方向に流れている。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。平板の場合は直接照射の原子束は計測ができないが、間接照射による ADS 原子は計測出

来るため、直接照射の原子束も実際の成長膜厚と比較校正することにより測定することが可能である。

Fig. 11 は Fig.10 と同様 V_B を変化させた場合の2電極間電極電位差と流れる電流の結果のグラフであり、このグラフから、2電極間電極電位差 E_A を一定にした場合の電流と V_A の関係を求め直し、グラフにしたものが Fig. 12 であり E_A により V_A に対応する電流値は増加し、(5) 式が成立することが示されている。

Fig.13 は VG80M 成長装置内へ2電極平行平板原子プローブを接地し他結果の電流電圧特性で V_A に対していずれの条件でも(5)式に対応した直線の関係を示すことが示される。この図には LB 放電と放電を切った場合の暗電流電圧特性も合わせ記されており、自己電離現象は HB 放電の原子が生成されている場合のみよることが明らかである。

測定感度を上げるためにはバイアス電圧 V_B を大きく電位差 E_A を大きくすることで原子電位 V_A を大きくできるが、面積 S を大きくすることによっても可能である。

2.2.3 多重平行メッシュ電極原子束プローブ

原子が照射される電極面積を大きくする目的で Fig. 14 に示す様に平板電極をメッシュ電極とし、かつ多重に櫛歯状に組み合わせることで実現させる事ができる。

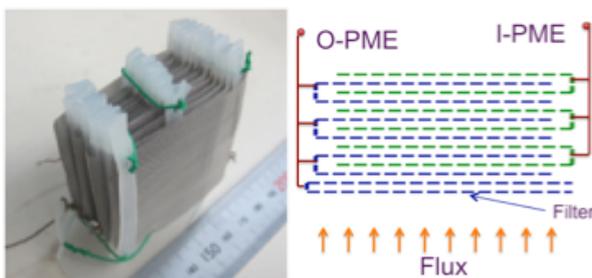


Fig. 14 Photographs of PEEs, of which area of 60 x 110 mm² and distances of two electrodes are 20 mm for Fig. 1(a) and 6 mm for Fig. 1(b).

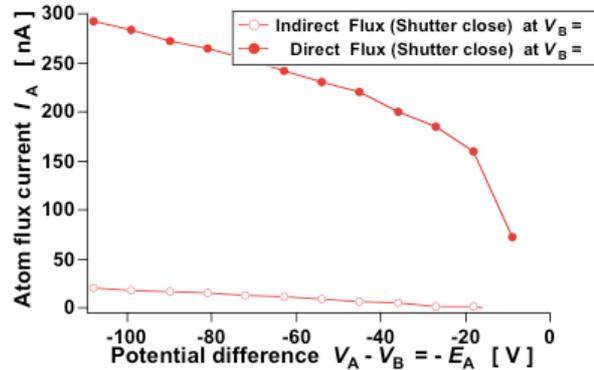


Fig. 15 Atom flux current between two parallel electrode vs. potential difference corresponding different Lanbmuir baias voltage..

Fig. 15 は多重平板メッシュ電極原子プローブを用いて直接フラックスを測定した例を示し、シャッタを閉じた場合でも周り込みによる電極内への吸着により(3)(5)式に従う事が示されている。

3. ダブルバッファ層 AlN/ β -Si₃N₄/Si 成長

Wu たち¹²⁾と同様に、III族窒化物成長基板に Si 表面を固相界面反応エピタキシャル法窒化し、さらに 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 としたダブルバッファ層 AlN/ β -Si₃N₄/Si を作製し、その上にホモエピタキシャル成長として AlN を成長させ、AlN テンプレートを作る事ができる。この AlN を基板として AlGa_{0.5}N, GaN 結晶を成長させることができる。別報告¹⁾で成果を報告する。

4. AM-MEE

rf-ICP 放電の特徴を生かした SS-jet フラックスの運動エネルギーを LB 放電と HB 放電の2つの放電を制御することにより活性度変調マイグレーションエンハンスド成長 (Activation modulation migration enhanced epitaxy: AM-MEE)法を提案しているが^{13,14)}、シーケンスを変化させて励起分子の影響などを詳しく調査する時間がなく、低温での成長可能であることから準安定層の立方晶 GaN の成長に対する検討も含めて今後の研究にまわされることになった。

AM-MEE のタイムシーケンスのグラフを示す¹⁵⁾。

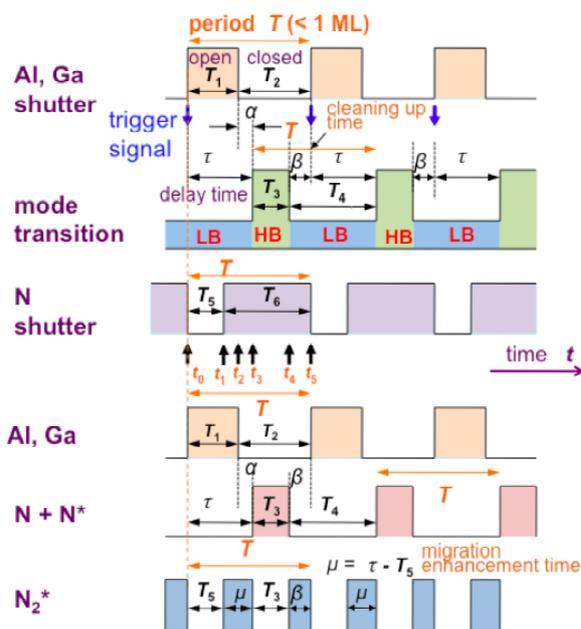


Fig.16 Time sequence of AM-MEE operation, where T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 , α , β , τ , and μ are the duration of the Al or Ga shutter opening, the duration of the Al or Ga shutter closing, the duration of the LB mode, the duration of the HB mode, the duration of the N shutter closing, the duration of the N shutter opening, the delay time of N+N* atoms irradiation after the Al or Ga shutter closes, the duration of removal excess Al or Ga atoms when the N shutter is open, the delay time of starting the HB mode after the start of Al of Ga irradiation, and the migration time of Al or Ga, respectively. One period $T = T_1 + T_2 = T_3 + T_4 = T_5 + T_6$ is controlled by group III cells and $T_3 + T_4$ is controlled by a rf-ICP discharge system. The migration time of Al or Ga atoms and the duration of removal excess Al or Ga atoms are μ and β , respectively.

5. 結論

5年目のまとめとしてⅢ族窒化物へ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、ダブルバッファテンプレート AlN/ β -Si₃N₄/Si 開発により AlN テンプレート作製に成功した。本報告では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、活性度変調マイグレーションエンハンスド成長 (Activation modulation migration enhanced epitaxy : AM-MEE)法を紹介した。

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) 山邊信彦, 大鉢忠 同志社大学界面現象研究センター2010年度研究成果報告書, (本報告書) (2011).
- 2) 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).
- 3) 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).
- 4) 大鉢忠, 山邊信彦, 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).
- 5) 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).
- 6) 大鉢忠, 山邊信彦, 和田元 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, pp. (2010).
- 7) 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, pp. (2010).
- 8) M. J. Kappers, M. A. Moram, D. V. Sridhara Rao, C. McAleese, C. J. Humphreys, J. Crystal Growth 312, (2010) 363-367.
- 9) J.H. Yang, S.M. Kang, D.V. Dinh, D.H. Yoon Thin Solid Films 517, (2009) 5057-5060.
- 10) W. J. Meng and T. A. Perry, J. Appl. Phys. 76 (1994) 7824 – 7828.
- 11) 淀徳男, 福山高章, 淵上紘志. 信学技報 ED2004-118, LQE2004-56(2004-10).
- 12) C. L. Wu, J. C. Wang, M. H. Chan, T. T. Chen, and S. Gwo, Appl. Phys. Lett. 83, 4530 (2003).
- 13) T. Ohachi, N. Yamabe, Y. Yamamoto, M.i Wada, O. Ariyada, J. Crystal Growth 318(2011) 474-478.
- 14) T. Ohachi, N. Yamabe, H. Shimomura, T. Shimamura, O. Ariyada, and M. Wada, J. Crystal Growth292 (2009) 2987-2991.
- 15) T. Ohachi, N. Yamabe, Y. Yamamoto, M.i Wada, O. Ariyada, J. Japn. Appl. Phys.50(2011) 01AE01(1)-(8).