

機関番号：34310

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360011

研究課題名（和文） 表面構造制御法開発による準安定立方晶Ⅲ族窒化物半導体の創製と物性制御

研究課題名（英文） Growth and properties of metastable cubic group III nitride semiconductors by developing a surface structure control method

研究代表者

大鉢 忠 (OHACHI TADASHI)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：40066270

研究成果の概要（和文）：Si 基板上への3族窒化物半導体(AIN, GaN)作製にあたり、分子線エピタキシー(MBE)法に用いる誘導結合高周波放電窒素源の2つの放電モードを制御して、窒素原子と励起窒素分子の化学活性度の違いを利用する表面構造制御法を開発した。そのSi表面構造制御による $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>層製作と、Alとの界面反応によりAINダブルバッファ層製作、その上への活性度変調マイグレーションエンハンスド(AM-MEE)法によるAIN、GaN用のテンプレート成長法のSiからデバイスまでの一貫成長方式を確立した。さらにAM-MEE法によりSi基板上への熱力学的準安定な立方晶AIN、GaNエピタキシャル膜成長の見通しを得ることができた。

研究成果の概要（英文）：Preparation of an AlN double buffer layer (DBL) on a  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> layer by the interfacial reaction between Al and the  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> layer was developed by controlling two electrical discharge modes of the high frequency induction coupling electrical discharge in molecular-beam epitaxy (MBE) method. Activity modulation migration enhanced (AM-MEE) method was established as a continuous MBE method by preparing the AlN/ $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si DBL layer firstly. In addition, the prospect to the growth of thermodynamically metastable cubic crystals, AlN and GaN epitaxial films on Si substrates was able to be obtained by the AM-MEE method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物性・結晶工学

キーワード：結晶成長、PA-MBE、エピタキシャル、電子・電気材料、半導体物性、原子フラックス測定、AINダブルバッファ層、AM-MEE成長法

### 1. 研究開始当初の背景

低炭素排出社会と省エネルギー指向の人間社会生活に、Ⅲ族窒化物半導体の利用が望まれ、安価なデバイス作製にはSi基板上での成長法の開発、半導体性質の向上には準安定相の立方晶Ⅲ族窒化物の結晶性の良い薄膜製造法開発が望まれていた。

さらに、Ⅲ族窒化物半導体成長の多くが有機

金属化学気相堆積法(MOCVD)により製作されており有害廃棄物除去処理が必要であることから、除去処理の不要な環境に優しい製造方法のプラズマ補助分子線エピタキシャル法(PA-MBE)の開発が望まれていた。

PA-MBEはⅢ族窒化物半導体成長に必要な窒素原子を発生させる方式に誘導高周波放電によるプラズマを利用する事を特徴とし

ており、窒素原子と励起窒素分子の化学活性度の違いを利用した PA-MBE 法における表面構造制御法の開発と、六方晶ウルツ鉱型 III 族窒化物半導体に代わり、熱力学的には準安定であるが半導体的性質が優れた立方晶閃亜鉛鉱型 III 族窒化物半導体成長法の開発が望まれていた。さらに Si 基板上に創製し、窒化物系パワー電子デバイスおよび半導体レーザーなどの光デバイスに応用するための物性制御の研究が必要とされていた。

## 2. 研究の目的

Si 基板上への III 族窒化物半導体 (AlN, GaN) 作製にあたり、プラズマ補助分子線エピタキシャル (PA-MBE) 法に用いる高周波放電窒素源の暗い放電 (LB 放電) と明るい放電 (HB 放電) の 2 つの放電モードを制御して、LB 放電の励起窒素分子と HB 放電の窒素原子の化学活性度の違いを明らかにし、それを利用する表面構造制御法を開発することと共に、その Si 表面構造制御による  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 層製作と、Al との界面反応により AlN ダブルバッファ層製作、その上への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 : AM-MEE) 法による AlN、GaN 用のテンプレート成長法を確立する。さらに AM-MEE 法により熱力学的には準安定な立方晶 AlN、GaN の成長へ AM-MEE 法の開発を行うことを目的として研究を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 放電モードの制御と原子フラックス計測 :

PA-MBE 法の窒素原子と励起窒素分子の化学活性度の違いを利用する目的で、高周波誘導放電の放電特性を窒素圧力 (窒素流量)、放電電力特性を発光スペクトル法にて評価する以外に、負電位電極への付着窒素原子の自己電離現象を利用した平行メッシュ 2 電極原子フラックス計測装置を開発して、放電特性を調べる。

### (2) 表面構造制御法の開発 :

HB 放電により発生する窒素原子は寿命が長く、シッター板からもしくは成長室の壁から反射した原子フラックスが間接照射されて、Si 表面で界面反応を行い、Si(111)、Si(001) の Si 表面構造制御による  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 層製作と、Al と  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 層の界面反応により AlN ダブルバッファ層 (DBL) 製作、その上への活性度変調マイグレーションエンハンスト (AM-MEE) 法による AlN、GaN 用のテンプレート成長法を確立する。

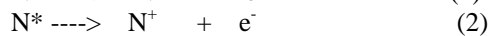
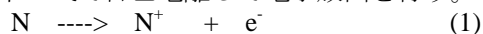
### (3) 活性度変調マイグレーションエンハンスト (AM-MEE) 法

AM-MEE 法は窒素原子が発生しない暗い放電 (LB 放電) と窒素分子が解離して窒素原子が発生する明るい放電 (HB 放電) の 2 つの放電モードを制御することが可能である。さらに、放電管内の圧力がおおよそ 50 Pa 程度であり、成長室の圧力が  $10^{-3}$  Pa のオーダーであるため、放電粒子が放出される約直径 0.2 mm 長さ 0.5 mm の穴から超音速ジェット流 (SS-jet) として励起窒素分子フラックスや窒素原子フラックスが基板に到達するため、放出される活性種フラックスは大きな運動エネルギーを有することになる。LB 放電の窒素分子フラックスは基板上的 Al あるいは Ga 原子と反応はしないが表面拡散を助ける働きがあり、HB 放電の窒素原子は反応する場合に大きな SS-jet フラックスの運動エネルギーを有していることから、等価的に基板温度を高めていることになる。そのため成長温度が GaN 成長で 750°C 以下であり MOCVD 法などの他の成長法に比べ低温で成長が可能である。AM-MEE 法により熱力学的には準安定な立方晶 AlN、GaN の成長を可能にすべく AM-MEE 法の開発を行うことを目的として研究を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 窒素原子フラックス計測 :

図 1 に開発した平行櫛歯状メッシュ電極写真と電気接続を示し、図 2 に 2 つの電極の中で、より負電位電極を原子電極 (Atom electrode) と称しその電位を  $V_A$  として原子電位 (Atom potential) と呼び、他方を  $V_B$  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  $\alpha$ 、有効電極面積を  $S$ 、表面の原子電極内部の付着原子束を  $F_N$ 、原子電極の電位を  $V_A$  として (3) 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る。

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

図 3 に特性の一例を示す。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 (3) 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 放電の場合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、電流は殆ど流れて居らず自

自己電離現象は HB 放電の原子が生成され窒素原子が電極面に付着し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面積  $S$  を大きくすることによっても可能であるが、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  $V_A$  を大きくできることが示されている。

特許出願を行い、III族窒化物を MBE 装置で Si 基板からデバイスまで一貫して成長する場合に、窒素原子その場観察に威力を発揮するものと期待している。

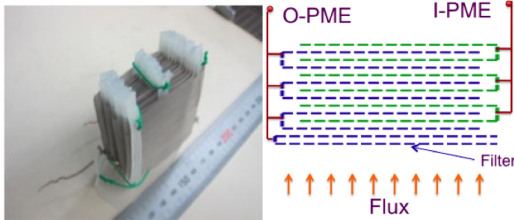


図1 平行櫛歯状メッシュ電極写真と電気接続

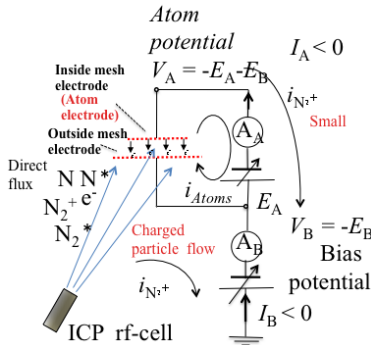


図2 計測回路  $I_A$  : 原子電流  $V_A$  : 原子電位

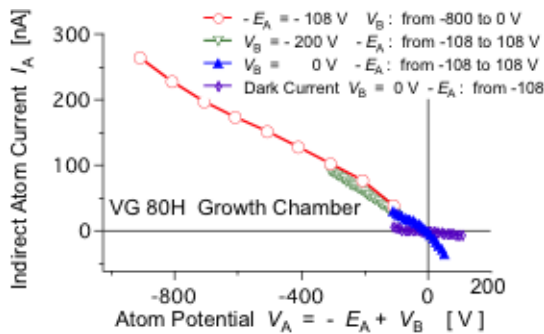


図3 原子電流は原子電位  $V_A$  に直線的に依存

## (2)放電モードの制御：

LB 放電と HB 放電を切り替える事により窒素原子の発生しない状態とする状態を切り替える事ができ、表面反応を制御することができる。そのために LB 放電と HB 放電の相図を求め、図4に示す。実験では圧力一定条件で放電電力をパルス的に低い電力と大きな電力を切り替えて制御した。窒素原子を間接照射させて Si 表面の表面構造制御を用いて単結晶薄膜  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  を形成する場合や、活性度変調マイグレーションエ

ンハンスト(AM-MEE)法による  $\text{AlN}$ 、 $\text{GaN}$  成長に利用した。

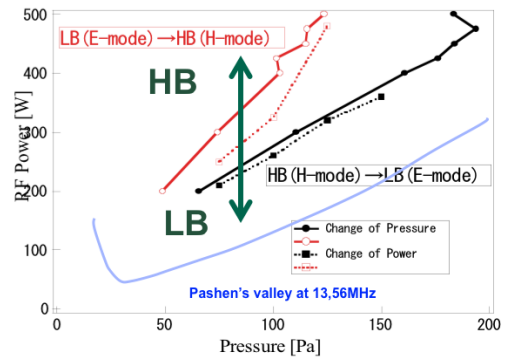


図4 放電相図 LB 放電と HB 放電の存在する領域を示す放電管圧力と放電電力

## (3)表面構造制御法の開発による $\text{AlN}$ ダブルバッファ層 DBL 作製：

HB 放電により発生させた窒素原子を間接照射させて Si 表面の表面構造制御を用いて単結晶薄膜  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  を形成し、その上に Al 原子のみを 2ML(分子層)照射して表面反応エピタキシャル法による  $\text{AlN}$  テンプレート成長法に加え LB 放電と HB 制御による、当研究室で開発した活性度変調マイグレーションエンハンスト(AM-MEE)法による  $\text{AlN}$ 、 $\text{GaN}$  成長法開発を行い、Si 基板上の  $\text{AlN}/\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  ダブルバッファ層 ( $\text{AlN}/\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  DBL) の開発に成功した。

成長結晶の評価は膜が薄いところから、表面構造観察として FE-SEM、AFM 装置以外に、膜厚測定に XPS 装置を利用した。

特許出願を行い、III族窒化物を MBE 装置で Si 基板からデバイスまで一貫して成長する方式を確立した。

## (4)活性度変調マイグレーションエンハンスト (AM-MEE) 法

高周波誘導放電の特徴を生かしたルツボからのフラックスが SS-jet フラックスの運動エネルギーを有しており、LB 放電と HB 放電の2つの放電を制御することにより励起窒素分子のみのフラックスと窒素原子と励起窒素分子の混合のフラックスを制御して利用出来る AM-MEE 法は PA-MBE 装置のセルのみに開閉の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不足しており、その最適化や励起窒素分子の働きについての準安定相の立方晶  $\text{GaN}$  の成長条件の最適化までは改名出来ず、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図5示す。特徴は窒素セルのシャッターと LB、HB 放電の周期により窒素励起分子フラックス、窒素原子と窒素励起分子の混合フラ

クス、アルミニウム又はガリウムフラックスが独立して基板へ照射される事である。図5に記号は  $T_1$  は Al または Ga シャッターの開いている時間、 $T_2$  は Al または Ga シャッターの閉まっている時間、 $T_3$  は HB モード放電時間、 $T_4$  は LB モード放電時間、 $T_5$  は Nセルシャッターの閉まっている時間、 $T_6$  は Nセルシャッターの開いている時間、 $\alpha$  は Al 又は Ga シャッターが開いてから HB 放電始まるまでの遅れ時間、 $\beta$  は次の Al 又は Ga シャッターが開くまでの時間で反応での残った過剰 Al 又は Ga 原子が蒸発する時間でクリーニング時間、 $\tau$  は Al 又は Ga シャッターが開きトリガー信号が入った後、HB 放電が始まるまでの時間、 $\mu = \tau - T_5$  は Al 又は Ga 原子に窒素励起分子が照射される時間でマイグレーション促進時間である。

特許出願を行い、III族窒化物を MBE 装置で Si 基板からデバイスまで一貫して成長する方式を確立した。

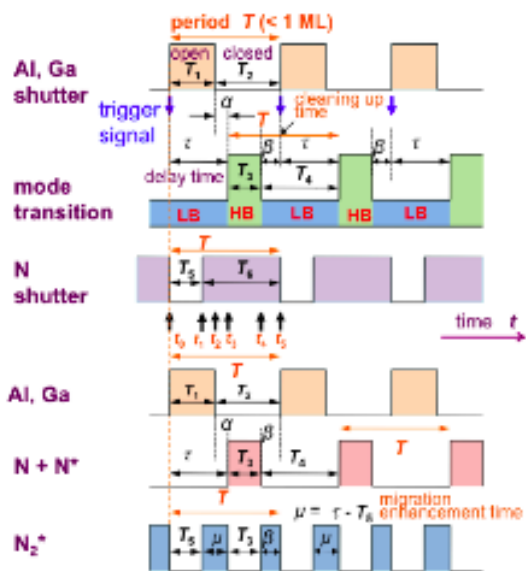


図5 AM-MEE のシャッター開閉シーケンスと Al、Ga、窒素原子、励起窒素分子照射シーケンス

### (5) AlN/DBL 膜 GaN 成長膜と結晶性評価:

① 結晶の評価は成長中は高速反射電子線回折 (RHEED) 観察により、成長後は成長室から取り出して原子間顕微鏡 (AFM) による表面形状評価と X 線回折法で行った。X 線回折法は PANalytical 社の薄膜 X 線回折装置を用いた回折ピークの半値巾、高分解逆格子マッピング (RSM) 計測を本助成金にて購入した新次元半導体検出器

PIXCEL を利用して計測時間を約 100 分の 1 に短縮して実験の効率化を計った。PIXCEL のもう一つの特徴である X 線計測のダイナミックレンジが大きく反射率測定において広い角度範囲までノイズ無く計測が可能であり、低入射角反射 X 線 (grazing incidence-angle X-ray reflectivity : GIXR) 測定により表面・界面構造計測に威力を発揮する事ができた。

### ② AlN/ $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si DBL の RHEED 及び AFM 測定:

初期膜の Si 基板上的 AlN/ $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si DBL 作製は図6 (a) に示す Si(111) 面の清浄表面を示す 7 x 7 表面再構成構造パターンを得た後、間接照射により窒素原子を照射して図6 (b) に示す  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> の 8 x 8 構造を得た後、Al のみを 2ML 照射して界面反応エピタキシャル成長により図6 (c) に示す AlN を成長させ AlN/ $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si DBL を得た。AFM 観測により  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> と AlN 表面を図 6(d)(e) に示す。

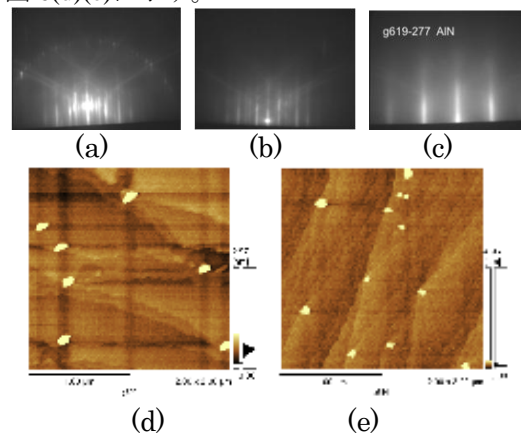


図6  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 及び AlN/ $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si DBL L 膜の RHEED 及び AFM 結果

### ③ 立方晶と六方晶混合比測定:

立方晶 GaN の (111) 面 [c-GaN(111) 面] 上に六方晶 GaN の (0002) 面 [h-GaN(0002)] が成長して両相が混在するモデルを考えると c-GaN(002) 面に対して h-GaN(10-11) 面は 7.35° 傾いているため  $\omega$  方向に 7.35° ずれた位置に X 線回折ピークが出現する。 $\omega$  変化による  $2\theta - \omega$  スキャン逆格子マッピング RSM による立方晶純度測定結果を図6にまた、h-GaN は c-GaN の (111)、(-1-11)、(1-11)、(-111) の四面から発生していて RSM で一度に測れるのは (111) と (-1-11)、あるいは (1-11) と (-111) のみであるため、Si(001) 基板での混在率の測定では一度 RSM をとった後、 $\phi$  を 90° 回してもう一度 RSM をとる必要があり図7に示す。立方晶と六方晶の混在比は X 線強度の積分値の

比により計算したが c-GaN(002) 面と h-GaN(10-11)面では X 線の回折強度が異なるため下式で表される回折強度比  $c\text{-GaN}(002) : h\text{-GaN}(10-11) = 1.00 : 2.81$  を用いて強度を規格化した。結果立方晶の混在比は 84.2% という値が得られた。

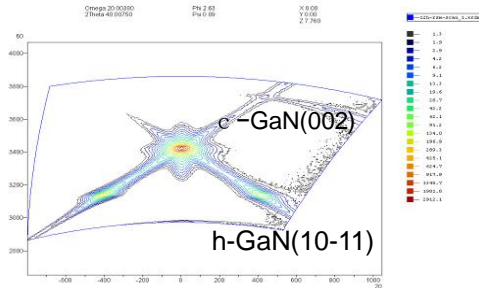


図 7 ω 変化による 2θ-ω スキャン逆格子マッピングによる立方晶純度測定

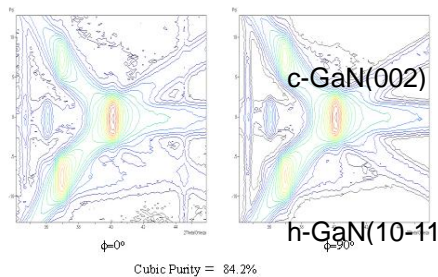


図 8 φ 変化による 2θ-φ スキャン逆格子マッピングによる立方晶純度測定

#### ④ GIXR 測定による界面評価：

AIN/ $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si DBL 膜の上に AM-MEE 法により AIN 及び GaN を各々 30 nm 成長させた図 9 に示す様な GaN 結晶を得、GIXR 測定を行い図 10 の結果を得た。PANalytical 社の解析ソフトウェアを利用して膜厚と界面のラフネス解析を行い、AIN/ $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si DBL 膜の厚みは nm オーダーであるため界面として扱い 3 層の解析を行った。780 °C と 830 °C にて窒化膜を作製した DBL のラフネスは 0.5 nm と 0.6 nm が得られた。GaN(0002) 膜の XRD 半値幅 ω-FWHM は 780 °C と 830 °C にて窒化膜を作製した場合に 58.2 arcmin と 55.2 arcmin が得られた。

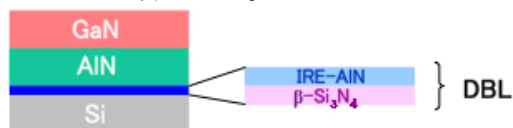


図 9 AIN/ $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si DBL 膜上に AM-MEE 法にて AIN 及び GaN を各々 30 nm 成長の GaN 膜

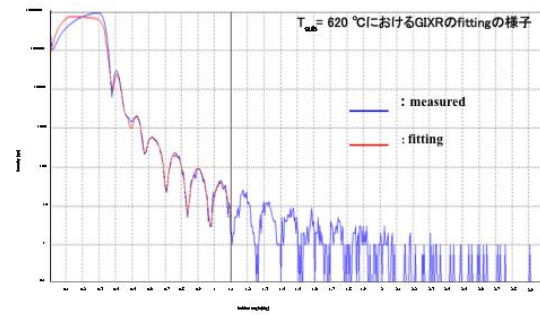


図 10 830 °C にて窒化膜を作製した DBL 上の GaN 膜の GIXR 測定結果とカーブフィッティング結果

#### (6) まとめ：

Ⅲ族窒化物を MBE 装置で Si 基板からデバイスまで一貫して成長する場合の方式が完成し、今後本方式を利用した立方晶Ⅲ族窒化物結晶成長の最適化により電子デバイスへの応用出来る道ができたと考える。

#### 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 10 件)

- (1) Tadashi Ohachi, Nobuhiko Yamabe, Yuka Yamamoto, Motoi Wada, and Osamu Ariyada, *in-situ* measurement of adsorbed nitrogen atoms for PA-MBE growth of group III nitrides on Si, Phys. stat. sol. C8(2011) 1491-1494. 査読有
- (2) Nobuhiko Yamabe, Yuka Yamamoto, Tadashi Ohachi, Epitaxial growth of  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> by the nitridation of Si with adsorbed N atoms for interface reaction epitaxy of double buffer AIN(0001)/ $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si(111), Phys. stat. sol. C8(2011) 1552-1555. 査読有
- (3) Yuka Yamamoto, Nobuhiko Yamabe, Tadashi Ohachi, Interface roughness of double buffer layer of GaN film grown on Si(111) substrate using GIXR analysis, J. Cryst. Growth 318(2011) 474-478. 査読有
- (4) Tadashi Ohachi, Nobuhiko Yamabe, Yuka Yamamoto, Motoi Wada, and Osamu Ariyada, Control of active nitrogen species using by RF-MBE nitrides growth on Si, J. Cryst. Growth 318(2011) 468-473. 査読有
- (5) Tadashi Ohachia, Nobuhiko Yamabe, Motoi Wada, and Osamu Ariyada, Improvement of Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxial Growth of Group III Nitrides on Si Controlling Radio Frequency Discharge Modes and Exposure of Nitrogen Flux, Jpn. J. Appl. Phys. 50 (2011) 01AE01-101AE01-8. 査読有
- (6) Y. Kangawa, K. Kakimoto, Possibility of AIN growth using Li-Al-N solvent, Journal of

Crystal Growth, 312(2010) 2569-2573. 査読有  
(7) T. Ohachi, H. Shimomura, T. Shimamura,  
O. Ariyada, M. Wada, Measurement of nitro  
gen atomic flux for RF-MBE growth of GaN  
and AlN on Si substrates, J. Crystal Growth,  
311 (2009) 2987-2991. 査読有

[学会発表] (計 45 件)

- (1) T. Ohachi, N. Yamabe, Y. Yamamoto,  
H. Murakami, Y. Kumagai and A. Kouki  
itu, Crack in HVPE grown 2H-AlN film  
s on AlN templates prepared by PA-MBE  
using AM-MEE, 7th International Work  
shop on Nitride Semiconductors (IWBNS  
7) 2011.3.18, Koyasan University, Japan
- (2) Y. Kangawa, B. M. Epelbaum, K. Kaki  
moto, Two-phase-solution growth of AlN  
on self-nucleated AlN crystal, 7th Inter  
national Workshop on Bulk Nitrides Sem  
iconductors (IWBNS-7) 2011.3.18. Koyas  
an University, Japan
- (3) 寒川義裕, 土岐隆太郎, 屋山巴, 柿本浩  
一, AlN バルク成長に向けた 2 相溶液成  
長法の提案, 2011 年春季 第 58 回応用物  
理学関係連合講演会, 2011.3.15. 東日本  
大震災のため講演会は中止、アブストラ  
クト発表のみ
- (4) Tadashi Ohachi, Nobuhiko Yamabe , Motoi  
Wada and Osamu Ariyada, Parallel mesh  
electrode to monitor nitrogen atoms for  
PA-MBE, ISPlasma2011, 2011.3.7, 名古屋  
工業大学
- (5) Tadashi Ohachi, Nobuhiko Yamabe , Yuka  
Yamamoto, Motoi Wada, and Osamu  
Ariyada, Control of active nitrogen species  
using by RF-MBE nitrides growth on Si,  
The 16th International Conference on  
Crystal Growth (ICCG-16) 2010.8.9,  
Beijing International Convention  
Center, Beijing, China
- (6) Tadashi Ohachi, Nobuhiko Yamabe , Yuka  
Yamamoto, Motoi Wada, and Osamu  
Ariyada, Nitridation of Si and activity  
modulation of nitrogen atoms\_ for growth  
of group III nitrides on Si using PA-MBE,  
The 14th International Summer School on  
Crystal Growth (ISSCG-14) 2010.8.1,  
Dalian International Finance Conference  
Center, Dalian, China
- (7) Tadashi Ohachi, Nobuhiko Yamabe , Yuka  
Yamamoto, Motoi Wada, and Osamu  
Ariyada, *in-situ* measurement of adsorbed  
nitrogen atoms for RF-MBE growth of  
group III nitrides on Si, The third  
International Symposium on Growth of  
III-Nitrides, 2010.7.5, Montpellier, France
- (8) 大鉢忠, 山邊信彦, 山本由香, 和田元,

有屋田修, RF-MBE プラズマ窒素源の窒  
素原子フラックスその場計測, 第 2 回窒  
化物半導体結晶成長講演会, 2010.5.14,  
三重大学

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

名称: 原子フラックス測定装置  
発明者: 大鉢 忠、和田 元、有屋田 修、  
山邊 信彦  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特願 2010-287599  
出願年月日: 平成 22 年 12 月 24 日  
国内外の別: 国内

名称: 原子フラックス測定装置  
発明者: 大鉢 忠、和田 元、有屋田 修、  
山邊 信彦  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特願 2010-152658  
出願年月日: 平成 22 年 7 月 5 日  
国内外の別: 国内

名称: 原子フラックス測定装置  
発明者: 大鉢 忠、和田 元、有屋田 修  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特開 2009-146755  
出願年月日: 平成 21 年 7 月 2 日  
国内外の別: 国内

名称: シリコン基板上に  $Si_3N_4$  ヘテロ  
エピタキシャルバッファ層を有する窒化シ  
リコン基板の作製方法および装置  
発明者: 大鉢 忠、和田 元、有屋田 修、  
山邊 信彦  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特願 2009-79062  
出願年月日: 平成 21 年 3 月 27 日  
国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大鉢 忠 (OHACHI TADASHI)  
同志社大学・理工学部・教授  
研究者番号: 40066270

### (2) 研究分担者

寒川 義裕 (KANGAWA YOSHIHIRO)  
九州大学・応用力学研究所・准教授  
研究者番号: 90327320