

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「プロセスインテグレーションによる機能発
現ナノシステムの創製」
研究課題「自己組織化グラファイトシート上エ
レクトロニクスの開発」

研究終了報告書

研究期間 平成20年10月～平成27年3月

研究代表者：藤岡 洋
(東京大学 生産技術研究所、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究では柔軟で面積の大きい自己組織化グラファイトシートを基板材料とする半導体エレクトロニクスを開発を行った。安価で柔軟な大面積材料上に半導体薄膜が成長可能となれば、従来の単結晶ウェハの持つ価格が高い、堅くて脆い、面積が小さいといった問題点を一挙に解決でき、従来の限界を超えた新しいエレクトロニクスシステムが実現すると考えられる。本研究では、自己組織的に結晶配向性シートを得ることができるグラファイトに着目し、パルススパッタ堆積(PSD)法と呼ばれる新しい低コスト半導体結晶成長法を開発することによって、グラファイトシート上への半導体素子作製を行った。東京大学グループでは、PSD法を用いた半導体結晶成長プロセスの開発、グラファイトシート上の半導体結晶評価、およびデバイス作製を担当した。鳥取大学グループでは理論面からグラファイト上半導体結晶成長のメカニズム解明を行った。両グループが緊密に情報を交換することでグラファイト上への高品質半導体結晶成長を実現し、さらに2次元物質上への3次元半導体の接合という新しい概念を含む学術領域を開拓した。また、このグラファイトシート上の結晶技術を応用することによって液晶テレビや太陽電池などの作製基板として産業応用実績があるガラス基板上に高性能 III-V 族化合物半導体素子の発光素子やトランジスタを集積する技術を開発した。鳥取大学のグループでは、実験が先行していたグラファイト基板上の窒化物成長を第一原理計算から裏付けた。周期律表の全ての原子種について、グラフェン/グラファイト上の原子吸着の第一原理計算を磁性・非磁性両方の条件で行い、吸着エネルギー、表面拡散障壁エネルギー、電荷分布の変化、磁性の発露の有無など2次元物質上の3次元物質の成長という一般的な立場からの研究の基礎となる成果を得た。

グラファイトシート上への半導体結晶成長技術開発においては、半導体薄膜とグラファイト基板の界面反応を抑制することが、高品質半導体結晶を得るために有効であることを見出した。さらに、グラファイトシート技術に加え、発展の著しいCVDグラフェン技術も我々の素子作製に利用できることを見出した。また、素子作製のために必要な、p型n型の伝導性制御、InGa_NやAlGa_N等の混晶作製技術、量子井戸・超格子などの界面形成技術といった要素技術をPSD法で全て実現した。これらの成果によって、安価で高スループットな成長手法であるスパッタリング法においても、従来の主な半導体結晶成長手法である有機金属気相成長法や分子線エピタキシー法と遜色ない品質の半導体結晶成長が可能となった。さらに、PSD法を用いたことに由来する新しい利点として、結晶成長温度の低温化や、これに伴うInGa_N結晶中の相分離反応の抑制効果が発見され、InGa_N系半導体の応用範囲が紫～緑から全可視～近赤外に拡大した。これらの技術を統合することで、グラファイトシート上への素子作製を行ったところ、グラファイトシート上でのフルカラーLEDの動作を確認することに成功した。これは、安価なグラファイト上にフルカラー表示素子が作製できることを世界で初めて実証したものである。また、PSD法の技術開発の進展に伴って、良質なヘテロ界面形成が可能となり、AlGa_N/Ga_Nヘテロ界面の2次元電子ガスを用いた高電子移動度トランジスタ(HEMT)と呼ばれる極めて性能の高いパワートランジスタの動作を確認した。この成果は、トランジスタとして最高の性能を持つHEMT素子を極めて安価に製造できる可能性を示したもので、半導体産業に極めて大きなインパクトを与える。また、InN極薄膜をチャネル層に用いた新しい金属-酸化膜-半導体(MOS)構造を作製し、電界効果トランジスタが良好に動作することを世界で初めて見出した。これは、化合物半導体で最大のピーク電子速度を有するInNを電子デバイスに応用できることを示した初めての例であり、学術・応用の両面で極めて高い価値を有するものである。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. パルススパッタ堆積法による低温窒化物結晶成長技術の開発

概要: 窒化物結晶の成長時にⅢ族原子を間欠的にパルス供給することによって、基板表面での原子の拡散を促進できることを見出し、この現象を用いて結晶成長温度の劇的な低減を達成した。この低温成長技術を用いて、従来は困難であった赤色光から近赤外光に対応する狭バンドギャップ高品質 InGaN 結晶の合成にはじめて成功した。また、ポリマーを焼結して作製した自己組織化グラファイトシートのように化学的反応性の高い材料の上に高品質窒化物半導体結晶を成長することがはじめて可能となった。

2. InN を用いた MOS 構造の実現

概要: InN は化合物半導体の中で最大のピーク電子速度を持つため次世代の高速エレクトロニクス材料として期待されてきたが、結晶成長が困難でこれまで素子が動作したことはなかった。我々は前述のパルススパッタ低温成長技術を用いて極めて品質の高い InN 薄膜成長技術の開発に成功し、InN 薄膜をチャンネル層に用いた金属-酸化膜-半導体(MOS)系構造の作製、トランジスタ動作に世界で初めて成功した。本成果は、InN がデバイスに応用可能であることを示した初めての結果であり、極めて高い価値を有するものである。

3. 第一原理計算によるグラファイト上窒化物成長のメカニズム解明

概要: 第一原理計算によって、グラファイト上における窒化物半導体の成長メカニズムを解明した。具体的には、グラファイトまたはグラフェン上に GaN や AlN を成長させた場合の極性決定メカニズムや格子歪み、結晶配向関係を理論的に明らかにした。本研究で見出されたグラファイト上における窒化物半導体の成長メカニズムは、他の材料系を用いた2次元物質上への3次元物質結晶成長においても理論的なガイドラインになるものであり、極めて高い価値を有する。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. グラファイトシート上のフルカラー発光素子の実現

概要: 前述の自己組織化グラファイトシート上へのパルススパッタ堆積法によるⅢ族窒化物半導体薄膜成長技術を発展させ、グラファイト上に赤、緑、青3原色の LED 動作を実証することに成功した。この成果は、自己組織化グラファイトシート上にⅢV 族化合物半導体素子を作製できることをはじめて実証したものであり、従来の単結晶基板上では不可能であった大面積なフレキシブルエレクトロニクスの創製を可能にする新技術である。

2. パルススパッタ法による低コスト GaN パワーエレクトロニクスの実現

概要: パルススパッタ堆積法によって作製した AlGaIn/GaN ヘテロ構造を用いて高移動度トランジスタ(HEMT)を試作し、その良好なトランジスタ動作を確認した。この成果は、次世代パワーエレクトロニクス用トランジスタとして最高性能を持つ HEMT パワー素子を、パルススパッタ堆積法という本質的な安価な手法を用いて製造できる可能性を示したもので、次世代の省エネルギー技術として社会に極めて大きなインパクトを与えるものである。

3. 低コストガラス基板上へ高性能エレクトロニクスの実現

概要: 従来技術では窒化物系半導体素子の作製に 1000°C 以上の高温が必要であったため、耐熱性の高い基板材料しか用いることができなかった。本研究において、素子作製温度の低温化に取り組んだところ、480°C という温度でも GaN の LED を実現できることが明らかになった。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「東大」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
藤岡 洋	東京大学生産技術研究所	教授	H20.10～H27.3
太田 実雄	東京大学生産技術研究所	助教	H20.10～H27.3
小林 篤	東京大学生産技術研究所	特任助教	H23.4～H27.3
上野 耕平	東京大学工学系研究科	研究員	H26.4～H27.3
高野 早苗	東京大学生産技術研究所	技術専門職員	H20.10～H27.3
金 恵蓮	東京大学工学系研究科	博士 3 年	H23.4～H26.3
北村 未歩	東京大学工学系研究科	博士 2 年	H25.4～H26.3
大橋 正哉	東京大学工学系研究科	修士 2 年	H25.4～H26.3
伊藤 剛輝	東京大学工学系研究科	修士 2 年	H25.4～H27.3
野口 英成	東京大学工学系研究科	修士 2 年	H25.4～H26.3
施 甫岳	東京大学工学系研究科		H20.10～H23.4
孫 政佑	東京大学工学系研究科		H22.10～H26.3
金子 俊郎	東京大学工学系研究科		H21.4～H26.3
渡辺 拓人	東京大学工学系研究科		H24.4～H26.3
大関 正彬	東京大学工学系研究科		H24.4～H26.3
岸川 英司	東京大学工学系研究科		H24.4～H26.3
大久保 佳奈	東京大学工学系研究科		H23.4～H25.3
近藤 堯之	東京大学工学系研究科		H23.4～H25.3
森田 和樹	東京大学工学系研究科		H23.4～H25.3
井上 茂	東京大学生産技術研究所		H20.10～H24.3
郭 堯	東京大学工学系研究科		H21.10～H25.3
丹所 昇平	東京大学工学系研究科		H22.4～H24.3
玉木 啓晶	東京大学工学系研究科		H22.4～H24.3
野村 周平	東京大学工学系研究科		H22.4～H24.3
梶間 智文	東京大学工学系研究科		H21.4～H23.3
田村 和也	東京大学工学系研究科		H21.4～H23.3
古沢 優太	東京大学工学系研究科		H20.10～H22.3
岡本 浩一郎	東京大学工学系研究科		H20.10～H21.3
佐藤 一博	東京大学工学系研究科		H20.10～H21.3
下元 一馬	東京大学工学系研究科		H20.10～H21.3

研究項目

- ・ PXD 結晶成長プロセスの基礎
- ・ グラファイトシート上結晶評価
- ・ デバイス作製
- ・ 中性粒子ビームを用いたダメージフリー窒化物半導体素子作製プロセスの開発

②「鳥取大」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
石井 晃	鳥取大学工学研究科	教授	H20.10～
中田 謙吾	鳥取大学工学研究科	ポスドク	H21.4～
横山 真美	鳥取大学工学研究科	博士3年	H21.4～
藤原 史明	鳥取大学工学研究科	修士1年	H25.4～
猪本 伸枝	鳥取大学工学研究科	アルバイト	H21.5～
小田 泰丈	鳥取大学工学研究科		H21.4～H25.3
土路生 隆宏	鳥取大学工学研究科		H23.4～H25.3
平井 翔	鳥取大学工学研究科		H22.4～H25.3
多谷 孝明	鳥取大学工学研究科		H20.10～H23.3
津崎 雄一郎	鳥取大学工学研究科		H20.10～H21.3
浅野 裕基	鳥取大学工学研究科		H20.10～H21.3

研究項目

- ・グラファイト基板上的 GaN 結晶成長
- ・グラファイト基板上的窒化物結晶成長
- ・グラファイト基板上的3次元物質結晶成長
- ・グラフェン/グラファイト上の原子種の吸着
- ・グラフェン/グラファイト上のナノ構造形成

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

本研究ではグラファイトシートの品質がその上に作製する半導体素子の特性に大きな影響を及ぼすことが予想されたので、グラファイト作製の専門家(国研研究者および民間企業)からグラファイトシート試作品の提供と取り扱いに関するアドバイスを受け、グラファイトの結晶性や平坦性が半導体素子の品質に与える影響を調べた。また、最近開発されたCVDグラフェンの製造に関しても専門家(大学研究者および民間ベンチャー企業)と共同での研究を行っている。さらに、応用面ではレーザーの製造を行っているデバイスメーカーとの共同研究を開始し、現在、共同での素子試作を試みている。また、この他の半導体メーカー各社とも打ち合わせを行い、共同での素子作製の可能性を検討している。この他、H22年度からH25年度において寒川チームとのチーム間共同研究として「中性粒子ビームを用いた高性能高電子移動度トランジスタの開発」を行った。H25年度には、パルススパッタ堆積法による緑色レーザーダイオードの作製を行うため、企業との共同研究を実施した。

§ 3 研究実施内容及び成果

3.1 PXD 結晶成長プロセスの基礎(東大プロセスグループ)

本項目ではパルススパッタ (PSD) 法による半導体結晶成長技術の開発を行い、自己組織化グラファイト上に成長した半導体結晶の高品質化、およびデバイス作製に必要な半導体結晶の p 型 n 型伝導性制御技術と多層膜作製技術開発に取り組んだ。具体的には先ず PSD 法を用いて成長した窒化物半導体結晶の高品質化につとめ、電子線回折半値幅 0.5° を切るような高品質薄膜結晶を実現することを目指した。また、PSD 法による p 型および n 型ドーピング技術や急峻な InGa_N/Ga_N/AlGa_N ヘテロ界面を形成する技術の開発を行い、デバイス構造作製のための要素技術を開発した。本グループで作製した試料を評価グループでの解析し、さらにその実験データを鳥取大グループに伝えるとともに現象の理論的背景について解説を受け、それらの情報を基にプロセスの改善を実施した。

グラファイトシート上窒化物半導体結晶の高品質化

グラファイトシート上窒化物半導体結晶の高品質化を行うため、まずグラファイト表面の清浄化と界面反応抑制プロセスの開発を行った。グラファイト表面の清浄化処理として、室温から 900°C の温度範囲で真空中アニール処理を行った。図 1(a) にアニール処理前後での XPS 測定結果を示すが、アニール前には酸素に由来するピークが検出されており、グラファイトシート表面が汚染されていることが分かる。400°C でアニール処理を行ったところグラファイトシート表面が清浄化され、酸素に由来するピークは検出限界以下となった。また、アニール後のグラファイトシートの表面形状を AFM 観察によって調べたところ、数 μm のサイズを有する原子レベルで平坦なテラスによって覆われていることが明らかになった (図 1(b))。この様な 400°C 程度の低温での簡単な熱処理でも、清浄かつ原子レベルで平坦な基板表面が得られるのは二次元的な結合様式を持つグラファイトの特徴である。清浄化したグラファイトシート上に GaN 薄膜の成長を試みたところ、エピタキシャル成長は可能であったものの界面反応に起因した C 原子の GaN 膜中への拡散が観測され、良質な GaN 成長は困難であることが分かった。そこで、反応バリア層として AlN および HfN 層の挿入を行った。AlN や HfN は熱的、化学的に安定な材料であり、GaN との格子不整が小さいことから界面バリア層として有望である。AlN 層を界面に挿入して成長した GaN 薄膜の XPS 測定を行ったところ、カーボンに由来するピークは観測されず、AlN 層の導入によってグラファイトシートから GaN 薄膜へのカーボン原子の拡散が抑制されていることが明らかになった。HfN を用いた場合でも同様に C の拡散が抑制できた。界面

バリア層を用いて作製した GaN 試料のフォトルミネッセンス測定を行ったところ C の混入に由来する発光は観測されず、界面バリア層を用いることでグラファイト上 GaN 薄膜の品質を向上できることが分かった。

グラファイトシート上 GaN 薄膜の結晶性を向上するためには、グラファイトシート

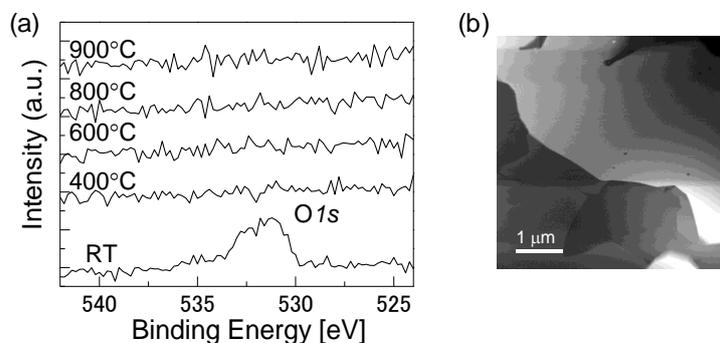


図 1 (a) アニール処理した後のグラファイト表面の O1s 光電子スペクトルと (b) AFM 像

の結晶品質改善も極めて重要であると考えられる。そこで、グラファイトシートの作製方法を開発している外部の研究グループと協力し、新シートの利用を検討した。具体的には、出発材料にポリイミド、ベンゾイミダゾベンゾフェナントロリンラダー (BBL) ポリマー、4,4'-ビナフェチル-1,1',8,8'-テトラカルボン酸-3,3',4,4'-ビフェニルテトラアミン (BNTCA-BPTA) ポリマーを用いたグラファイトシート上に GaN 薄膜の成長を行った。その結果、炭素含有率や分子構造の平坦性が高い BNTCA-BPTA ポリマーを出発材料に用いた場合に、結晶性や平坦性に優れたグラファイトシートが得られ、その上に成長する GaN の結晶品質も向上することが明らかになった。図 2 は BNTCA-BPTA ポリマーを出発材料に用いたグラファイトシート上に、界面バリア層として AlN を挿入して成長した GaN 薄膜の結晶性評価を行った結果である。電子線後方散乱回折 (EBSD) 測定によって<0001>方位と<10 $\bar{1}$ 2>方位の分布角を調べたところ、それらの半値幅はそれぞれ 0.19°、0.39°であり、本項目の目標値としていた電子線回折半値幅 0.5°以下を達成した。これらの結果から、グラファイトシート上に高品質 GaN 薄膜を得るためには、高品質なグラファイトシートを用いることと界面反応を抑制するバリア層を挿入することが有効であることが明らかになった。

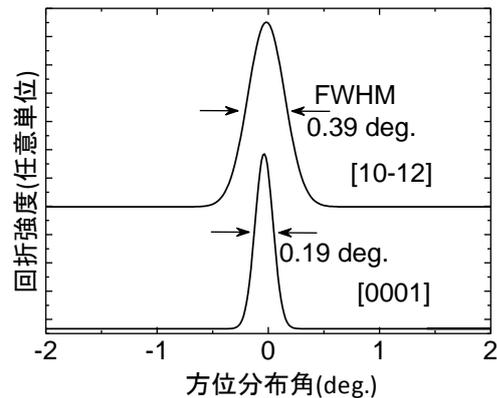


図 2 グラファイトシート上 GaN 薄膜の (a) [0001] 方位, (b) [10 $\bar{1}$ 2] 方位の角分布

また、近年のグラフェン成膜技術の進展により、様々な基板上に転写された単層もしくは多層のグラフェンを入手することが可能となっている。そこで本研究で開発した PSD 法によるグラファイト上への高品質窒化物半導体成長技術を応用して、アモルファス SiO₂ 上に転写されたグラフェンを下地基板として用いた窒化物半導体薄膜作製に取り組んだ。その結果、図 3 に示すようにグラフェン無しの場合、すなわち SiO₂ 上に直接 GaN 薄膜を成長した場合には表面凹凸の激しい低品質の GaN 薄膜が成長したのに対し、グラフェンを用いた場合には GaN 薄膜の結晶性が劇的に改善され、表面平坦性に優れた GaN 薄膜が得られた。この結果は、SiO₂ のようなアモルファス基板上においても、結晶性の高いグラフェンを転写しておけば高品質半導体薄膜成長が可能であることを示唆している。この技術は、半導体結晶成長の新潮流を生み出す技術として期待できるだけでなく、ガラスやポリマー、金属などの様々な基板材料上への半導体エレクトロニクス開発の道を拓くものと考えられる。

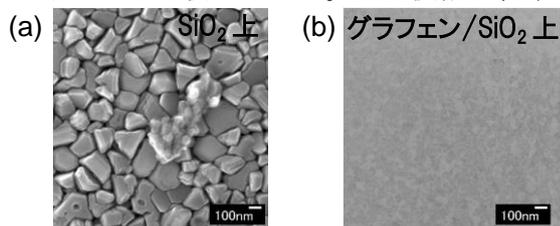


図 3 アモルファス SiO₂ 上に作製した GaN 薄膜の表面 SEM 像: (a) グラフェン無し, (b) グラフェン有り

極性制御プロセスの開発

窒化物半導体の結晶構造は六方晶のウルツ鉱型構造であり、c 軸方向<0001>に反転対称性を持たないことから (000 $\bar{1}$) 面 (N 極性) と (0001) 面 (Ga 極性) が存在する。極性の混在による反転境界の形成は素子特性の劣化を引き起こすため、素子応用のためには GaN 薄膜の極性制御プロセスの開発が不可欠である。そこでグラファイト上 GaN 薄膜の極性制御プロセスの開発に取り組んだ。

具体的には、極性制御層として GaN とグラファイトの界面に挿入する層の構造を検討した。極性判定には KOH 溶液に対するエッチング耐性試験を行った。N 極性 GaN はアルカリ溶液に対する耐性が低く、Ga 極性 GaN は耐性が高い。AlN 層を用いて成長した GaN 薄膜では、図 4(a) に示すようにエッチング後の表面ラフネスが大きくなっており、N 極性であることが分かった。一方、大気中酸化によって AlN 層表面に Al_xO_y 層を形成し、AlN 再成長を行った AlN/ Al_xO_y /AlN 構造を用いた場合には、アルカリエッチング後も表面形状に変化が見られず、Ga 極性であることが明らかになった。極性反転の詳細なメカニズムについては第一原理計算による考察が必要であるが、本プロセスを用いることでグラファイト上での極性制御が可能となり、グラファイト上 GaN 薄膜を素子作製に展開することが可能となった。また、この AlN/ Al_xO_y /AlN 層を用いて Ga 極性 GaN を得る技術はユニバーサルなものであり、グラファイト上に限らずあらゆる基板材料上での適用が可能であることも見出された。

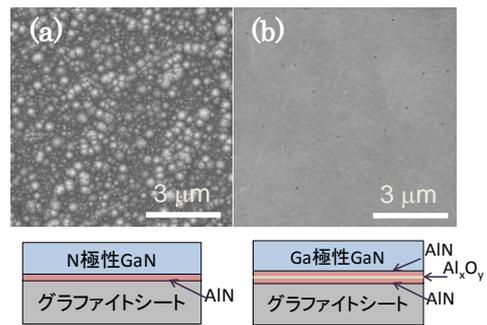


図 4 (a) AlN バッファ層, (b) AlN/ Al_xO_y /AlN バッファ層を用いて成長した GaN 薄膜の KOH エッチング後の表面 SEM 像

pn制御

半導体素子作製のためには伝導性制御、すなわち p 型、n 型化が必須である。PSD 法を用いて GaN の伝導性制御技術の開発を行ったところ、p 型、n 型用ドーパントとしてそれぞれ Mg と Si を用いることで p 型および n 型の伝導性を示す GaN 薄膜が得られた。この成果は、安価で大面積化が可能なスパッタリングプロセスにおいても半導体の伝導性制御が可能であり、本手法が半導体デバイス作製手法として有望な結晶成長手法であることを示している。当初計画では伝導性制御技術開発は H22 年度中の達成予定であったが、パルススパッタ堆積法による結晶成長プロセスの開発が予想以上に進展し、H21 年度内に達成することができた。これにより、LED 試作を当初予定よりも前倒しで実施することが可能となった。

また、GaN 系 LED を作製する場合、素子作製工程の最高温度は p 型層の成長温度で決まる。従来技術である有機金属気相成長では p 型層作製温度は 1000°C 以上であるが、この p 型層作製を低温化できれば、耐熱性の低い基板材料上への結晶成長が可能となり、新構造の素子作製への展開が期待できる。そこで H24 年度から p 型層作製温度の低減に取り組んだ。その結果、原料供給比の精密制御によって表面ストイキオメトリーを維持しながら、結晶成長を行ったところ 480°C から 800°C の広い温度領域で p 型化を実現できることが明らかになった。図 5 は 480°C で成長した p 型 GaN 薄膜の表面 AFM 像であるが、ステップ構造が現れており、原子レベルで平坦なものであることが分かる。このような 480°C という低温で GaN の p 型化を実現できたのは世界初の例である。この技術を用いれば LED の全工程温度を 480°C 以下にすることが可能だと考えられ、従来は使用することができなかった耐熱性の低い基板材料上への窒化物系 LED 作製を実現できる。たとえばガラスや金属などの大面積でフレキシブルな材料上に半導体素子を作製できるようになり、本技術による半導体エレクトロニクスの新たな展開が可能になる。

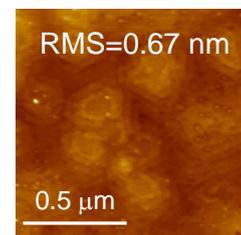


図 5 480°C で作製した p 型 GaN 薄膜の表面 AFM 像

多層膜InGaN成長とヘテロ構造

窒化物半導体を用いた素子作製では、GaN とバンドギャップの異なる InGaN や AlGaIn などの混晶を作製する必要がある。従来、InGaN 成長では InN と GaN の相分離が起こるため高 In 濃度 InGaN の実現が難しかったため、青色以外の高効率受発光素子の作製は困難であったが、本研究で用いているパルススパッタ堆積 (PSD) 法では低温結晶成長が可能であることから相分離反応を抑制でき、高品質な InGaN 薄膜の作製が可能と考えられる。そこで本手法を用いて高 In 組成 InGaN 薄膜の成長に取り組んだところ、平成 21 年度に In 濃度 50% を超える高 In 濃度 InGaN や InN 等の良質な結晶成長に成功した。図 6 はサファイア上に作製した InGaN 薄膜の X 線回折測定結果であるが、全組成領域について InGaN0002 回折がシングルピークであり、顕著な相分離反応は起こっていないことが分かる。また、同様に本手法を用いることで全組成域の AlGaIn 薄膜成長も可能であった。PSD 法による良質な混晶薄膜の成長が可能となったことから、従来の単結晶基板上において InGaIn/GaN 量子井戸 (MQW) 構造や AlGaIn/GaN ヘテロ構造を作製した。X 線反射率測定によってその界面急峻性を調べたところ、原子レベルで急峻な界面が実現されており、本手法を用いて素子応用可能な多層膜やヘテロ接合を作製できることが明らかになった。

この PSD 法によるヘテロ構造作製技術を用いて、グラファイトシート上への [InGaIn/GaN]MQW 構造の作製に取り組んだ。X 線回折測定を行ったところ、図 7(a) に示すように GaN0002 回折近傍に MQW 構造に由来するサテライトピークが明瞭に観測された。これは、MQW 構造が急峻な界面を有していることを示唆している。XRD カーブに対するフィッティングの結果から、この MQW 構造は In 組成 16% の InGaIn (4.5nm) と GaIn(6nm) から構成されており、ほぼ設計値どおりであった。405nm のレーザーを励起源に用いて室温 PL スペクトル測定を行ったところ、図 7(b) のように 465nm 付近の青色領域にピークを持つ強い発光が観測され、作製したグラファイト上の MQW 構造が良好な発光特性を有していることが分かった。

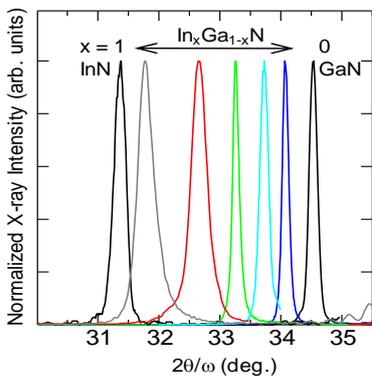


図 6 PSD 法を用いて低温成長した InGaIn 薄膜の XRD 測定結果

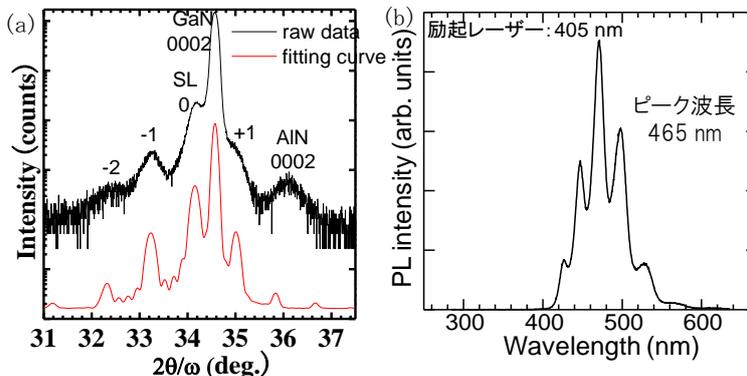


図 7 PSD 法を用いてグラファイト上に作製した [In_{0.16}Ga_{0.84}In/GaN]量子井戸構造の(a)XRD カーブと (b)室温フォトルミネッセンススペクトル

N 極性 GaIn 成長技術開発

N 極性面上では Ga 極性面上に比べて In の取り込み効率が高い、高 In 組成 InGaIn の高温成長が可能といった利点があり、高性能な InGaIn 発光素子や太陽電池の作製が期待されている。また、素子特性向上の観点から近年 N 極性窒化物薄膜の電子素子への応用にも関心

が集まっている。しかしながら、Ga 極性面に比べて N 極性面上では表面吸着原子の表面拡散が短く、従来の有機金属気相成長では原子レベルで平坦な高品質 N 極性 GaN 薄膜成長は困難であったため、一般に窒化物半導体素子は Ga 極性面上に作製されてきた。一方、PSD 法では III 族原料を間欠的に供給し表面原子のマイグレーションを促進できることから高品質な N 極性 GaN 薄膜の成長が期待できる。そこで PSD 法による N 極性 GaN 薄膜成長技術の開発に取り組んだ。サファイア上に GaN 薄膜を成長したところ、反射高速電子線回折 (RHEED) 像は (3×3) 表面再構成パターンを示し、GaN 薄膜の極性が N 極性であることが分かった。この試料の表面を AFM 観察によって調べたところ、原子レベルで平坦なテラスによって覆われていることが分かった。膜厚 6 μm の N 極性 GaN 薄膜について X 線ロックインカーブ半値幅を調べたところ、0002 回折で 266 arcsec、10-12 回折で 493 arcsec と小さな値が得られ、低結晶欠陥密度の N 極性 GaN 薄膜であることが明らかになった。さらに N 極性面上の素子開発に必要な p 型 GaN 層の成長に取り組んだところ、図 8 に示すように Mg ドープを行うことによって正孔濃度を $10^{16} \sim 10^{18} / \text{cm}^3$ 台で制御できることが分かった。これらの技術を用いて n 型 GaN 層、[InGaN/GaN]MQW 構造、p 型 GaN 層を積層し、電極加工を施すことによって LED 構造を試作したところ、電流注入発光が明瞭に観測された。このように本項目では、PSD 法を用いてデバイス応用可能な高品質 N 極性 GaN 薄膜成長を実現した。本技術は N 極性面上の LED や太陽電池、高電子移動度トランジスタといった高性能素子を実現するための基盤技術として展開が期待できる。

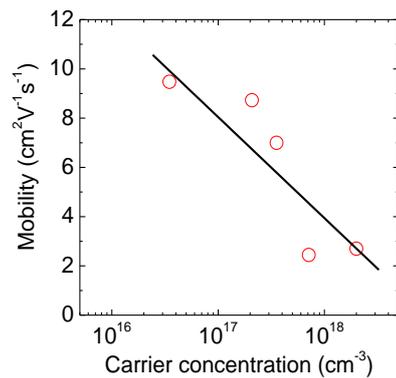


図 8 Mg ドープ N 極性 GaN 薄膜の正孔移動度と正孔濃度の関係

3.2 グラファイトシート上結晶評価(東大評価グループ)

本項目では、グラファイトシート上半導体薄膜の解析手法の開発し、プロセスグループが作製した試料の評価を行う。グラファイトシートは極めて柔らかいため、結晶性評価手法として一般的な X 線回折などの手法を利用できない。そこで本項目では柔らかい基板上でも結晶性の評価が可能となる電子ビームを用いた評価手法や光ビームを用いた界面評価技術を開発した。また、電子線後方散乱回折 (EBSD)、フォトルミネッセンス測定、ホール効果測定、X 線反射率測定といった分析装置を用いて、プロセスグループが作製した半導体薄膜のキャリア濃度や移動度の評価、発光特性や構造特性の評価を行った。得られた結果は結晶成長プロセス条件にフィードバックし、PSD 法による結晶成長条件最適化のための指針を構築した。

グラファイトシート上の窒化物半導体薄膜の構造評価

EBSD 測定では、数 μm サイズの局所的な結晶性評価が可能であり、グラファイトシートのようなフレキシブルな材料の結晶性評価に適している。様々なポリマーを出発材料に用いたグラファイトシートの結晶性を、EBSD 方位角分布測定によって評価した結果を図 9 に示す。BNTCA-BPTA ポリマーを焼結することによって得られるグラファイトシートの方位角分布が最も小さく、結晶性に優れていることが明らかになった。また同様の測定から、このグラファイトシート上に成長した GaN の結晶性が、他のポリマーから作製されたグラファイトシート上に成長した GaN よりも優れていることが分かった。BNTCA-BPTA ポリマーを出

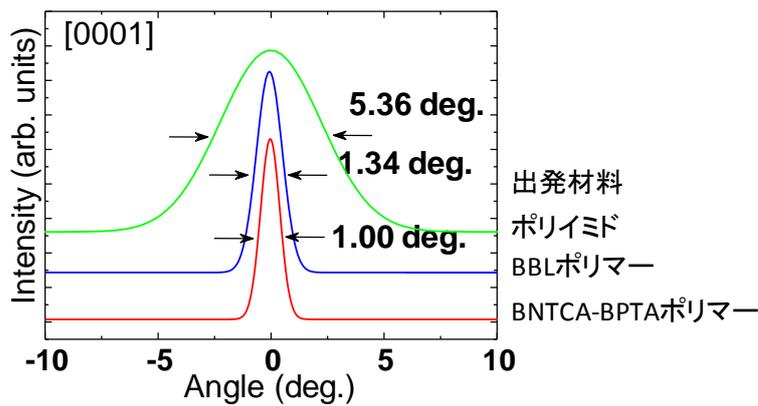


図9 様々なポリマーを出発材料に用いたグラファイトシート
のEBSD方位角分布

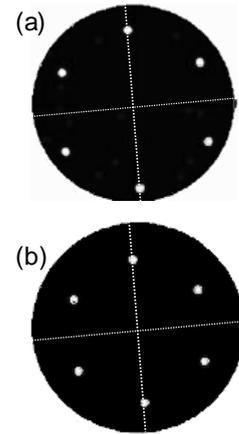


図10 グラファイトシートおよびGaNの $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ 方位EBSD極点図
($2 \times 2 \mu\text{m}^2$)

発材料に用いたグラファイトシートと、その上に成長したGaNについて測定範囲 $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ のEBSD極点図測定を行った結果を図10に示す。明瞭な6回対称性が観測されており、グラファイト上にGaN薄膜がエピタキシャル成長していることが確認された。GaN薄膜の結晶性をEBSD方位角分布の半値幅測定によって求めたところ、 $\langle 0001 \rangle$ 方位で 0.19° 、 $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ 方位で 0.39° であり、グラファイト上に高品質GaN成長が実現していることが見出された。また、グラファイト上GaN薄膜の光学特性をフォトルミネッセンス測定によって評価し、GaNとグラファイトの界面反応に起因したC原子の拡散の有無を調べた。界面反応バリア層を挿入しない場合、Cに由来する発光が観測され、GaN膜中へのC原子の拡散が示唆されたが、AlNやHfNの界面バリア層を用いた場合にはC原子の混入に由来する発光は観測されず、GaN/グラファイト界面の反応が抑制されていることが分かった。以上のように、グラファイトシート上窒化物半導体薄膜成長の評価技術として、電子ビームや光ビームを用いた評価手法が有用であることが分かった。

PSD法によって作製した窒化物半導体の特性評価

また、本項目ではプロセスグループがPSD法によって作製した窒化物半導体薄膜の特性評価を行った。半絶縁性GaNテンプレート上にPSD法を用いて成長したノンドーブGaN薄膜のフォトルミネッセンス測定を行ったところ、バンド端近傍からの発光が明瞭に観測され、その発光半値幅は 37 meV と小さく、従来のMOVPE法によって成長されたGaNと同等の優れた光学特性を有していることが分かった。次に、Siドーブ量を変化させてn型GaN薄膜を成長し、その電気特性を調べた。図11(a)に示す電子濃度と電子移動度の関係から分かるように、PSD法においても高い電子移動度を持つ高品質試料を得ることができる。これらの値がMOCVD法やMBE法などで報告されているデータのプロット上に乗っていることから、PSD法で作製したGaN薄膜が素子応用可能な品質であることが分かった。また、Mgドーブによってp型化したGaN層のホール濃度について測定温度依存性を調べた結果を図11(b)に示す。理論フィッティングからその活性化エネルギーを見積もったところ 144 meV という値が得られ、他の手法で成長したp型GaN試料にほぼ近い値を得た。以上の結果から、PSD法を用いた場合でも、従来のMOVPE法を用いた場合と同等の電気特性や光学特性を有する高品質GaN薄膜の成長が可能であることが明らかになった。この成果は、安価で大面積化に適したスパッタリングプロセスにおいても高品質な半導体薄膜を得られることを示し

た初めての例であり、PSD 法が窒化物半導体結晶成長手法として極めて有望であることを示している。

上記に示すように、PSD 法を用いて作製した GaN 薄膜が電子素子に応用できる品質を有していることが見出されたことから、本項目において高電子移動度トランジスタ (HEMT) への応用を見据えた AlGaIn/GaN ヘテロ構造の作製を試みた。図 12(a) は従来型の基板上に作製した AlGaIn/GaN ヘテロ構造の X 線回折測定の結果であるが、AlGaIn0002 回折が明瞭に観測されており、GaN 薄膜上にエピタキシャル成長していることがわかる。また、回折カーブには平坦な表面、界面を反映したフリンジ構造が見られた。逆格子マッピングを行ったところ、図 12(b) に示すように、GaN と AlGaIn が面内方向で同じ格子定数となっており、AlGaIn が GaN に対してコヒーレント成長していることが分かった。回折位置から組成を見積もったところ、Al 組成 25% の $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ が成長しており、ほぼ設計通りであった。AlGaIn/GaN ヘテロ界面には、AlGaIn のコヒーレント成長に伴ったピエゾ電界によって高濃度の 2 次元電子ガスが誘起されることが知られている。そこで容量電圧測定によって深さ方向の電子濃度を調べたところ、図 12(c) から分かるようにヘテロ界面に $10^{13}/\text{cm}^2$ 台の高濃度 2 次元電子ガスの形成が確認できた。この結果はスパッタ法による世界初の AlGaIn/GaN ヘテロ構造 2 次元電子ガスの作製例である。これらの結果は、安価な PSD 法が受発光素子のみならず電子素子の作製にも有望な結晶成長手法であることを示しており、半導体産業にとってインパクトは極めて大きい。

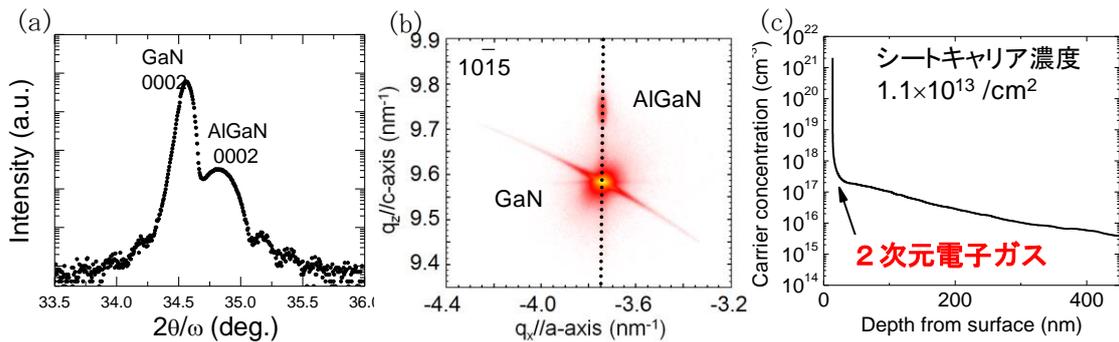


図 12 パルススパッタ堆積法によって作製した AlGaIn/GaN ヘテロ構造の(a)XRD 測定結果、(b)逆格子マップ、(c)キャリア濃度の深さ依存性

3.3 デバイス作製(東大デバイスグループ)

本項目では、プロセスグループが開発した PSD 法による半導体結晶成長技術を用いてグラファイト上への半導体デバイス作製を行い、その素子動作実証に取り組んだ。具体的

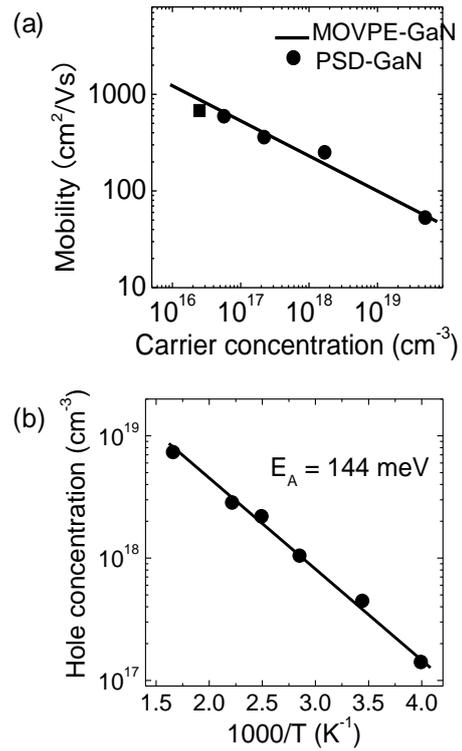


図 11 (a)パルススパッタ堆積法によって作製した GaN 薄膜の電子濃度と移動度の関係、(b) Mg ドープ GaN ホール濃度の温度依存性

は、プロセスグループで開発した高品質結晶成長技術、p型n型の伝導性制御技術、急峻なヘテロ界面を有するヘテロ構造作製技術、組成均一性に優れた混晶作製技術を統合し、発光ダイオードや高電子移動度トランジスタ、太陽電池といったデバイス作製プロセスの開発を行った。

フルカラーLEDの作製

プロセスチームにおいて、反応バリア層、pn制御、多層膜技術などのPSD法による高品質半導体結晶作製技術の開発が予想よりも早く進んだことから、計画を前倒してLEDの試作に取り組んだ。LED構造の活性層に用いられるInGaN成長では、従来、InNとGaNの相分離により高In濃度InGaNの実現が難しかったため、青色以外の高効率受発光素子の作製は困難であった。一方、プロセスグループにおいて、PSD法による低温結晶成長技術を用いれば相分離反応を抑制でき、高品質InGaN薄膜の作製が可能であることが見出された。そこで、様々なIn組成のInGaNを活性層に用いたLED構造作製プロセスを従来型の単結晶基板上において開発したところ、図13(a)、(b)に示すように青、緑、赤の電流注入発光を示すフルカラーLEDの作製に成功した。この成果は、PSD法による低温結晶成長技術を用いれば、高In組成InGaNを用いた素子を作製でき、従来手法では困難であった長波長領域の高効率LEDや高効率太陽電池の開発が可能であることを示している。

上述のPSD法によるフルカラーLED作製技術と、プロセスグループで開発されたグラファイトシート上への窒化物半導体薄膜成長技術を統合し、グラファイトシート上へのLED作製に取り組んだ。図14(a)の構造概略図に示すように、グラファイトシート上に反応防止やGa極性化のための界面バッファ層を堆積した後に、p型GaN/[InGaN/GaN]量子井戸構造/n型GaNを成長した。オーミック電極を形成後に電流注入を行ったところ明瞭な青色発光が観測され、グラファイトシート上LEDが正常に動作することを実証できた。また、量子井戸構造内のInGaN井戸層のIn組成を増加することによって赤色発光を示すLEDの作製も可能であった。この成果は、グラファイトシート上において半導体素子動作を実証した世界

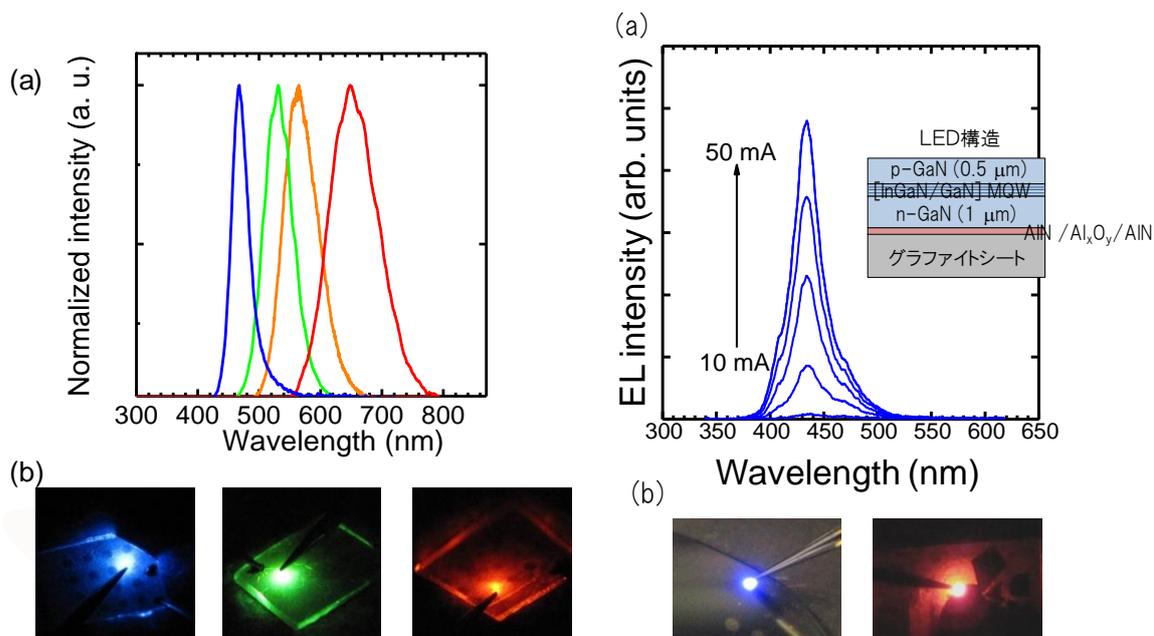


図13 PSD法によってサファイア基板上に作製した窒化物半導体フルカラー発光ダイオード: (a) 電流注入発光スペクトル, (b) 発光中の写真

図14 グラファイトシート上に作製したLEDの(a)電流注入発光スペクトルと(b)発光中の写真

初の例であり、将来の超低価格 LED 照明や大面積 GaN 発光・表示素子、低価格高効率半導体太陽電池、低価格 GaN パワー素子等のグラファイト上エレクトロニクス実現に道を開くものと期待される。このように本研究では、結晶品質のよいグラファイトシートの利用や PSD 法による窒化物半導体薄膜成長技術を構築したことによって、グラファイトシート上への LED 素子作製に成功した。一方、近年のグラフェン成膜技術の著しい進展により、様々な基板材料上に転写された高結晶性グラフェンを手に入れることが可能となっている。そこで本技術の新たな展開として、グラフェンが転写されたアモルファス SiO₂ (グラフェン/SiO₂) 上への LED 素子作製を試みた。グラフェン/SiO₂ 上への窒化物半導体薄膜成長については、プロセスグループにおいてその条件が見出され、高品質 GaN 薄膜成長が可能となった。本グループにおいて LED 構造を作製したところ、全可視光領域で電流注入発光が観測され、グラフェン/SiO₂ 上のフルカラーLED 動作を実証することができた。この技術は、基板材料を選ばない半導体結晶成長法として半導体エレクトロニクスに新潮流を生み出すと期待でき、ガラスやポリマー、金属など様々な基板上への半導体素子作製技術に応用できると考えられる。

この他、プロセスグループにおいて開発された低温 p 型 GaN 薄膜作製技術を用いることで、LED 作製プロセスの低温化にも成功した。また、N 極性面上での素子作製プロセスの開発を行い、LED 動作と疑似太陽光照射下における光起電力の発生を確認した。

AlGa_N/Ga_N ヘテロ構造を用いた高電子移動度トランジスタ(HEMT)の作製

プロセスグループにおける PSD 法による結晶成長技術の進展に伴い、電子素子への応用が可能な品質の GaN 薄膜や AlGa_N/Ga_N ヘテロ構造を得られるようになったことから、AlGa_N/Ga_N ヘテロ構造を用いた高電子移動度トランジスタ (HEMT) の作製プロセスを開発した。図 15(a) は実際に作製した素子の光学顕微鏡写真であるが、AlGa_N/Ga_N ヘテロ構造を作製した後に、リソグラフィによるパターンニング、誘導結合型プラズマエッチングによるメサ構造の作製、電極形成を行った。ソースおよびドレイン部のオーミック電極には Ti/Al/Ti/Au を、ゲート部のショットキー電極には Au を用いた。図 15(b) は作製した HEMT の IV 特性である。ドレイン電流がゲート電圧によって明瞭に変化し、ゲート電圧が -4V でドレイン電流がシャットオフされること分かった。ゲート電圧 0V においてドレイン電流が流れているのは、AlGa_N/Ga_N ヘテロ界面での分極電場に起因した 2 次元電子ガスの自発的な生成に対応するものである。この結果は、安価な PSD 法が電子素子の作製にも有望な結晶成長手法であることを示しており、半導体産業にとってインパクトは極めて大きい。

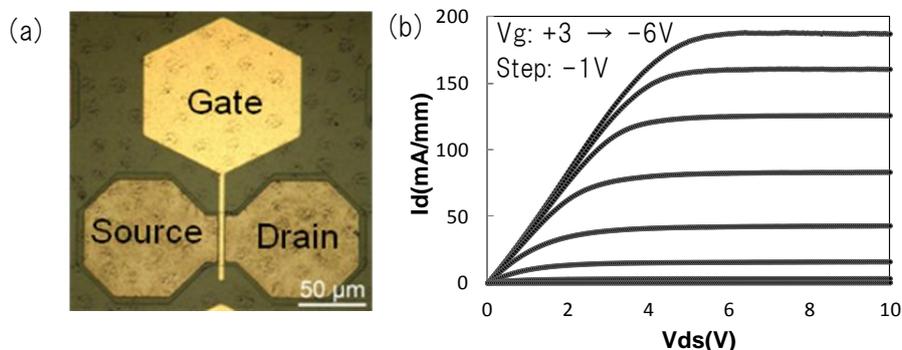


図 15 PSD 法を用いて作製した AlGa_N/Ga_N ヘテロ構造 FET の (a) 光学顕微鏡写真と (b) IV カーブ

3.4 中性粒子ビームを用いたダメージフリー窒化物半導体素子作製プロセスの開発(東大評価グループ)

AlGaIn/GaN ヘテロ構造を用いた HEMT は次世代ハイパワー素子への応用が期待されているが、実用に供するためには素子のノーマリーオフ化が必須である。ノーマリーオフ化の技術として、ゲート領域のリセスエッチングを行う方法などが知られているが、従来手法ではこれらの工程におけるプラズマダメージに起因した素子特性の劣化が問題となっていた。本研究項目ではこの問題を解決するために、中性粒子ビーム (NB) を用いた低ダメージ加工技術を開発し、HEMT の高性能化を試みた。本研究は、NB エッチング技術を有する寒川チームとのチーム間共同研究として行った。NB エッチング後に GaN 薄膜の表面 AFM 観察を行ったところ、表面ラフネスの rms 値は 0.5 nm と小さく、高い平坦性が維持されていることが分かった。室温 PL 測定によってエッチング前後の光学特性を評価したところ、従来法である ICP エッチング技術を用いてエッチングしたサンプルに比べて、NB エッチングサンプルでは欠陥に由来するイエロー発光成分の増大が小さく (図 16(a))、エッチング加工に由来する欠陥生成が抑制されていることが示唆された。図 16(b) はエッチング前後の GaN についてのホール効果測定結果である。ICP エッチング後にはキャリア濃度の増大と移動度の低下が観測された。NB エッチングサンプルでも同様の傾向が得られたものの、その劣化の程度は ICP エッチングの場合と比べて大幅に改善されていることが分かる。これらの結果から、NB エッチングを用いればエッチングダメージを軽減することが可能であることが明らかになり、NB エッチングプロセスを用いることによって性能の高い窒化物半導体素子が作製できると期待される。

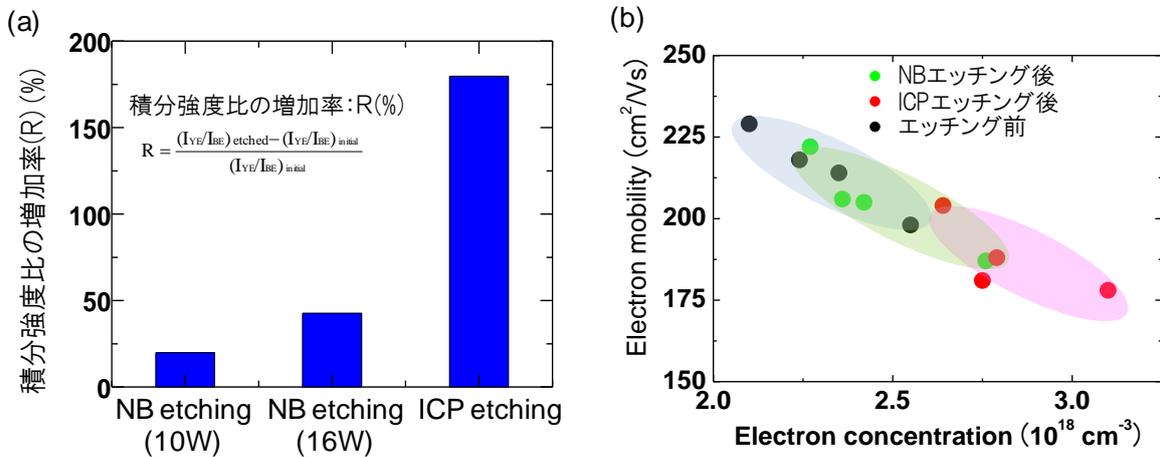


図 16 (a) GaN エッチング前後における欠陥由来の発光 (I_{VE}) とバンド端近傍からの発光 (I_{BE}) の積分強度比増加率、(b) エッチング前後での GaN の移動度とキャリア濃度

次に、AlGaIn/GaN ヘテロ構造の AlGaIn 表面を中性粒子ビームによってエッチングし、ショットキー特性を測定することでダメージ評価を行った。比較

表2 エッチング後の Au/AlGaIn/GaN 構造のショットキー特性

	リーク電流 (A/cm^2) at -5V	ショットキー障壁 (eV)	理想係数
NBエッチング後	1.39×10^{-2}	0.74	1.92
ICPエッチング後	5.43×10^{-1}	0.66	2.01

として、従来型の誘導結合型プラズマ(ICP)エッチングを行ったサンプルを用いた。ショットキー電極には Au を、オーミック電極には Al を堆積した。電気特性を評価したところ、表 1 に示すように NB エッチングを行ったサンプルでは、従来型のプラズマエッチングを行ったサンプルよりも逆バイアス時のリーク電流が 1 桁抑制されており、低ダメージ化を実現できていることが明らかになった。さらに、実際に NB エッチング技術を用いて作製した HEMT は、良好なトランジスタ特性を示し、本技術が低ダメージエッチング技術として有望であり、素子の高性能化に有効な手法であることが確認できた。

3.5 第一原理計算によるグラファイトシート上 GaN 成長メカニズムの解明(鳥取大グループ)

鳥取大グループでは、東大グループにおいて見出されたグラファイト上へのⅢ族窒化物へテロエピタキシャル成長のメカニズムを解明するため、まず、グラファイト基板上に成長した GaN の界面構造の理論的解明を試みた。界面構造を解明することは、グラファイト上に成長した GaN 薄膜の高品質化に繋がるので、この系をエレクトロニクスデバイスとして応用するためにも必要である。東大グループの実験において、グラファイト上に成長した GaN 薄膜の電子線回折像が 1×1 の回折スポットのみを示したことから、複雑な表面緩和構造の可能性をひとまず除外し、単純な 1×1 構造でグラフェン表面上にガリウム原子と窒素原子を積層した計算を行った。図 17 に、第一原理計算から求められたグラフェンと GaN の界面近傍における構造模式図を示す。

計算の結果、グラフェン上に N 原子が吸着し、その上に N 極性 GaN(000 $\bar{1}$) 構造が成長する、という構造が最も安定であることが明らかになった。Ga 極性 GaN の成長は、グラフェンとの結合エネルギーが小さく、ストイキオメトリな成長条件では実現しえないことが判明した。この結果は、東大グループの実験で示された実験事実と一致しており、界面近傍における吸着原子種とその積層時における原子配列が、極性を決定する要因であることを示唆している。また、グラフェン上に N 極性 GaN のバイレイヤーが 2 層積層した場合の計算において、GaN の格子定数はバルクの格子定数に近いものであったのに対し、グラフェンの格子定数は GaN に引きずられて約 20% 伸び、平面結合角も本来の 120° からずれており、 sp^2 結合ではない結合が混じっていることが示唆された。

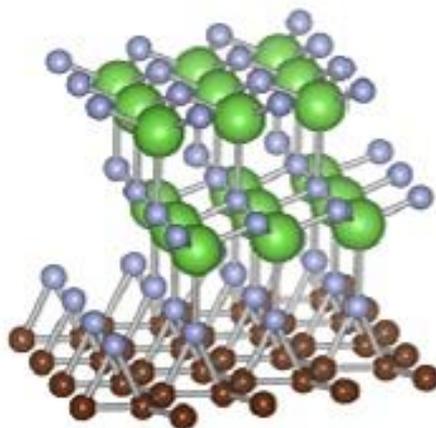


図 17 GaN/グラフェンの界面構造模式図

グラファイトは 2 次元層状物質であり、層間の相互作用は弱い。従って、GaN を成長した場合に、GaN と結合した層のみが原子間距離を引き延ばされ、表面層以外のグラファイトはその格子不整による歪みを受けないということが推測できる。この推測どおりであるとすれば、GaN に限らず多くの材料が格子不整にほとんど影響を受けることなく、グラファイト上に結晶成長しうると考えられる。そこで、第一原理計算を用いてグラファイトなどの 2 次元層状物質の表面上における、3 次元物質の結晶成長を調べ、その一般論の構築を目指すことを目的として研究を行った。グラファイトは 2 次元層状物質であってそれぞれの層はグラフェンである。層と層の間の相互作用はきわめて弱いので、グラファイト表面への吸着系の取り扱い、ほぼ、グラフェン上への吸着系として扱って大差ないと考えられる。平成 21 年度は 20 年度に引き続いて、グラフェン上に GaN を積層した系の第一原理計

算を行った。Ga と N によって構成されるバイレイヤーを 1 層として、平成 20 年度は 2 層バイレイヤーが積層された系について計算を行い、21 年度はその積層数を 2 層～5 層まで変化させた系において計算を行った。その計算結果を図 18(a) に示すが、横軸が GaN バイレイヤーの積層数、縦軸が形成エネルギーである。Ga 極性 (Ga-terminate) の場合に比べ、N 極性 (N-terminate) の方が安定に形成され、またその形成エネルギーは積層数を増やしても、顕著な変化は無いことが分かった。図 18(b) には、GaN バイレイヤーの積層数と GaN の格子定数の関係を示す。グラフ上 GaN の積層数が増加するのに伴い、GaN の格子定数がバルク値に近づいていくことがわかる。

次に、第一原理計算を用いて、グラファイトなどの 2 次元層状物質の表面上の 3 次元物質の結晶成長を調べ、その面内配向関係や格子歪みなどについて明らかにすることを試みた。具体的には、平成 21 年度に明らかになった 1 層のグラファイト上への N 極性 GaN の成長

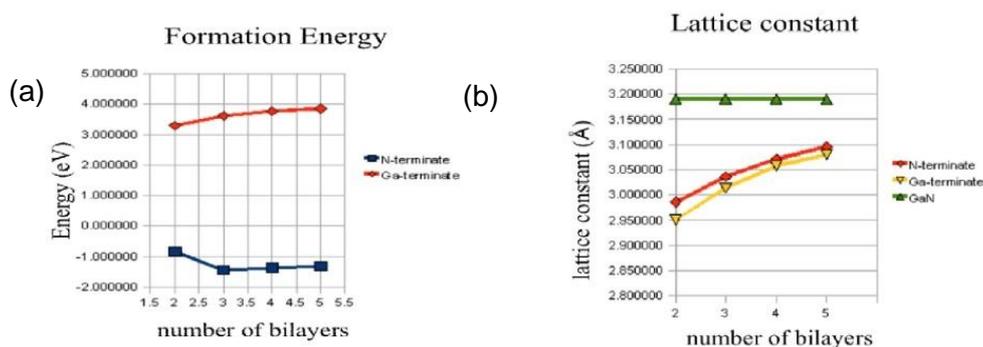


図 18 グラフェン上に成長した (a) GaN 形成エネルギーと (b) GaN の格子定数の GaN 積層数依存性

という研究成果を基に、グラファイト基板上への GaN 成長の計算、InN や AlN 成長の計算、グラフェンもしくはグラファイト上への様々な原子種の吸着に関する計算を行った。まず、グラファイト上への GaN 成長に関する計算の結果を図 19(a) に示す。グラファイトは 2 層のグラフェンで構成した。その結果、1 層グラフェン上への成長の場合と同様に、グラファイト上においても N 極性 GaN が安定に成長することが明らかになった。また、表面グラフェンの格子定数が、GaN の吸着によって 120% 伸びた状態、すなわち 6×6 のグラファイト上に 5×5 のグラフェンが形成された状態について計算を行い、格子が伸びた状態でもグラフェンが安定に存在できることを見出した。さらに GaN の形成による格子歪みの影響は、下側のグラフェン層に対してはほとんど無いことも計算によって明らかになった。これは、

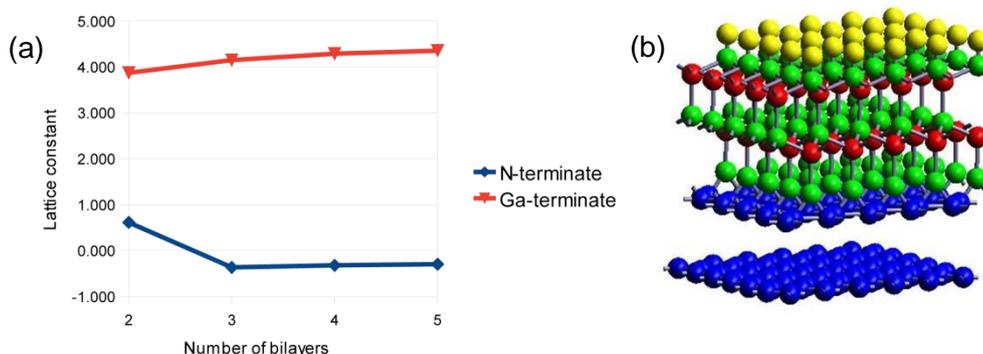


図 19 グラファイト基板上の GaN 成長における (a) GaN 積層数と格子定数の関係、(b) 界面構造模式図

グラファイトの層間の相互作用が極めて弱いためであると考えられる。図 19(b)はグラファイト上への N 極性 GaN 成長における界面構造模式図である。また、グラファイト上の AlN および InN の成長について計算を行った結果、AlN は GaN 成長の場合と同様にグラファイト上にエピタキシャル成長が可能であるが、InN のエピタキシャル成長は困難であることが明らかになった。

実際のグラフェンやグラファイト表面成長において、基板となるグラフェン/グラファイトの表面が欠陥の無い理想的な 2 次元結晶であることは有り得ない。原子欠損等などの欠陥が必ず欠陥が存在するので、その影響を見る必要もある。そこで 23 年度の研究において、1 原子分の欠損が存在するグラフェン表面に、N 原子が吸着する場合について調べたところ、図 20 のように N 原子がその欠損部に強い結合で嵌まり込むことが明らかになった。さらに、このような表面上に N 極性 GaN が成長するとした場合、無欠陥のグラフェン上の場合と比べても、全く形成エネルギーが変わらないという結果が示された。すなわち、グラファイト表面の格子欠陥があったとしても、窒化物半導体薄膜成長はほとんど影響を与えないことが明らかになった。

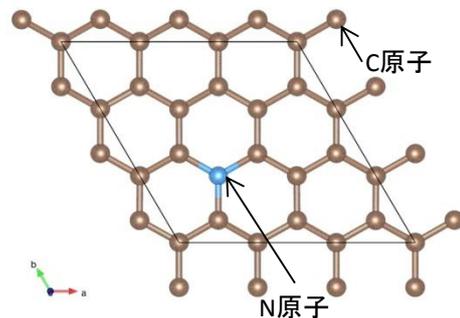
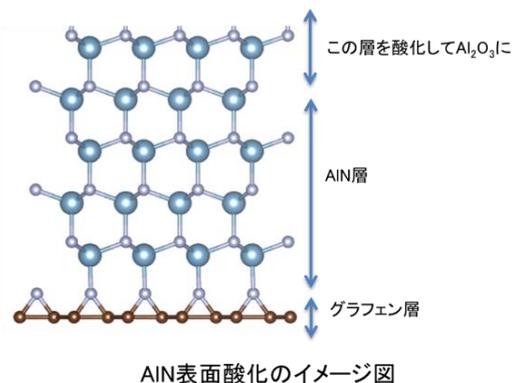


図 20 欠陥の存在するグラフェン上への N 吸着の模式図

次に、グラファイト上 GaN 薄膜成長における極性制御メカニズムを第一原理計算によって明らかにした。ウルツ鉱型の結晶構造を有する窒化物半導体では、c 軸方向に中心対称性を持たないため、Ga 極性と N 極性が存在する。この極性は窒化物半導体の結晶品質や素子特性に大きな影響を与えることが知られており、グラファイト上に成長した GaN 薄膜をデバイス応用するためには、その極性制御が不可欠である。一般に Ga 極性 GaN の方が、N 極性 GaN に比べて優れた表面平坦性や低い残留キャリア濃度を示すことから、LED や HEMT への応用において有利である。本グループでの計算や東大グループでの実験において明らかになったように、グラファイト上に GaN 薄膜を成長した場合、N 極性面が安定に成長する。そのため、グラファイト上への Ga 極性 GaN 成長を実現するためには、何らかの極性制御プロセスを導入することが必要となった。この課題について、東大グループにおいて実験が進められた結果、グラファイト上に成長した N 極性 AlN 薄膜表面の酸化プロセスを導入し、その上に GaN 薄膜を成長することで、Ga 極性 GaN 薄膜成長を実現できることが明らかとなった。本グループでは、この AlN 表面酸化過程の最適化条件を探索するため、第一原理計算による極性反転プロセスのメカニズム解明を行った。



AlN表面酸化のイメージ図

計算を行うにあたっては、図 21 に示すような構造を想定した。計算を行った結果、AlN 表面の熱酸化によって形成される酸化層では、コランダム構造がエネルギー的に安定であることが示された。この熱酸化された AlN 表面上に吸着した Al 原子と N 原子について、それらの表面移動バリアエネルギーを調べたところ、サファイア単結晶基板の場合とほぼ同じであることが分かった。この事実は、これまで藤岡と石井らが共同で報告していたサファイア単

図 21 グラフェン上に成長した AlN 薄膜を表面酸化した場合の構造図

結晶基板上の GaN 極性反転技術を応用できることを示している。具体的には、酸化膜の表面に Al 層が吸着された状態とすることでその上に成長する GaN 薄膜が Ga 極性になる、という手法である。この手法を適用することで、図 22 に示すようなメカニズムでグラファイト上に Ga 極性 GaN 薄膜成長が可能となることが明らかになった。

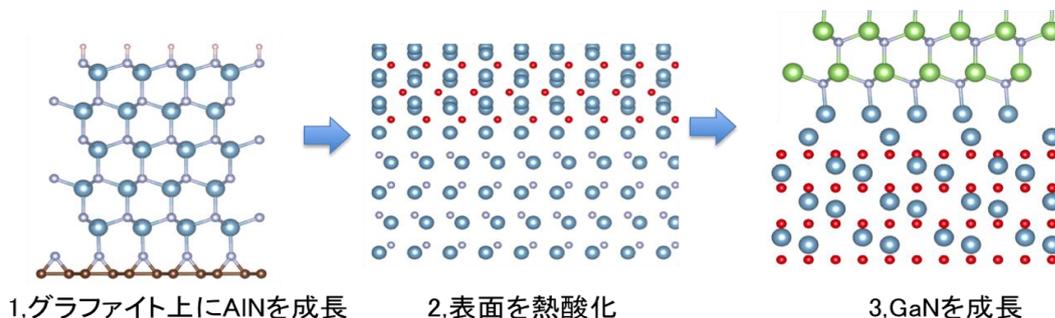


図 22 グラファイト上への Ga 極性 GaN 薄膜成長の概略図

次に、2次元物質上の3次元物質成長について、その一般的な理解を深めるため、様々な種類の原子について第一原理計算を行った。具体的には、グラフェン上に64種の原子種を単原子吸着させ、その吸着サイト、吸着エネルギー、価電子数を第一原理計算によって調べた。その結果を図 23 に示すが、各原子種についてのスピンの有・無、および吸着サイトを示す。各吸着サイトは、B (ブリッジサイト)、H (6員環の中心)、T (on top)として表示した。この表から分かるように、金属原子など大部分の原子種はHサイトに吸着するのに対し、気体原子などはブリッジサイトに吸着する。また、遷移金属原子ではdバンドが半分占有された原子種が最も結合が強いことが明らかになった。N原子はスピン分極しない状態が最安定であり、Al、Ga、In では結合エネルギーは弱いがスピン分極した状態が最安定であった。

H																He					
1.03																					
		no-spin		Spin																	
		B		B																	
		H		H																	
		T		T																	
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
1.21	0.27															1.4	1.8	4.6	3.3	2.5	
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
0.47	0.03															1.5	1.2	0.7	1.6	1.3	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
0.59	0.65	2.0	2.3	1.9	0.1	0.2	1.9	3.6	2.7	0.7	0.1	1.3	1.6	0.3	1.0	0.8					
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
0.55	0.37	2.3	2.9	2.8	2.0	2.7	3.8	3.1	1.9	0.2	0.1	1.2	1.3	0.2	0.5	0.8					
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi							
0.65	0.70	2.3	2.7	2.9	2.4	1.8	2.5	3.5	2.6	0.7	0.1	1.1	1.3	1.1							

図 23 グラフェン上原子吸着 結合エネルギーと結合サイト

図24はグラフェン上の吸着原子について、その移動バリアエネルギーを計算したものである。この図は、グラフェン上にどのような原子と原子の組み合わせによる3次元物質を成長させることが可能かどうかを判定するために重要な基礎データとなるものであり、結晶成長において一つの指針を与えるものである。

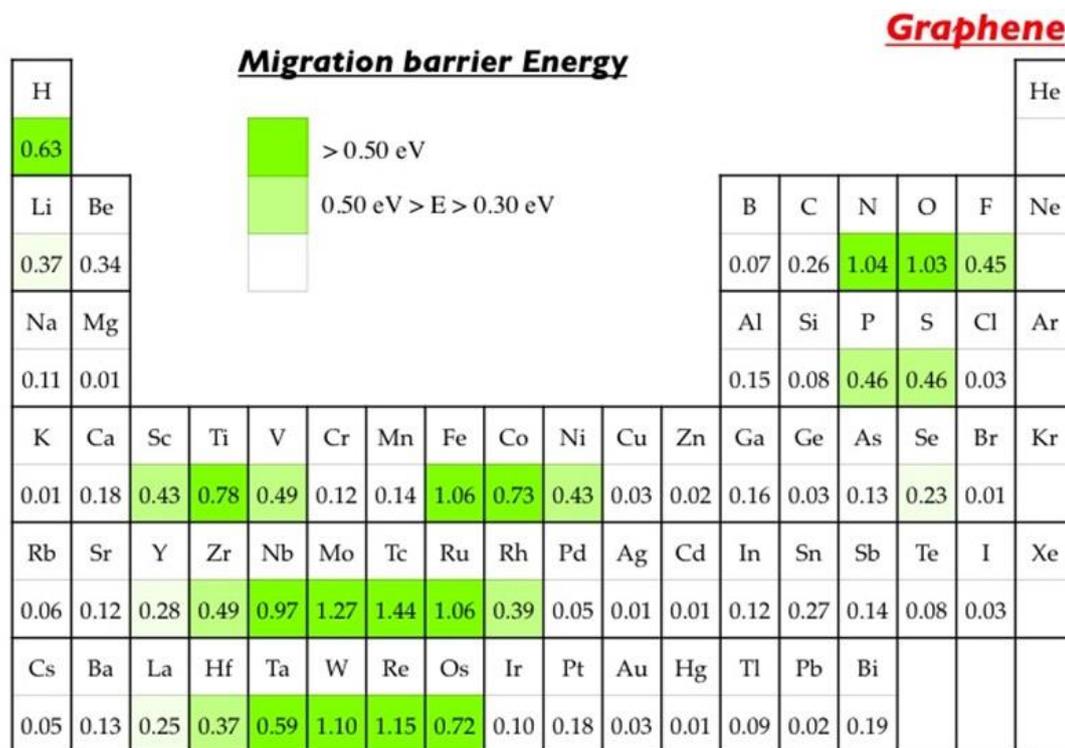


図 24 グラフェン上に吸着した原子の面上移動バリアエネルギー

原子吸着においてはスピン偏極も考慮したが、遷移金属元素の大部分は磁性を示して吸着することが計算で明らかになった。スピンを含めた場合の各サイト上での吸着エネルギー値と、マイグレーションバリア、の計算結果について、その一部を表3に示す。これは、スピンを考慮した場合としない場合とで吸着エネルギーの差が大きかったいくつかの遷移金属元素についての計算値であり、右端には磁気モーメントを掲げる。この結果はグラファイト表面の修飾やナノ構造形成、そして窒化ガリウム形成の際の不純物ドーピングなどにおいて実験の指針を与える有益な計算結果である。

表 3 代表的遷移金属元素の吸着エネルギーと磁気モーメント

adatom	migration	B-site	H-site	T-site	moment
Ti	0.78	1.76	2.55	1.77	1.65
V	0.45	1.46	1.91	1.41	1.36
Cr	0.12	0.65	0.77	0.65	4.16
Mn	0.14	-0.01	0.26	0.12	0.78
Fe	1.06	1.20	2.31	1.25	1.86
Co	0.73	1.88	2.61	1.83	0.92
Ni	0.43	2.22	2.65	2.17	0.00

子を作製するための基板材料として用いることが出来るなど、ナノテクノロジー・ナノ科学での用途が期待される。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
H	ΔE [eV] : h-BN GGA spin																He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											0.10	0.20	0.15	0.51	0.35		
												Al	Si	P	S	Cl	Ar	
												0.04	0.16	0.00	0.12	0.05		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
		0.25	0.14	0.29			0.02	0.11	0.21	0.03			0.04	0.13	0.00	0.21	0.05	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
				0.02	0.13			0.03	0.37	0.05	0.08			0.03	0.09	0.00	0.00	0.02
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi				
		0.27	0.03	0.12	0.01			0.19	0.12	0.18	0.01			0.02	0.08	0.00		

図 27 六方晶 BN 上に吸着した原子の移動バリアエネルギー

§ 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 1 件、国際 (欧文) 誌 57 件)

[東大グループ]

1. K. Okamoto, S. Inoue, N. Matsuki, T.-W. Kim, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka, and A. Ishii, "Epitaxial growth of GaN films grown on single crystal Fe substrates", *Appl. Phys. Lett.* **93** (2008) 251906. **DOI:** 10.1063/1.3056117
2. T. Fujii, K. Shimomoto, R. Ohba, Y. Toyoshima, K. Horiba, J. Ohta, H. Fujioka, M. Oshima, S. Ueda, H. Yoshikawa, and K. Kobayashi, "Fabrication and Characterization of AlN/InN Heterostructures", *Appl Phys. Exp.* **2** (2009) 011002. **DOI:** 10.1143/APEX.2.011002
3. K. Sato, J. Ohta, S. Inoue, A. Kobayashi, and H. Fujioka, "Room-Temperature Epitaxial Growth of High Quality AlN on SiC by Pulsed Sputtering Deposition", *Appl. Phys. Exp.* **2** (2009) 011003. **DOI:** 10.1143/APEX.2.011003
4. K. Mitamura, T. Honke, J. Ohta, A. Kobayashi, H. Fujioka, and M. Oshima, "Characteristics of InN grown directly on Al₂O₃(0001) substrates by pulsed laser deposition", *J. Cryst. Growth* **311** (2009) 1316. **DOI:**10.1016/j.jcrysgro.2008.12.015
5. K. Okamoto, S. Inoue, T. Nakano, J. Ohta, and H. Fujioka, "Epitaxial growth of GaN on single-crystal Mo substrates using HfN buffer layers", *J. Cryst. Growth* **311** (2009) 1311. **DOI:** 10.1016/j.jcrysgro.2008.11.097
6. K. Ueno, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka, H. Amanai, S. Nagao, and H. Horie, "Room temperature growth of semipolar AlN (1 $\bar{1}$ 02) films on ZnO(1 $\bar{1}$ 02) substrates by pulsed laser deposition", *Phys. Status Solidi RRL* **3** (2009) 58. **DOI:** 10.1002/pssr.200802263
7. K. Shimomoto, A. Kobayashi, K. Ueno, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka, H. Amanai, S. Nagao, and H. Horie, "Room-temperature epitaxial growth of high-quality m-plane InGaN films on ZnO substrates", *Phys. Status Solidi Rapid Research Letter* **3** (2009) 124. **DOI:** 10.1002/pssr.200903072
8. J. Ohta, K. Sakurada, F.- Y. Shih, A. Kobayashi, and H. Fujioka, "Growth of group III nitride films by pulsed electron beam deposition", *J. Solid State Chem.* **182** (2009) 1241. **DOI:** 10.1016/j.jssc.2009.01.028
9. R. Ohba, K. Mitamura, K. Shimomoto, T. Fujii, S. Kawano, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, "Growth of cubic InN films with high phase purity by pulsed laser deposition", *J. Cryst. Growth* **311** (2009) 3130. **DOI:** 10.1016/j.jcrysgro.2009.03.010
10. R. Ohba, J. Ohta, K. Shimomoto, T. Fujii, K. Okamoto, A. Aoyama, T. Nakano, A. Kobayashi, H. Fujioka, and M. Oshima, "Epitaxial growth of high purity cubic InN films on MgO substrates using HfN buffer layers by pulsed laser deposition", *J. Solid State Chemistry* **182** (2009) 2887. **DOI:** 10.1016/j.jssc.2009.08.002
11. K. Shimomoto, J. Ohta, , T. Fujii, R. Ohba, A. Kobayashi, M. Oshima, and H. Fujioka, "Epitaxial growth of InN films on lattice matched EuN buffer layers", *J. Cryst. Growth* **311** (2009) 4483. **DOI:** 10.1016/j.jcrysgro.2009.08.020
12. T. Kajima, A. Kobayashi, K. Shimomoto, K. Ueno, T. Fujii, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, "Layer-by-layer growth of InAlN films on ZnO (000-1) substrates at room temperature", *Applied Physics Express* **3** (2010) 021001. **DOI:** 10.1143/APEX.3.021001
13. T. Fujii, A. Kobayashi, K. Shimomoto, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka, "Structural Characteristics of GaN/InN Heterointerfaces Fabricated at Low Temperatures by Pulsed Laser Deposition", *Applied Physics Express* **3** (2010) 021003. **DOI:** 10.1143/APEX.3.021003
14. S. Inoue, M. Katoh, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka, "Investigation on the conversion efficiency of InGaN solar cells fabricated on GaN and ZnO substrates", *Phys. Status Solidi RRL* **4**, No. 3–4, 88– 90 (2010). **DOI:**10.1002/pssr.201004044
15. K.Ueno, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka, "Improvement in the crystalline quality of semipolar AlN (1-102) films using ZnO substrates with self-organized nanostripes", *Appl. Phys. Express* **3**, (2010) 041002-1-3. **DOI:** 10.1143/APEX.3.041002
16. K.Ueno, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka, "Structural properties of semipolar Al_xGa_{1-x}N

- (1-103) films grown on ZnO substrates using room temperature epitaxial buffer layers", *Phys. Status Solidi (a)* 207 (2010). **DOI:** 10.1002/pssa.201026209
17. K. Shimomoto, A. Kobayashi, K. Ueno, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka, "Characteristics of thick m-plane InGaN films grown on ZnO substrates using room temperature epitaxial buffer layers", *Appl. Phys. Express*, 3(2010) 061001-1-3. **DOI:** 10.1143/APEX.3.061001
 18. A. Kobayashi, K. Shimomoto, J. Ohta, H. Fujioka, M. Oshima, "Optical polarization characteristics of m-plane InGaN films coherently grown on ZnO substrates", *Phys. Status Solidi (RRL)* 4(2010) 188–190. **DOI** 10.1002/pssr.201004204
 19. K. Ueno, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka, "Structural and optical properties of nonpolar AlN (11-20) films grown on ZnO (11-20) substrates with a room-temperature GaN buffer layer", *Jpn. J. Appl. Phys.* 49, (2010) 100202. **DOI:**10.1143/JJAP.49.060213
 20. T. Fujii, A. Kobayashi, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka, "Structural characteristics of semipolar InN (11-2l) films grown on yttria stabilized zirconia substrates", *Phys. Status Solidi A* 207, No. 10 (2010)2269. **DOI:**10.1002/pssa.201026215
 21. T. Kajima, A. Kobayashi, K. Ueno, K. Shimomoto, T. Fujii, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, "Room-temperature epitaxial growth of high quality m-plane InAlN films on nearly lattice-matched ZnO substrates", *Jpn. J. Appl. Phys.* 49, (2010) 070202. **DOI:** 10.1143/JJAP.49.070202
 22. K. Shimomoto, A. Kobayashi, K. Mitamura, K. Ueno, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka, "Characteristics of m-plane InN films grown on ZnO substrates at room temperature by pulsed laser deposition", *Jpn. J. Appl. Phys.* 49(2010) 080202-1-3. **DOI:** 10.1143/JJAP.49.080202
 23. T. Fujii, K. Shimomoto, J. Ohta, M. Oshima and H. Fujioka, "Growth orientation control of semipolar InN films using yttria-stabilized zirconia substrates", *Jpn. J. Appl. Phys.* 49(2010) 080204. **DOI:** 10.1143/JJAP.49.080204
 24. A.Kobayashi, S. Kawano, K. Ueno, J. Ohta, H. Fujioka, "Improvements in optical properties of semipolar r-plane GaN films grown using atomically flat ZnO substrates and room temperature epitaxial buffer layers", *Jpn. J. Appl. Phys.* 49 (2010) 100202-1-3. **DOI:**10.1143/JJAP.49.100202
 25. J. W. Liu, A. Kobayashi, K. Ueno, S. Toyoda, A. Kikuchi, J. Ohta, H. Fujioka, H. Kumigashira, and M. Oshima, "Electronic structures of c-plane and a-plane AlN/ZnO heterointerfaces determined by synchrotron radiation photoemission spectroscopy", *Appl. Phys. Lett.* 97, 252111 (2010). **DOI:** 10.1063/1.3530445
 26. K. Ueno, J. Ohta, H. Fujioka, and H. Fukuyama, "Characteristics of AlN films grown on Thermally-nitrided sapphire substrates", *Appl. Phys. Exp.* 4, (2011) 015501-1-3. **DOI:** 10.1143/APEX.4.015501
 27. A.Kobayashi, K. Ueno, J. Ohta, H. Fujioka, "Coherent growth of r-plane GaN films on ZnO substrates at room temperature", *Phys. Status Solidi A* **208**, 4, (2011) 834–837. **DOI** :10.1002/pssa.201026397
 28. F. Y. Shih, A. Kobayashi, S. Inoue, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka, "Fabrication of densely packed arrays of GaN nanostructures on nano-imprinted substrates", *J. Cryst. Growth* **319** (2011) 102-105. **DOI:** 10.1016/j.jcrysgro.2011.01.078
 29. F. Y. Shih, A. Kobayashi, S. Inoue, J. Ohta, and H. Fujioka, "Growth of group III nitride nanostructures on nano-imprinted sapphire substrates", *Thin Solid Films* **519** (2011) 6534–6537. **DOI:** 10.1016/j.tsf.2011.04.120
 30. J. W. Liu, A. Kobayashi, S. Toyoda, H. Kamada, A. Kikuchi, J. Ohta, H. Fujioka, H. Kumigashira, and M. Oshima, "Band offsets of polar and nonpolar GaN/ZnO heterostructures determined by synchrotron radiation photoemission spectroscopy", *Phys. Status Solidi B* 248, No. 4, 956–959 (2011) . **DOI:** 10.1002/pssb.201046459
 31. H. Tamaki, A. Kobayashi, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka, "Dependence on composition of the optical polarization properties of m-plane In_xGa_{1-x}N commensurately grown on ZnO" *Appl. Phys. Lett.* 99 (2011) 061912. **DOI:**10.1063/1.3624462

32. A. Kobayashi, K. Ohkubo, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka, "Polarity control and growth mode of InN on yttria-stabilized zirconia (111) surfaces", *Phys. Status Solidi A* 209, No. 11, 2251–2254 (2012). DOI: 10.1002/pssa.201228287
33. T. Kajima, A. Kobayashi, K. Shimomoto, K. Ueno, T. Fujii, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, "X-ray reciprocal space mapping study on semipolar InAlN films coherently grown on ZnO substrates", *Phys. Stat. Solidi RRL* 5, No. 10–11, 400–402 (2011). DOI: 10.1002/pssr.201105380
34. K. Ueno, A. Kobayashi, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka, "Demonstration of enhanced optical polarization for improved deep ultraviolet light extraction in coherently-grown semipolar Al_{0.83}Ga_{0.17}N/AlN on ZnO substrates", *Appl. Phys. Lett.* 99, 121906 (2011). DOI: 10.1063/1.3641876
35. K. Ohkubo, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, "Polarity dependence of structural and electronic properties of Al₂O₃/InN interfaces", *Appl. Phys. Exp.* 4 (2011) 091002. DOI: 10.1143/APEX.4.091002
36. A. Kobayashi, T. Ohnishi, M. Lippmaa, Y. Oda, A. Ishii, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka, "Polarity replication across m-plane GaN/ZnO interfaces", *Appl. Phys. Lett.* 99, 181910 (2011). DOI: 10.1063/1.3659008
37. J. Liu, A. Kobayashi, K. Ueno, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, "Band configuration of SiO₂/m-plane ZnO heterointerface correlated with electrical properties of Al/SiO₂/ZnO structures", *Jpn. J. Appl. Phys.* 52, 011101-1-4 (2012). DOI: 10.7567/JJAP.52.011101
38. Y. Guo, S. Inoue, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka, "Theoretical study on initial stage of InN growth on cubic zirconia (111) substrates", *Phys. Status Solidi RRL* 7, No. 3, 207–210 (2013). DOI: 10.1002/pssr.201206465
39. K. Okubo, A. Kobayashi, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka, "Electron mobility of ultrathin InN on yttria-stabilized zirconia with two-dimensionally grown initial layers", *Appl. Phys. Lett.* 102, 022103-1-3 (2013). DOI: 10.1063/1.4776210
40. Y. Guo, S. Inoue, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka, "Theoretical Investigation of the Polarity Determination for c-plane InN Grown on Yttria-Stabilized Zirconia (111) Substrates with Yttrium Surface Segregation", *Appl. Phys. Express* 6, 021002-1-3 (2013). DOI: 10.7567/APEX.6.021002
41. T. Kajima, A. Kobayashi, K. Ueno, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, "Structural Properties of m-Plane InAlN Films Grown on ZnO Substrates with Room-Temperature GaN Buffer Layers", *Appl. Phys. Express* 6, 021003-1-3 (2013). DOI: 10.7567/APEX.6.021003
42. J. Liu, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, "Electrical properties of amorphous-Al₂O₃/single-crystal ZnO heterointerfaces", *Appl. Phys. Lett.* 103, 172101-1-4 (2013). DOI: 10.1063/1.4826538
43. A. Kobayashi, K. Ueno, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka, "Atomic scattering spectroscopy for determination of the polarity of semipolar AlN grown on ZnO", *Appl. Phys. Lett.* 103, 192111 (2013). DOI: 10.1063/1.4829478
44. E. Nakamura, K. Ueno, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, "Dramatic reduction in process temperature of InGaN-based light-emitting diodes by pulsed sputtering growth technique", *Appl. Phys. Lett.* 104, 051121 (2014). DOI: 10.1063/1.4864283
45. M. Oseki, K. Okubo, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka, "Field-effect transistors based on cubic indium nitride", *Scientific Reports*, 4, 3951 (2014). DOI: 10.1038/srep03951
46. J. W. Shon, J. Ohta, K. Ueno, A. Kobayashi, and H. Fujioka, "Fabrication of full-color InGaN-based light-emitting diodes on amorphous substrates by pulsed sputtering", *Sci. Rep.* 4, 5325 (2014). DOI: 10.1038/srep05325
47. T. Watanabe, J. Ohta, T. Kondo, M. Ohashi, K. Ueno, A. Kobayashi, and H. Fujioka, "AlGaIn/GaN heterostructure prepared on a Si (110) substrate via pulsed sputtering", *Appl. Phys. Lett.* 104, 182111 (2014). DOI: 10.1063/1.4876449
48. J. W. Shon, J. Ohta, K. Ueno, A. Kobayashi, and H. Fujioka, "Structural properties of GaN films grown on multilayer graphene films by pulsed sputtering", *Appl. Phys. Express* 7, 085502 (2014).

DOI:10.7567/APEX.7.085502

[鳥取大グループ]

1. 石井晃、「原子動力学の第一原理計算から考える化合物半導体のエピタキシャル成長」、表面科学 29 pp.765-770 (2008)
2. A.Ishii, T.Tatani, Y.Oda and K.Nakada, "Density functional theory calculation for GaN and GaP growth on graphite", Proceedings of ALC'09(7th international symposium on Atomic Level Characterization for New Materials and Devices '09, Maui, 2009) ,P4
3. K.Nakada and A.Ishii, "Migration of adatom adsorption on graphene using DFT calculation", Solid State Commun. 151 (2010) 13-16, DOI:10.1016/j.ssc.2010.10.036
4. Kengo Nakada and Akira Ishii, "First-principles investigation of charge density analysis of various adatom adsorptions on graphene" ICPS-30 (2010) proceedings, DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3666615>
5. A.Ishii, T.Tatani, H.Asano and K.Nakada, "Computational study for growth of GaN on graphite as 3D growth on 2D material", phys.stat.sol. (c) 7 347-350 (2010), DOI: 10.1002/pssc.200982430
6. A.Ishii, T.Tatani, S.Hirai and K.Nakada, "Growth of GaN on Graphite Substrate as Growth on Graphene using the Density Functional Theory", ICPS-30 (2010) proceedings, DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.3666288>
7. A.Ishii, T.Tatani and K.Nakada, "Density Functional Calculation for growth of GaN on graphite as 3D growth on 2D material", phys.stat.sol. (c)8 (2011) 1585-1588, DOI: 10.1002/pssc.201000918
8. K.Fujiwara, A.Ishii, T.Abe and K.Ando, "Growth Mechanisms of ZnO(0001) Using the First-Principles Calculation", Appl.Phys. 112 (2012) 064301-064301-4, DOI: 10.1063/1.4748272
9. Y.Oda, A.Ishii and K.Fujiwara, "DFT Study for Growth of m-Plane GaN/ZnO Interface", e-Journal of Surface Science and NanoTechnology 10 (2012) 221-225, DOI: 10.1380/ejssnt.2012.221
10. K.Nakada, T.Torobu and A.Ishii, " Investigation of Hf adatom adsorption on graphene using DFT calculation", e-Journal of Surface Science and NanoTechnology(2012) 325-330, DOI: 10.1380/ejssnt.2012.325

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

[東大グループ]

1. 太田実雄、藤岡洋、「PXD法を用いたハイブリッド発光材料の開発」月刊ディスプレイ vol.15, No. 2 (2009) 27.
2. 小林篤、太田実雄、藤岡洋、「室温結晶成長を用いたフレキシブルエレクトロニクスの開発」、未来材料 vol. 9, No. 9 (2009) p16-p21.
3. 藤岡洋、「ナノプロセス技術が育むフレキシブルエレクトロニクスの世界」、生産研究 vol.61,NO.5, 54(2009)
4. 小林篤、藤岡洋、天野浩、他34名執筆分担、「窒化物基板および格子整合基板の成長とデバイス特性」、シーエムシー出版、2009.10.30
5. 藤岡洋 「無機フレキシブルデバイスの開発-無機単結晶エレクトロニクスの反撃-」現代化学 2011.2
6. 小林篤、藤岡洋、室温結晶成長技術を用いた高輝度緑色発光素子用材料の開発、未来材料、Vol.11 No.4、p36-42、2011.4.10
7. 藤岡洋 他 26 名 執筆分担、フレキシブルエレクトロニクスデバイスの開発最前線-アンビエント社会を実現するキーデバイスの開発現状と応用展開-、(株)エヌ・ティー・エス、2011.7.11
8. Jen-Inn Chyi, Yasushi Nanishi, Hadis Morkoc, Joachim Piprek, Euijoon Yoon, Hiroshi Fujioka, PROCEEDINGS OF SPIE 「Gallium Nitride Materials and Devices VIII」 Vol.8625, SPIE, 2013.2.4

9. Hiroshi Fujioka, Atsushi Kobayashi, Jitsuo Ohta, *et al.*, Japanese Journal of Applied Physics Vol.52, No.8(2013), Special Issue: Recent Advances in Nitride Semiconductors, The Japan Society of Applied Physics, 2013.8.25
10. H. Fujioka, Handbook of Crystal Growth, Vol. III, Elsevier; 2015, pp. 365-397

[鳥取大グループ]

1. Kengo Nakada and Akira Ishii, "Chapter title: DFT calculation for adatom adsorption on graphene", 「Graphene / Book 1」P18, ISBN 978-953-308-60-2

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 13 件、国際会議 43 件)

[東大グループ]

<国内>

1. 太田実雄、上野耕平、小林篤、井上茂、藤岡洋、 PXD 法による窒化物半導体の低温エピタキシャル成長、日本結晶成長学会ナノエピ分科会第1回窒化物半導体結晶成長講演会、東京農工大学、2009.5.15.
2. 藤岡洋、大面積単結晶エレクトロニクス of 展望、ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス「新機能ナノエレクトロニクス」グループ分科会、北海道大学、2009.10.9.
3. 藤岡洋、大面積化合物半導体エレクトロニクスの可能性、第13回名古屋大学VBLシンポジウム、名古屋大学、2009.11.10.
4. 藤岡 洋、上野 耕平、小林 篤、井上 茂、太田 実雄、低温バッファ層の応用 (1) GaN への応用 —PXD 法による窒化物半導体の室温エピタキシャル成長—、日本学術振興会第161委員会第61回研究会、京都市産業技術研究所、2009.12.4.
5. 藤岡洋、PSD法を用いた大面積窒化物素子作製の可能性、第2回窒化物半導体ワークショップ、東北大学、2009.12.22.
6. 藤岡洋、PSD法による高品質窒化物成長の検討、第3回窒化物半導体の高品質結晶成長とその素子応用、東北大学、2010. 10.25
7. 藤岡 洋、窒化物半導体太陽電池の将来、窒化物ナノ・エレクトロニクス材料研究センター講演会、東北大学、2010. 11.5
8. 藤岡洋、低温 PXD 成長技術を用いた高 InGaN の素子応用、第3回窒化物半導体結晶成長講演会、九州大学、2011.6.17
9. H. Fujioka, Green technology with nitride semiconductors, 30th Electronic Materials Symposium, Shiga, Japan, 2011.7.1
10. 藤岡洋、非平衡パルス励起制御を用いた特異構造の導入法の開発、第59回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012.3.15
11. 藤岡洋、異種基板上への窒化物エピタキシーにおけるヘテロ界面の科学、日本学術振興会第161委員会第84研究会ワイドギャップ半導体のヘテロ制御とデバイスへの展開、サンバレー富士見、2013.12.13
12. 藤岡 洋、上野耕平、小林 篤、太田実雄、非平衡状態の能動的利用による窒化物特異構造の創製、第61回応用物理学学会春季学術講演会、青山学院大学、2014.3.19
13. 小林篤、太田実雄、藤岡洋、酸化亜鉛基板上への窒化物半導体低温成長、第6回窒化物半導体結晶成長講演会、名城大学、2014.7.26

<国際>

1. H. Fujioka, High Quality Group III Nitrides Grown on ZnO Substrates, OPTO2009, San Jose, 25 Jan. 2009.
2. H. Fujioka, Low Temperature Epitaxial Growth of Group III Nitrides by Pulsed Excitation Deposition, OPTO2009, San Jose, 26 Jan. 2009
3. H. Fujioka, Room Temperature Epitaxial Growth of Nitride Semiconductors, New Material Design Technology For the Next Generation of Performed Components: NMDT-NGPC, ALGIERS, 2009.5.20.

4. H. Fujioka, Room temperature growth of group III nitride crystals, 2009 Japan-China Crystal Grows and Crystal Technology Symposium, Osaka University, 2009.7.23.
5. H. Fujioka, Room temperature epitaxial growth of group III nitride semiconductors, ROMANIAN CONFERENCE ON ADVANCED MATERIALS: ROCAM 2009, Romania, 2009.8.28.
6. H. Fujioka, *Development of room temperature epitaxial growth technique for nitride optical devices*, 5th International Symposium on Laser, Scintillator and Non Linear Optical Materials: ISLNOM-5, Pisa, 2009.9.5.
7. H. Fujioka, Room temperature epitaxial growth of InGaN and its Application to Solar Cells, ICAM2009, Rio de Janeiro, 2009.9.23.
8. H. Fujioka, Feasibility study on large area nitride devices, Satellite Workshop on Nitride Semiconductors, Korea, 2009.10.26.
9. H. Fujioka, Fabrication of flexible devices with low temperature epitaxial growth technique, MNC2009, Sapporo, 2009.11.16.
10. Hiroshi Fujioka, Smart Sheet Technology for Optical and PV Devices, The 2010 USTO Photovoltaics Energy Workshop, ALGIERS, 2010.5.10
11. Hiroshi Fujioka, Feasibility study on Future large area nitride devices, The European Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits, Germany, 2010.5.17
12. H. Fujioka, Growth Orientation Control of InN by Pulsed Excitation Deposition, Electronic Materials Conference, U.S.A, 2010.6.25
13. Hiroshi Fujioka, Future large area nitride devices fabricated with low temperature PXD process, The International Workshop on Nitride semiconductors 2010, U.S.A, 2010.9.21
14. H. Fujioka, DEVELOPMENT OF FUTURE LARGE AREA GROUP III NITRIDE DEVICES, 2010 International Symposium on Crystal Growth, Korea, 2010.11.08
15. H. Fujioka, Possibility of Large Area III-V Semiconductor Devices, Collaborative Conference on Crystal Growth (3CG), Miami, 2010.11.29
16. H. Fujioka and A. Kobayashi, PXD Growth of InN and Related Materials, E-MRS ICAM IUMRS 2011 Spring Meeting, Nice, France, 2011.5.11
17. H. Fujioka, K. Tamura, S. Nomura, S. Inoue, and J. Ohta, Feasibility of large area nitride semiconductor devices prepared by pulsed sputtering, 5th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors, Mie, Japan, 2011.5.25
18. H. Fujioka, Possibility of Large Area Nitride Semiconductor Devices, The 5th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT5), Suntec, Singapore, 2011.6.28
19. H. Fujioka, Low cost process for single crystalline photovoltaic cells, 1st Asia-Arab Sustainable Energy Forum (AASEF), Nagoya, Japan, 2011.8.23
20. H. Fujioka, Low temperature growth of group III nitrides by pulsed sputtering and its applications to large area devices, SPIE Photonics West 2012, OPTO, Gallium Nitride Materials and Devices VII, California, USA, 2012.1.23
21. H. Fujioka, Properties of III-N Solar Cells Grown by PXD, NSAP2012, Chiba, Japan, 2012.5.11
22. H. Fujioka, Feasibility of Large Area Nitride Semiconductor Devices, The 1st International Symposium on Single Crystals and Wafers for LEDs, Wonju, Korea, 2012.6.21
23. H. Fujioka, Future prospect of large area nitride devices prepared by pulsed sputtering deposition, 4th International Symposium on Growth of III-Nitrides, St. Petersburg, Russia, 2012.7.16
24. H. Fujioka, Feasibility of large area nitride devices prepared by pulsed sputtering, International Workshop on Nitride Semiconductors 2012 (IWN2012), Sapporo, Japan, 2012.10.15
25. H. Fujioka, Crystal Growth of Nitride Semiconductors on Large Substrates, CCCG-16, Hefei, China, 2012.10.22
26. H. Fujioka, Nitride Devices Fabricated with Pulsed Sputtering Depositon, Intensive Discussion

- on Growth of Nitride Semiconductors, Sendai, Japan, 2012.10.23
27. H. Fujioka, Feasibility of III-Nitride LEDs prepared on large area substrates, 2012 International Symposium on Crystal Growth, Seoul, Korea, 2012.11.16
 28. H. Fujioka, Characteristics of GaN devices prepared by pulsed sputtering, 5th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2013), Nagoya, Japan, 2013.1.31
 29. Hiroshi Fujioka, Strategies to achieve InGaN LED Displays, LEDIA'13, Yokohama, Japan, 2013.4.24
 30. H. Fujioka, New efficiency enhancement technology for Si solar cells, The 3rd Asia-Arab Sustainable Energy Forum & the 5th International Workshop on Sahara Solar Breeder, Hirosaki, Japan, 2013.5.6
 31. H. Fujioka, Epitaxial Growth of High Quality Nitride Films by Pulsed, 3CG 2013 Meeting (Collaborative Conference on Crystal Growth), Cancun, Mexico, 2013.6.10
 32. H. Fujioka, Characteristics of GaN Films Prepared by PXD and Their Device Applications, ICMAT2013 – The 7th International Conference on Materials for Advanced Technologies, Suntec, Singapore, 2013.7.1
 33. A. Kobayashi, T. Kajima, H. Tamaki, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka, Low-temperature epitaxial growth of nonpolar and semipolar group-III nitrides on ZnO substrates, 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, Kyoto, Japan, 2013. 9. 18
 34. Hiroshi Fujioka, Preparation of Nitride Devices by Plasma Processing, ISPlasma2014/ IC-PLANTS2014, Nagoya, Japan, 2014.3.5
 35. H. Fujioka, Nitride Materials and Devices Prepared by Pulsed Sputtering, International Conference on Metamaterials and Nanophysics, Varadero, Cuba, 2014.4.24
 36. H. Fujioka, Pulsed Sputtering Technique for Fabrication of Future Nitride Devices, E-MRS 2014 Spring Meeting, Lille, France, 2014.5.28
 37. H. Fujioka, GaN crystals prepared by pulsed sputtering and its devices applications, The 6th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-6), Jeju, Korea, 2014.6.12
 38. H. Fujioka, Fabrication of Nitride Devices by Pulsed Sputtering Deposition, 13th International Conference on Modern Materials and Technologies (CIMTEC2014), Tuscany, Italy, 2014.6.18
 39. H. Fujioka, Characteristics of InN Transistors Prepared on Nearly Lattice Matched YSZ Substrates, 56th Electronic Materials Conference (EMC 2014), Santa Barbara, USA, 2014.6.27
 40. J. Ohta, J. W. Shon, T. Watanabe, E. Nakamura, K. Ueno, A. Kobayashi, and H. Fujioka, 1st International Workshop on Quantum Nanostructure Physics and Solar Cell Applications, Miyazaki Univ., Feb. 20, 2015.
 41. H. Fujioka, "Feasibility of flexible electronics based on nitride crystals", MANA International Symposium 2015, Tsukuba, March 11, 2015.
 42. H. Fujioka, "Fabrication of nitride LEDs on amorphous substrates by pulsed sputtering", SPIE Photonics West, San Francisco, Feb. 11, 2015.

[鳥取大グループ]

1. A.Ishii, T.Tatani and H.Asano, "Computational study for Epitaxial growth of GaN on graphite as 3D growth on 2D material", SemicoNano2009, Tokushima, Japan, 2009.8

② 口頭発表 (国内会議 127 件、国際会議 28 件)

[東大グループ]

〈国内〉

1. 上野耕平, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, 天内英貴, 長尾哲, 堀江秀善, 半極性面, ZnO 基板上への AlN 及び AlGaIn 結晶成長, 第 38 回結晶成長国内会議(NCCG-38), 2008.11.5
2. 下元一馬, 上野耕平, 小林篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, 天内英貴, 長尾哲, 堀江秀善, ZnO 基板上への無極性面 InGaIn 薄膜成長, 第 38 回結晶成長国内会議(NCCG-38),

- 2008.11.5
3. 施甫岳, 小林篤, 井上茂, 太田実雄, 藤岡洋, 楠浦崇央, ミトラ・オヌボン, ナノインプリント基板上へのIII族窒化物薄膜の成長, 第38回結晶成長国内会議(NCCG-38), 2008.11.5
 4. 入江享平, 太田実雄, 小林篤, 藤岡洋, 高分子熱分解グラファイトシート上へのGa₂N₃薄膜成長, 第38回結晶成長国内会議(NCCG-38), 2008.11.5
 5. 佐藤一博, 太田実雄, 井上茂, 小林篤, 藤岡洋, パルススパッタ堆積法によるSiC基板上へのAlN薄膜室温成長, 第38回結晶成長国内会議(NCCG-38), 2008.11.5
 6. 入江享平, 太田実雄, 小林篤, 井上茂, 藤岡洋, 自己組織化グラファイトシート上Ga₂N₃成長の初期過程観察, 春季第56回応用物理学関係連合講演会, 2009.3.30
 7. 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, 尾嶋正治, 天内英貴, 長尾哲, 堀江秀善, パルススパッタ堆積法によるZnO基板上へのm面InGa₂N低温成長, 春季第56回応用物理学関係連合講演会, 2009.3.30
 8. 施甫岳, 小林篤, 井上茂, 太田実雄, 藤岡洋, ナノインプリント加工Si基板を用いたIII族窒化物ナノ構造の作製, 春季第56回応用物理学関係連合講演会, 2009.3.30
 9. 梶間智文, 下元一馬, 上野耕平, 藤井智明, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, 尾嶋正治, 格子整合基板上へのAlInN室温layer-by-layer成長, 春季第56回応用物理学関係連合講演会, 2009.3.30
 10. 下元一馬, 小林篤, 上野耕平, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, ZnO基板上への高In組成m面InGa₂N薄膜の成長と評価, 春季第56回応用物理学関係連合講演会, 2009.3.30
 11. 上野耕平, 下元一馬, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, ZnO基板上半極性面AlGa₂N/AlNヘテロ構造の作製と評価, 春季第56回応用物理学関係連合講演会, 2009.3.30
 12. 宋頤成, 井上茂, 太田実雄, 藤岡洋, 伊勢村雅士, GaN/HfN/Si(110)ヘテロ構造の作製と界面の評価, 春季第56回応用物理学関係連合講演会, 2009.3.30
 13. 藤井智明, 下元一馬, 小林篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, 半極性面InNの成長と評価, 春季第56回応用物理学関係連合講演会, 2009.3.30
 14. 井上茂, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, III族窒化物を用いた太陽電池素子特性の理論的検討, 春季第56回応用物理学関係連合講演会, 2009.4.1
 15. 上野耕平, 半極性面AlGa₂N/AlN/ZnOヘテロ構造の特性評価, 日本結晶成長学会ナノエピ分科会第1回窒化物半導体結晶成長講演会, 東京農工大学, 2009.5.16.
 16. 藤井智明, YSZ基板上への半極性面InN薄膜のエピタキシャル成長, 日本結晶成長学会ナノエピ分科会第1回窒化物半導体結晶成長講演会, 東京農工大学, 2009.5.16.
 17. 梶間智文, ZnO基板上へのInAlN室温エピタキシャル成長, 日本結晶成長学会ナノエピ分科会第1回窒化物半導体結晶成長講演会, 東京農工大学, 2009.5.16.
 18. 入江淳平, 金子俊郎, 太田実雄, 藤岡洋, 山下順也, 羽鳥浩章, 平崎哲郎, 植仁志, BBLポリマーを出発材料とする高結晶性炭素フィルム上へのGa₂N₃成長, 第70回応用物理学会学術講演会, 富山大学, 2009.9.8.
 19. 上野耕平, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, 自己組織化ナノストライプZnO(1-102)基板上AlN結晶成長, 第70回応用物理学会学術講演会, 富山大学, 2009.9.8.
 20. 上野耕平, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, 無極性面InAlGa₂N四元混晶の室温エピタキシャル成長, 第70回応用物理学会学術講演会, 富山大学, 2009.9.8.
 21. 井上茂, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, デバイスシミュレーションによるIII族窒化物太陽電池の素子特性解析, 第70回応用物理学会学術講演会, 富山大学, 2009.9.10.
 22. 施甫岳, 小林篤, 井上茂, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, ナノインプリント加工基板を用いたInNナノ構造の形状制御, 第70回応用物理学会学術講演会, 富山大学, 2009.9.10.
 23. 藤井智明, 小林篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, YSZ基板上半極性面InNの成長と評価, 第70回応用物理学会学術講演会, 富山大学, 2009.9.10.
 24. 梶間智文, 上野耕平, 藤井智明, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, 尾嶋正治, ZnO(1-100)基板上へのm面InAlN室温成長, 第70回応用物理学会学術講演会, 富山大学, 2009.9.10.
 25. 小林篤, 下元一馬, 上野耕平, 太田実雄, 藤岡洋, 尾嶋正治, ZnO基板から面内に異方的歪みを受けたm面InGa₂Nの光学特性, 第70回応用物理学会学術講演会, 富山大学,

- 2009.9.10.
26. 金子俊郎, 入江享平, 太田実雄, 藤岡洋, 山下順也, 羽鳥浩章, BBLポリマーを出発材料とするグラファイトシート上へのGa₂N薄膜成長、第39回結晶成長国内会議(NCCG-39)、名古屋大学、2009. 11. 14.
 27. 上野耕平, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, 規則配列ナノストライプZnO基板を用いた半極性面AlNの高品質化、第39回結晶成長国内会議(NCCG-39)、名古屋大学、2009. 11. 14.
 28. 小林篤, 下元一馬, 上野耕平, 梶間智文, 太田実雄, 藤岡洋, 尾嶋正治, ZnO基板上に成長した無極性面III族窒化物半導体の構造的・光学的異方性、レーザ・量子エレクトロニクス研究会、徳島大学、2009. 11. 19
 29. 梶間智文, 上野耕平, 藤井智明, 小林 篤, 太田実雄, 藤岡 洋, 尾嶋正治, ZnO基板上への半極性面InAlN薄膜の成長、第57回応用物理学関係連合講演会、東海大学、2010.3.17
 30. 藤井智明, 小林 篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡 洋, 半極性面AlN/InNヘテロ構造の作製と評価、第57回応用物理学関係連合講演会、東海大学、2010.3.17
 31. 上野耕平, 小林 篤, 太田実雄, 藤岡 洋, 自己組織化ナノストライプZnO(1-102)基板上AlN結晶成長(II)、第57回応用物理学関係連合講演会、東海大学、2010.3.18
 32. 上野耕平, 太田実雄, 藤岡 洋, 福山博之, サファイア窒化法により作製した高品質AlN基板上へのホモエピタキシャル成長、第57回応用物理学関係連合講演会、東海大学、2010.3.18
 33. 玉木啓晶, 小林 篤, 太田実雄, 藤岡 洋, 尾嶋正治, ZnO基板上m面InGa₂N薄膜の偏光特性、第57回応用物理学関係連合講演会、東海大学、2010.3.18
 34. 金子俊郎, 太田実雄, 藤岡 洋, 山下順也, 羽鳥浩章, 児玉昌也, 平崎哲郎, 植 仁志, BNTCA-BPTAポリマーを出発材料とする高結晶性グラファイトシート上へのGa₂N成長、第57回応用物理学関係連合講演会、東海大学、2010.3.19
 35. 加藤雅樹, 田村和也, 井上 茂, 太田実雄, 藤岡 洋, 太陽電池用InGa₂N薄膜の成長と評価、第57回応用物理学関係連合講演会、東海大学、2010.3.19
 36. 加藤雅樹, 田村和也, 井上茂, 太田実雄, 藤岡洋, パルススパッタ法による太陽電池用InGa₂N薄膜の作製、第2回窒化物半導体結晶成長講演会、三重大学、2010.5.15
 37. 金子俊郎, 太田実雄, 藤岡洋, 山下順也, 羽鳥浩章, 児玉昌也, 平崎哲郎, 植仁志, BNTCA-BPTAポリマー焼結グラファイトシート上へのGa₂N薄膜成長、第2回窒化物半導体結晶成長講演会、三重大学、2010.5.15
 38. 玉木啓晶, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, 尾嶋正治, ZnO基板から異方的歪みを受けたm面InGa₂N薄膜の偏光特性、第2回窒化物半導体結晶成長講演会、三重大学、2010.5.15
 39. 梶間智文, 上野耕平, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, 尾嶋正治, ZnO基板上への無極性面・半極性面InAlN薄膜の成長、第2回窒化物半導体結晶成長講演会、三重大学、2010.5.15
 40. 小林 篤, 大久保佳奈, 太田実雄, 藤岡 洋, 尾嶋正治, YSZ基板上に成長したInNの極性制御と成長モード、秋季第71回応用物理学学会学術講演会、長崎大学、2010.9.14
 41. 梶間智文, 上野耕平, 小林 篤, 太田実雄, 藤岡 洋, 尾嶋正治, ZnO基板上への高In組成m面InAlN薄膜の成長、秋季第71回応用物理学学会学術講演会、長崎大学、2010.9.14
 42. 上野耕平, 小林 篤, 太田実雄, 藤岡 洋, ZnO基板上半極性面AlGa₂N薄膜の偏光特性評価、秋季第71回応用物理学学会学術講演会、長崎大学、2010. 9.15
 43. 玉木啓晶, 小林 篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡 洋, ZnO基板上高In組成m面InGa₂N薄膜の構造特性及び偏光特性、秋季第71回応用物理学学会学術講演会、長崎大学、2010. 9.15
 44. 井上 茂, 太田実雄, 加藤雅樹, 田村和也, 藤岡 洋, 高In濃度InGa₂Nを用いた太陽電池の試作、秋季第71回応用物理学学会学術講演会、長崎大学、2010. 9.15
 45. 岡野雄幸, 井上 茂, 上野耕平, 小林 篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡 洋, Rh(111)基板上への窒化物成長初期過程の解析、秋季第71回応用物理学学会学術講演会、長崎大学、2010. 9.16
 46. 劉 江偉, 小林 篤, 豊田智史, 菊池 亮, 太田実雄, 藤岡 洋, 組頭広志, 尾嶋正治, 放射光光電子分光による極性面・無極性面Ga₂N/ZnOヘテロ界面の解析、秋季第71回応用物理学学会学術講演会、長崎大学、2010. 9.16
 47. 野村周平, 田村和也, 太田実雄, 井上 茂, 藤岡 洋, マイカ基板を用いたIII族窒化物LEDの作製、春季第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011. 3.24

48. 金子俊郎, 太田実雄, 井上 茂, 藤岡 洋, グラファイトシート上GaN 青色LED の作製、春季第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011. 3.24
49. 大久保佳奈, 小林 篤, 太田実雄, 藤岡 洋, 尾嶋正治, Al₂O₃/InN 界面の電子状態評価、春季第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011. 3.25
50. 小林 篤, 上野耕平, 太田実雄, 藤岡 洋, 尾嶋正治, 中西繁光, 東堤秀明、原子散乱表面分光法による半極性面AlN/ZnO の極性判定、春季第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011. 3.25
51. 上野耕平, 太田実雄, 藤岡 洋, 福山博之、窒化サファイア基板上に成長したAlN 薄膜の微細構造観察、春季第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011. 3.25
52. 玉木啓晶, 小林 篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡 洋、無極性面・半極性面ZnO 基板上InGa_N の偏光スイッチング、春季第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011. 3.26
53. 丹所昂平, 井上 茂, 太田実雄, 藤岡 洋、PSD 法により成長したGa_N 薄膜の電気特性、春季第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011. 3.27
54. 梶間智文, 上野耕平, 小林 篤, 太田実雄, 藤岡 洋, 尾嶋正治、ZnO 基板上への全組成域 m 面InAlN 薄膜のエピタキシャル成長、春季第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011. 3.27
55. 大久保佳奈, 小林篤、太田実雄、尾嶋正治、藤岡洋、ALD法で作製したAl₂O₃/InNヘテロ構造の評価、第3回窒化物半導体結晶成長講演会、九州大学、2011.6.17
56. 玉木啓晶、小林 篤、太田実雄、尾嶋正治、藤岡洋、ZnO 基板上に成長した無極性面InGa_N 薄膜の偏光特性、第3回窒化物半導体結晶成長講演会、九州大学、2011.6.17
57. 上野耕平、小林篤、太田実雄、藤岡洋、尾嶋正治、半極性面 ZnO 基板上に成長した高 Al 組成 AlGa_N の偏光特性評価、第 3 回窒化物半導体結晶成長講演会、九州大学、2011.6.18
58. 小林篤、上野耕平、太田実雄、尾嶋正治、藤岡洋、中西繁光、東堤秀明、半極性面 AlN/ZnO 界面における極性反転、2011 年秋季第 72 回応用物理学会学術講演会、山形大学、2011. 8.30
59. 大久保佳奈, 小林篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋、極性が制御された Al₂O₃/InN ヘテロ構造の作製、2011 年秋季第 72 回応用物理学会学術講演会、山形大学、2011. 8.30
60. 梶間智文、小林篤、上野耕平、太田実雄、尾嶋正治、藤岡 洋、パルス励起堆積法による ZnO基板上への非極性面InAlN薄膜の成長、2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会、山形大学、2011. 8.31
61. 野村周平、太田実雄、井上茂、藤岡洋、マイカを出発材料とする大面積窒化物エレクトロニクスの可能性、2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会、山形大学、2011. 8.31
62. 玉木啓晶、小林篤、太田実雄、尾嶋正治、藤岡洋、ZnO基板上半極性面InGa_N薄膜の偏光特性、2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会、山形大学、2011.9. 1
63. 太田実雄、田村洋典、黄啓賢、王宣又、久保田智広、藤岡洋、寒川誠二、中性粒子ビームを用いたGa_Nエッチングの特性、2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会、山形大学、2011.9. 1
64. 丹所昂平、田村和也、井上茂、太田実雄、藤岡洋、PSD法により作製したAlGa_N/Ga_Nヘテロ構造の電気特性、2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会、山形大学、2011.9. 1
65. 金子俊郎、太田実雄、井上茂、藤岡洋、グラファイトシート上Ga_N薄膜の極性制御と可視LEDの作製、2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会、山形大学、2011.9. 2
66. 玉木啓晶、小林篤、太田実雄、尾嶋正治、藤岡洋、ZnO基板上にコヒーレント成長した無極性面・半極性面薄膜の光学特性、第41回結晶成長国内会議 NCCG-41、つくば国際会議場、2011.11.5
67. 小林篤、大久保佳奈、太田実雄、尾嶋正治、藤岡洋、YSZ基板を用いたInN薄膜の極性制御エピタキシャル成長、第41回結晶成長国内会議 NCCG-41、つくば国際会議場、2011.11.5
68. 森田 和樹, 太田 実雄, 井上 茂, 藤岡 洋, PSD法を用いたInGa_N太陽電池の作製、春季第59回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012.3.15
69. 丹所 昂平, 井上 茂, 太田 実雄, 藤岡 洋, PSD法によるAlGa_N/Ga_N HEMT構造の特性、春季第59回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012.3.16

70. 近藤堯之, 太田実雄, 井上茂, 小林篤, 藤岡洋, Si(110)基板上Ga_N薄膜成長におけるSiN_x中間層の効果、春季第59回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012.3.17
71. 大久保佳奈, 小林篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, YSZ基板上に成長したInN極薄膜の評価、春季第59回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012.3.17
72. 大関 正彬, 小林 篤, 太田 実雄, 藤岡 洋, 尾嶋 正治, YSZ基板上への半極性面高In濃度InAlN薄膜成長、春季第59回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012.3.17
73. 玉木 啓晶, 小林 篤, 太田 実雄, 尾嶋 正治, 藤岡 洋, ZnO基板上にエピタキシャル成長したm面InAlN薄膜の評価、春季第59回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012.3.18
74. 大関正彬, 小林篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, PSD法による半極性面InAlN薄膜のエピタキシャル成長、第4回 窒化物半導体結晶成長講演会 (プレIWN2012)、東京大学生産技術研究所、2012.4.28
75. 大久保佳奈, 小林篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, YSZ基板上にPSD法で作製したInN薄膜の成長モード、第4回 窒化物半導体結晶成長講演会 (プレIWN2012)、東京大学生産技術研究所、2012.4.28
76. 玉木啓晶, 小林篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, 無・半極性面ZnO基板上に成長した窒化物半導体の偏光特性、第4回 窒化物半導体結晶成長講演会 (プレIWN2012)、東京大学生産技術研究所、2012.4.28
77. 岸川英司, 上野耕平, 井上茂, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, AlN 熱酸化層の構造解析による極性反転機構の検討、第4回 窒化物半導体結晶成長講演会 (プレIWN2012)、東京大学生産技術研究所、2012.4.28
78. 近藤堯之, 太田実雄, 井上茂, 藤岡洋, Si(110)基板上Ga_N薄膜の極性制御、秋季 第73回応用物理学学会学術講演会、松山大学、2012.9.12
79. 小林篤, 伊藤剛輝, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, YSZ基板上への 酸窒化インジウム混晶薄膜の作製、秋季 第73回応用物理学学会学術講演会、松山大学、2012.9.13
80. 大関正彬, 大久保佳奈, 小林篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, 高速エピタキシャル成長させたInN薄膜の特性評価、秋季 第73回応用物理学学会学術講演会、松山大学、2012.9.13
81. 大久保佳奈, 大関正彬, 小林 篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡 洋, YSZ(111)基板上に作製したInN薄膜の特性、秋季 第73回応用物理学学会学術講演会、松山大学、2012.9.13
82. 小林篤, 梶間智文, 玉木啓晶, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, ZnO基板上へコヒーレント成長させた窒化物半導体薄膜の特性、第42回結晶成長国内会議、九州大学、2012.11.9
83. 上野耕平, 中村英司, 岸川英司, 井上茂, 太田実雄, 藤岡洋, 尾嶋正治, パルススパッタ堆積法によるサファイア基板上Ga_N(000-1)薄膜の高品質化、第42回結晶成長国内会議、九州大学、2012.11.9
84. 近藤堯之, 井上茂, 太田実雄, 藤岡洋, パルススパッタ法によるSi(110)基板上へのGa_N薄膜成長と構造特性評価、第42回結晶成長国内会議、九州大学、2012.11.9
85. 大久保佳奈, 大関正彬, 小林篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, YSZ基板を用いたc面InN薄膜の高品質化、第42回結晶成長国内会議、九州大学、2012.11.9
86. 大関正彬, 大久保佳奈, 小林 篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡 洋, 安定化ジルコニア基板上へのN 極性InN 薄膜の成長、第60回応用物理学学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013.3.28
87. 大久保佳奈, 小林 篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡 洋, 絶縁膜/ 極薄InN/YSZ 構造の作製と評価、第60回応用物理学学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013.3.28
88. 伊藤剛輝, 小林 篤, 太田実雄, 藤岡 洋, 尾嶋正治, 非晶質基板上へ成長したInN の特性評価、第60回応用物理学学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013.3.28
89. 岸川英司, 上野耕平, 井上 茂, 太田実雄, 藤岡 洋, N 極性InGa_N/Ga_N 量子井戸構造の作製および評価、第60回応用物理学学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013.3.30
90. 近藤堯之, 上野耕平, 太田実雄, 藤岡 洋, Si(110) 基板上へのGa_N 薄膜成長と中間層の効果、第60回応用物理学学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013.3.30
91. 上野耕平, 井上 茂, 太田実雄, 藤岡 洋, 尾嶋正治, PSD 法によるパターンサファイア基板上Ga_N 薄膜成長、第60回応用物理学学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013.3.30

92. 渡辺拓人, 丹所昂平, 井上 茂, 太田実雄, 藤岡 洋, PSD 法によるC ドープGaN 薄膜の成長、第60回応用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013.3.30
93. Jeongwoo Shon, 太田実雄, 上野耕平, 藤岡 洋, GaN growth on graphene by pulsed sputtering deposition、第60回応用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013.3.30
94. 太田実雄, 金子俊郎, 平崎哲郎, 植 仁志, 児玉昌也, 藤岡 洋, ポリマーを出発材料に用いたグラファイトシート上への窒化物薄膜結晶成長と発光素子への応用、第60回応用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013.3.30
95. 中村英司, 上野耕平, 井上 茂, 太田実雄, 藤岡 洋, 尾嶋正治, 窒化物LED 低温製造プロセスの開発、第60回応用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013.3.30
96. Hyeryun Kim, Shigeru Inoue, Jitsuo Ohta, Hiroshi Fujioka, Epitaxial growth of group III nitrides on highly oriented metal foils, The 2013 Japanese Association crystal Growth(JACG) Nanostructure Epitaxial Division, Osaka, Japan, 2013.6.21
97. 伊藤剛輝, 小林篤, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋, 合成石英基板上に成長したInNの特性評価、第5回窒化物半導体結晶成長講演会、大阪大学、2013.6.21
98. 大関正彬, 大久保佳奈, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, InNをチャネル層とした電界効果トランジスタの作成、第74回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学、2013.9.16
99. 渡辺 拓人, 近藤 堯之, 大橋 正哉, 上野 耕平, 太田 実雄, 藤岡 洋, PSD成長したSi(110)基板上GaN薄膜の構造評価、第74回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学、2013.9.16
100. 郭堯, 井上茂, 小林篤, ○藤岡洋、Theoretical investigation of polarity determination for c-plane InN grown on yttria-stabilized zirconia (111) substrates, 第74回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学、2013.9.16
101. H. Kim, S. Inoue, J. Ohta, H. Fujioka, Low-temperature epitaxial growth of GaN films on hafnium foil, Fall meeting of Japan Society Applied Physics, Kyoto, Japan、2013.9.16
102. 中村英司, 上野耕平, 太田実雄, 藤岡洋, 尾嶋正治, 窒化物発光素子製造プロセスの低温化、第43回結晶成長国内会議、長野市生涯学習センター、2013.11.7
103. 渡辺拓人, 近藤堯之, 大橋正哉, 上野耕平, 太田実雄, 藤岡洋, スパッタ法によるSi(110)基板上へのGaN薄膜成長、第43回結晶成長国内会議、長野市生涯学習センター、2013.11.7
104. 田中龍太, 太田実雄, 上野耕平, 小林篤, 藤岡洋, 金属基板上へのGaN結晶成長、第43回結晶成長国内会議、長野市生涯学習センター、2013.11.7
105. H. Kim, S. Inoue, J. Ohta, H. Fujioka, Growth of GaN films on hafnium foils, 第43回結晶成長国内会議、長野市生涯学習センター、2013.11.7
106. S. JeongWoo, J. Ohta, K. Ueno, H. Fujioka, Fabrication of GaN-based light emitting diodes on SiO₂ with graphite buffer layers, 第43回結晶成長国内会議、長野市生涯学習センター、2013.11.8
107. 孫 政佑, 太田実雄, 上野耕平, 藤岡洋, グラフェンバッファを用いて試作した非晶質基板上窒化物発光素子、第61回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学、2014.3.18
108. 太田実雄, Halubai Sekhar, 久保田智広, 岡田健, 寒川誠二, 藤岡洋, 塩素中性粒子ビームを用いた窒化物薄膜のエッチング特性、第61回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学、2014.3.19
109. 大関正彬, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, YSZ基板上極薄膜InNを用いた電界効果トランジスタ、第61回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学、2014.3.20
110. 上野耕平, 野口英成, 太田実雄, 藤岡 洋, 尾嶋正治, PSD法により成長したInGaIn薄膜の光学特性評価、第61回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学、2014.3.20
111. 大橋正哉, 渡辺拓人, 太田実雄, 上野耕平, 小林篤, 藤岡洋, パルススパッタ法によるSi(110)基板上へのAlGaIn/GaNヘテロ構造の作製、第6回窒化物半導体結晶成長講演会、名城大学、2014.7.26
112. H. Kim, J. Ohta, R. Tanaka, K. Ueno, A. Kobayashi, H. Fujioka, Growth of group III nitride films on flexible sheets, 第6回窒化物半導体結晶成長講演会、名城大学、2014.7.26
113. 野口英成, 上野耕平, 太田実雄, 小林篤, 藤岡洋, PSD 法により作製した高In組成InGaIn薄膜の光学定数評価、第6回窒化物半導体結晶成長講演会、名城大学、2014.7.26

114. 金恵蓮, 太田実雄, 田中龍太, 小林篤, 上野耕平, 藤岡洋, パルススパッタ法によるhcp金属基板上への窒化物薄膜成長, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014.9.17
115. 荒川靖章, 上野耕平, 野口英成, 太田実雄, 藤岡洋, InGaN 量子井戸構造太陽電池の作製と評価, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014.9.19
116. 孫 政佑, 石井辰典, 太田実雄, 小林篤, 上野耕平, 藤岡洋, 非晶質基板上への窒化物薄膜成長におけるグラフェンバッファ層の効果, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014.9.19
117. 野口英成, 荒川靖章, 上野耕平, 太田実雄, 藤岡 洋, 「PSD法により成長したp型GaNに対する接触抵抗の評価」, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015年3月11日
118. 荒川靖章, 上野耕平, 野口英成, 太田実雄, 藤岡 洋, 「PSD法による高In組成InGaN結晶成長と太陽電池の作製」, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015年3月11日
119. H. Kim, J. Ohta, A. Kobayashi, K. Ueno, and H. Fujioka, “GaN growth on Hf foils using nearly lattice-matched HfN barriers by pulsed sputtering deposition”, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015年3月11日

〈国際〉

1. A. Kobayashi, K. Shimomoto, K. Ueno, J. Ohta, H. Fujioka, M. Oshima, Structural and Optical Properties of Thick *M*-plane InGaN on ZnO Substrates Prepared with Room Temperature Epitaxial Growth Technique, 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Korea, 2009.10.20.
2. K. Ueno, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka, Improvement in crystalline quality of semipolar AlN (1-102) films by using ZnO substrates with self-organized nanostripes, The 3rd International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-3), Montpellier, France, 2010.7.6
3. H. Tamaki, A. Kobayashi, J. Ohta, M. Oshima; H. Fujioka, Optical polarization properties in *m*-plane In_xGa_{1-x}N pseudomorphically grown on ZnO, The 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), Glasgow, UK, 2011.7.12
4. K. Okubo, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, Structural and electronic properties of Al₂O₃/InN, SPIE Photonics West 2012, OPTO, Gallium Nitride Materials and Devices VII, California, USA, 2012.1.23
5. Hiroshi Fujioka, Kana Ohkubo, Masaaki Ooseki, Atsushi Kobayashi and Masaharu Oshima, Characteristics of InN and Related Materials with Various Surface Orientations, 2012 Electronic Materials Conference, Pennsylvania, USA, 2012.6.22
6. K. Morita, M. Katoh, J. Ohta, S. Inoue, H. Fujioka, InGaN prepared by pulsed sputtering and its application to solar cells, 4th International Symposium on Growth of III-Nitrides, St. Petersburg, Russia, 2012.7.17
7. Atsushi Kobayashi, Hiroaki Tamaki, Jitsuo Ohta, Masaharu Oshima, and Hiroshi Fujioka, Optical and structural characteristics of nonpolar InGaN and InAlN films grown on ZnO substrates, International Workshop on Nitride Semiconductors 2012 (IWN2012), Sapporo, Japan, 2012.10.16
8. K. Ueno, E. Kishikawa, S. Inoue, J. Ohta, H. Fujioka, M. Oshima, and H. Fukuyama, Pulsed sputtering deposition of high-quality AlN on thermally-nitrided sapphire substrates, International Workshop on Nitride Semiconductors 2012 (IWN2012), Sapporo, Japan, 2012.10.17
9. E. Kishikawa, K. Ueno, S. Inoue, J. Ohta, and H. Fujioka, Fabrication of N-Polar InGaN LEDs by Pulsed Sputtering, 10th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-10), Washington DC, USA, 2013.8.27
10. K. Morita, E. Kishikawa, K. Ueno, S. Inoue, J. Ohta, and H. Fujioka, Characteristics of InGaN-based solar cells fabricated by sputtering, 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, Kyoto, Japan, 2013. 9. 18

11. H. Fujioka, M. Oseki, K. Ohkubo, A. Kobayashi, J. Ohta, and M. Oshima, Feasibility Study for Bulk InN by PVD, The 8th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors (IWBNS-VIII2013), Bavaria, Germany, 2013.10.3

[鳥取大グループ]

〈国内〉

1. 石井晃、浅野裕基、多谷孝明、「DFT計算によるグラファイト基板表面上窒化ガリウム成長の研究」、関西薄膜表面物理セミナー、グリーンビレッジ交野、2008.11.22
2. 石井晃、浅野裕基、多谷孝明、「第一原理計算によるグラファイト基板上窒化ガリウム成長の研究」、日本物理学会 2009 年春、立教大学、2009.3.28
3. 多谷孝明、浅野裕基、石井晃、「DFT 計算におけるグラファイト基板上の GaN の結晶成長の研究」、日本物理学会、熊本大学、2009.9.28
4. 中田謙吾、石井晃、「DFT 計算によるグラフェンシート上の吸着原子の安定性の研究」、日本物理学会、熊本大学、2009.9.25
5. 中田謙吾、「第一原理計算によるグラフェンシート上の吸着子の電子構造」、2009 関西薄膜表面セミナー、交野市、2009.11
6. 平井翔、多谷孝明、中田謙吾、石井晃「第一原理計算によるグラファイト基板表面上の窒化アルミニウム及び窒化インジウムのエピタキシャル成長の研究」、日本物理学会 秋季大会、大阪府立大学、2010.9.26
7. 中田謙吾、三島圭一郎、石井晃「第一原理計算によるグラフェン上の Mn 原子吸着の研究」、関西薄膜表面セミナー、交野市、2010.11.27
8. 石井 晃、「元素周期律表に沿った BN 上原子吸着の第一原理計算」、日本物理学会 第 68 回年次大会、広島大学 東広島キャンパス、2013.3.28

〈国際〉

1. A.Ishii and H.Asano, "Computational study for growth mechanism of GaN on graphite", Pacific Rim Meeting on electrochemical and solid-state science 2008, Hawaii, USA, 2008.10
2. A.Ishii, H.Asano and T.Tatani, "Computational study for growth of GaN on graphite as 3D growth on 2D material", Symposium on Surface and Nano Science 09, iwate, Japan, 2009.1
3. A.Ishii, H.Asano and T.Tatani, "Computational study for growth of GaN on graphite as 3D growth on 2D material" Supercomputing in Solid State Physics 2009, Tokyo, Japan, 2009.2.
4. A.Ishii, H.Asano and T.Tatani, "Computational study for Epitaxial growth of GaN on graphite as 3D growth on 2D material" SciSSP2009, Tokyo, Japan, 2009.6
5. T.Tatani, H.Asano and A.Ishii, "Computational study for Epitaxial growth of GaN on graphite as 3D growth on 2D material", ICFSI-12(12th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces), weimar, germany, 2009.7
6. T.Tatani, H.Asano and A.Ishii, "Computational study for growth of GaN on graphite as 3D growth on 2D material", ACSIN-10 (10th international conference on Atomically Controlled Surface and Interface for Nanotechnology), Granada, Spain, 2009.9
7. A.Ishii, K.Nakada Y.Iwasawa and H.Asano, "DFT study for adsorption on various atomic species on graphene", ACSIN-10 (10th international conference on Atomically Controlled Surface and Interface for Nanotechnology) Granada, Spain, 2009.9
8. A.Ishii, T.Tatani, H.Asano and K.Nakata, "Epitaxial growth of GaN on graphite using the density functional theory calculation", ALC'09(7th international symposium on Atomic Level Characterization for New Materials and Devices '09), Maui, USA, 2009.12
9. Akira Ishii, "DFT study for atomic and electronic structures of various adatom adsorptions on single and double graphene sheet", Graphene Week, USA, 2010. 4. 22
10. Akira Ishii, "DFT study for atomic and electronic structures of various adatom adsorptions on graphene as basis of nanostructure", Zing, Mexico, 2010.12.2
11. Akira Ishii, Kengo Nakada, "Density functional calculation for various adatom adsorption on graphene", ICFSI-13, Czech Republic, 2011.7.4
12. Akira Ishii, "Density functional calculation for various adatom adsorptions on graphene for using graphene as substrate of nanomaterial", TNT2011, Spain, 2011.11.23

13. Akira Ishii, "Self-assembled formation of GaP/GaAs/InP nanowires on graphite", NanoSEA2012, Italy, 2012.6.25
14. Akira Ishii, "Density functional calculation for various adatom adsorptions on graphene for using graphene as substrate of self-assembled nano structures", ICN+T, Paris, 2012.7.26
15. Akira Ishii, "Self Cassembled formation of GAP/GAAS/INP nanowires on graphe ne", Nano2012, Greek, 2012.8.27
16. A.Ishii, S. Hirai, K. Nakada, J. ohta, H. Fujioka, "First-principles study of polarity flips mechanism using thermal oxidization of AlN layers", APWS2013, Taiwan, 2013.5.13
17. A. Ishii, T. Torobu, K. Nakada, "DFT calculation for adatom adsorption on single layer h-BN", IVC-19, France, 2013.9.9

③ ポスター発表 (国内会議 27 件、国際会議 43 件)

[東大グループ]

〈国内〉

1. A. Kobayashi, K. Shimomoto, K. Ueno, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, Polarized green emission from m-plane InGaN grown on ZnO substrates, 28th Electronic Materials Symposium, Shiga, 2009. 7. 9.
2. J. Ohta, K. Sato, S. Inoue, A. Kobayashi, and H. Fujioka, Room-temperature growth of high quality AlN films on SiC substrates by pulsed sputtering deposition, 28th Electronic Materials Symposium, Shiga, 2009. 7. 10.
3. K. Ueno, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka, Epitaxial growth of nonpolar AlN (11-20) films on ZnO substrates, 28th Electronic Materials Symposium, Shiga, 2009. 7. 10.
4. T. Kajima, K. Ueno, T. Fujii, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, Growth temperature dependence of structural properties of InAlN films on ZnO(000-1) substrates, 28th Electronic Materials Symposium, Shiga, 2009. 7. 10.
5. S. Inoue, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka, Device simulations of group III nitride solar cells on ZnO substrates, 28th Electronic Materials Symposium, Shiga, 2009. 7. 10.
6. 岡野雄幸, 井上茂, 上野耕平, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋, 尾嶋正治, Rh(111)基板上へエピタキシャル成長した AlGaIn の面内配向関係、第 39 回結晶成長国内会議(NCCG-39)、名古屋大学、2009. 11. 13.
7. 井上茂, 下元一馬, 小林篤, 太田実雄, 藤岡洋、ZnO 基板上 III 族窒化物太陽電池の理論的検討、第 39 回結晶成長国内会議(NCCG-39)、名古屋大学、2009. 11. 13.
8. 施甫岳, 小林篤, 井上茂, 太田実雄, 尾嶋正治, 藤岡洋、ナノインプリントサファイア基板上への InN ナノ構造の作製、第 39 回結晶成長国内会議(NCCG-39)、名古屋大学、2009. 11. 13.
9. H.Tamaki, A. Kobayashi, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka, Optical polarization characteristics of m-plane InGaN films grown on ZnO substrates with anisotropic in-Plane strains, 29th Electronic Materials Symposium (EMS-29), Shizuoka, Japan, 2010.7.14
10. A. kobayashi, T. Fujii, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, Fabrication and Characterization of semipolar AlN/InN heterostructures on yttria stabilized zirconia substrates, 29th Electronic Materials Symposium (EMS-29), Shizuoka, Japan, 2010.7.14
11. 玉木 啓晶、小林 篤、太田 実雄、尾嶋 正治、藤岡 洋、ZnO 基板上高 In 組成 m 面 InGaN 薄膜の偏光特性、応用物理学会結晶工学分科会主催2010年・年末講演会、学習院大学、2010. 12.17
12. 上野 耕平、小林 篤、太田 実雄、藤岡 洋、ZnO 基板上半極性面 AlGaIn/AlN ヘテロ構造の作製と光学特性評価、応用物理学会結晶工学分科会主催2010年・年末講演会、学習院大学、2010. 12.17
13. A. Kobayashi, K. Okubo, K. Ueno, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka, Polarity Control of InN on yttria-stabilized zirconia (111) surfaces, 30th Electronic Materials Symposium(EMS-30), Shiga, Japan, 2011.7.1
14. J.W. Shon, J. Ohta, A. Kobayashi, S. Inoue, and H. Fujioka, In-situ curvature measurements

during a-plane GaN films growth on r-plane sapphire substrates、春季第 59 回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012.3.16

15. Yao Guo, Shigeru Inoue, Atsushi Kobayashi, Jitsuo Ohta, and Hiroshi Fujioka, Theoretical study on initial stage of InN growth on YSZ (111) substrates、春季第 59 回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012.3.16
16. Hyeryun Kim, Shigeru Inoue, Jitsuo Ohta and Hiroshi Fujioka, Growth of GaN films on nearly lattice-matched Hafnium metal foils、春季第 59 回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012.3.16
17. A. Kobayashi, T. Itoh, J. Ohta, M. Oshima and H. Fujioka, Characteristics of $(\text{InN})_x(\text{In}_2\text{O}_3)_{1-x}$ films grown on yttria-stabilized zirconia, 32nd Electronic Materials Symposium, Shiga, Japan, 2013.7.11
18. M. Oseki, K. Okubo, A. Kobayashi, J. Ohta and H. Fujioka, Metal-oxide-semiconductor field-effect transistors based on ultrathin InN, 33rd Electronic Materials Symposium (EMS-33), Shuzenji, Shizuoka, 2014.7.9

〈国際〉

1. S. Inoue, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka, Theoretical Investigation of InGaN Solar Cells on ZnO Substrates, 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Korea, 2009.10.19.
2. Tomofumi Kajima, Kohei Ueno, Tomoaki Fujii, Atsushi Kobayashi, Jitsuo Ohta, Hiroshi Fujioka, Masaharu Oshima, Room-Temperature Layer-by-Layer Growth of InAlN on Atomically Flat ZnO(000-1) Substrates, 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Korea, 2009.10.20.
3. Kohei Ueno, Atsushi Kobayashi, Jitsuo Ohta, Hiroshi Fujioka, Characterization of Semipolar AlGa_xN/AlN/ZnO (1-102) Heterostructures, 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Korea, 2009.10.20.
4. Kohei Ueno, Atsushi Kobayashi, Jitsuo Ohta, Hiroshi Fujioka, Epitaxial growth of semipolar Al_xGa_{1-x}N(1-103) films on ZnO substrates using room temperature buffer layer, 2009 European Materials Society Fall Meeting, Poland, 2009. 9. 15.
5. H. Fujioka, J. Ohta, S. Inoue, Feasibility study on large area optical devices with PSD grown group III nitrides, LASE SPIE Photonics West Gallium Nitride Materials and Devices VI, San Francisco, California USA, 2011.1.26
6. K. Ueno, S. Inoue, J. Ohta, H. Fujioka, H. Fukuyama, Polarity control of AlN epilayers grown on thermally nitrided sapphire substrates, The 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), Glasgow, UK, 2011.7.11
7. A. Kobayashi, K. Okubo, K. Ueno, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka, Control of polarity and growth mode for c-plane InN on yttria-stabilized zirconia (111), The 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), Glasgow, UK, 2011.7.11
8. S. Nomura, K. Tamura, J. Ohta, S. Inoue, H. Fujioka, Fabrication of III nitride LEDs on mica substrates, The 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), Glasgow, UK, 2011.7.11
9. 4. K. Tandokoro, S. Inoue, J. Ohta, H. Fujioka, Electrical and optical properties of GaN films grown by pulsed sputtering, The 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), Glasgow, UK, 2011.7.12
10. A. Kobayashi, K. Okubo, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka, Polarity control of indium nitride on yttria-stabilized zirconia(111) surfaces, The 6th International Symposium on Surface Science (ISSS-6), Tokyo, Japan, 2011.12.12
11. J. W. Liu, A. Kobayashi, S. Toyoda, H. Kumigashira, J. Ohta, H. Fujioka, M. Oshima, Interfacial electronic structures of amorphous Al₂O₃/ZnO correlated with electrical properties of Al/Al₂O₃/ZnO metal-oxide-semiconductor structures, The 6th International Symposium on Surface Science (ISSS-6), Tokyo, Japan, 2011.12.12
12. T. Kondo, J. Ohta, S. Inoue, A. Kobayashi, and H. Fujioka, Improvement in crystalline quality of

- GaN prepared by pulsed sputtering by the use of SiN_x islands, 4th International Symposium on Growth of III-Nitrides, St. Petersburg, Russia, 2012.7.16
13. E. Kishikawa, K. Ueno, S. Inoue, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, Polarity inversion mechanism at oxidized AlN layers, 4th International Symposium on Growth of III-Nitrides, St. Petersburg, Russia, 2012.7.17
 14. K. Okubo, A. Kobayashi, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka, Characterization of ultrathin InN films grown on YSZ substrates, 4th International Symposium on Growth of III-Nitrides, St. Petersburg, Russia, 2012.7.17
 15. M. Oseki, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, Epitaxial growth of semipolar InAlN with high In concentrations on yttria-stabilized zirconia substrates, 4th International Symposium on Growth of III-Nitrides, St. Petersburg, Russia, 2012.7.17
 16. M. Oseki, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima, Low-temperature growth of semipolar InAlN on YSZ substrates, International Workshop on Nitride Semiconductors 2012 (IWN2012), Sapporo, Japan, 2012.10.15
 17. Eiji Kishikawa, Kohei Ueno, Shigeru Inoue, Jitsuo Ohta, Masaharu Oshima, and Hiroshi Fujioka, Comprehensive study of polarity flip mechanism at thermally-oxidized AlN layers, International Workshop on Nitride Semiconductors 2012 (IWN2012), Sapporo, Japan, 2012.10.18
 18. Eiji Nakamura, Kohei Ueno, Jitsuo Ohta, Hiroshi Fujioka, and Masaharu Oshima, Development of low temperature fabrication process for light emitting devices, 10th International Conference on Nitride Semiconductors(ICNS-10), Washington DC, USA, 2013.8.26
 19. T. Itoh, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka, M. Oshima, High Mobility C-Axis-Oriented Ultrathin InN Films Grown on Amorphous Substrates, 10th International Conference on Nitride Semiconductors(ICNS-10), Washington DC, USA, 2013.8.27
 20. K. Okubo, M. Oseki, A. Kobayashi, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka, High-Quality Ultrathin InN Films Grown on Nearly Lattice-Matched Yttria-Stabilized Zirconia by Pulsed-Sputtering Deposition, 10th International Conference on Nitride Semiconductors(ICNS-10), Washington DC, USA, 2013.8.27
 21. A. Kobayashi, K. Okubo, M. Oseki, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka, Characteristics of In- and N-polar InN films grown on yttria-stabilized zirconia, 2013 JSAP-MRS Joint Symposia Symposium, Kyoto, Japan, 2013.9.16
 22. M. Oseki, K. Okubo, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka, Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors using HfO₂/InN/YSZ Heterostructures, International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2014), Wroclaw, Poland, 2014.8.27

[鳥取大グループ]

〈国内〉

1. 中田謙吾, 石井晃, 「二次元モノレイヤーMoS₂ 上の吸着子の電子構造」、日本物理学会、熊本大学、2009.9.26
2. 中田謙吾, 三島圭一郎, 石井晃 「DFT 計算によるグラフェン上の Mu 原子吸着の研究」、日本物理学会 秋季大会、大阪府立大学、2010.9.24
3. 中田 謙吾, 石井 晃, 「グラフェンシート上の N 原子吸着の電子構造と安定性」、日本物理学会 秋季大会、富山大学、2011.9.23
4. 土路生 隆宏, 中田 謙吾, 石井 晃, 「第一原理計算によるグラファイト基板表面上の Hf 吸着の研究」、日本物理学会 秋季大会、富山大学、2011.9.23
5. 中田 謙吾, 石井 晃, 山本 奈津美, 「第一原理計算におけるグラフェンの欠損及び不純物に関する研究」、日本物理学会 第 67 回年次大会、関西学院大学、2011.3.26
6. 石井 晃, 「グラファイト基板上窒化物成長の第一原理計算」、第 4 回 窒化物半導体結晶成長講演会、東京大学生産技術研究所、2012.4.27
7. 小田 泰丈, 「GaN 無極性面の成長の第一原理計算による研究」、第 4 回 窒化物半導体結晶成長講演会、東京大学生産技術研究所、2012.4.27
8. 中田 謙吾, 「グラファイト基板上の GaN 成長における欠陥と不純物の影響」、日本物理学会

第 68 回年次大会、広島大学 東広島キャンパス、2013.3.26

9. 中田 謙吾、石井 晃、「第一原理計算によるグラファイト基板上的 ZnO の成長の研究」、物理学会 秋季大会、徳島大学、2013.9.27

〈国際〉

1. H.Asano, T.Tatani and A.Ishii , "Computational study for growth mechanism of GaN on graphite", International Symposium on Surface Science and Nanotechnology 5,Tokyo, Japan, 2008.11
2. T.Tatani H.Asano and A.Ishii, "Computational study for growth of GaN on graphite as 3D growth on 2D material", the 14th International Conference on Modulated Semiconductor structures (MSS-14) , Kobe, Japan, 2009.7.23
3. T.Tatani, H.Asano and A.Ishii, "Computational study for growth on graphite as 3D growth on 2D material." 8th International Conference for Nitride Semiconductors(ICNS-8), Korea, 2009.10.19
4. Akira Ishii, Takaaki Tatani, Kengo Nakada "DFT calculation for growth of GaN on graphite substrate", ISCS, Takamatsu,Japan, 2010.5.31
5. Kengo Nakada, Akira Ishii, "First-principles study of stability of adatom adsorption on monolayer and bilayer graphene", ISCS, Takamatsu, Japan, 2010.6.1
6. Akira Ishii, Takaaki Tatani, Shou Hirai, Kengo Nakada, "DFT study for growth on GaN and InN on graphite substrate", ISGN, France, 2010.7.5
7. Akira Ishii, Takaaki Tatani, Yasuhiro Oda, Shou Hirai, Kengo Nakada,"DFT study for growth of GaN, InN and GaP on graphite substrate", ICPS, Korea, 2010.7.27
8. Kengo Nakada, Akira Ishii, "First-principles investigation of stability of various adatom adsorptions on graphene", ICPS, Korea, 2010.7.29
9. Akira Ishii, Takaaki Tatani, Yasuhiro Oda, Shou Hirai, Kengo Nakada "DFT study for growth of GaN, InN and GaP on graphite substrate", Psi-k, Berlin, 2010.9.13
10. Kengo Nakada, Akira Ishii "DFT study for electronic structure and stability of adatom adsorption on graphene", Psi-k, Berlin, 2010.9.14
11. Akira Ishii, Takaaki Tatani, Shou Hirai, Kengo Nanada, "Growth of nitrides on graphite substrate using the density functional theory", APWS2011, Mie, Japan, 2011.5.25
12. Akira Ishii, Kengo Nakada, "Density functional calculation for adatoms on graphene", FIESTA2011, Berlin, 2011.6.29
13. Kengo Nakada, Akira Ishii, "Investigation of Mn Adatom Adsorption on Graphene Using DFT Calculation", ICTF-15, Kyoto, Japan, 2011.11.8
14. Takahiro Torobu, Kengo Nakada, Akira Ishii, "Investigation of Hf Adatom Adsorption on Graphene Using DFT Calculation", ISSS-6, Tokyo, Japan, 2011.12.13
15. Akira Ishii, Kengo Nakada, "Density functional calculation for various adatom adsorptions on graphene", 2nd nanotoday, Hawaii, USA, 2011.12.14
16. Kengo Nakada, "DFT study of the influence of a defect and impurity substitute in the nitride compound semiconductor on the defect graphene", GrapheneWeek, Netherlands, 2012.6.5
17. Kengo Nakada, "First-principles investigation of the influence of adsorbed atom on the defect and impurity substitute graphene", ICM2012, Korea, 2012.7.9
18. Akira Ishii, "DFT calculation for various adatom adsorptions on graphene for using graphene as substrate of nano structures and nitride devices", ICPS2012, Switzerland, 2012.7.31
19. Kengo Nakada, "Influence of defect to the nitride compound growth on the defect graphene", IWN2012, Sapporo, Japan, 2012.10.15
20. Kengo Nakada, A.Ishii, "Influence of defect to the GaN growth on the defect grapheme", ISCS2013, Kobe, Japan, 2013.5.20
21. Akira Ishi, "DFT calculation for adatom adsorption on single layer h-BN", GrapheneWeek, Germany, 2013.6

(4)知財出願

- ①国内出願 (1件)
- ②海外出願 (2件)
- ③その他の知的財産権

(5)受賞・報道等

①受賞

[東大グループ]

- ・太田実雄 日本結晶成長学会 ナノ構造・エピタキシャル成長分科会 研究奨励賞
2009.5.16
- ・上野耕平 日本結晶成長学会 ナノ構造・エピタキシャル成長分科会 発表奨励賞
2009.5.16
- ・藤井智明 日本結晶成長学会 ナノ構造・エピタキシャル成長分科会 発表奨励賞
2009.5.16
- ・小林篤 第29回電子材料シンポジウム EMS 賞 2009.7.14
- ・上野耕平 日本結晶成長学会 ナノ構造・エピタキシャル成長分科会 研究奨励賞
2011.6.18
- ・金 惠蓮 2012 International Conference on Flexible and Printed Electronics, ICFPE2012
Student Poster Award, 2012.9.8
- ・金 惠蓮 日本結晶成長学会 ナノ構造・エピタキシャル成長分科会 発表奨励賞
2013.6.21
- ・上野耕平 10th International Conference on Nitride Semiconductors, Poster award,
2013.8.26

② マスコミ(新聞・TV等)報道

2014年6月23日

「ガラス基板上に低コストでLEDディスプレイを作製する技術を開発」と題して、以下の論文に関するプレス発表を行った。

J. W. Shon, J. Ohta, K. Ueno, A. Kobayashi, and H. Fujioka, “Fabrication of full-color InGaN-based light-emitting diodes on amorphous substrates by pulsed sputtering”, Sci. Rep. 4, 5325 (2014). DOI:10.1038/srep05325

その結果、日経エレクトロニクス、日経産業新聞、日刊工業新聞、EETimesなどに技術内容が掲載された。

③ その他

無し。

§5 最後に

本研究では、自己組織化グラファイトシートを用いた新しい半導体エレクトロニクスを展開するために、グラファイトシート上に半導体デバイスを作製する技術を開発し、最終年度までにその動作を実証することを目的とした。また、この最終目標を実現するために、大面積量産に適したパルススパッタ堆積(PSD)法を用いた半導体結晶成長技術の確立を行った。PSD法を用いた半導体結晶成長プロセスの開発が当初予定よりも早く進展し、窒化物半導体の高品質薄膜成長技術や、素子作製に必要なp型やn型の伝導性制御、ヘテロ構造作製技術を構築できた。これによりLED試作の前倒しが可能となり、グラファイトシート上に作製した窒化物半導体系フルカラーLEDの動作を実証することに成功した。また、PSD法の結晶成長プロセス開発をさらに推し進めたことで、電子デバイス応用が可能な品質の半導体結晶を得られることが見出され、AlGaIn/GaNヘテロ構造を用いた高電子移動度トランジスタの作製が可能となった。さらに、本研究で開発したPSD法による結晶成長技術を基に、InN系電界効果トランジスタや、グラフェン上のLED、緑色レーザーダイオード、N極性窒化物半導体薄膜を用いたLEDや太陽電池といった素子について、それらの実現可能性を示すことができた。また、追加研究項目として実施したチーム間共同研究においてもパワーエレクトロニクス作製プロセス技術に関する重要な知見が得られた。このように本研究では、当初の目的がほぼ予定より早く達成され、新たな展開への萌芽も数多く得られたと自負している。

研究遂行にあたっては、グラファイトシート上半導体素子開発に必要なプロセス装置や消耗品類などを導入し、滞りなく研究を遂行できた。また、研究の進捗は、当初の研究計画から前倒しはあっても後退することはなく、各年度で最適な予算執行ができたと考えている。震災時の装置復旧においては、JSTの迅速なご支援によって研究の大幅な遅延を回避することができ感謝している。また、CREST研究を実施したことにより、本研究に参加した若手研究者や多くの学生が先端的な環境の下で研鑽を積むことができ、本研究は人材育成の点でも極めて有意義なものであったと確信している。最後に、本研究の成果は研究参加者の尽力によるところが大きく、その多大なる貢献に感謝したい。本プロジェクトの成果を俯瞰的に振り返ってみると、従来は性能が高くても価格が高いために実用に供されなかったIII-V族化合物半導体を極めて安価に供する技術を開発することができた。PSDパワー素子やガラス基板上のIII-V族半導体エレクトロニクスなど将来が楽しみな技術を見出すことができたのも、本プロジェクトにご協力頂いた沢山の皆様のお力によるところが大きく、心よりの謝意を表したい。

東大グループの集合写真

