

III-2-2 大口径エピタキシャル成長技術の開発

研究は、順調に進捗しており、平成21年度中間目標を達成見込みである。表1に、目標に対して得られた成果、達成度、及び今後の課題を示す。

(1) 大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術

① 窒化物基板上の高均一・高品質結晶成長技術

既存炉を用いて、2インチc面 GaN 基板上にHFET 構造を試作し、C-V 測定により残留不純物を評価した。ウェハ全面にわたって N_D-N_A は 10^{13}cm^{-2} 程度となり、中間目標である $5 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ 以下を達成した。膜厚分布および組成分布はそれぞれ $\pm 1\%$ 以内、および $\pm 6\%$ 以内であり、中間目標を達成した。成長の極初期にSiが高濃度に添加されてしまう現象が観測され、その原因の把握と抑制が今後の課題である。

② デジタル MOVPE の開発

高温での高In組成 GaInN 成長を可能にするための加圧機構、および0.1秒のガス置換が可能な高速バルブを備えたデジタル MOVPE 装置を設計・開発し、AlGaIn では世界初の原子層エピタキシャル成長(Atomic Layer Epitaxy : ALE)、および低温成長での ALE の有用性を確認した。

(2) 高 In 組成窒化物層成長技術

① 高圧 MOVPE 成長用有機 In 原料の選択

CpIn の特性を調査し、既存炉において、実際に GaInN の成長が可能であることを確認した。

② 2 インチの有極性又は無極性 GaN 基板上への加圧 GaInN 成長

成長中の炉内圧力を変えてc面 GaN 基板上、および a 面 GaN テンプレート上に、CpIn を用いて GaInN の成長を行い、圧力印加とともに In 組成が高くなることを確認した。また、高 In 組成 GaInN を成長させ In 組成 0.5 までの GaInN の成長を確認した。c面 GaN 基板上では赤色のフォトルミネッセンス発光が観測されたが、a面テンプレート上では発光が観測されず、TEM 観察から、ポイドが存在することを確認した。従って転位密度の評価には至っていない。c面 Fe ドープ GaN 基板上への HFET 構造を試作し、表面偏析、固相および気相拡散による Fe の再分布を詳細に評価した。その結果、Fe 以外の不純物による半絶縁性基板の実現、および MOVPE における低温成長の必要性を確認した。

(3) Al 組成窒化物層成長技術

① 高 Al 組成 AlGaIn エピタキシャル成長技術の開発

既存炉を用いて AlGaIn 成長を行い、Al 組成 0.5 に至るまでの制御性を確認した。得られた AlGaIn は原子レベルで平坦であることを確認した。Fluent を用いて既存 MOVPE 炉、および新型加圧・高速バルブ付きの MOVPE 炉の流体シミュレーションを行い、既存炉においては Al 組成および膜厚が均一になる成長条件、新型の加圧・高速バルブ付きの MOVPE 炉では、ウェハ全面にわたって高速でガス置換が可能なインジェクターを考案・設計した。このシミュレーションに基づき AlGaIn/GaN HFET 構造を試作し、Si 及び Mg のドーピングではそれぞれ $9 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 、 $2 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ までのドーピング制御性を確認し中間目標を達成した。均一性は厚み $\pm 4.9\%$ 、組成 $\pm 5.4\%$ 、Mg ドーピング $\pm 7.7\%$ 、Si ドーピング $\pm 9.6\%$ であり、中間目標をほぼクリアしている。c面基板上に AlGaIn チャネル HFET 構造を試作し、シート抵抗評価によりc面 AlN 基板の有用性を確認した。一方 m 面 AlN 基板上の AlGaIn エピの場合、極めて高密度の欠陥が発生しており、m 面 AlN 基板上に AlGaIn を成長する場合は、c 面と異なり、非極性面に適したエピタキシャル成長条件または構造が不可欠であることが判明した。今後、膜厚の薄い AlGaIn を成長することでこの多数の欠陥の発生を抑制するなど課題解決に向けて検討を継続する。

② 高 Al 組成 AlGaIn エピタキシャル層成長用無極性 AlN 基板の開発

成長法として、c面成長の長尺化、および無極性 SiC 基板上への成長の二つの方法を検討した。c面長尺化に関しては 10mm に至るまでの厚膜 AlN の成長に成功している。無極性 SiC 基板上では、界面から積層欠陥が導入され、低欠陥化に課題を残している。一方、SiC 上のc面 AlN とm面 AlN を比較すると、同一膜厚ではクラック間隔がm面の方が広い。従って、クラックに関しては無極性面の方が有利と考えられるため、今後もc面長尺化及び無極性面基板上への成長を引き続き検討する。

(4) 結晶成長その場観察評価技術

結晶成長その場観察に関しては、c面 AlGaIn/GaN ヘテロ成長における AlGaIn の Al 組成および膜厚と反りの関係を把握した。無極性面では反りの異方性により二次元マッピングが必要であることが判明し、新原理に基づく二次元ウェハ形状その場観察装置の設計及び試作を行い、曲率半径 1km 以上の精度で、成長中のウェハ形状その場観察に世界で初めて成功した。

表1 目標に対して得られた成果, 達成度, 及び今後の課題

研究項目	最終目標	中間目標	成果		今後の課題 (対最終目標)
			達成値など	達成度	
②高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発	口径4インチの有極性, 及び口径3~4インチの無極性窒化物半導体バルク基板上	口径2インチの有極性, 及び無極性窒化物基板上	AlGaIn の ALE に世界で初めて成功 AlGaIn の低温成長に成功	◎ ◎	・大口径化
	AlGaIn, 及びInGaIn 混晶エピ成長層 Al 又はIn 組成 $1 \geq x \geq 0.5$ 転位密度 $< 10^6 \text{cm}^{-2}$ ドーピング不純物濃度 N 型 $> 10^{18} \text{cm}^{-3}$ P 型 $> 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 面内均一度: 厚み $\pm 5\%$, 組成: $\pm 5\%$, ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$	AlGaIn, 及び InGaIn 混晶エピ成長層 Al 又は In 組成 $0.5 \geq x \geq 0.2$ 転位密度 $< 10^8 \text{cm}^{-2}$ ドーピング不純物濃度 N 型 $> 10^{18} \text{cm}^{-3}$ P 型 $> 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 面内均一度: 厚み $\pm 5\%$, 組成: $\pm 5\%$, ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$	GaNN に関して ・有極性 GaN テンプレート基板上への GaInN 膜の高圧成長実施。PL, X 線回折特性比較。 ・In 組成 0.4~0.5 の高 In 組成 GaInN 膜の成長達成。 但し, a 面は膜内に空洞有り。 ・In 組成のバラツキ $\pm 13\%$ と大。 ・GaNN 膜内残留炭素, 酸素原子濃度大 ($> 10^{20} \text{cm}^{-3}$) AlGaIn/GaNN ヘテロ接合形成。構造評価実施。 AlGaIn に関して Al 組成 $0.5 \geq x \geq 0.2$ 可能。 Al 組成 $0.5 \geq x \geq 0.2$ N 型 $\sim 9 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ P 型 $\sim 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 厚み $\pm 4.9\%$ 組成 $\pm 5.4\%$ Mgドーピング $\pm 7.7\%$ Siドーピング $\pm 9.6\%$	○ ○	・非極性面上の GaInN 膜の結晶性改善 ・空洞発生抑制: デジタル成長 AlGaIn の成長温度に相応して成長温度の低温化又は V/III 比の高比率化。 ・均一性向上 (1)ヒータ均熱性向上 (2)低温成長 ($< 600^\circ\text{C}$) (3)高 V/III 比成長 (> 20000)
	GaN ホモエピ成長層 残留ドナー濃度 $< 10^{15} / \text{cm}^3$ 転位密度 : 有極性基板上で $< 5 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$, 無極性基板上で $< 10^5 \text{cm}^{-2}$ 面内均一度 : 厚み $\pm 5\%$, ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$, ドーピング精度 $\pm 20\%$ また, 上記エピ層からなる窒化物半導体ヘテロ構造において 2次元電子ガス移動度 $> 2,500 \text{cm}^2 / \text{Vs}$	GaN ホモエピ成長層 残留ドナー濃度 $< 5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$, 転位密度: 有極性基板上で $< 10^5 \text{cm}^{-2}$, 無極性基板上で $< 10^6 \text{cm}^{-2}$ 面内均一度: 厚み $\pm 5\%$, ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$, ドーピング精度 $\pm 20\%$ 。	GaN 残留ドナー濃度 $< 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 以下を達成 転位密度 有極性基板上 $< 10^6 \text{cm}^{-2}$ 無極性基板上: 測定中 面内均一性 厚み $< \pm 5\%$ ドーピング不純物濃度 $< \pm 6\%$ ドーピング精度 $< \pm 1\%$	○	・残留不純物低減 ・成長初期の Si スパイクの抑制

(1) 大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術

① 窒化物基板上の高均一・高品質結晶成長技術

・ 既存の高速回転型縦型炉を用いて、2インチ c 面導電性 GaN 基板上に AlGaIn/GaN HFET 構造を成長し、膜厚約 2 μm のアンドープ GaN の残留ドナー濃度の評価、AlGaIn バリア層の組成分布および膜厚分布を評価した。結果を図 1, 2 に示す。図 1 からわかる通り、アンドープ GaN の $N_D - N_A$ は 10^{13}cm^{-3} 台前半であり、目標とする $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 以下の残留濃度のアンドープ GaN 層を実現した。GaN 基板とエピタキシャル層界面において、 $N_D - N_A$ の急激な増加がみられた。この原因を探るために SIMS による不純物の深さ方向分布を測定したところ、特に界面付近において高濃度の Si が検出された。配管内やリアクタ内に残存する Si や、SiC コートサセプタからのコンタミネーション等が考えられるが、現状では原因不明であり、引き続き界面での Si のパイルアップの原因を検討する。

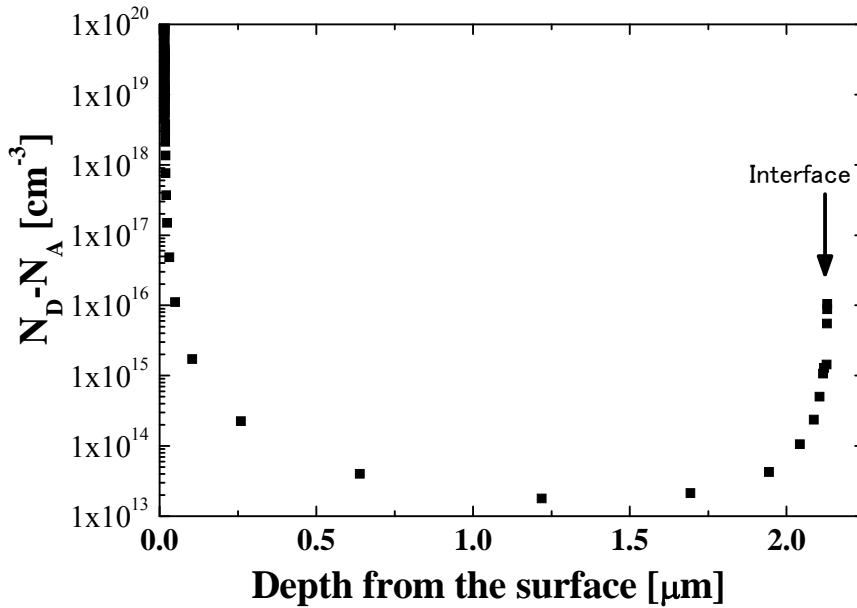


図 1 2 インチ c 面導電性 GaN 基板上の AlGaIn/GaN 構造の C-V プロファイルから求めた $N_D - N_A$ の深さ方向分布

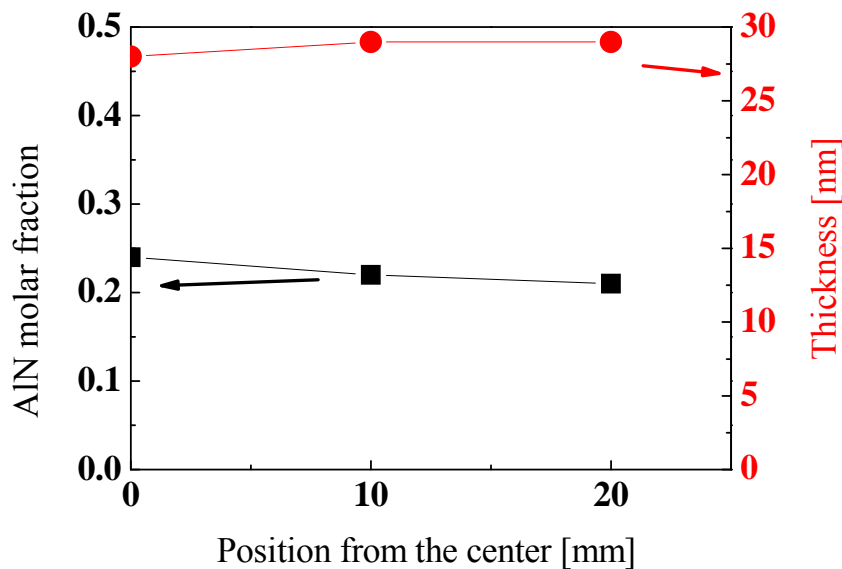


図 2 2 インチ c 面導電性 GaN 基板上の AlGaIn/GaN 構造における AlGaIn バリア層の AlN モル分率及び膜厚分布

図2より、組成分布は±6%、膜厚分布は±1%であった。これらの試料を福井大に送付し、HFETの試作を行い、良好な結果との報告を受けた。

②デジタル MOVPE の開発

GaNN チャンネル、AlGaIn バリアの究極の HFET 構造実現のため、スイッチング時間 10 ミリ秒の超高速バルブおよび 2 気圧まで加圧可能な MOVPE 炉を新たに設計、製作した。

性能確認のため、図4に示す原料ガス供給シーケンスにて、GaN テンプレート上の AlGaIn の成長を試みた。NH₃ の供給流量、および TMGa と TMAI 供給モル比は一定とし、TMGa+TMAI の供給モル量を変化させて、AlGaIn の成長速度の変化を評価した。キャリアガス、成長圧力、成長温度は、H₂, 1 気圧, 1100°C, および N₂, 2 気圧, 700°C の 2 通り試みた。結果を図5に示す。

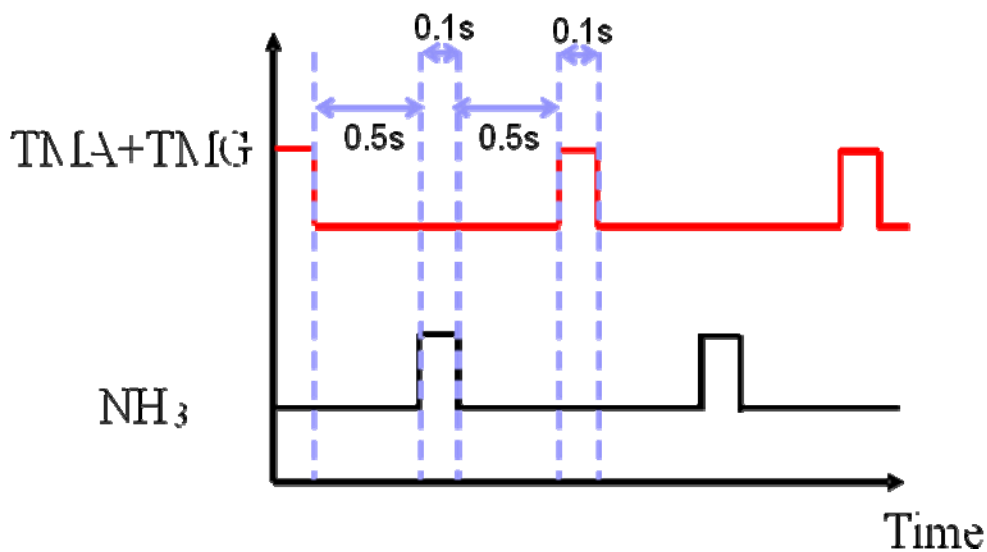


図4 原料ガス供給シーケンス

図5に示す通り、Ⅲ族原料供給モル量がある程度まで供給量に比例して成長速度が増加し、それ以後は供給量を増加させても、成長速度は増加しない。その飽和する成長速度は、図4のシーケンスにおける1回のⅢ族原料供給で1原子層成長する場合と一致している。すなわち、原子層エピタキシャル成長（Atomic Layer Epitaxy : ALE）が実現していることを示した結果といえる。原料供給1パルスにより1原子層の成長が可能になったことで、従来の成長法では実現困難なデジタル混晶が作製可能になる。また、1原子層で成長がストップするため、任意の大きさの基板に対して、1原子層の精度で膜厚制御が可能になる。

以前より、Ⅲ族とⅤ族の原料ガスを交互に供給する方法はアメリカのサウスカロライナ大学をはじめ多くの研究機関より報告があったが、いずれもALEを示す結果は示されていない。本プロジェクトでは、特殊なガスバルブを用いたこと、および高AI組成窒化物層成長において示す流体シミュレーションを用いてガス導入部を設計することにより、反応炉内での高速ガススイッチングを実現したことにより、ALEを実現することができた。特にN₂キャリア、2気圧においてAlGa₂NのALEを実現したことは、原子レベルで平坦なAlGa₂N/GaInNヘテロ構造実現にとって極めて重要な成果と言える。

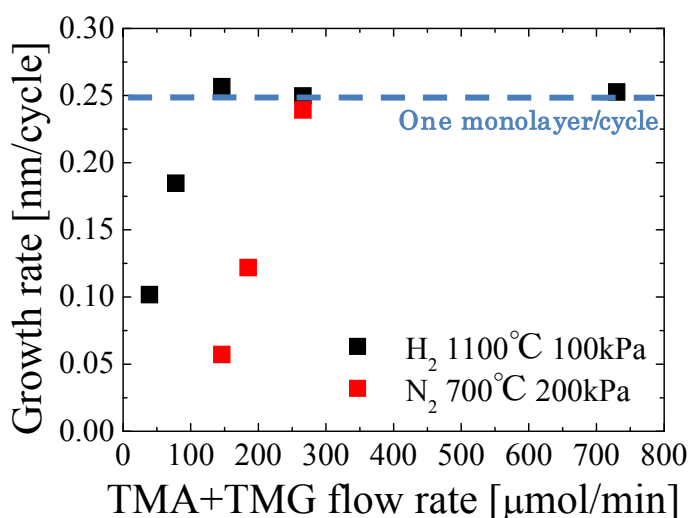


図5 図4に示す原料ガス供給シーケンスにて成長させたAlGa₂N成長速度のⅢ族原料供給モル量依存性

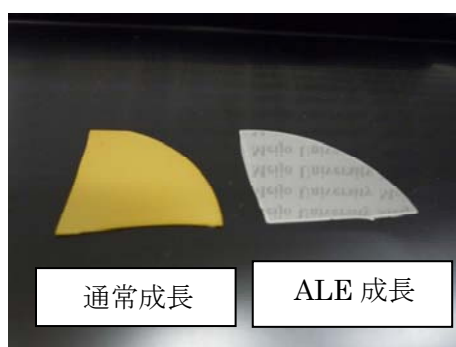


図6 N₂中650°Cにて通常成長させたAlGa₂N(左)およびALE成長させたAlGa₂N(右)。

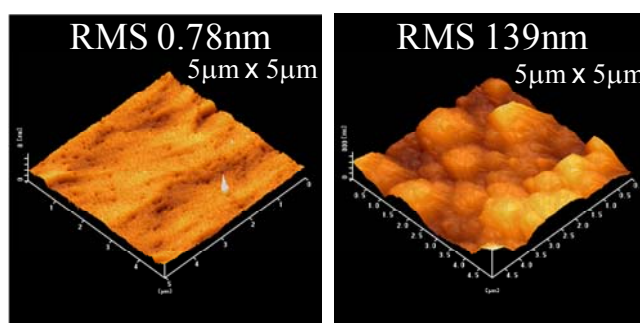


図7 N₂中650°Cにて通常成長させたAlGa₂N(右)およびALE成長させたAlGa₂N(左)のAFM像。

図6, 7には、それぞれN₂中、650°Cにおいて通常成長させたAlGa₂NおよびALE成長させたAlGa₂Nの表面

写真, および AFM 像を示す。ALE 成長させた AlGaIn は目視で鏡面であり, AFM 像からも原子レベルで平坦なことがわかる。ALE 成長させた AlGaIn の対称反射の X 線回折半値幅は, 160 秒であり, サファイア基板上としては良好な結果であった。

今後の課題として, 有極性および無極性導電性および半絶縁性 GaN 基板上への成長時の転位密度の評価, 4 インチ基板上での組成分布および膜厚分布評価, 高 In 組成 GaInN, 高 Al 組成 AlGaIn, AlInN の ALE 成長などのほか, ALE 成長時の残留不純物濃度評価, AlGaIn/GaInN ヘテロ構造 HFET の試作, AlInN/GaInN ヘテロ構造 HFET の試作などを行い, 加圧 ALE 成長の有用性確認を行う。また, さらに ALE 成長の長所を生かし, 合金散乱を抑えた超高移動度 HFET 構造の実現を目指す。

(2) 高 In 組成窒化物層成長技術

① 高圧 MOVPE 成長用有機 In 原料の選択

<原料選定>

高圧下では, III 族原料である有機金属と窒素源であるアンモニアとの気相複合化(ポリマー化)反応がより顕著に進行すると推察される。従来, InP 系の MOVPE 成長では, この気相での反応を抑制するのに, ルイス(Lewis)塩基性の有機 In 原料として結合価を1価とするシクロペンタジエニル In(分子式: $C_5H_5In(I)$) が有効であることが知られている¹⁾。しかし, これまで窒化物半導体の MOVPE には利用されてこなかった。今回, 高圧下での高 In 組成窒化物を成長するにあたり, 気相反応の問題がより深刻化すると考え, 気相反応抑制に期待できるシクロペンタジエニル In を採用し, その有効性を検討した。

<原料物性調査>

MOVPE 成長条件の設定に必要な蒸気圧, 熱分解性などの基本的な物性を調査した。図1にシクロペンタジエニル In の分解圧の温度依存性についての調査結果を示す(出典: J. Am. Chem. Soc. 111(1989), 7648-7650.)。蒸気圧については, 現在, 一般に In 源として使用されているトリメチルインジウム(TMIn)に比較して室温付近での蒸気圧が1桁以上低いことがわかるが, 今回の目的である数十nmの薄膜 GaInN チャンネル層へ適用する場合においては, 十分実用可能な成長速度が得られると考えられる。

<原料の入手>

シクロペンタジエニル In は, 国内メーカーでは製造しておらず, 米国 STREM 社から入手した。

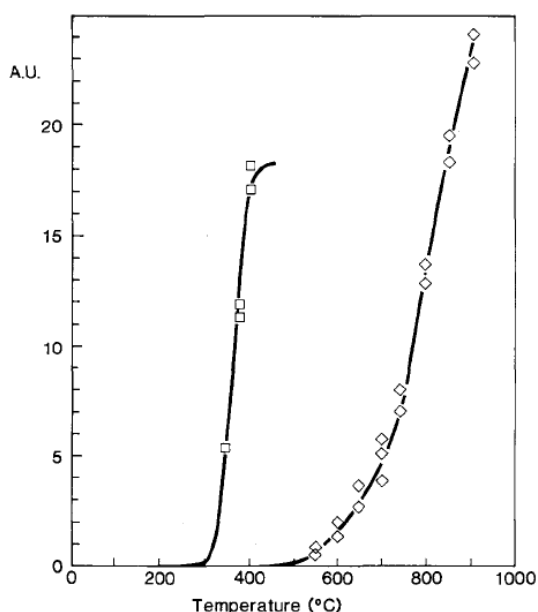


Figure 1. Thermal decomposition of $(CH_3C_5H_4)In$ (\diamond) and $(CH_3)_3In$ (\square) in H_2 atmosphere. The amount of In metal deposited per unit time, normalized for the area of the substrate, is expressed as a rate in arbitrary units.

図1 シクロペンタジエニル In の分解温度¹⁾

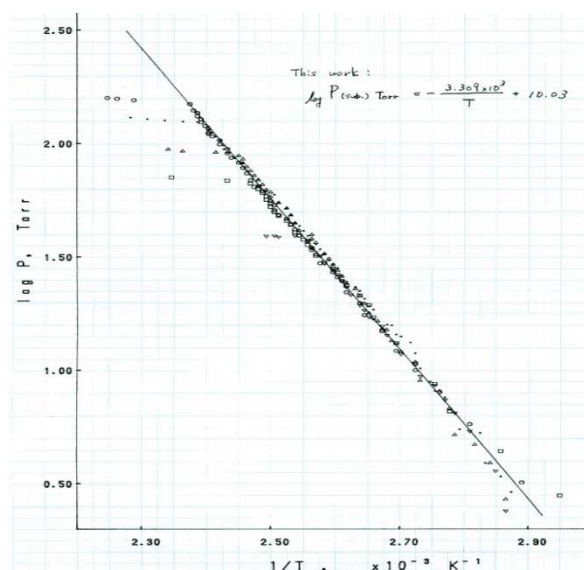


図2 シクロペンタジエニル In の蒸気圧

②口径 2 インチの有極性又は無極性 GaN 基板上への加圧 GaInN 成長

(a)有極性(c面:(0001)面)上の GaN 膜の高圧 MOVPE 成長

加圧成長についての装置動作の確認や基本的成長条件の確認のため GaN 膜成長を実施し、基礎となるデータを取得した。図3に構造と成長条件を示す。従来の減圧成長炉で GaN テンプレートを作製し、その上加圧炉によって、さらに GaN を成長させた。



図3 試料構造

【成長条件】

圧力:200kPa
成長温度:T/C 1180
成長時間:30min
TMG:2.86E-5mol/min
NH3:0.174mol/min
V/Ⅲ:609

その結果、従来の減圧炉で作製した GaN テンプレートの結晶性よりも、その上に成長した加圧成長 GaN の方がX線ロックアップカーブで見る結晶性が良好であることを確認した(表1)。しかし、表面のラフネスについては、加圧 GaN では悪化していた(図4)。今後、加圧下での成長モード制御などの検討が必要である。

表1 加圧成長GaNの結晶性 単位: arcsec

	(0002)	(20 $\bar{2}$ 4)
加圧成長GaN	333	580
GaNテンプレート	385	780

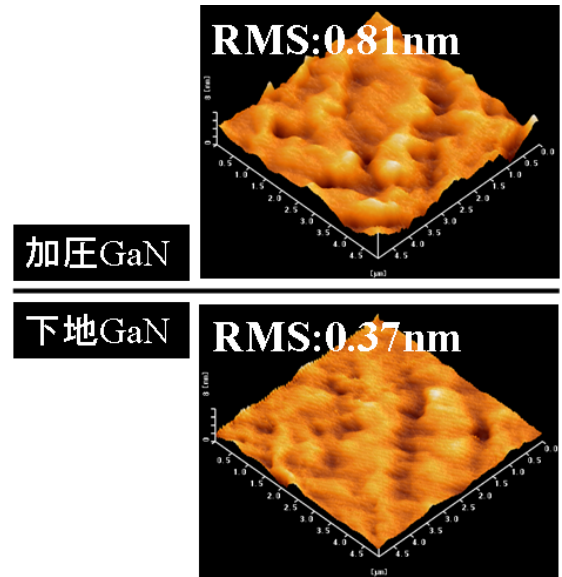


図4 加圧GaInN層とテンプレート下地GaN層のAFM像

また、装置の特性として 2 インチウエハの中心と周辺での膜厚が大きく異なり、均一性に問題があることが判った。原因は、ガスフロー(原料濃度分布)およびサセプタ温度分布の不均一と考えられることから、4インチ化改造に合わせてフローチャネルの改良を実施する。

(b)有極性(c面:(0001)面)及び無極性(a面:11-20面)GaN 層上への GaInN 膜の加圧 MOVPE 成長

In 原料として CpIn, 及び比較として TMIIn を用いて有極性面および無極性面上に GaInN を圧力を変化して成膜した。

CpIn を用いた場合の GaInN 成長

複合化(ポリマー化)反応は視認されなかった。TMIIn を用いた場合との比較をさらに進め、CpIn の有効性を確認していく必要はあるが、その可能性を示す結果を得た。

InN モル分率について

図5に示すような構造で、有極性(c-GaN)および無極性(a-GaN)上に GaInN を成膜した。図 6 に X

線の結果を示す。これより GaInN の InN モル分率を計算した結果が図7である。図に示すように、有極性及び無極性GaInN層の双方で成長圧力を高圧にすることにより InN モル分率が增大した。また、有極性に比較して無極性面の方がInN モル分率が大きかった。(図 6)。これは、無極性面上の GaInN 層に内在する結晶欠陥(積層欠陥など)への集中的な In の取り込みに起因している可能性を示していると思われる。

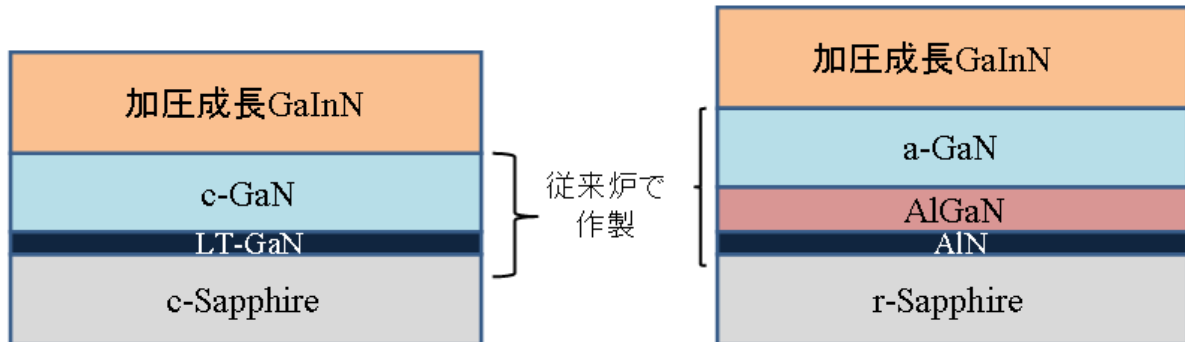


図5 有極性InGaInNおよび無極性InGaInN成長構造

- 成長温度: 750°C
 - 成長圧力: 100, 150, 200kPa
 - In/(In+Ga)=0.5
 - V/III比: 5686
 - 成長時間: 1h
- ※流速が一定になるようにガス総流量を調整した。

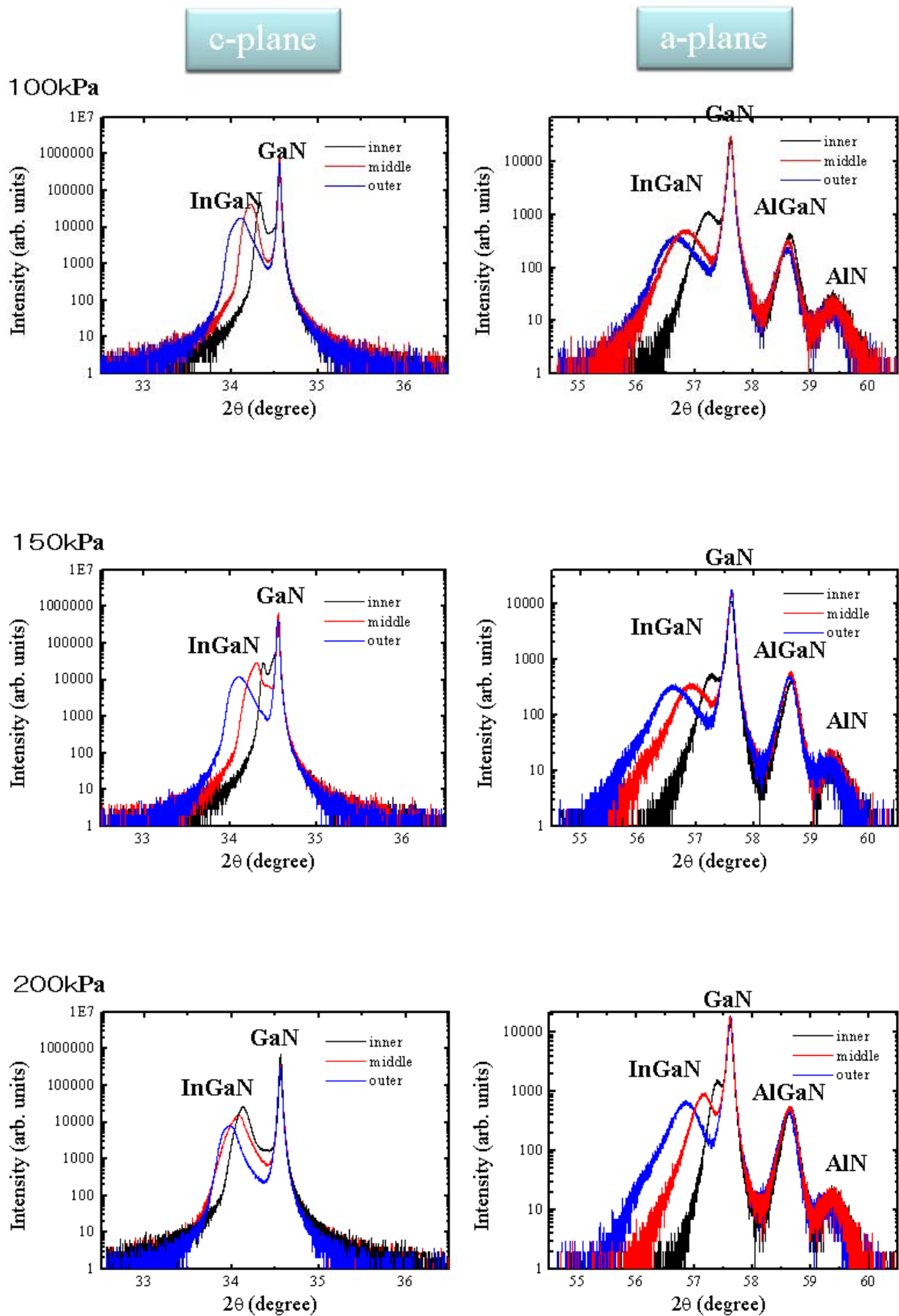


図6 有極性InGaNおよび無極性InGaNのX線測定($2\theta - \omega$)

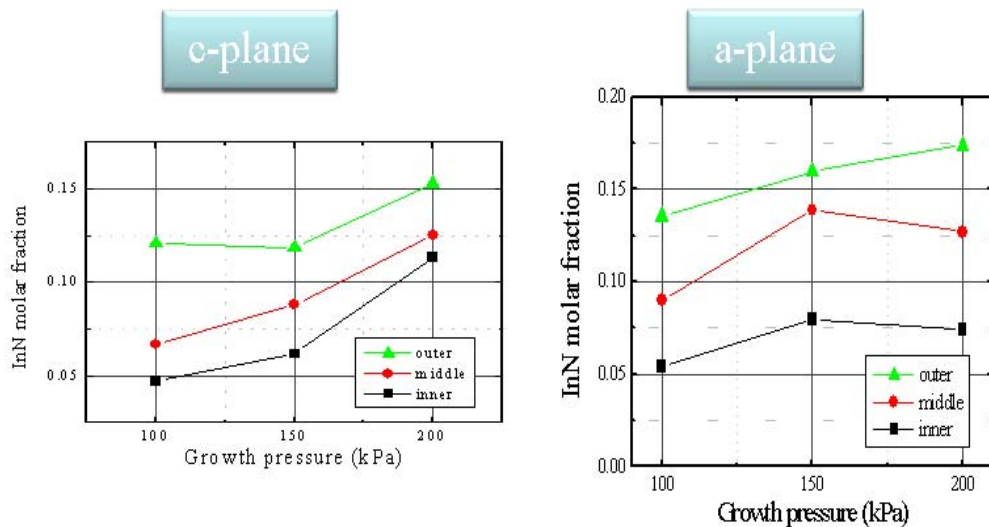
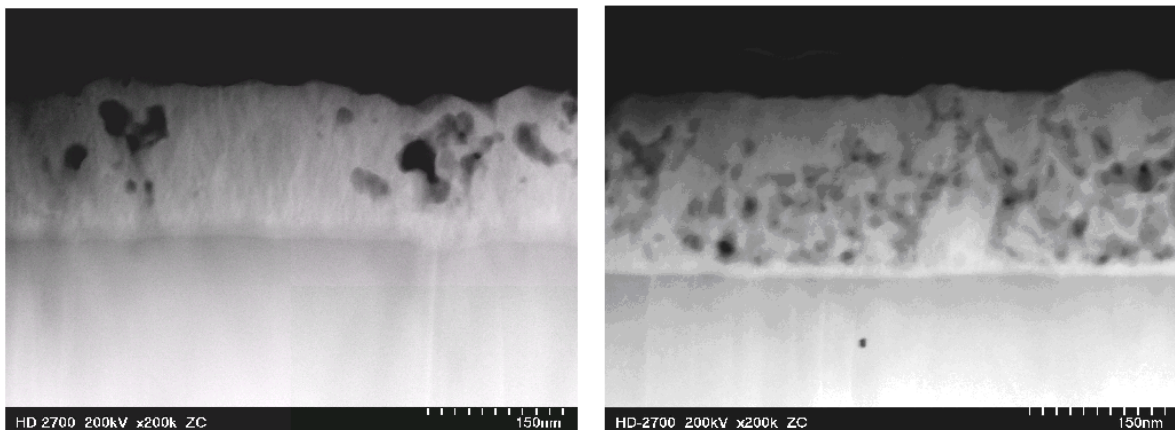


図7 有極性InGa_Nおよび無極性InGa_NのInNモル分率の成長圧力依存性
 ※ただし、Inモル分率算出に歪みは考慮していない。

無極性 GaN 面上で In 組成 0.4~0.5 の高 In 組成の成長が可能である。但し、膜中には空洞 (ポイド) が存在する。また、In 組成のミクロ的な不均一性も±13%と大きい。



(課題)

特に高 In 組成 GaInN 膜の In 組成の均一性向上及び空洞の発生の抑制が課題である。

(課題解決施策の背景)

他の有機 In 化合物 (=トリメチル In) を In 原料として用いても、In 原料供給比率を 0.5 とした際にも、無極性 a 面 GaN 上の GaInN 膜はスポンジ状となる。

CpIn を原料としても、CpIn / トリメチルガリウム (TMGa) 原料系では、In の偏析が認められるものの、空洞の無い GaInN 膜が成長できる場合がある (2008 年第 2 回 研究開発・委員会資料参照)。従って、In 原料種よりも、むしろ成長条件に主に因ると推察される。

(施策)

- * 基板均熱加熱平面積拡大: ヒーター大口径化 (2 インチ用 → 4 インチ用)
- * 成長温度低温化

高品質 AlGaIn 電子供給層の低温でのデジタル MOVPE 成長が可能となったため(～550°C), 成長温度をその温度近傍に低下する。併せて, 空洞の発生の抑制を狙う。

* 原料供給比率(V/Ⅲ比率)増大

成長温度の低温化により窒素源(アンモニア)の分解率の低下を補い, 且つ, InN の昇華を抑制するために V/Ⅲ比を増大させる。

(c) GaN ホモエピ成長

r面サファイア基板上 a 面((11-20)面)GaN テンプレート上の GaN 層の断面 TEM 観察を実施した。貫通転位密度は $7 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 程度であった。有極性(c面:(0001)面)及び無極性(a面:11-20 面)GaN 層上への GaInN 膜の高圧 MOVPE 成長を実施したが, 膜中の空洞が発生しているため, 転位密度の測定には至らなかった。

(d) 高電子移動度ヘテロ接合構造形成

Fe ドープ GaN 半絶縁性基板上への HFET 構造での不純物濃度測定実施(Fe 原子濃度 $\sim 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)

Fe ドープ GaN 基板上に GaInN チャネル HEMT エピ構造を試作した。基板からの Fe の表面偏析および熱拡散を確認した。Fe ドープ GaN 基板自体は高抵抗のため電子移動度の測定はできなかった。下図に基板全体写真, 表面 AFM 写真, 及び基板内部の SIMS 元素分析結果を示す。

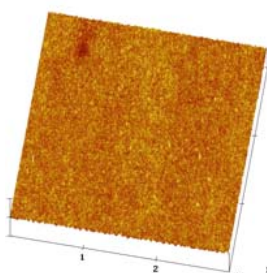
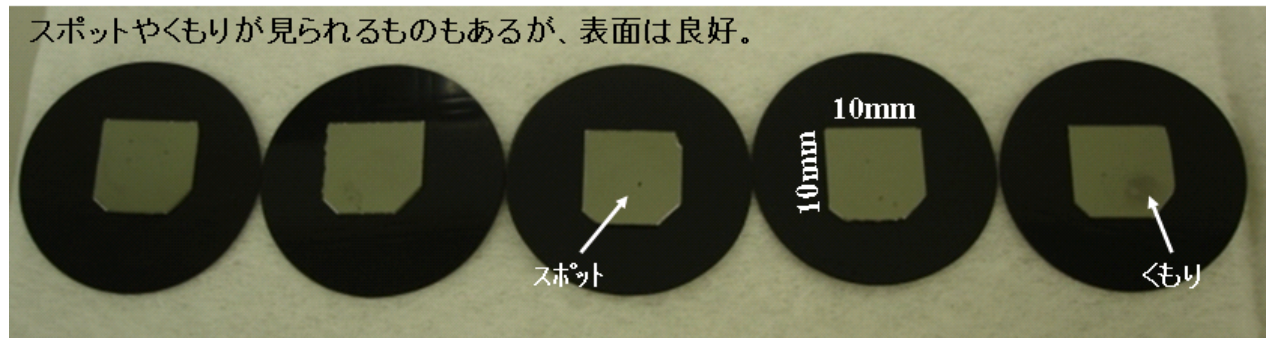


Fig.7 Perspective Image, Edge1

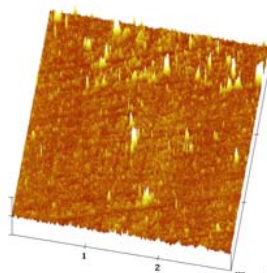


Fig.6 Perspective Image, Center

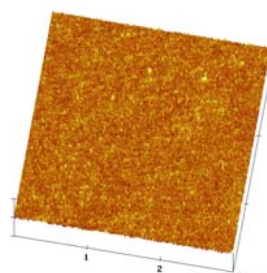


Fig.8 Perspective Image, Edge2

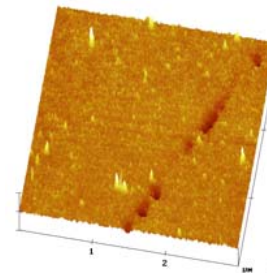


Fig.9 Perspective Image, Edge3

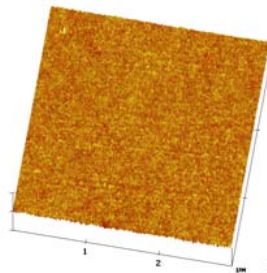
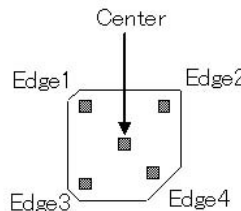
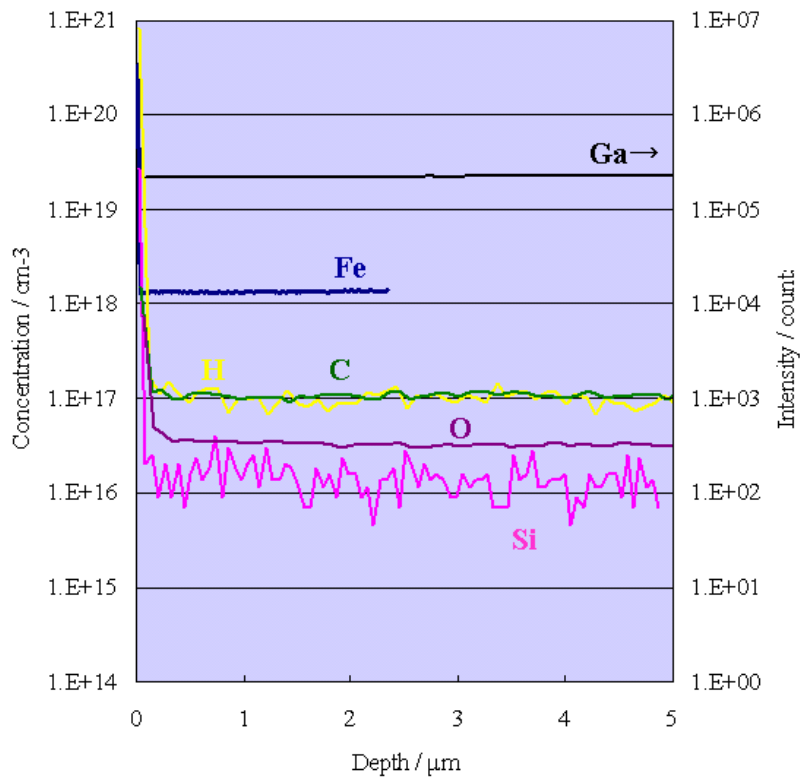


Fig.10 Perspective Image, Edge4

測定位置	Center	Edge1	Edge2	Edge3	Edge4
RMS(nm)	0.146	0.074	0.071	0.117	0.063

スペックは、RMS<0.5nm



(3)高 Al 組成窒化物層成長技術

① 高 Al 組成 AlGa_N エピタキシャル成長技術の開発

(a) Al 組成比率 $x: 0.2 \leq x \leq 0.5$ の AlGa_N エピタキシャル層の開発

既存の MOVPE 装置を用いて、中間目標である Al 組成 $x: 0.2 \leq x \leq 0.5$ の AlGa_N エピタキシャル層の成長に関して検討を行った。

今回、AlGa_Nの成長を実施するにあたり、キャリアガスとして高純度水素ガス(H₂)を用い、V族原料として高純度 NH₃ ガス(NH₃)を用いた。III 族原料として、トリメチルガリウム(TMGa)と、トリメチルアルミニウム(TMAI)を用いており、サセプタ上に設置した各種基板(サファイア基板や GaN, AlN 等の窒化物基板)を 1100°C前後まで加熱することにより、基板上での原料の反応を行い、AlGa_N のエピタキシャル成長を実施した。

今回、1100°Cの基板温度にてエピタキシャル成長を行うことにより、図1に示すように良好な Al 組成制御を実現できた。図1は、TMAI 気相比に対する AlGa_N の Al 組成比の関係である。本成長条件を用いることで、目標の Al 組成約 20%から約 50%までの AlGa_N の Al 組成の良好な制御性が得られた。

また、図2に、AlN, AlGa_N(21%並びに 37%)の X 線回折(XRD)の 2θ-ω 測定の測定結果を示す。シミュレーションとほぼ一致する明瞭なピークが得られており、AlGa_N 系のエピタキシャル膜の良好な構造制御が可能である。また、AlGa_N 表面についても図3に示すように良好なステップフロー成長で RMS=0.12nm という極めて良好な平坦性を実現しており、各種デバイスが高い精度で設計・作製が可能な AlGa_N エピタキシャル膜の成長技術を開発できた。

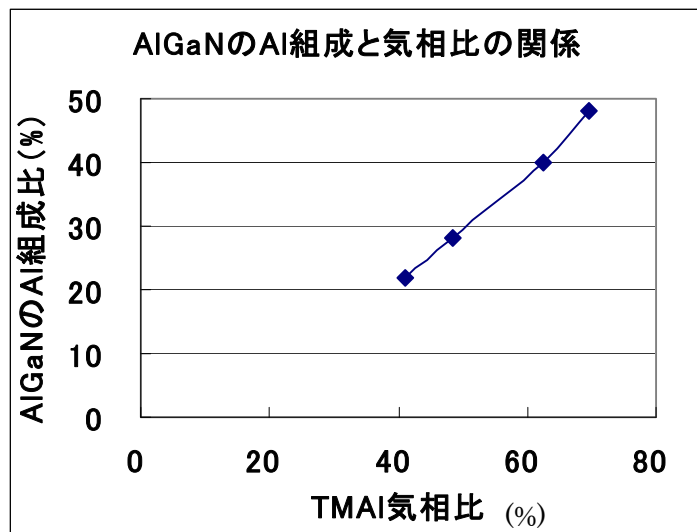


図1. TMAI 気相比と AlGa_N の Al 組成の関係 (基板温度 1100°C)

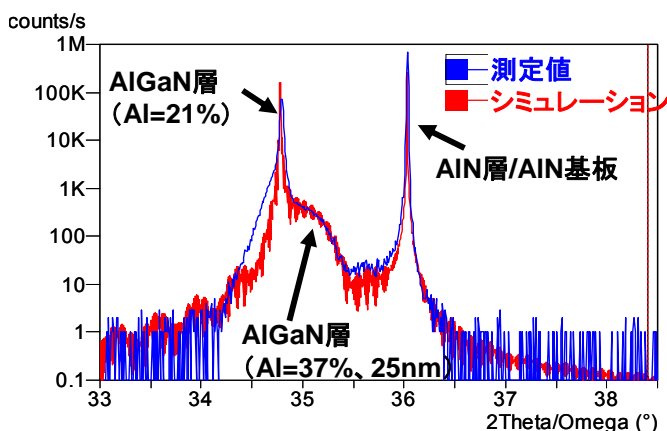


図2. AlGa_N 層の XRD(ω-2θ)プロファイル

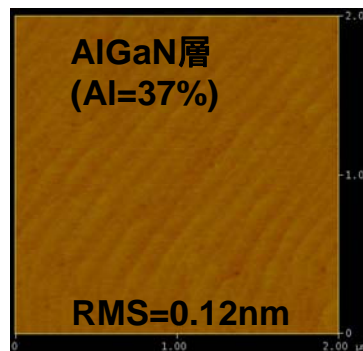


図3. AlGa_N 層表面の AFM 像

(b)既存炉でのシミュレーション検討

エピタキシャル成長に利用している有機金属気相成長法(MOVPE 法)ではV族原料ガス, III族原料ガスとこれらの反応副生成物の反応により成長膜の成長速度(厚み), Al 組成が大きく左右される。特に大口径化を行う際は, 気相中での反応の速度とガス流れの速度の関係によってエピタキシャル膜の分布が大きく変化するため, 成長条件, 成長装置構造の最適化には, これらの速度因子を考慮することによって, 的確な改善が可能になる。また, 上述の反応の速度は反応炉内の温度によって大きく変化するため, 流体解析, 反応解析と同時に, 高精度な伝熱解析を行う必要がある。上述の成長条件, 成長装置構造の最適化の加速のために熱流体解析とガスの反応解析を組み合わせた, MOVPE 成長シミュレーションを行った。

まず, 名城大学で保有している2つのタイプの既存炉を対象にシミュレーションを行い, 実験結果との対比を行い, シミュレーションモデルの精度を向上した。これらの解析結果を基に, 特に高温成長での高 Al 組成の AlGaIn エピタキシャル成長に有利な方式はどのような方式であるかを考察した。

<既存成長装置の MOVPE シミュレーション>

正確な AlGaIn の成長速度, Al 組成を予測できる MOVPE シミュレーション技術を確立するため, 既存の MOVPE 装置のシミュレーションモデルを作成し, 実験結果との対応を確認した。また, シミュレーションの解析結果を利用して, 高 Al 化に有利な装置要件, 成長条件はどのようなものか, 考察した。

①水平式 MOVPE 装置である AIX1432(Aixtron 社製)と②縦型 MOVPE 装置 P75(Veeco 社製)をモデル化しシミュレーションを行った。シミュレーションは炉内の伝熱解析と原料ガスの流れを数値解析により解き, 同時に, 原料ガスの分解, 反応副生成物の生成反応を数値解析により解いた。熱流体解析には汎用熱流体解析ソフト FLUENT(ANSYS 社製)を使用した。反応解析には VPE-Sim(STR 社製)を使用した。後者は前者にサブルーチン関数として読み込まれ, 熱伝導方程式, 流体方程式, 反応種の拡散・反応方程式を同時に解かれた。反応解析には一部の反応副生成物の反応による微粒子の核形成と核の成長(クラスター化)による原料ガスの反応も解かれ, 特に高 Al 組成の AlGaIn エピタキシャル層を成長する際に問題となる気相での寄生反応による Al 組成の低下も予測した。図4に水平式装置の3次元モデルの計算例を示す。図4左は反応炉内部の流れと, 基板周辺の AlGaIn 層の成長速度分布をコンター図で示している。III族ガスとV族ガスは基板の直ぐ上流まで仕切られそこで混合され, 基板へエピタキシャル膜の堆積が始まるため, 上流での堆積は低い。炉中央流れ方向の成長速度分布, Al 組成分布のグラフを挿入している。図4右に炉中央面の Al 原料ガス(TMA)のモル濃度分布, 反応生成物(ガス状 AlN)のモル濃度分布, 寄生反応により生じた粒子の重量濃度分布を示す。この装置の場合 Al 取り込みの障害となる寄生反応は主に基板より下流で起こるため, 高 Al 化への障害は小さい。水平式装置の場合は, 流速を適正なレベルに上げ, 寄生反応を下流で起こすことによって高 Al 化の障害が取り除かれることが分かる。

図5に, シミュレーションにより求めた基板を載置している台(サセプター)の設定温度と AlGaIn エピタキシャル膜の成長速度, Al 組成の関係を示す。サセプター温度約 1000°Cの条件では実験も実施しており, シミュレーション結果(赤)と実験結果(緑)の対応が良好なことが分かる。シミュレーションから, サセプター温度が 1200°C以上の高温では AlGaIn 中の GaN が H₂にエッチングされる現象が顕著になり, 成長速度は低下するが, Al 組成は増加することが分かった。

図6に縦型 MOVPE 装置の2次元モデル(軸対象)の計算例を示す。図6左に炉内温度分布とガス流れを示す。図6右に反応副生成物(ガス状 AlN)のモル濃度分布と Al 原料ガスの寄生反応により生成した粒子の重量濃度分布を示す。ガスの温度は基板上の空間で急激に上昇し, そこで寄生反応が激しく起こり, 微粒子が発生することがわかる。

図7に成長圧力が 200 Torr(図中赤線)と 50 Torr(図中青線)の場合の AlGaIn エピタキシャル膜の成長速度と Al 組成の分布を示す。これらの条件での成長実験も行っており, シミュレーション結果と実験結果(図中四角)の対応が良好なことが分かる。現実にはありえないが, シミュレーションで Al 原料ガスの寄生反応が無かった場合の分布(図中桃色(200 Torr)と水色(50 Torr))も示している。これらの比較により, 縦型装置では寄生反応により比較的圧力が高い成長条件において高 Al 組成の AlGaIn 成長に障害が生じるが, 成長圧力を下げることによってその障害を取り除くことが可能なことが分かる。

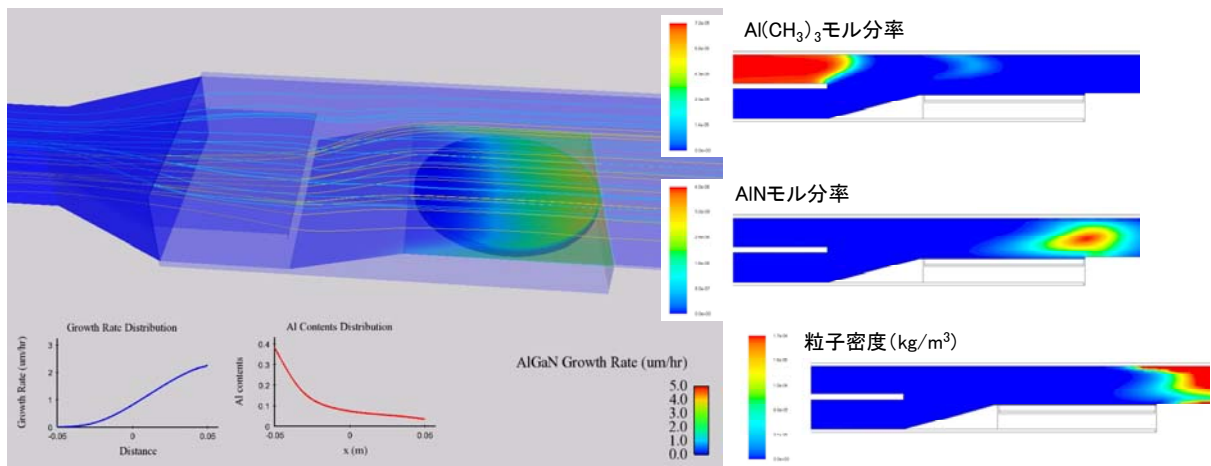


図4. 既存装置(水平式)MOVPE 成長シミュレーション

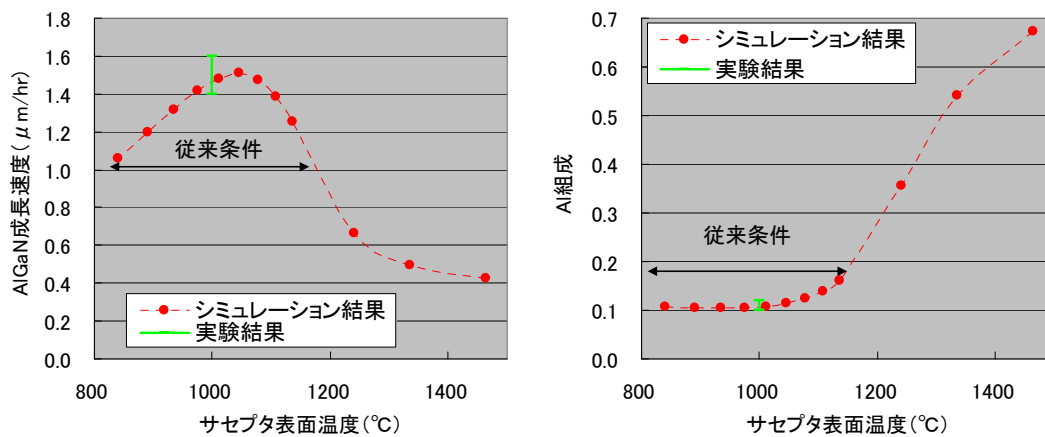


図5. 既存装置(水平式)の AlGaIn エピタキシャル膜成長速度 Al 組成の温度依存性予測

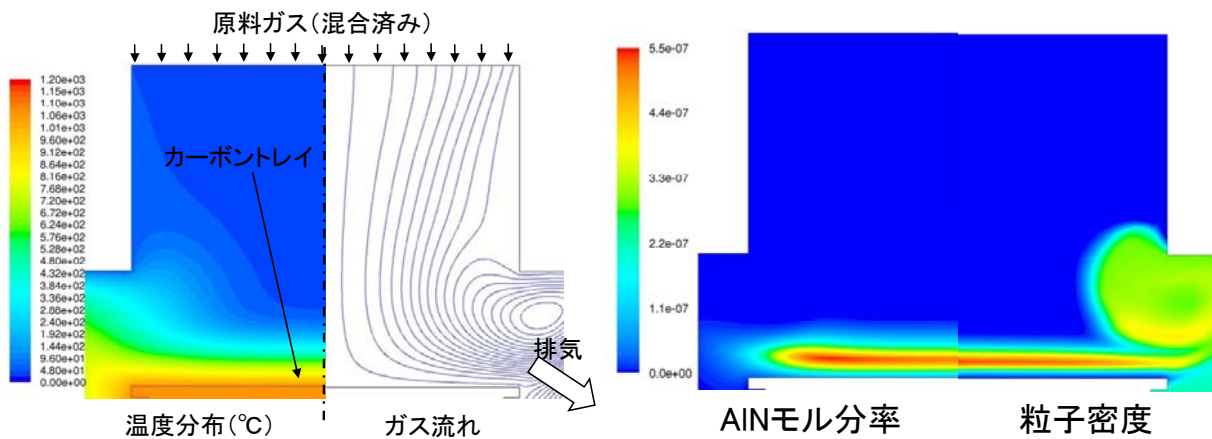


図6. 既存装置(縦型)MOVPE シミュレーション

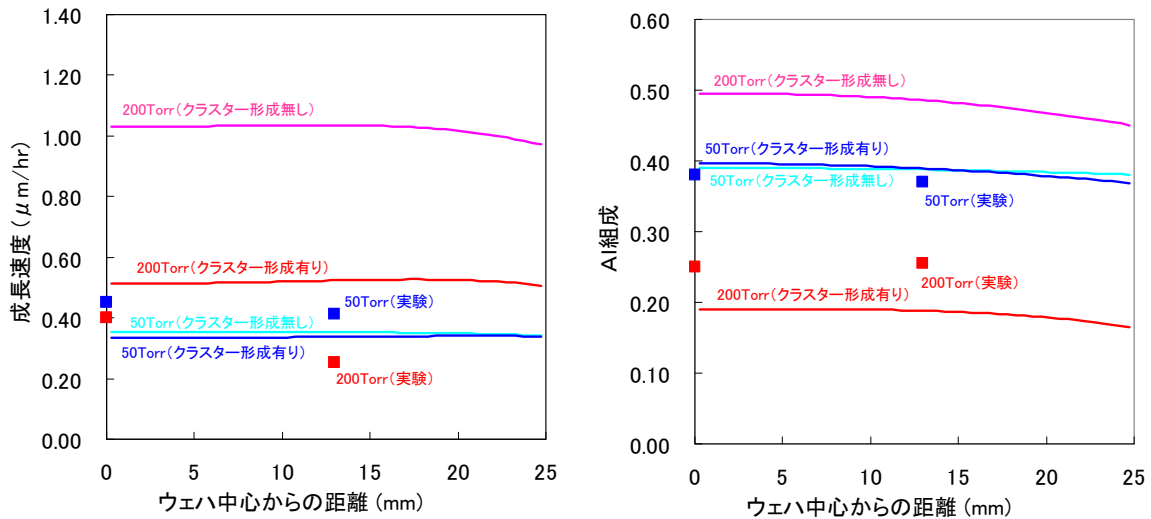


図7. 既存装置(縦型)エピタキシャル膜分布

(c) AlGa_N エピタキシャル層の Al 組成均一性・膜厚均一性の開発

AlGa_N の Al 組成と膜厚の面内均一性に関しては、シミュレーションを活用し、実験との対比を進めながら実施した。シミュレーションにより、成長圧力を下げることによって、Al 原料と NH₃ の気相反応が大幅に抑制され、ウェハ面内における AlGa_N の Al 組成・膜厚分布を大幅に改善できるとの知見が得られたため、成長圧力と AlGa_N の Al 組成分布・膜厚分布との相関について調べた。その実験結果を図8に示す。成長圧力を 200 Torr から 100 Torr, 50 Torr に小さくするに従い、AlGa_N のウェハ面内での Al 組成・膜厚の均一性を大幅に向上できた。AlGa_N を成長圧力 50 Torr で成長することにより、膜厚分布は±4.9%, Al 組成分布は±5.4%の均一性が得られており(図9)、さらなる改善を実施している。シミュレーションの活用により、AlGa_N の Al 組成及び膜厚均一性の目標をほぼ達成できた。

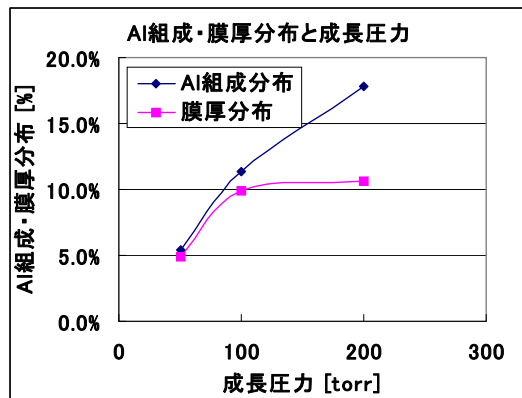


図8. AlGa_N の成長圧力による、Al 組成分布と膜厚分布の関係

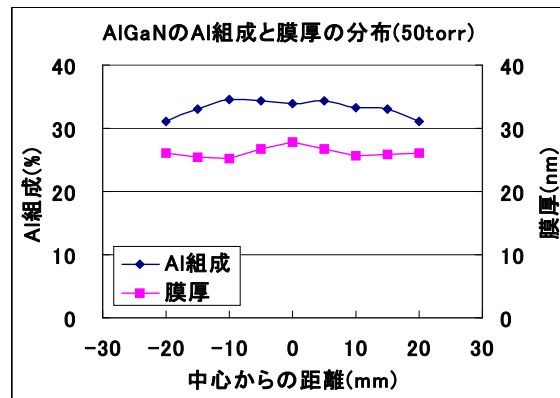


図9. 成長圧力 50 Torr における AlGa_N の Al 組成・膜厚

(d) AlGa_N エピタキシャル層のドーピング制御およびドーピング均一性の開発

AlGa_N エピタキシャル層の n 型不純物の濃度制御に関して、AlGa_N (Al=30%) に Si をドーピングした結果を図 10, 11 に示す。ここで、Si のドーピング原料には、テトラメチルシラン (TMSi) を用いた。図 10 は、AlGa_N (Al=約 30%) に TMSi 流量を階段状に変化させながら Si をドーピングした試料の SIMS 分析結果である。また、図 11 は、TMSi 流量と AlGa_N 中の Si 濃度の関係である。図 10 より、急峻で安定した、メモリ効果等の見られない良好なドーピング制御が実現できており、図 11 より TMSi 流量と AlGa_N 中の Si 濃度がほぼ比例の関係にあることがわかる。AlGa_N の Si 濃度は 1×10^{18} から $9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ までドーピング制御できており、目標の $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の n 型不純物のドーピングを達成できた。また、p 型不純物の濃度制御に関しては、Mg のドーピング原料として EtCp₂Mg を用い、AlGa_N (Al=50%) にドーピングを行い、目標の $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上の p 型不純物のドーピングを達成できた。

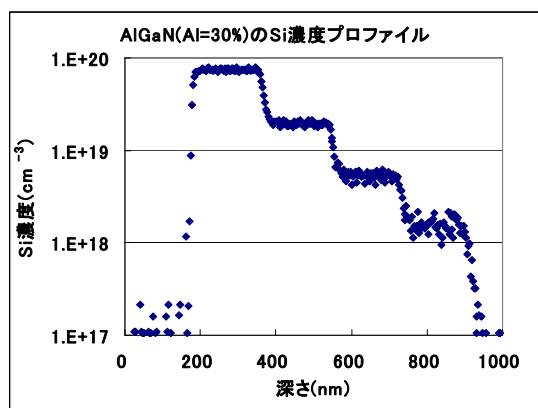


図10. Siドーピング AlGaIn の SIMS 結果

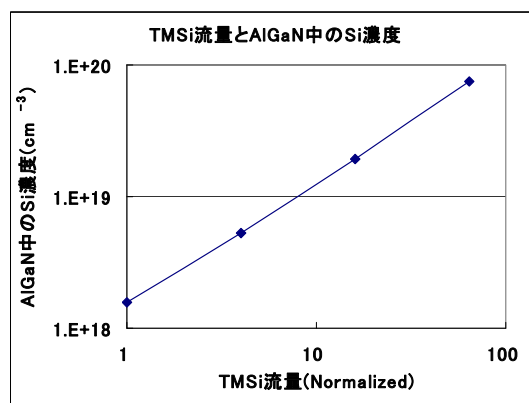


図11. TMSi 流量に対する AlGaIn 中の Si 濃度

均一性に関しては、上記の Al 組成・膜厚の均一性に関する知見を生かし、成長圧力 50 Torr での n 型および p 型不純物のドーピング均一性を確認する実験を行った。図12に示すように Si 濃度で $4.8 \sim 5.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、濃度分布で $\pm 9.6\%$ の良好な均一性が確認できており、Mg に関しても、図13に示すように Mg 濃度で $2.1 \sim 2.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、Mg 濃度分布で $\pm 7.7\%$ の良好な均一性が確認できており、Si, Mg 共に目標の $\pm 10\%$ を達成できた。

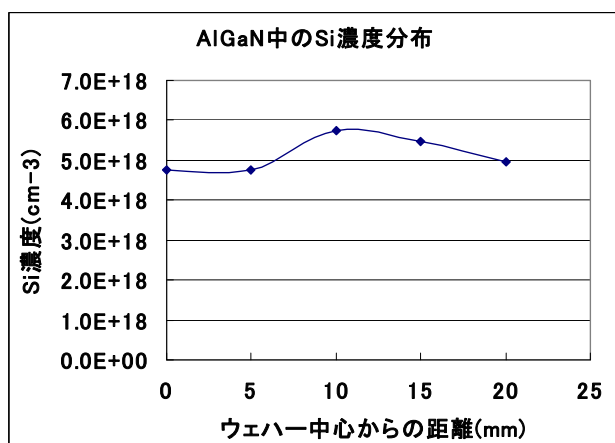


図12. AlGaIn に対する Si ドーピングの均一性

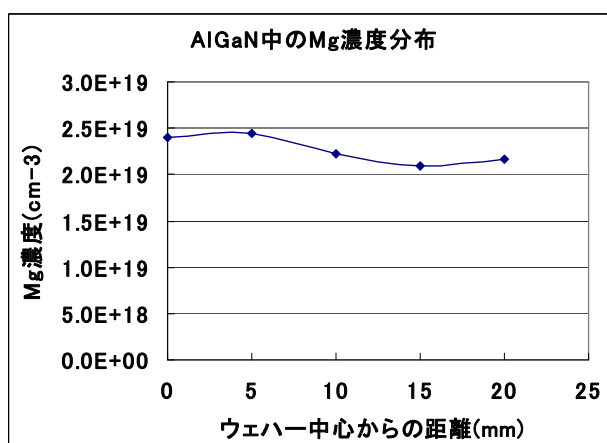


図13. AlGaIn に対する Mg ドーピングの均一性

(e)新規導入炉に関するシミュレーション検討

種々の特徴を備えた新型 MOVPE 装置を設計し、大口径化のために流体シミュレーションを用いて、幅の広い炉で均一にガスを流し、かつ数百ミリ秒の幅の高速バルブスイッチング特性を十分に発揮できるガス導入機構を設計した。また、成長時の温度分布の原因となる基板の厚み方向の温度差を制御できる両面加熱方式を設計し、熱流体シミュレーションを用いて、基板の温度分布とその状態を制御する加熱条件を、実験に先立ち、明らかにした。

<新炉ガス導入機構の設計>

新たに導入した高温 MOVPE 装置では V 族ガスと III 族ガスを数十～数百ミリ秒の短い周期で交互に供給し、高 Al 組成条件で問題となる原料ガスの寄生反応を抑制する高速バルブスイッチングの機構を備え、高 Al 組成で高品質の AlGaIn 層を成長することを計画している。従来、大口径化炉でのガス流れの均一化を目的として、ガス導入機構に整流板構造を採用していたが、これが高速バルブスイッチングの効果にどのような影響を与えるかを原料ガスの拡散を考慮した流体シミュレーションを行い確認した。また、改善点が明らかとなったため、スイッチング特性が良好になる導入機構の構造を設計した。

図14に、3次元非定常計算によるスイッチング時のある瞬間の原料ガスの分布を示す。(a)が従来のガス導入機構、(b)がスイッチング特性を改善するために考案されたガス導入機構の場合の計算結果である。従来の機構では細い供給管から基板の直径以上の幅の範囲に流速がほぼ均一になるように原料ガスの流れを分散するために2段の整流板構造を設けていたが、原料ガスの分布に不均一が生じ、さらに後述するような、スイッチング波形の乱れも生じることが分かった。最適化設計では整流板構造をなくし、薄い流路を流れ方向に徐々に

に広げていくことによって、幅方向のガス流れの均一性を保ちながら原料ガス濃度の分布も均一になる。

図15にスイッチングを行った場合のインジェクター出口での原料ガスモル濃度の時間変化を示す。最適化前の従来構造(青線)の場合、整流板で渦が発生し流れによるガスのミキシングが起こり導入機構出口でのスイッチング波形がだれる。改善設計(赤線)では渦の発生が無いいため、期待通りのスイッチング波形が得られる。

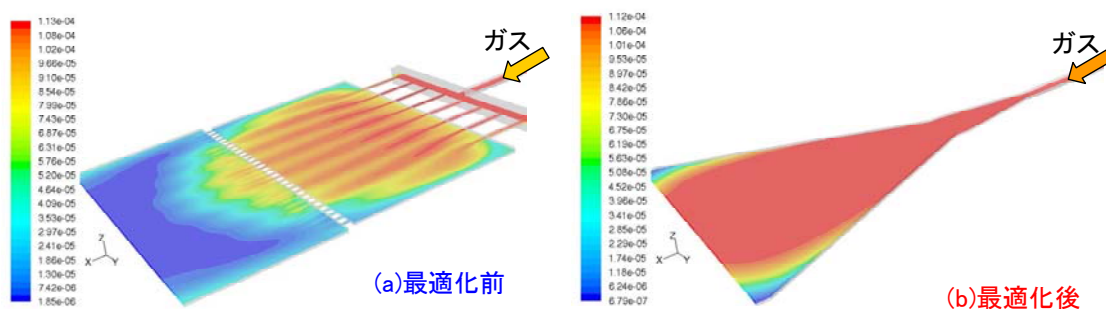


図14. 新炉ガスインジェクター設計シミュレーション

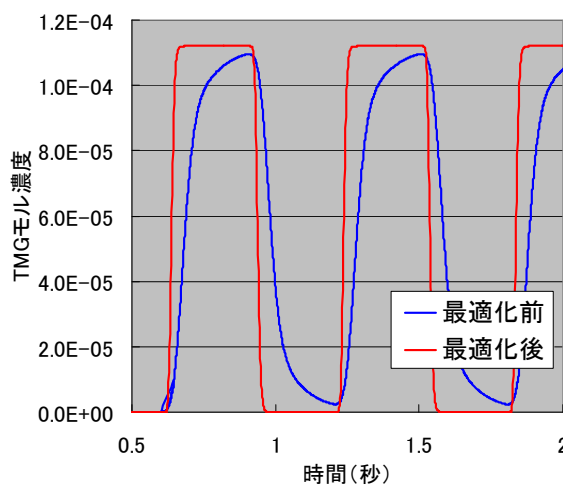


図15. 新炉インジェクター設計による高速ガスバルブスイッチング時の原料ガス波形変化

<新炉ヒーターの効果予測>

基板そりのその場観察モニターを使った成長実験から、成長中基板は載置されているサセプターからの熱で加熱されるため、基板裏面温度が基板表面温度より高くなり、表面と裏面の温度差によるそりが基板に生じる。すると、基板外周部が浮き上がり、中央に比べ温度が低下する。高温 MOVPE 装置では、基板を下側からのみでなく上からも加熱し、基板のそりと温度分布を制御するようにした。熱流体シミュレーションにより、基板厚み方向の温度差がこの方式で制御可能か否かを確認した。

図16左に2次元伝熱解析結果の一例を示す。上下にヒーターを配置し、サセプターおよびフローライナーを加熱した場合の固体部の温度分布を示している。図16右に様々な加熱条件での基板厚み方向の温度分布(基板中央)を示す。AlGaIn エピタキシャル膜の成長条件では、上側ヒーターの設定温度を下側ヒーターのそれより約 100°C 高く設定することにより、基板厚み方向の温度差はごくわずかになり、そりを押さえることが可能であることが分かった。また、さらに上側ヒーターの設定温度を上げることによって、通常と逆の基板のそり状態を起こすことも可能であることが分かった。

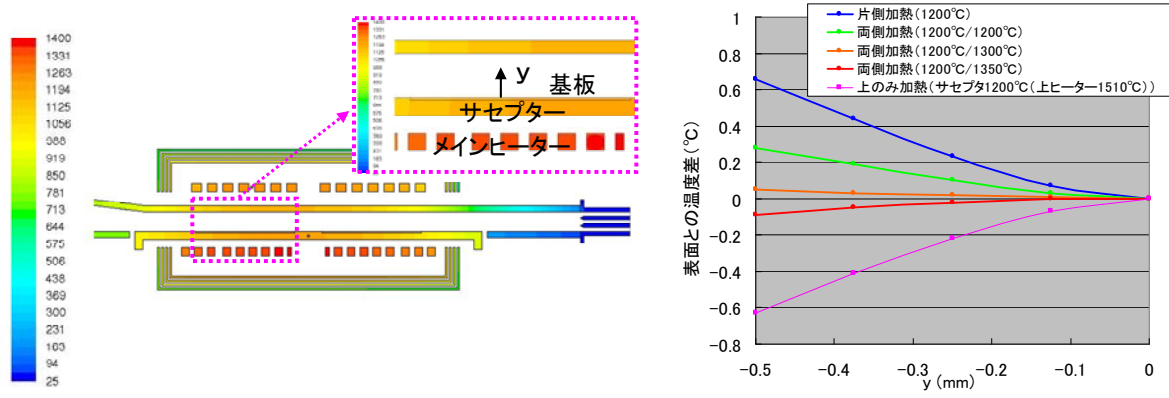


図16. 新炉両面加熱ヒーター伝熱解析

(f)有極性 AlN 基板を用いたエピ開発および有用性の確認

AlN 基板を使用した場合の AlGaIn エピタキシャル層の特性の向上を確認するために、まず、有極性 AlN 基板を用いたエピ成長実験を実施した。有極性 AlN 基板として、(0001) 面(c 面)の Al 面側を用いた。なお、サファイア基板上の AlN テンプレート(以降サファイア基板上)を、有極性 AlN 基板の比較として用いた。

図17に、作製したエピ構造と、結晶性の評価としての X 線回折(X 線ロックアップカーブ(XRC)とその半値幅)を示す。AlN 基板上とサファイア基板上とで、AlGaIn の Al 組成・膜厚はほぼ同じであることを X 線回折(ω -2 θ 測定及び逆格子マッピング測定)により確認している。図17のグラフより明らかなように、結晶性の優れた AlN 基板を用いることで、AlN 層の XRC 半値幅が大幅に低減するだけでなく、AlGaIn 層についても、XRC 半値幅の大幅な低減が確認でき、結晶性の向上に大きな効果があることを確認できた。一方、サファイア基板上では、下地の AlN の結晶性が劣るために、AlGaIn 層の結晶性も、AlN 基板上に比べ劣ることが分かった。

なお、AlN 基板上エピタキシャル成長の問題点として、サファイア基板上と比較して、AlGaIn の Al 組成が 1 割程度低下してしまうということが挙げられる。これに関しては AlN 基板表面の温度がサファイア基板表面よりも数 10°C 下がっていることが原因と考えられ、AlN 基板上にエピタキシャル成長する場合は、ヒータ温度を補正することにより、両者で比較可能なエピタキシャル構造が成長可能となった。

【AlN基板上AlN,AlGaInエピの構造とX線回折】 【AlNテンプレート上AlN,AlGaInエピの構造とX線回折】

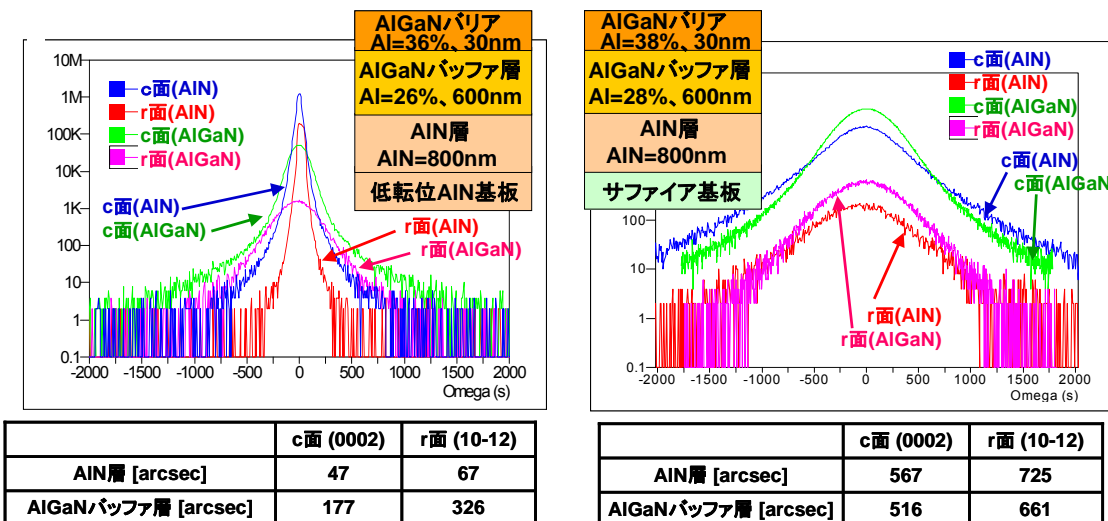


図17. AlN 基板(c 面)およびサファイア基板上の、AlN, AlGaIn エピの構造と X 線回折 (下の表は AlN, AlGaIn 層の c 面及び r 面の X 線ロックアップカーブの半値幅である。)

(g)有極性 AlN 基板と、無極性 AlN 基板との比較

有極性 AlN 基板と、無極性 AlN 基板との比較を行うべく、m 面 AlN 基板と c 面 AlN 基板に、AlN エピタキシャル層を成長後、AlGaIn エピタキシャル層の成長を実施した。X 線回折 ($2\theta-\omega$) より、ピークの角度から、m 面 AlN 基板には m 面の AlN 層および AlGaIn 層が、c 面の AlN 基板には、c 面の AlN 層および AlGaIn 層が成長していることを確認した(図 18)。

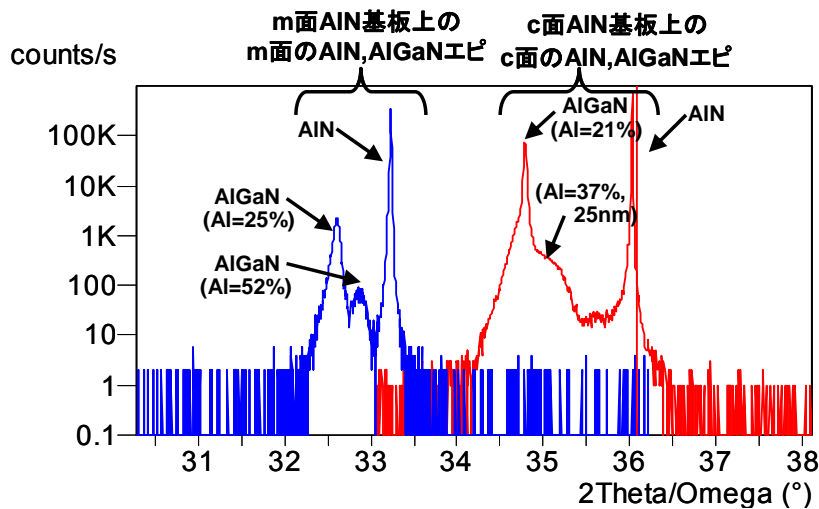
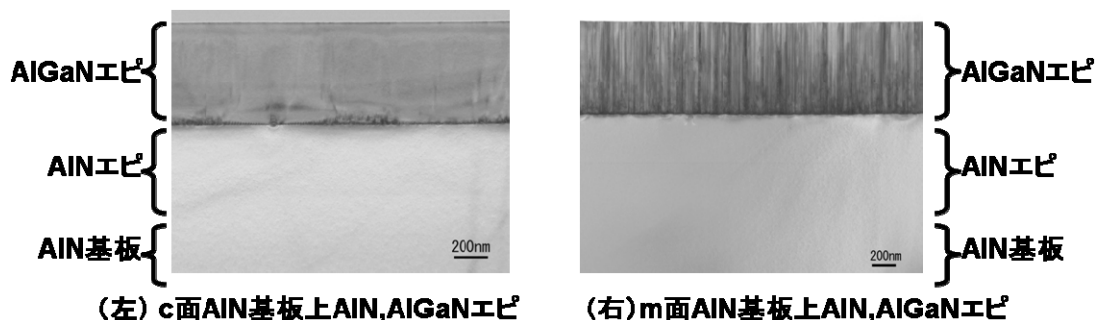


図18. c 面及び m 面 AlN 基板上の、AlN 層、AlGaIn 層の X 線回折 ($2\theta-\omega$ 測定)

また、作製した AlN 層及び AlGaIn 層の結晶性等を評価するために、それらの断面 TEM 観察を実施した結果を図 19 に示す。AlN エピタキシャル層に関しては c 面 AlN 基板上及び m 面 AlN 基板上ともに、低欠陥で良好なホモエピタキシャル成長が実現されている。すなわち、m 面であっても、AlN 基板に対して、格子不整合のないホモエピタキシャル成長の AlN であれば、c 面と同様に良好なエピタキシャル層が成長できることを確認できた。

AlGaIn エピタキシャル層に関しては、c 面 AlN 基板上の場合(図 19 の左図)、刃状転位が発生するものの螺旋転位の発生は見られず、あるいは図 17 の AlGaIn の X 線回折の結果のように良好な AlGaIn 層の成長が容易に可能であることが分かる。

一方 m 面 AlN 基板上の AlGaIn エピの場合、図 19 の右図に示すように、極めて高密度の欠陥が発生しており、m 面 AlN 基板上に AlGaIn を成長する場合は、c 面と異なり、非極性面に適したエピタキシャル成長条件または構造が不可欠であることが分かる。c 面と m 面でこのような大きな違いが現れる要因として、m 面の場合、格子不整合による結晶面のすべり面がパイエルス応力の小さい c 面であることが考えられ、厚膜の AlGaIn エピタキシャル層を成長することにより、AlN の格子不整合による応力が大きくなり、欠陥の入りやすい c 面に多数の欠陥が導入されたと考えられる。故に、格子整合による応力が小さくすべく、さらに Al 組成の高い、膜厚の薄い AlGaIn を成長することでこの多数の欠陥の発生を抑制する計画である。



(左) c 面 AlN 基板上 AlN, AlGaIn エピ (右) m 面 AlN 基板上 AlN, AlGaIn エピ

図 19. c 面 AlN 基板と m 面 AlN 基板上の AlN, AlGaIn エピの断面 TEM 構造

(h)積層構造での評価(AIGaN チャンネル HEMT エピの作製と評価)

前述のように開発した AIGaN エピタキシャル成長技術を用いて、高 Al 組成によるメリットを確認すべく、「研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」グループ(以下デバイス G)にてデバイス評価するために、AIGaN 系電子デバイスとして、通常の GaN チャンネル HEMT (AIGaN/GaN HEMT) に対し、AIGaN をチャンネルに用いた AIGaN/AIGaN HEMT エピタキシャル構造をデバイス G との打合せに基づき作製した。

AIGaN チャンネル HEMT エピタキシャル構造は、図20に示すように Al 組成約 20%~30%の AIGaN をチャンネル層に、Al 組成約 35%~50%の AIGaN をバリア層に用いている。XRD・SIMS・TEM 等から、ほぼ設計どおりのエピタキシャル構造が作製できていることを確認し、図20の右図に示すように C-V 測定から AIGaN バリア層と AIGaN チャンネル層の界面のみに高濃度の 2 次元電子ガスが存在していることを確認した。すなわち、今回開発した AIGaN エピタキシャル成長技術は、AIGaN をチャンネルに用いた AIGaN/AIGaN HEMT エピが作製できる高いレベルであることを確認できた。さらに、AIGaN チャンネル HEMT において、AIGaN バッファ層の結晶性に対するシート抵抗の依存性を調べた結果、図21に示すように AIGaN バッファ層の結晶性の向上に伴い、シート抵抗が大幅に低減し、2 次元電子ガスの特性が向上するという結果が得られた。AIGaN をチャンネルに用いた HEMT において、その特性を向上させるためには AIGaN の結晶性の向上が特に重要であり、これまで示したように AlN 基板が極めて有効であることが分かった。

さらに今回作製した AIGaN チャンネル HEMT エピタキシャル構造をデバイス G に提供し、デバイスの作製を進めた。

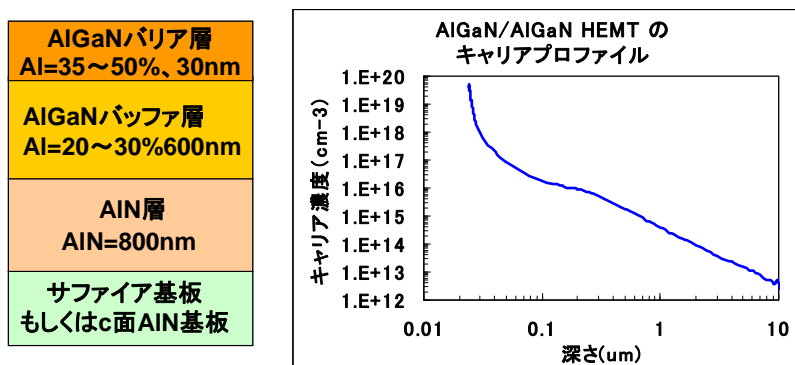


図20. AIGaN チャンネル HEMT エピ構造(左図)と CV 測定から求めた AIGaN チャンネル HEMT エピのキャリアプロファイル(右図)

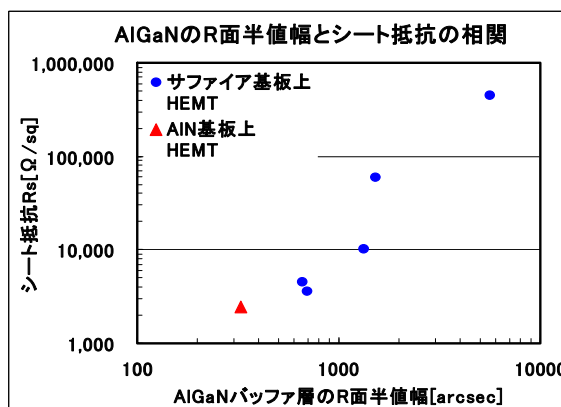


図21. AIGaN チャンネル HEMT エピの結晶性とシート抵抗の相関

②高 Al 組成 AIGaN エピタキシャル層成長用無極性 AlN 基板の開発

高品位 AIGaN エピタキシャル層成長の下地基板としては、格子定数の観点から GaN や AlN といった窒化物単結晶が好適である。特に AlN は高 Al 組成 AIGaN 層と格子定数が最も近く、かつ、その大小関係が AIGaN 層に対して引っ張り応力が入らないような関係にあるために、低欠陥でクラックフリーの高 Al 組成 AIGaN 層を成長させる上で有利であることが予想される。また、AlN は GaN に比べて耐熱性にも勝っており、より高温での

AlGa_N 層成長を検討し易いという利点もある。AlN 基板は品質面から上記のような利点があり、高 Al 組成 AlGa_N エピタキシャル層成長の開発を促進できると考えられる。今回、この検討をノーマリーオフ動作に有効な無極性面を中心に進めており、その成果について以下に述べる。

(a)成長方法

大電力素子に適用可能な高 Al 組成 AlGa_N エピタキシャル層成長用基板として、低欠陥で無極性面を有する高抵抗な AlN 基板を開発する。その方策としては、

- ①無極性面を有する基板上での成長する方法。
- ②一般的な c 面(有極性面)成長を長尺化後、無極性面を切り出す方法。

の2通りが考えられる(図22)。前者は高品質化(低転位化)に、後者は大口径化に有利なもの期待される。今回の検討では、将来の実用化を見通し、比較的大面積で高速成長が可能な昇華法を用いて、上記2通りの方法による検討を行なった。

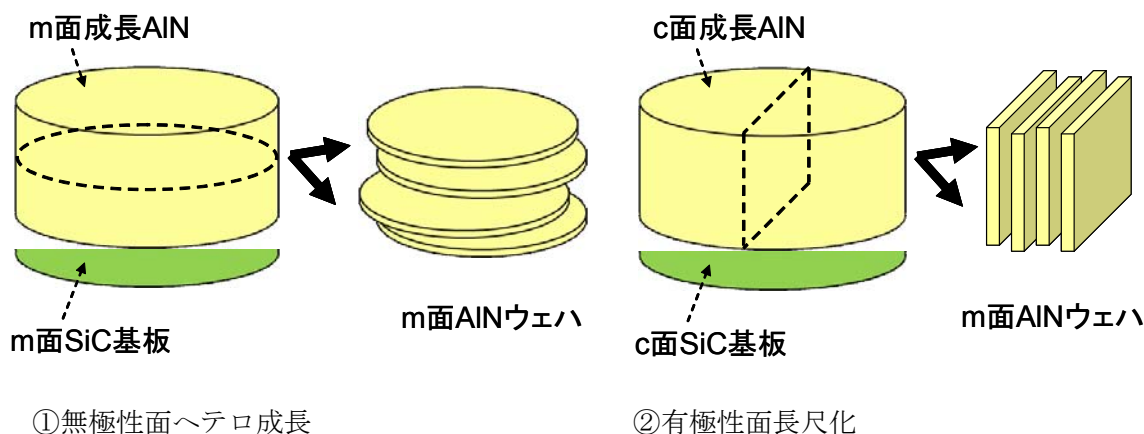


図 2 2 無極性面 (m面) AlN 基板の製法

(b) 成長方法比較の基礎検討

(b-1)無極性面 SiC 基板上への昇華法 AlN 成長

無極性面である(10-10)面 SiC 基板上に AlN を昇華法により成長させた。成長表面は 4 回対称状のモフォロジーを有し(図23)、X 線回折により評価したところ、無極性面(10-10)の AlN 単結晶が成長していることが確認された(図24)。

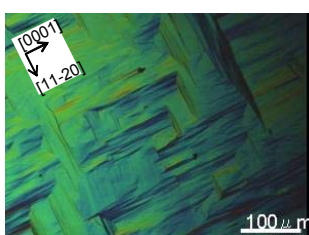


図 2 3 . AlN 成長表面写真

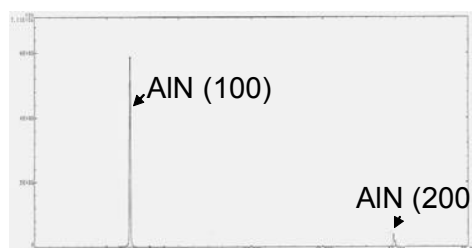


図 2 4 . X 線回折 (θ-2θ) による評価結果

(b-2) 有極性面 AlN 単結晶の長尺化と無極性面の切り出し

有極性面である(0001)面 SiC 基板の上に AlN を昇華法により成長させ、無極性面である(10-10)面を主面とする基板を切り出した。得られた結晶は約 4 mm×6 mm の無極性面単結晶であった(図25)。結晶の表面を研磨し、AFM により評価した結果、表面粗さの指標である RMS が 0.51 nm であり、エピ成長用基板として適用可能なレベルであることを確認できた(図26)。

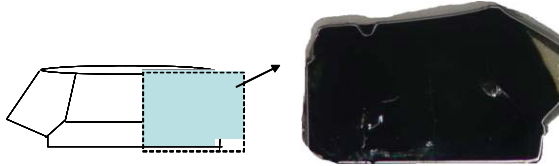


図 25. 長尺結晶から切り出した無極性面結晶

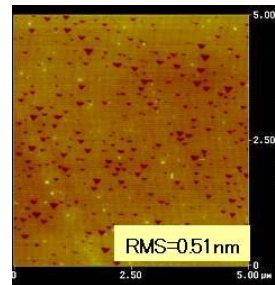


図 26. 研磨表面の AFM 像

(c) 無極性面上成長における転位挙動の評価

(10-10)面および(0001)面の SiC 基板の上に AlN を成長させた際の転位挙動を、TEM 観察により評価した。断面 TEM の観察結果を図27に示す。(10-10)面上の成長では、AlN/SiC 界面から転位または面欠陥が成長表面に向かって進展している。TEM 観察角度を僅かに傾斜させて観察すると(図27b 挿入図)、フリンジが発生することから、観察されている欠陥は積層欠陥であると推定される。転位密度の低減には、転位伝播方向の制御技術開発が必要と考えられる。一方、(0001)面上の成長では、転位は界面に局在し、成長表面近傍では転位等欠陥が極めて少ない領域が得られていることが分かった。これらの様子は図28の平面 TEM 観察の結果からも伺える。以上より、(0001)面上に長尺結晶を成長して無極性面単結晶を切り出すことで、高品質な基板を得ることができるものと期待される。

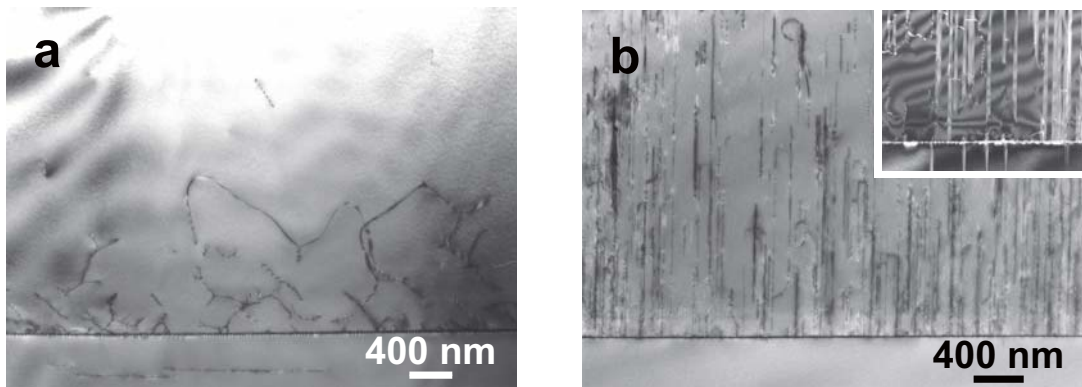


図 27. AlN 単結晶の断面 TEM 観察像: (a) SiC (0001)面上, (b) SiC (10-10)面上

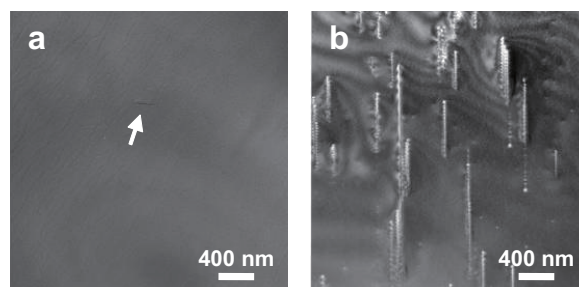


図 28. AlN 単結晶の平面 TEM 観察像: (a) SiC (0001)面上, (b) SiC (10-10)面上

(d)クラック挙動の評価

一方、光学顕微鏡により SiC(0001)面上および SiC(10-10)面上の AlN 成長表面を詳細に観察したところ(図29), 双方の間でクラック間距離(密度)に差異がみられることが分かった。そこで, クラック間距離を AlN 成長厚さのパラメータとしてプロットしたところ, 図30のように, (10-10)面 SiC 上の方が, (0001)面 SiC 基板上と比較して約 1 桁クラック間距離が大きい値となっていることがわかった。これは, 表1に示すように, SiC と AlN の熱膨張係数の比が, c軸方向とm(a)軸方向において異なっていることが要因のひとつと考えられる。

以上の結果より, 無極性面上へテロ成長においては, 積層欠陥発生課題はあるものの, 熱膨張差によるクラックについては有極性面上と比較して有利であると思われる。引き続き, 有極性面上と並行して無極性面上へテロ成長の検討も継続する。

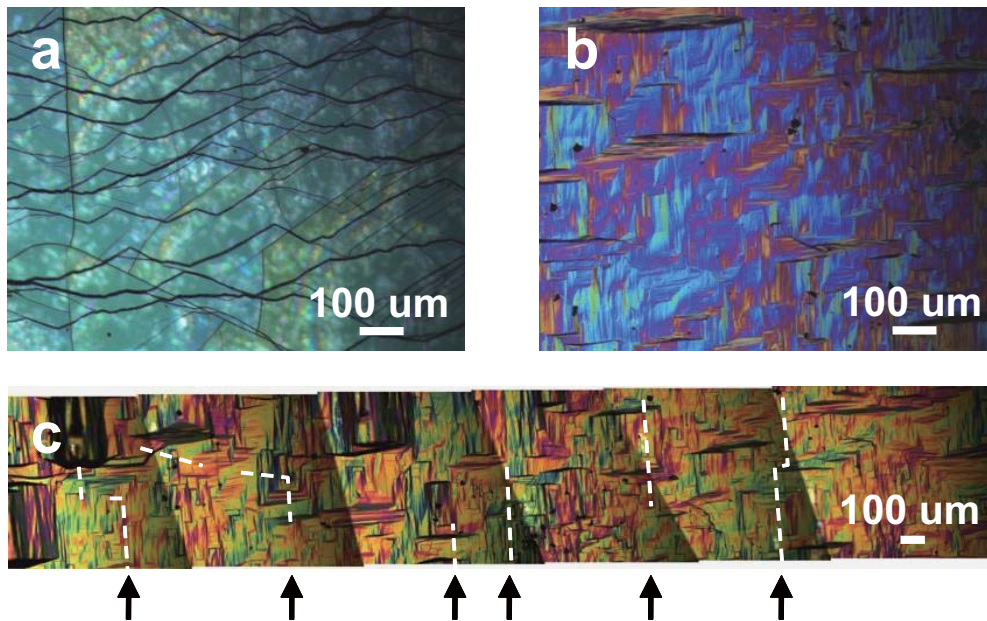


図29 光学顕微鏡観察像: (a)c面上, (b)m面上, (c)m面上広域.

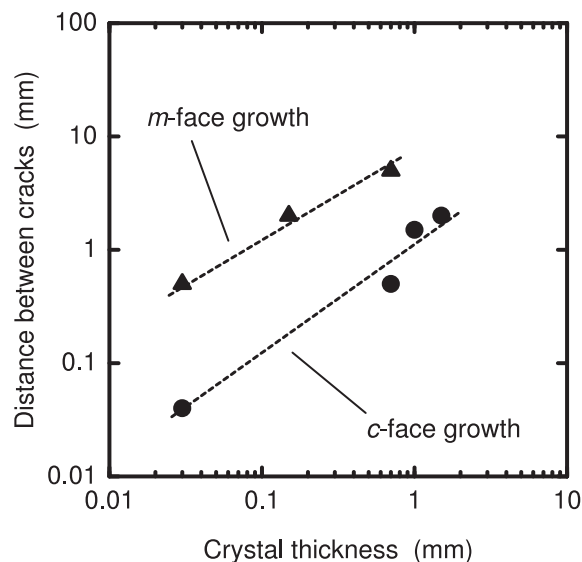


図30. クラック間距離の結晶厚さ依存性.

表1. AlNとSiCの熱膨張係数.

	($\times 10^6 / \text{K}$)		
軸	AlN	SiC	差の率 (%)
<i>c</i>	4.96	4.75	4.23
<i>a(m)</i>	5.91	4.85	17.9

(e) 転位密度低減への取組

窒化アルミニウム(AlN)は広いバンドギャップ($\sim 6.2 \text{ eV}$)を有し、熱伝導性にも優れることから、紫外発光素子や高出力電子デバイス等、窒化物系半導体素子用の基板として期待されている。AlN 単結晶の成長には、下地に異種材料基板を用いる方法が大面積化において有利であるが、格子不整合や下地からの引き継ぎによる多数の転位・欠陥が存在し、有極性面だけでなく非極性面結晶作製の際にも問題となる可能性がある。そこで AlN 単結晶の長尺成長および転位挙動の観察・評価をおこなった。

SiC(0001)面上に AlN 単結晶を昇華法により成長させた。1.4 mm 厚 AlN 単結晶の成長表面を研磨し、溶融アルカリエッチング法により転位密度評価を実施したところ、as grown 表面および平面 TEM 観察と同等の値 ($1.1 \times 10^6 / \text{cm}^2$) が得られることを確認した。次に、AlN 単結晶を 10 mm 厚に達するまで成長させ、その後、成長結晶のスライス・研磨を実施した。転位密度の結晶厚さ依存性についてプロットしたところ(図31)、転位密度は成長結晶の長尺化に伴って減少することが分かった。10 mm 厚における転位密度は $5 \times 10^4 / \text{cm}^2$ であり、長尺成長により高品質 AlN 単結晶が得られることを示した。

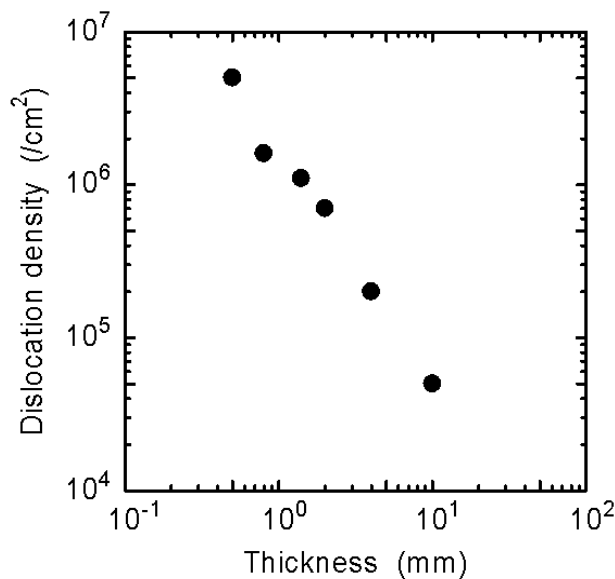


図31. AlN 単結晶における転位密度の結晶厚さ依存性

(f) 「無極性面 AlN 基板開発装置」の導入

無極性 AlN 基板の成長基礎検討のために、無極性面 AlN 基板開発装置を設計、導入した。これまでの検討から、SiC(0001)面上の長尺成長により低転位の無極性面 AlN 結晶が得られることが確認されたので、長尺成長の際に問題となる成長雰囲気の高純度化・長時間安定化、温度分布最適化による高速成長を図るべく、炉内構造を実験的に検討・導入した(図32)。これまでに、1 インチφ、2.1mmt までの一回成長に成功しており、今後、シミュレーション技術を活用しながら、炉内温度分布のさらなる最適化を行い、無極性面 AlN 結晶の低転位化、エピタキシャル層成長実験への提供を進める。



図 3 2. 無極性面 AIN 基板開発装置.

(g) AlGaIn エピタキシャル層成長実験への提供

上記のようにして得られた AIN 結晶(～1 インチφ、～10mmt)から、有極性面、無極性面の AIN 基板を切り出し、高品位 AlGaIn エピタキシャル層成長用として提供を開始した。エピ膜成長用の基板は、表面の平坦性はもとより、平坦化加工の際に導入される加工変質層が表面に残留していると、良好なエピタキシャル層の成長実現が望めない。平坦性を維持したまま加工変質層を除去するために、CMP やドライエッチング工程を導入した。その結果、AlGaIn エピタキシャル層成長において平坦なステップフロー成長が実現し、良好なエピ膜が形成できる表面であることを確認した。

(h)まとめ

高品位 AlGaIn エピタキシャル層成長用の下地基板として、無極性面 AIN 基板の開発を進めている。

- ①有極性面の長尺化と無極性面のヘテロ成長を比較し、有極性面の長尺化が高品質化に有利であることを確認した。
- ②有極性面の長尺化においては、10mmt までの長尺化に成功し、転位密度として $5 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$ と目標を上回る成果を得た。
- ③安定した長尺成長を狙い、「無極性面 AIN 基板開発装置」を導入、立上げた。
- ④高品位表面仕上げ技術を適用し、AlGaIn エピタキシャル成長実験用の基板提供を開始した。

これらの成果は、結晶成長国内会議(NCCG-38, 08 年秋季), 応用物理学会(09 年春季), 窒化物国際会議(ISGN-2, 2008), にて参加・発表し、最新の窒化物バルク結晶成長技術の研究開発状況について情報収集を行い、適宜開発計画の修正に役立てた。また、国際ナノテクノロジー総合展「nano tech 2009」にて作製した AIN 単結晶基板を展示した。

(4) 結晶成長その場観察評価技術

既存の MOVPE 炉に設置中の光弾性測定装置を用いてc面サファイア基板上 HFET 構造成長時の反りのその場観察を行った。結果の一例を図1に示す。構造はバッファ(25nm)/アンドープ GaN(2 μ m)/アンドープ Al_{0.25}Ga_{0.75}N(25nm)である。基板回転はベルトドライブを用いており、ワブリングなどの発生が懸念されたが、ノイズは十分低い。GaN 上の AlGaN 成長では引っ張り応力が観測されており、コヒーレント成長していることが分かる。詳細に分析すると、干渉測定では困難な膜厚の評価が可能であることが分かった。一方、反りはヘテロ成長における歪による応力のみならず、炉内圧力やガス流量など、ウェハ表裏での温度分布差により大きく影響を受けることが確認され、成長条件の安定性が重要であることが分かった。

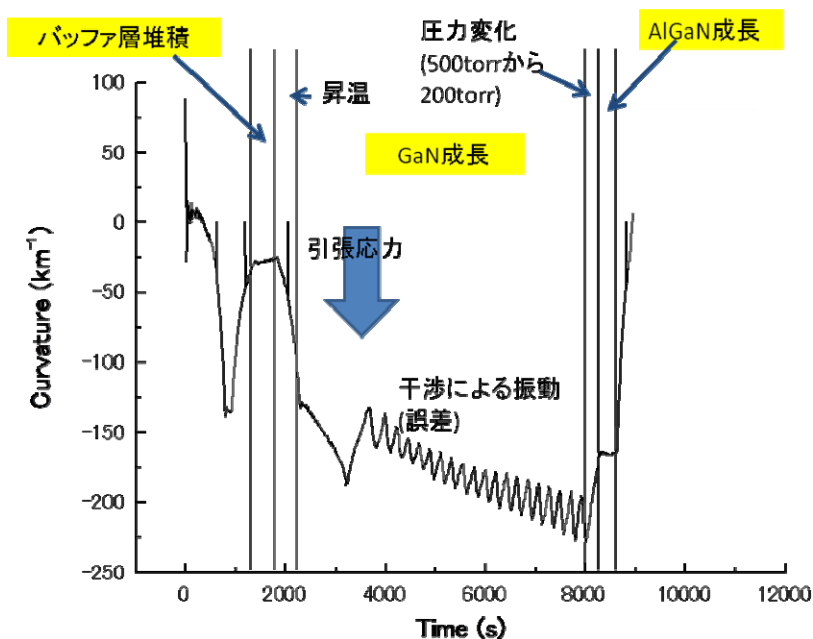


図1 既存炉でのウェハ反りその場観察の一例。c 面サファイア基板上への HFET 構造の成長の場合。

既存の反り測定装置では、c面のような等方的面方位上でのみ適用可能であり、a 面やm面のような面内異方性のある無極性面上では正確な反り測定ができない。そこで、く二次元ウェハ形状その場観察法を考案した。本手法により、従来報告例が皆無のウェハ形状その場観察が可能になった。図2には、c 面サファイア基板上の GaN のウェハ形状その場観察結果を示す。

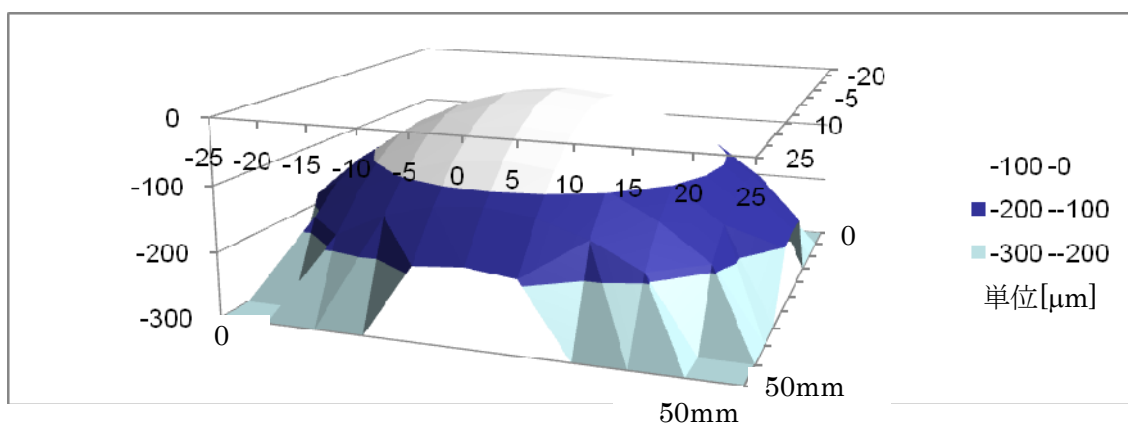


図2 c 面サファイア基板上の GaN の二次元ウェハ形状その場観察結果の例

成果発表内訳

特許、論文等については、下記の通り年度毎の件数の内訳表を記載する。また、巻末の添付資料に詳細内容についてのリストを記載する。

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※ 出願	査読付き	その他	
H19FY	3件	0件	0件	0件	0件	0件
H20FY	6件	5件	1件	0件	0件	6件
H21FY	5件	0件	0件	2件	0件	0件

III-2-3 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価

研究は、順調に進捗しており、平成21年度中間目標を達成見込みである。表1 に、目標に対して得られた成果、達成度、及び今後の課題を示す。

具体的には、窒化物単結晶基板上 FET と他種基板上 FET の特性の差違、及びその利害得失の明確化の目標については、有極性 GaN 基板上に AlGaIn/GaN ヘテロ接合 FET を試作し、Si 基板上の同構造に比べて20%以上高いドレイン電流密度を確認し、結果を課題①、②にフィードバックした。また、基板/エピ層の品質とデバイス特性との関係の明確化と課題①、②へのフィードバックの目標については、GaN 基板上の縦型pnダイオードにおいて耐圧特性を統計的に測定し、GaN 基板上ダイオードの優位性を確認し、課題①、②にフィードバックした。

表 1 目標に対して得られた成果、達成度、及び今後の課題

研究項目	最終目標	中間目標	成果		今後の課題 (対最終目標)
			達成値など	達成度	
③窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価	・有極性単結晶基板上FETと無極性単結晶基板上FETの特性の差違、及びその利害得失の明確化	・窒化物単結晶基板上FETと他種基板上FETの特性の差違、及びその利害得失の明確化	・GaN基板上FETにて高ドレイン電流を確認	○	・無極性基板上のデバイス試作の加速
	・広い混晶組成範囲における耐圧と結晶欠陥の相関の明確化と課題①、②へのフィードバック	・基板/エピ層の品質とデバイス特性との関係の明確化と課題①、②へのフィードバック	縦型ダイオードにて基板/エピ界面の品質と耐圧特性との相関を確認	◎	・基板/エピ層の品質向上による耐圧向上の確認と考察

(1)横型電子デバイスの評価

・本研究テーマでは、横型電子デバイスにおいて、無極性構造、有極性構造、及び異種基板上窒化物半導体エピ構造との比較を含めて、窒化物半導体基板/エピ材料・構造・品質の差異がデバイス特性に及ぼす影響を正確に評価し、デバイス動作に有効な基板品質およびエピ品質を明らかにするとともに、その結果を基板・エピ開発グループにフィードバックすることを目的としている。

<平成 19 年度>

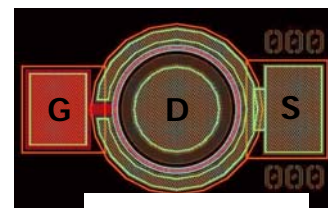
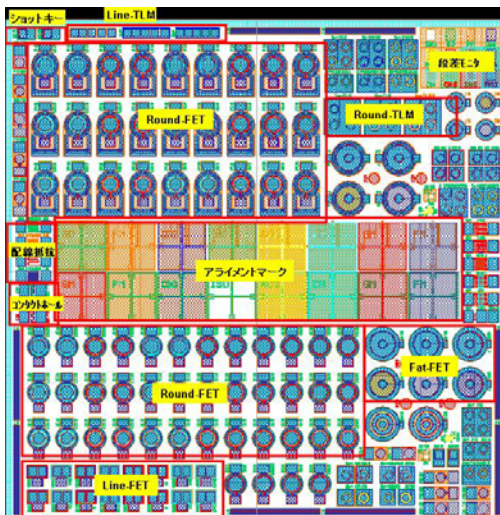
平成 19 年度は、有極性、及び無極性窒化物半導体エピ構造での横型電子デバイスを作製・評価していくための、①FET 及び TEG パターン設計(マスク設計)、②FET のプロセス検討(試作への適用)を実施した。

①FET 及び TEG パターン設計(マスク設計)

・トランジスタ/TEG パターンを標準化し、エピ材料・構造・品質とトランジスタ特性との相関関係について、プロセス要因を極力排除して評価していくためのマスクパターン(コンタクトアライナー用)を設計・作製した。表1-1 にマスク搭載主要パターンリスト、図1-1に作成したマスク1ショットの全体レイアウトを示す。1ショットのサイズは 5mm 角であり、アイソレーション、オーミックメタル、ゲートメタル、コンタクトホール、メタル配線の5層を準備した。

	パターン名	評価項目
FET	fat-FET	チャネル移動度 vs シートキャリア濃度
		I-V 特性, C-V 特性
		深さ方向のキャリア濃度分布
	Round-FET Linear-FET	耐圧, オン抵抗 ゲート/ドレインリーク電流 閾値電圧, サブスレショルド特性
FET 以外	Round-TLM Linear-TLM	コンタクト抵抗, シート抵抗 (ピッチ:2,4,6,8um 等)
	メタル抵抗評価	電極, 配線メタルの抵抗
	ショットキー	ショットキーダイオード特性,
	その他	基板ブレイクダウン評価 アイソレーションチェック 断面 SEM 観察用パターン 段差評価パターン,他

表1-1 マスク搭載主要パターンリスト



Round-FET

図1-1 マスク全体レイアウト

②FET のプロセス検討(試作への適用)

・横型電子デバイスの試作・評価は主として福井大学で保有/導入する装置を用いて行うため、福井大学と共同でオーミック/ショットキーメタル形成、露光条件等のプロセス条件検討を行い、これらのプロセス条件を適用して、上記マスクを用いた異種基板上窒化物半導体エピ基板でのFET、TEGの試作を実施し、FET動作を確認した。これにより、平成20年度以降に本格化する有極性/無極性窒化物半導体基板を用いた横型電子デバイスの試作・評価・フィードバックの一連の流れに対応する試作環境を構築することができた。

<平成20年度以降>

①オーミック電極形成プロセスの検討

窒化物系化合物半導体基板及びエピタキシャル成長膜に関し、その材料・構造・品質と横型電子デバイス(FET)特性との相関関係をプロセス要因を極力排除して評価していくためには、平成19年度に行ったマスク設計、試作環境構築に加え、プロセスの安定性・再現性も重要である。特に、一般に高温の熱処理工程が必要となるオーミック電極形成に関し、各種エピ基板に対して低抵抗で安定的に形成できることがプロセス要因を排除した評価を行う上で重要であり、オーミック電極材料、熱処理条件等の検討を行った。

オーミック電極材料として、Ti/Al/Mo/Au、V/Al/Mo/Au、Hf/Al/Mo/Au、Zr/Al/Mo/Au、Cr/Al/Mo/Auを検討した。電極材料の膜厚は、下層から15nm、60nm、35nm、50nmとし、EB蒸着装置で成膜を行った。オーミック電極を形成した半導体層はAlGaIn/GaN HEMT構造であり、AlGaIn層のAl混晶比は0.25、膜厚は25nmである。オーミックメタル蒸着後、RTA装置を用いて、N₂雰囲気中で600°Cから950°Cまで、温度条件を変えてアニール(アロイ化)を行った後に接触抵抗を測定した。アニール時間は30秒である。各種オーミック電極に対する接触抵抗のアニール温度依存性を図1-2に示すが、V/Al/Mo/Auオーミック電極で接触抵抗0.48Ωmm(アニール温度650°C)、Ti/Al/Mo/Auオーミック電極で0.52Ωmm(アニール温度800°C)と良好な特性が達成されている。

アニール温度が高いと、オーミック電極金属の凝集やアロイ層の不均一拡散などによってプロセス起因の特性ばらつきが生じることが懸念されるため、600°C-650°Cという低温アニールで良好なオーミック特性が得られるV系オーミックは横型電子デバイスの評価を行う上で好適である。

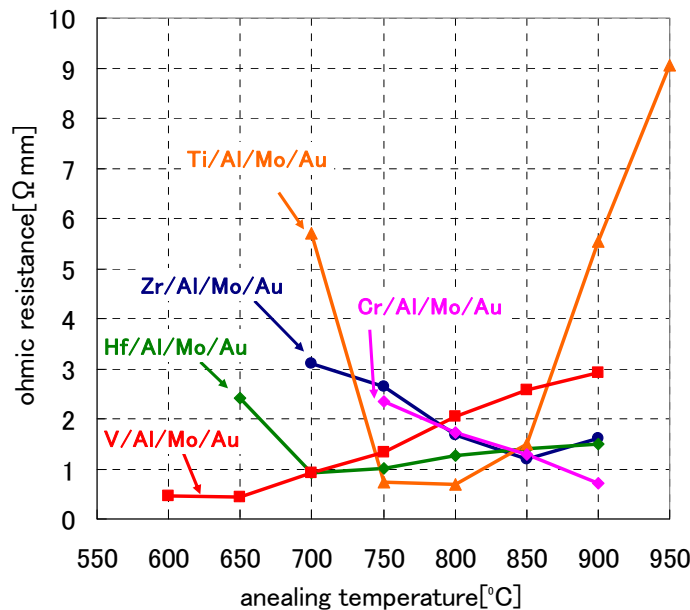


図 1-2 オーミック接触抵抗のアニール温度依存性

図 1-3 は、V/Al/Mo/Au オーミック電極を採用して試作したFETと、Ti/Al/Mo/Au オーミック電極を採用して試作したFETのドレイン耐圧を測定した結果である。エピ層はAl_{0.21}Ga_{0.79}N(30nm)/GaIn(1μm)構造、下地基板はSiであり、FETの各電極間隔は、L_{sg}=3μm、L_g=3μm、L_{gd}=5μmである。V/Al/Mo/Au オーミック電極を採用したFETの方が、Ti/Al/Mo/Au オーミック電極を採用したFETよりも約50%耐圧が高い結果となった。

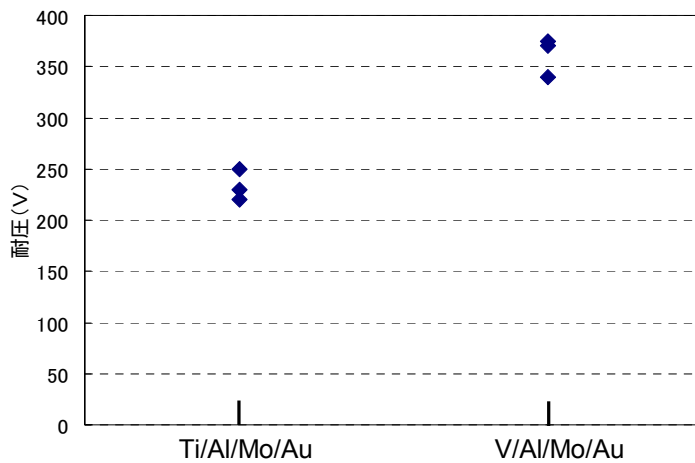


図 1-3 オーミック電極材料による FET 耐圧の違い

図 1-4 は、Ti/Al/Mo/Au と V/Al/Mo/Au オーミック電極のアニール後の断面 TEM 観測写真である。Ti/Al/Mo/Au オーミック電極では、Ti がスパイク状に半導体層に不均一に侵入しているのに対し、V/Al/Mo/Au オーミック電極の金属/半導体界面は良好な平坦性を保っており、均一なオーミック接触が得られていることを示唆している。スパイク状の金属拡散部には電界集中が生じる可能性があり、それが図 1-3 に示されるようなオーミック電極材料による耐圧の違いに現れているとも考えられる。オーミック電極の材料/形状と FET の特性の相関については今後も継続して検討を行う。

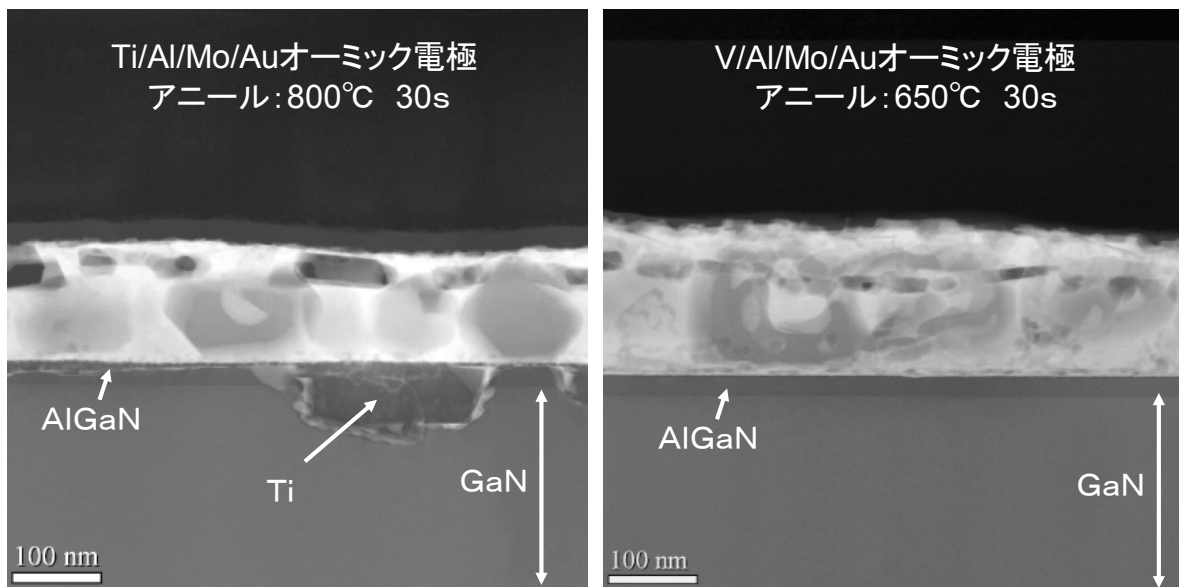


図 1-4 オーミック接触界面の断面 TEM 観察写真

②横型電子デバイスの試作・評価・フィードバック

②-1 有極性 GaN 基板上横型電子デバイスの評価

平成 19 年度に設計・作成した FET 及び TEG マスクおよび改善したオーミック電極形成プロセスを用いて、本プロジェクト内製の有極性 AlGaIn/GaN エピ基板を用いた横型 FET (HEMT) の試作、参照として異種 (Si) 基板上 AlGaIn/GaN FET (HEMT) の試作を行い、それらを共通の条件で評価した。(図 1-6: 試作ウエハ上の FET 写真)

その結果、本プロジェクト内製の有極性 AlGaIn/GaN エピ基板を用いた横型 HEMT において、参照試作した異種 (Si) 基板上 AlGaIn/GaN HEMT を上回る最大ドレイン電流 510mA/mm の特性を確認した。(図 1-5: 本プロジェクト内製の有極性 AlGaIn/GaN エピ基板を用いた横型 FET, 及び参照試作した異種 (Si) 基板上 AlGaIn/GaN FET の電流-電圧特性実測値) 有極性 AlGaIn/GaN エピ基板を用いた横型 HEMT 形状は Round-FET であり、 $L_{gs}=2\mu m$, $L_g=3\mu m$, $L_{gd}=5\mu m$, $W_g=515\mu m$, また AlGaIn の Al 組成比は 0.27 である。

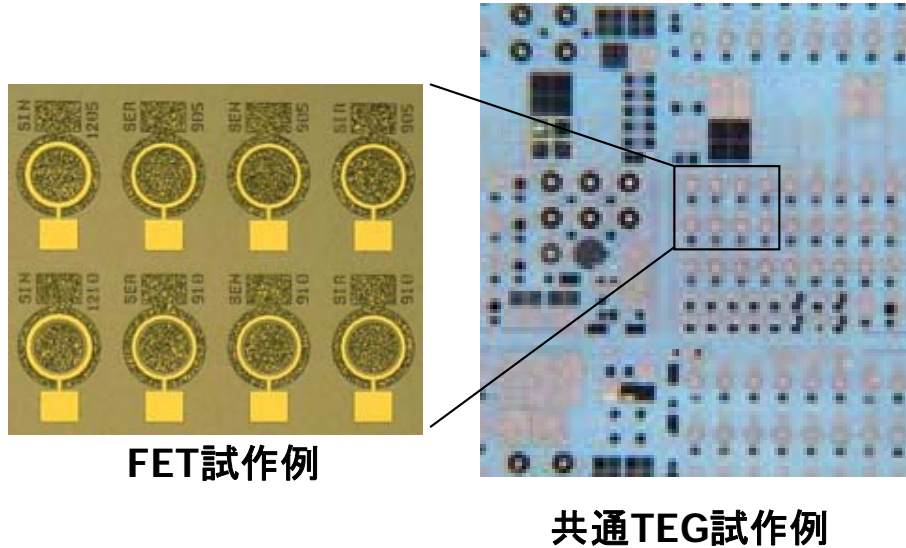


図 1-5 試作ウエハ上の FET,TEG 写真

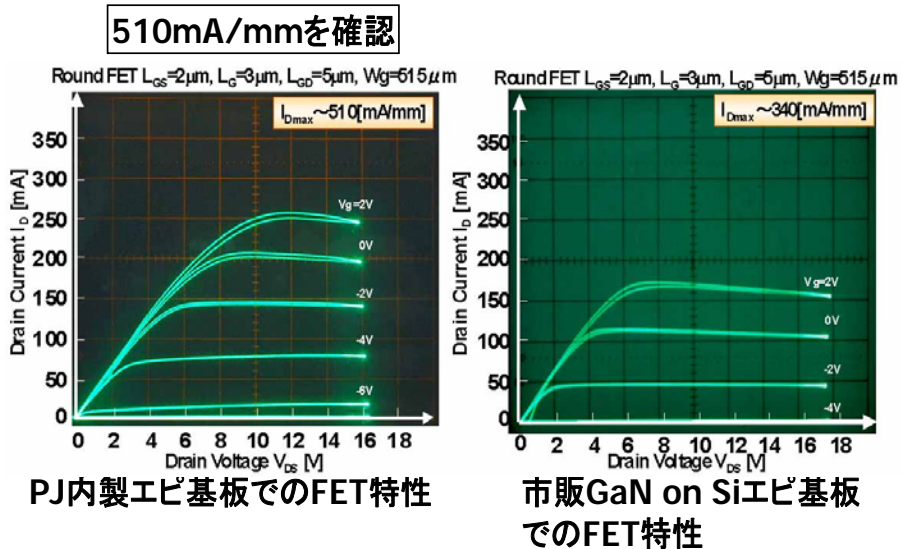


図 1-6 試作した FET の電流-電圧特性

図 1-7 に、試作したプロジェクト内製有極性 GaN 基板上 AlGaIn/GaN HEMT のリーク電流特性を示す。ソース・ゲート電極間隔 L_{sg} 、ゲート長 L_g 、ゲート・ドレイン間隔 L_{gd} はそれぞれ $3, 9, 5 \mu\text{m}$ である。

$100 \mu\text{A}/\text{mm}$ 程度のドレインリーク電流があるが、参照試作の Si 基板上 AlGaIn/GaN HEMT に比べると 2 桁程度高く、リーク電流についてはエピ基板の結晶品質に起因していると考えられる。デバイスレベルでのこれらの評価結果を基板・エピ技術開発へフィードバックしていくことにより、改善を図っていく。

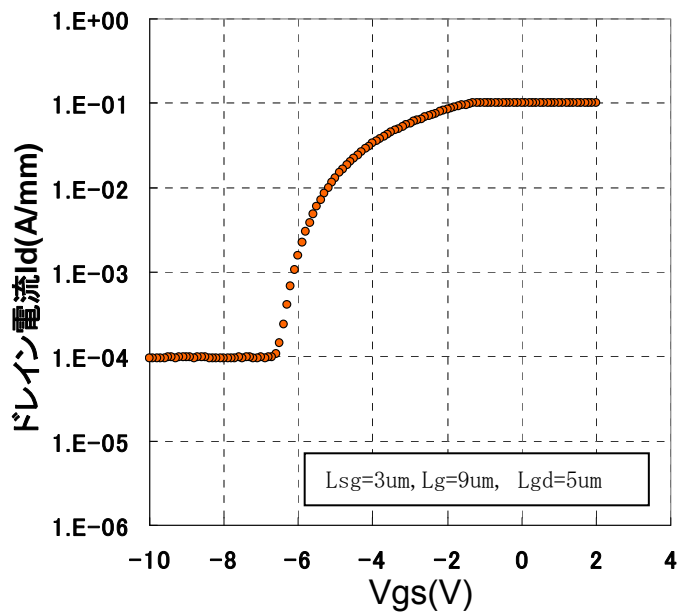


図 1-7 有極性 GaN 基板上 AlGaIn/GaN HEMT のドレインリーク電流

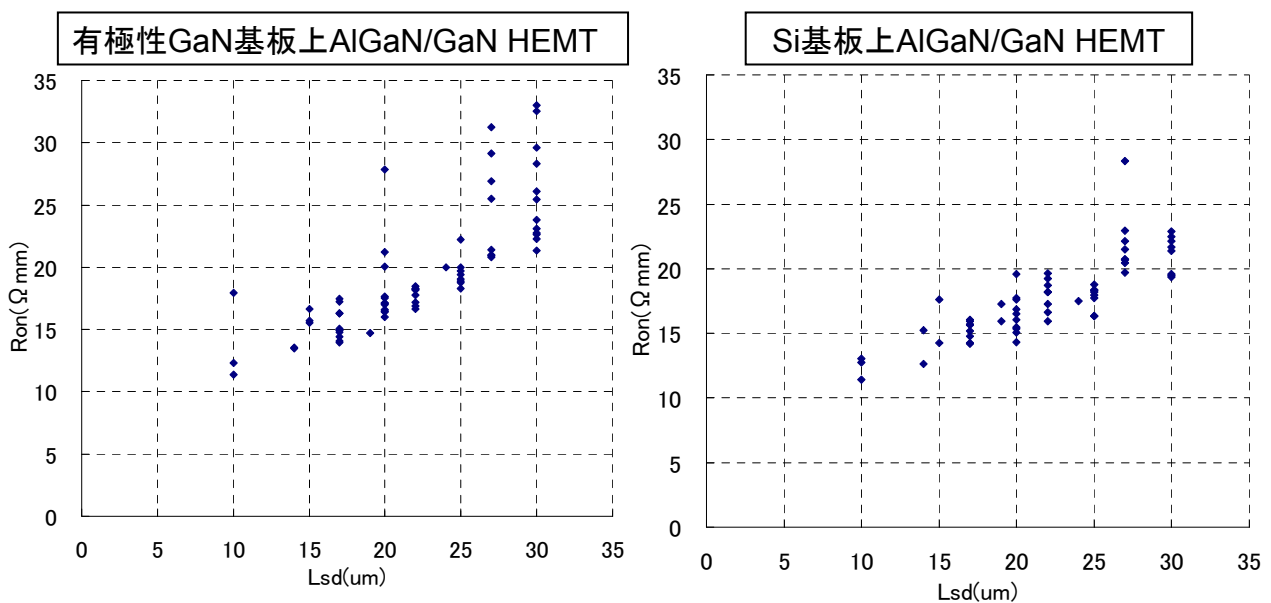


図 1-8 試作した FET のオン抵抗-Lsd 依存性

図 1-8 は、単位ゲート幅あたりのオン抵抗 $R_{on} (\Omega\text{mm})$ をソース・ドレイン電極間隔 $L_{sd} (\mu\text{m})$ の異なる HEMT について測定した結果である。各 L_{sd} について、ウエハ上で複数の HEMT に対する R_{on} の測定値がプロットされている。 L_{sd} の異なる HEMT は同一マスク中にパターン化され、同一ウエハ上に作成されている。特性ばらつき(ウエハ上での面内分布)はまだ大きいですが、各 L_{sd} で R_{on} が低いサンプル同士で比較するとプロジェクト内製の有極性 GaN 基板上 AlGaIn/GaN HEMT は異種基板(Si 基板)上 AlGaIn/GaN HEMT と同等の R_{on} が得られていることがわかる。

オン抵抗以外の特性についても、図 1-9(A)(B)に示すように、試作ウエハごとに各種測定データのウエハ上での面内マップや、特性のばらつき分布などの分析を行い、基板・エピ技術開発へのフィードバックを逐次行っている。



図 1-9(A) 試作ごとの評価データ分析例(マップ)

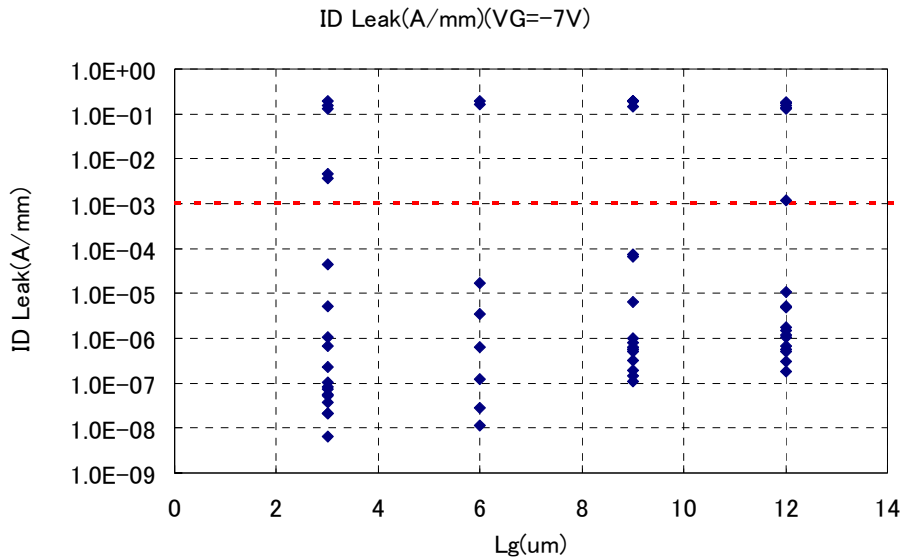


図 1-9(B) 試作ごとの評価データ分析例
(特性バラツキ分布)

図 1-10 に市販の2インチ有極性 GaN 基板(n 形)の上に AlGaIn/GaN ヘテロ接合を MOCVD 成長し、この2インチエピ基板全面に HEMT-TEG を試作したものの表面写真を示す。表面保護膜は使用していない。2インチ基板上に 60 個以上の同一パターンのレチクルが形成されていることが分かる。図 1-11 に円形 HEMT-TEG(ゲート幅:515 μm , ゲート長:3 μm)を用いて評価したしきい値電圧の面内分布を示す。全 64 素子について、しきい値

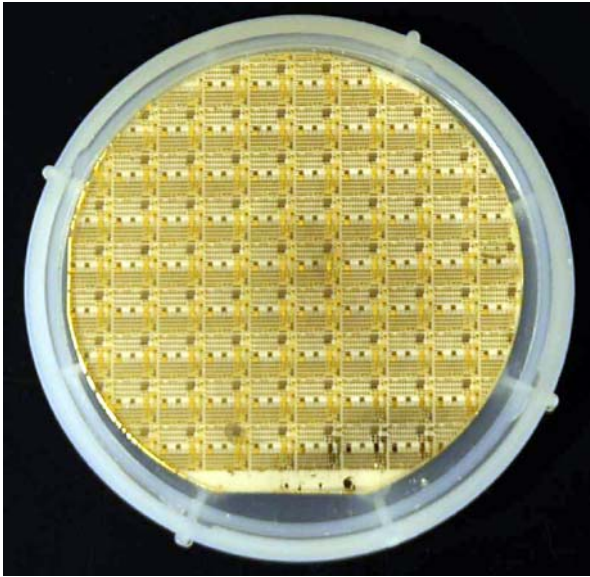


図 1-10 2インチ有極性 GaN 基板上 HEMT-TEG の表面写真

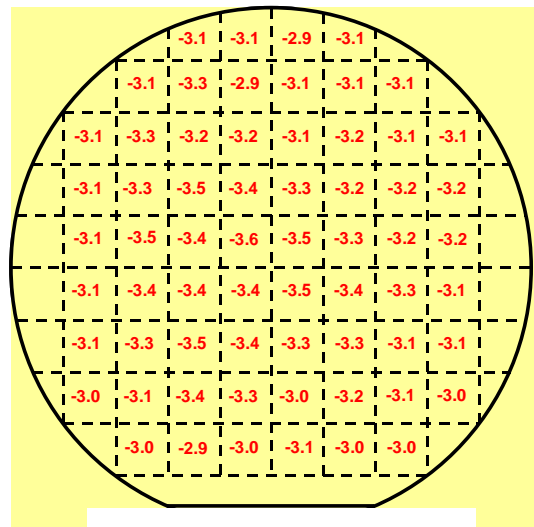


図 1-11 しきい値電圧の面内分布(単位:V)

圧の平均値と分散はそれぞれ-3.20V, 167mV であった。図 1-12(A),(B)にドレイン電流電圧特性とドレイン耐圧(3端子耐圧)波形の一例をそれぞれ示す。 $V_G=1V$ にて評価した最大ドレイン電流密度は 250mA/mm であり、 $-1\text{mA}/\text{mm}$ で定義したドレイン耐圧は 350V 以上と良好であった。今回のエピでは、エピ-基板界面の結晶成長条件を改善した結果、ドレイン耐圧が飛躍的に向上した。エピ条件とドレイン耐圧の関係については、この結果をエピグループにフィードバックした。ドレイン電流については、今後の試作において、表面保護膜の採用、およびオーミック電極上に Au パッド電極を追加することでさらに改善されるものと考えられる。

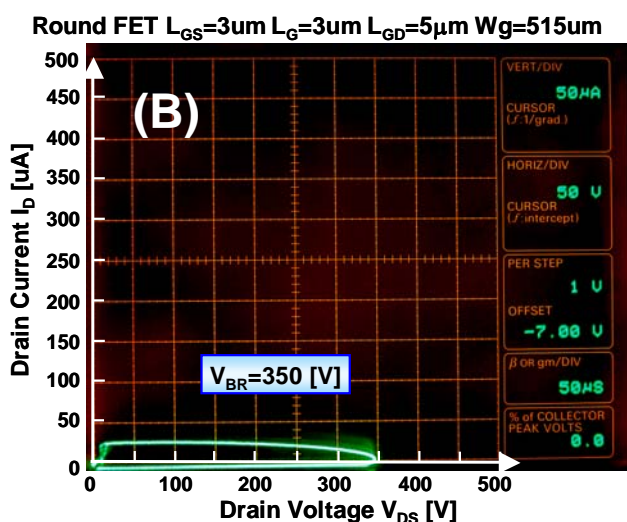
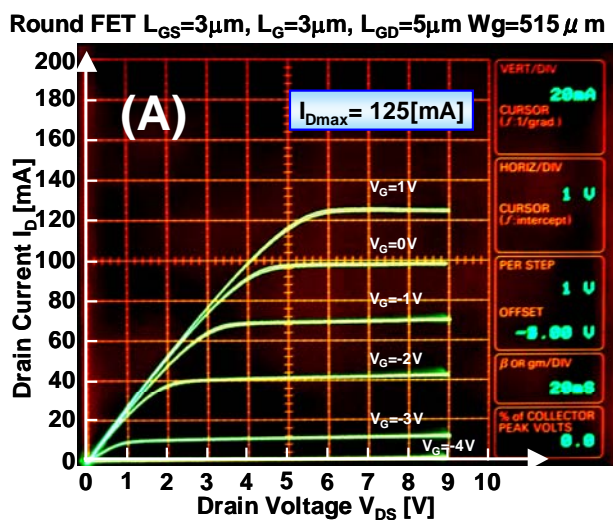


図 1-12 ドレイン電流電圧特性(A), とドレイン耐圧特性(B)

② -2 AlN エピ基板上 FET の評価

窒化物系化合物半導体エピ基板の高 Al 組成の極限としての、AlN 基板上にエピ成長した基板を用いた FET の試作・評価も試みた。エピ技術開発グループから提供された、AlN 基板上 AlGaIn チャネル構造のエピ基板を

用いて FET の試作・評価を行った。エピ構造は、 $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{N}(28\text{nm})/\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{N}(600\text{nm})/\text{AlN}(600\text{nm})/\text{AlN}$ 基板であり、評価した FET パターンサイズは、 $L_{\text{sg}}=3\mu\text{m}$, $L_{\text{g}}=3\mu\text{m}$, $L_{\text{gd}}=5\mu\text{m}$, $W_{\text{g}}=515\mu\text{m}$ である。

図 1-13 に FET の $I_{\text{d}}-V_{\text{ds}}$ 特性を示す。最大電流はまだ小さいものの、ピンチオフ特性を有する正常な FET 動作を確認することができた。特性値は、 $V_{\text{th}}=0.57\text{V}$, $R_{\text{on}}=180\Omega\text{mm}$, $I_{\text{dmax}}=25\text{mA/mm}$, 耐圧 130V 。図 1-14 に $I_{\text{d}}-V_{\text{g}}$ 特性を示す。ドレインリーク電流はまだ大きく、改善の必要がある。リーク電流については、前述のように GaN エピ基板上 FET でも低減課題のひとつであり、結晶品質に大きく依存するパラメータであると考えられることから、横型電子デバイスの評価結果を基板・エピ技術開発にフィードバックしていく上での重要な特性指標となるものと考えられる。

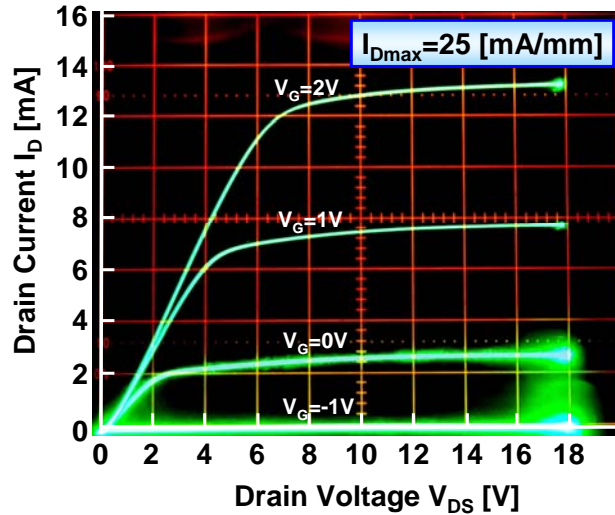


図 1-13 AlN エピ基板上 FET の $I_{\text{D}}-V_{\text{ds}}$ 特性

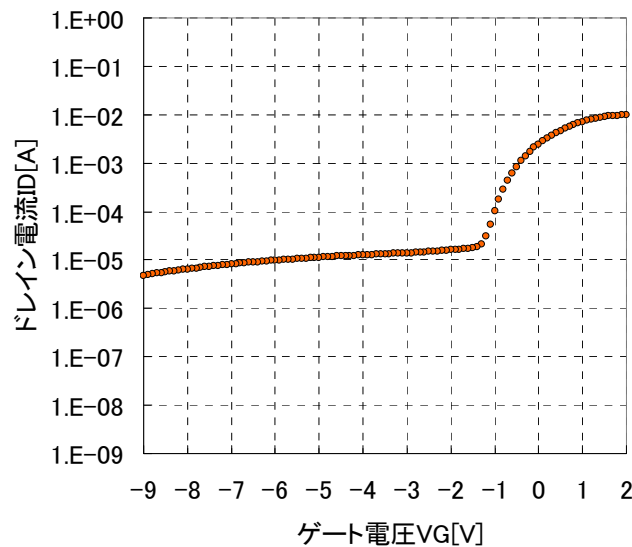


図 1-14 AlN エピ基板上 FET の $I_{\text{D}}-V_{\text{G}}$ 特性

②-3 今後の取組み

引き続き、大口径 2 インチクラスの基板サイズで有極性構造および無極性構造を有する窒化物半導体各種エピエピ基板を用いて、横型構造の FET 及び TEG パターンを試作し、それらを共通の条件で評価することによって、有極性単結晶基板上 FET と無極性基板上 FET での基板・エピ品質とデバイス特性との関係、利害得失を明らかにし、基板・エピ開発グループにフィードバックしていく。

(2) 縦型電子デバイスの評価

(2)-1 はじめに

GaN 電子デバイスは、開発当初から構造として横型が採用されていた。それは、対象が高周波デバイスであり、周波数特性の観点からメリットが大きいのがその理由であった。一方電流をオン・オフして電力を制御するパワースイッチングデバイスにおいても、多くは横型構造が採用されてきた。その理由として、横型 GaN-HFET の持つ高い周波数特性が高周波スイッチングに適していることが挙げられる。さらに、横型であれば、結晶に含まれる転位密度が高くても高耐圧が得られるため、基板として Si など異種基板が使用でき、低コストデバイスの可能性があることが挙げられる。

一方、数十kwを超える大電力の制御では、スイッチング周波数はそれほど高くなく(1kHz~30kHz 程度)、横型構造よりむしろ縦型構造のメリットが生きてくる。実際、従来の高電力用 Si パワーデバイスでは、縦型構造が普通である。図 2-1 に横型構造と縦型構造の典型的な GaN デバイスの構造を示す。ここで縦型構造の横型構造に対するメリットをまとめると次のようになる。

1) 縦型ではドリフト層の厚さで耐圧を保持するため、耐圧増加に伴う素子面積の増加が少ない。すなわちチップ面積を小さくできる。

2) 電極を基板の表・裏に形成するため、表面電極に大電流を流す必要がなく、配線の取り回し、層間絶縁膜の形成などが簡略化される。

3) 現状の大電力用スイッチングデバイス(Si 縦型デバイス)における実装技術を生かすことができる。

4) 縦型では、電流が表面を流れないため表面の影響を受けにくく、いわゆる電流コラプスを抑制できる。

5) 縦型では高電圧が印加されるソース・ドレインが基板を挟んで存在するため、縁面放電が起きにくい。

このような縦型デバイスのメリットがあるにもかかわらず GaN 縦型デバイスの開発が活発化しなかった理由は、GaN の自立基板がなかったということにある。しかし、青紫色半導体レーザの開発がきっかけとなり、GaN 基板の開発が行われるようになった。その結果、GaN の縦型構造トランジスタの研究が可能になり、縦型構造のトランジスタ動作が実現されている。

高耐圧縦型構造の課題は、GaN 基板に含まれる結晶欠陥と耐圧、信頼性の関係が不明なことである。これまで利用できる GaN 基板は気相成長法によるもので、 10^6 cm^{-2} 程度の結晶欠陥(貫通転位)を含んでいる。縦型構造では、素子に印加される電圧の向きが貫通転位と同じ方向であるため、耐圧への影響は大きいと予想される。本プロジェクトで開発される GaN 基板は、転位密度が低いことがその特徴になっている。そのため縦型デバイスに適すると考えられるが、実際にデバイスを作製して、特性を評価し、結晶の特性を結晶成長グループにフィードバックすることを目的に基板の評価を行った。

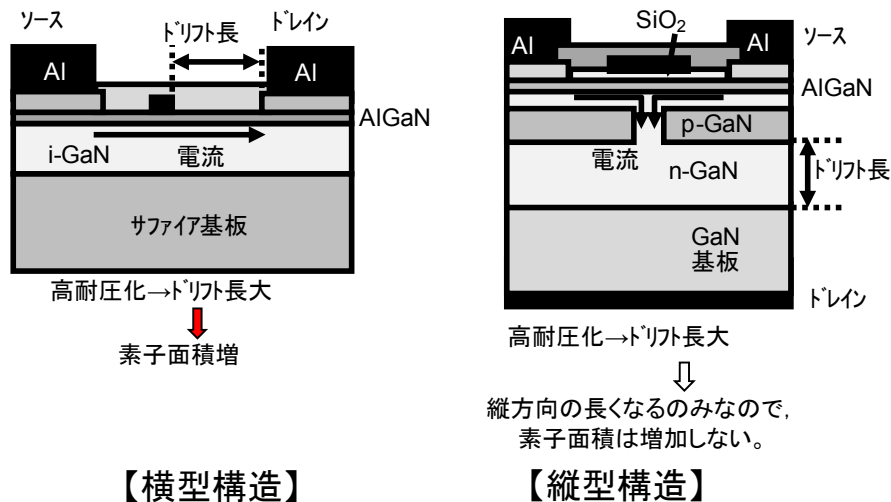


図 2-1 GaN デバイスの横型構造と縦型構造

(2)-2 実施項目

1) 耐圧の評価

縦型構造では、図 2-1 に示すようにデバイス構造に p-n 接合を有し、動作がオフ時にこの p-n 接合に逆バイアスがかかり耐圧を保持する。そこで、縦型デバイスの観点から基板を評価するための構造として、最も簡単な構造である p-n ダイオードを作製した。そして、その耐圧特性を評価し、欠陥との関係を調べた。

p-n ダイオードの作製プロセスを図 2-2 に示す。まず GaN 基板上に MOVPE 法を用いて Si を $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

ドーピングしたn-GaNを7~10 μm 成長し、次にMgを $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ドーピングしたp-GaNを0.5または1.0 μm 成長した。成長後 p-GaN の活性化のため、窒素中、850 $^{\circ}\text{C}$ 、5分のアニールを行った。この処理により、ホール濃度は約 $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 程度になる。p型、n型のドーピングの比から、空乏層はほとんどn型層に広がり、耐圧を保持する。その後、 SiO_2 をマスクとしてドライエッチングを行い、メサ構造を作製した。メサの深さは、p-GaN層の厚さの2割増し程度とした。最後に電極形成を行い、p型電極として、Ni/Au(酸素中、500 $^{\circ}\text{C}$ 、5分シンター)、n電極としてTi/Al(窒素中、450 $^{\circ}\text{C}$ 、5分シンター)を形成した。試作したダイオードの表面写真と断面構造を図2-3に示す。ダイオードのメサ形状は円形と六角形を作製した。

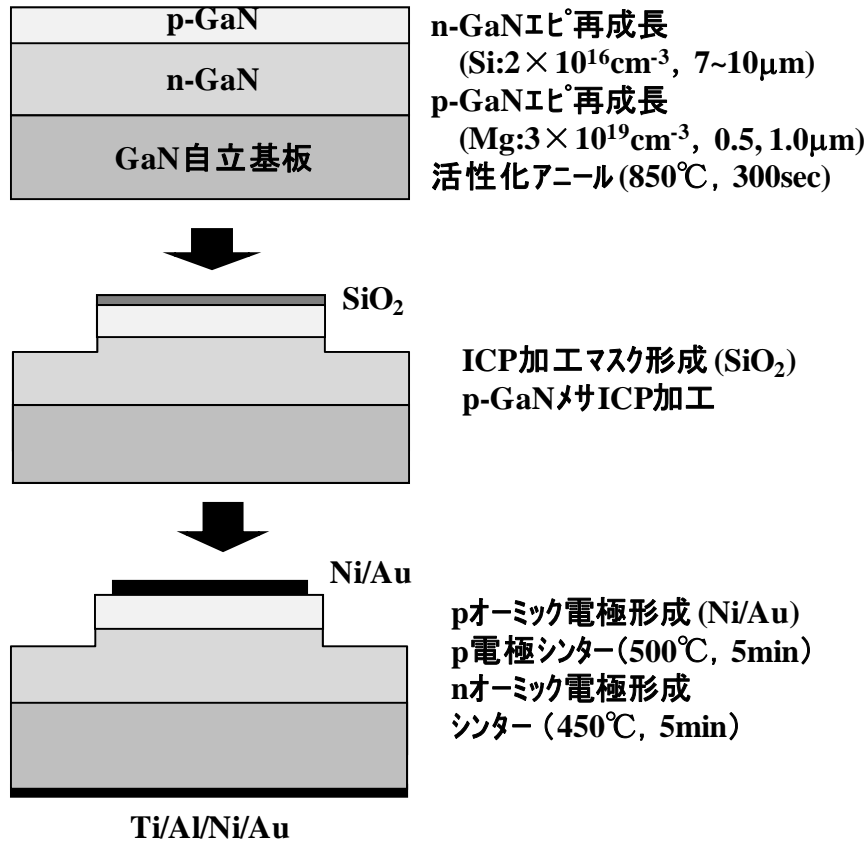


図 2-2 pn ダイオードの作製プロセス

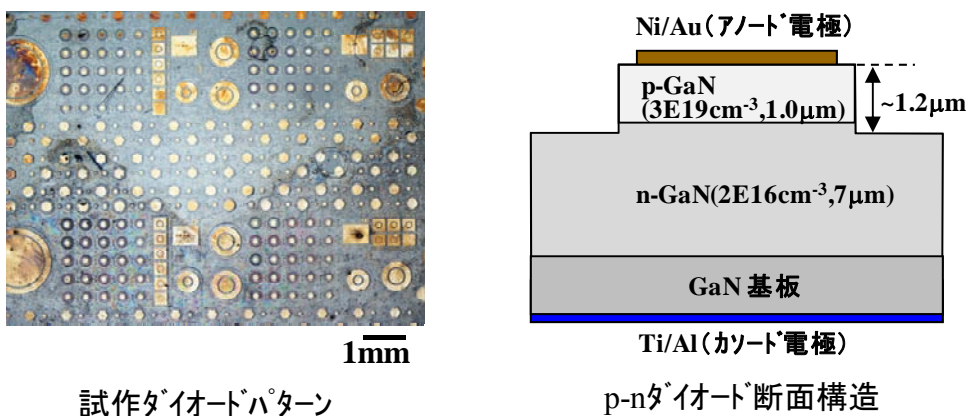


図 2-3 試作したダイオードの写真

耐圧の評価はアノード、カソード間に逆バイアスを印加して、0V~1000V ににおける電流-電圧特性を測定して行った。測定は縁面放電を避けるため、試料をフロリナートに浸けて行った。使用した GaN 基板は、HVPE 法で作製された市販のウエハおよび本プロジェクトで作製された Na フラックス法による基板を用いた。測定した結

果を図 2-4に示す。どちらの試料についても、逆方向電圧が上昇するにつれ、リーク電流が発生し、絶縁破壊が発生している様子が見られる。絶縁破壊の多くは、その破壊痕から、素子のメサ端部で発生しているのが観察され、フロリナート中とはいえ破壊の防止には不十分であることが分かった。今後、端部の積極的な保護が必要である。リーク電流の大きさは両方ほぼ同じである。しかし得られた耐圧の値に関しては、Na フラックス法の基板では 1kV でも破壊しない試料が多く存在しているのに対し、HVPE 基板では 1kV に達する試料は無かった。これらのことから、今回の評価では、Na フラックス法による基板の方が市販品より耐圧の点から優位性ありと判断される。

また、基板上に結晶成長後図 2-5 に示すような、六角形状のピットが形成されることが、観測された。このピットの形成は両方の基板とも見られた。このようなピットが、ダイオード中に存在するとアノード、カソード間は導通状態でまったくダイオードとして機能しない。このピットは成長時基板表面から発生しているのが、断面の観察からわかった。図 2-6 にその写真を示すが、ピットが成長界面から発生しているのが見られる。このピットの発生源としては、おそらく基板に存在する螺旋転位が起因していると考えられる。このように成長層にピットが生じるのは、基板中の GaN コラム間の傾き(Tilt)が大きく、中空になった方が系のエネルギーが小さくなる条件の欠陥が存在し、ピット形成の原因に成っていると推測される。こうした欠陥があると、エピタキシャル成長条件を最適化してピットの形状を消しても結晶中に螺旋転位が残ることになり、後述するように、リーク電流の原因となる。ピットの密度は、基板ごとに異なっており、ピット形成が少ない基板も存在する。したがって基板作製の条件の最適化で、これらのピットは低減できるものと思われる。

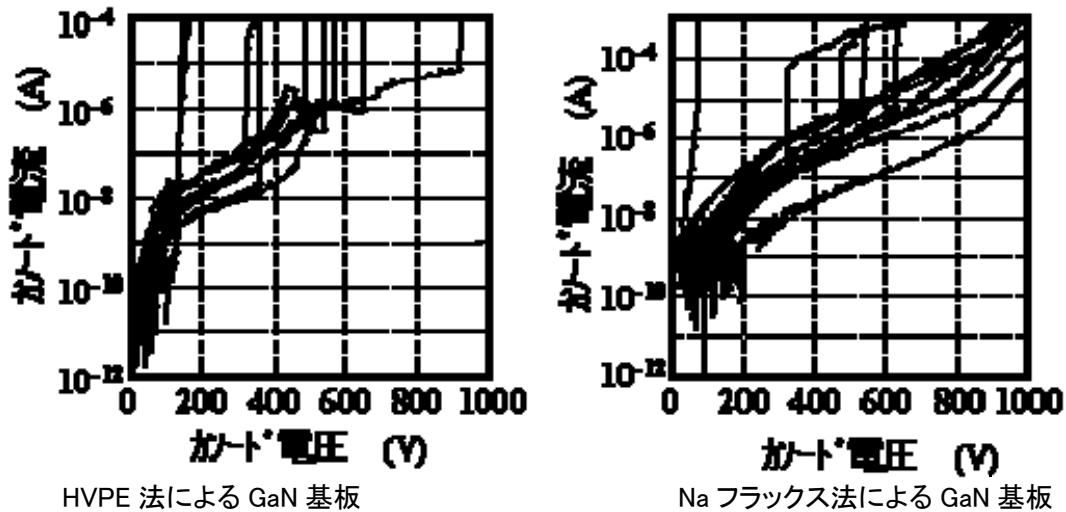


図 2-4 HVPE 及び Na フラックス法で作製した GaN 基板上の pn ダイオードの耐圧特性

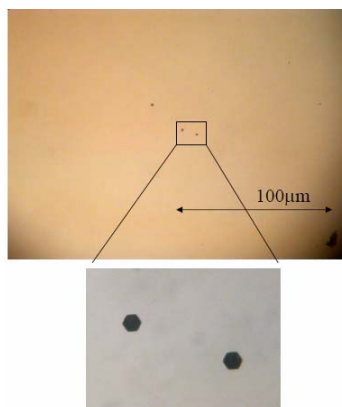


図 2-5 成長表面に現れるピット

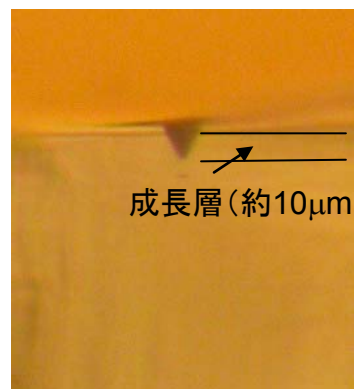


図 2-6 ピット部の断面写真

2)リーク電流の起源

今回の評価では Na フラックス法の特徴が優れていたが、図 2-4 から明らかなように Na フラックス法の基板においてもリーク電流が発生し、この原因を解明することは重要である。今回作製した p-n ダイオードのリーク電流の原因として2つのパスが考えられる。一つは、貫通転位によるリーク、もう一つはメサ加工した端面を

介してのリークである。この部分を説明するために次の実験を行った。

別の実験から、メサ加工した端面をポリイミドで表面を覆うことで、端面でのリークが抑制できる結果が得られた。そこで、端面でのリークの影響を低減するために、メサ端面およびメサのエッジをポリイミドで覆い、上記と同じ評価を行なった。そして得られたリーク電流の大きさを、素子サイズで比較した。その結果の一例を図 7 に示す。ダイオードの大きさは、直径 100, 200, 400 μm 径のものを用いたが、図 2-7 では、サイズの違いによるリーク電流の違いが分かり易いよう 100 μm , 400 μm を示している。図 7 から径が大きくなると、リーク電流も増加することがわかる。もし、リーク電流が貫通転位に起因するのであれば、リーク電流は素子面積に比例し、1:4:16 となるはずである。そこで、リーク電流の測定結果の平均値で比を求めると、およそ 1:2:8 となった。この値は面積比とは一致しない。この結果は、ポリイミドで加工端面を保護しても、端面で一定のリーク電流が生じていることを示唆している。すなわち、周囲(加工端面)のリーク電流の寄与はダイオードの周囲長に比例するため、小さい径では寄与が大きい。しかし、径が大きくなると影響は小さくなり、その結果、面積の大きな 200 μm , 400 μm に関しては 1:4 と面積比になっていると考えられる。したがって、リーク電流の面積依存性から、リーク電流の主な原因は、結晶に含まれる転位であると推測される。

次に、ここで得られたリーク電流の大きさをデバイスの観点から評価する。商用電源(200V)を用いる装置には 600V 耐圧のデバイスが必要とされる。そこで、耐圧 600V、電流容量 30A、素子サイズ 1mm 角を想定し、スイッチングデバイスとして動作させたときの電流のオン・オフ比を 10^6 必要と仮定する。するとオフ時に許されるリーク電流は $3 \times 10^{-5} \text{A}$ となる。一方、図 7 から 400 μm 径のリーク電流は、平均しておよそ $5 \times 10^{-6} \text{A}$ である。これを 1mm 角のサイズに換算すると約 8 倍、 $4 \times 10^{-5} \text{A}$ となり、ほぼ要求性能に一致する。すなわち耐圧 600V 系のデバイスを想定すると、この基板の性能で成立する。しかし 600V 以上の耐圧系に対しては、リーク電流が大きく、転位低減の改善が必要である。今後、後に述べる方法を使って、この試料に含まれる転位の種類・密度を計測し、どの転位を、どの程度まで改善すべきかを明らかにしてゆく。

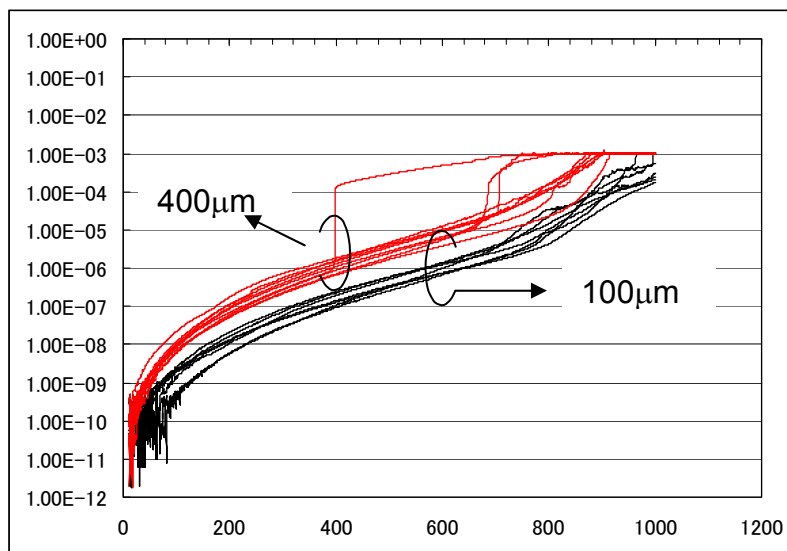


図 2-7 サイズの異なる Na フラックス基板上ダイオードの耐圧特性

3) 転位の同定

GaN 基板に含まれる貫通転位は、刃状転位、螺旋転位、両者の混合転位の 3 種類である。リーク電流の起源が貫通転位による可能性が高いため、試料に含まれる転位を同定し、どの転位がリークに利くのかを調べる必要がある。そこで、過去のエッチピット観察例を調査し、HCl による気相エッチングが有用と考え、確認実験を行った。試料は、サファイア基板上に結晶成長した GaN 結晶を用い、条件の最適化を行なった。その結果、エッチング条件は HCl+N₂ 雰囲気中で、600°C、15 分が最適であることが分かった。図 8 にその条件によるエッチピットの SEM 写真を示す。大きな六角形は螺旋転位、それより小さな中心に穴のあるピットが混合転位、皿状の細かなピットが刃状転位である。またこの方法で計測した転位密度と、X線ロッキングカーブから計算される転位密度は一致し、この手法の有効性が確認された。

そこで、この手法を GaN 基板上のダイオードに適用し、リーク電流(耐圧)と転位の関係を調べた。用いた試料は HVPE 法の GaN 基板上に形成した p-n ダイオードで行った。図 9 に一例を示す。この写真では六角形状のダイオードの中に、刃状転位(写真の○印)および混合転位(写真の→)が観測された。このダイオードでは、

大きなリーク電流が発生している。このように転位の種類とリーク電流の関係を調べることで、次のような転位の影響が推測される。すなわち、

- ・螺旋・混合転位は逆方向リーク電流のパスとなる可能性が高い。
- ・刃状転位は逆方向リーク電流には大きくは寄与しない。

したがって、螺旋転位に関係する転位は出来る限り少なくする必要がある。また刃状転移に関しても高電圧ではリークパスとならないかなど更に検討が必要である。

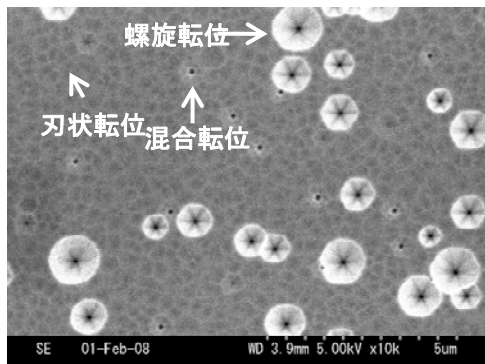


図 2-8 サファイア基板上 GaN を HCl ガスでエッチングした表面

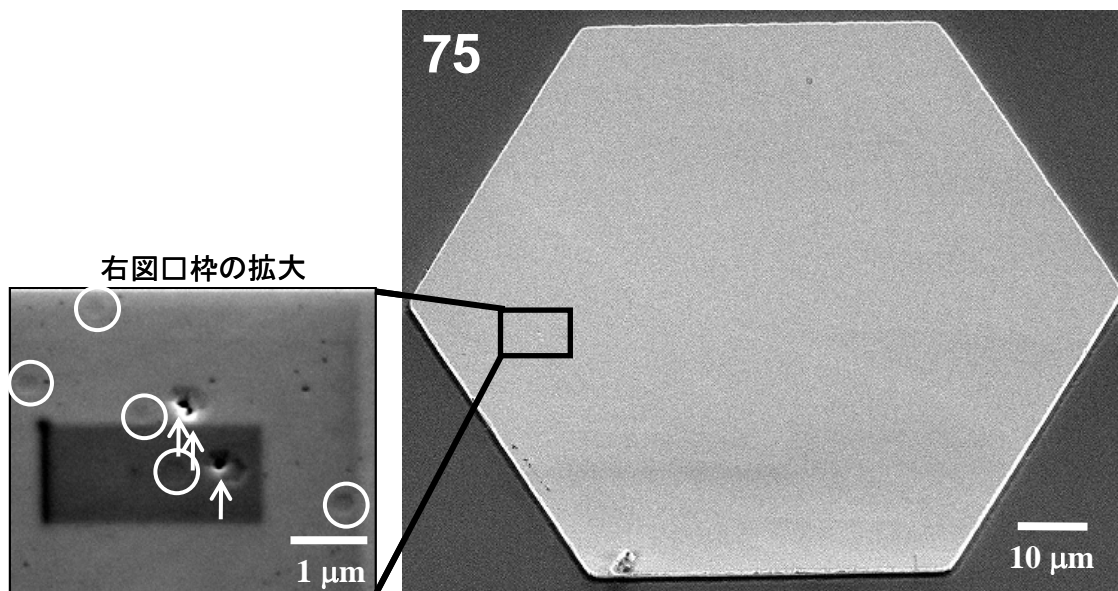


図 2-9 HVPE 法 GaN 基板上 pn ダイオードの HCl エッチング後の表面
図中、○は刃状転位、→は混合転位を示す。

(2)-3 まとめ

Na フラックス法で作製した GaN 基板の縦型デバイスの観点から見た評価を行った。縦型デバイスの場合、耐圧を持つ方向と、貫通転位の方向が同じであるため、リーク電流の発生、耐圧の低下の懸念がある。そこで、pn ダイオードを作製して耐圧特性を評価した。その結果、HVPE 法による基板に対し優位性が確認できた。また、リーク電流の原因を解析し、結晶に含まれる貫通転位がその原因である可能性を見出した。リーク電流の程度は 600V 系のデバイスには適用できるレベルであるが、それ以上の耐圧に対しては、さらなる改善が必要である。また、結晶に含まれる転位をエッチピットとして観察する手法を開発し、その有効性を確認した。今後、この手法を用いて、Na フラックス法による基板に含まれる欠陥を観察し、どの欠陥をどの程度まで低減すべきかを明らかにしてゆく。

(3)窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認

3-1.デバイス試作準備とプロセス及び評価の確認

3-1-1.デバイスマスクの作製

福井大での試作との相関が確認できる評価用の円形 SBD 及び円形 FET と実用デバイスに近い構造の楕円形 SBD 及び FET、その他 TEG を配置したデバイス評価試作用マスクを設計、作成した。

3-1-2. デバイスエピの作製と評価

試作における問題点の抽出を目的に市販されているサファイア、Si、SiC、GaN の各基板上に HEMT 構造を自社でエピ形成し、プロセス及び評価系の確認を実施した。GaN 基板上のエピで基板のスクラッチに起因した表面荒れが生じたもののデバイス試作可能なレベルの平坦性を持つエピタキシャルウエハが作製可能なエピ条件を得ることができた。(図3-1-1:各基板上のエピ表面のノマルスキ像)

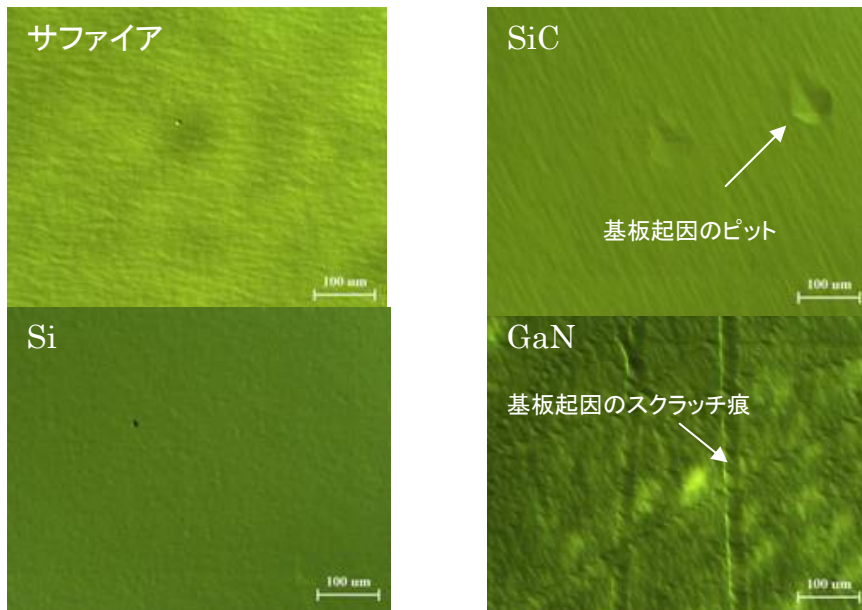


図3-1-1 エピ表面モフォロジ(ノマルスキ像)

水銀プローブを用いた CV 測定によるエピタキシャルウエハの評価法を確立し、非破壊で、HEMT 構造における 2 次元電子ガス層の状態を確認した。

(図3-1-2:各基板上 HEMT エピウエハの CV 特性と算出されたキャリアプロファイル(NW))

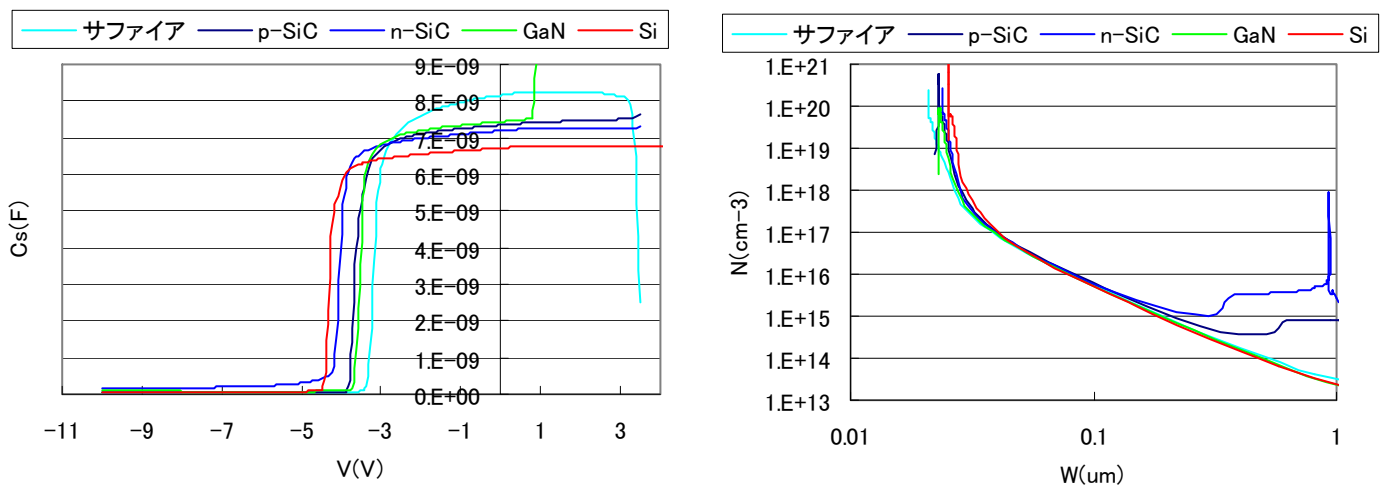


図3-1-2 各基板上 HEMT 構造の CV 特性と算出された NW 結果

3-1-3. デバイス試作と評価

各種基板上的の HEMT エピを用い、新規作成したデバイスマスクで試作を実施した。TEG パターンにおいて、GaN 基板上エピにおいても、ref として投入した Si 基板上エピと同等の $R_c < 1.2 \Omega \cdot \text{mm}$ 、 $R_s < 400 \Omega / \text{口}$ が得られた。またいずれの基板上的のエピにおいても、FET、SBD 動作が確認され、プロセス及び評価において大きな問題点がないことを確認した。
(図3-1-3: 試作した円形 FET デバイスの表面写真)



図3-1-3 試作デバイス形状

3-1-4. DC 特性の評価

市販の n 型 GaN 基板上的の HEMT エピを用いたデバイスにおいては、Si 基板上的の HEMT に比べて高いオン動作が得られる一方、オフ時の特性において、基板を介してのリーク電流により、エピの膜厚方向の耐圧(縦方向耐圧)が著しく低く、それにより耐圧が律則し、低耐圧になっていることがわかった。
(図3-1-4~5: Si 基板上及び GaN 基板上 HEMT の円形 FET のオン及びオフ特性)

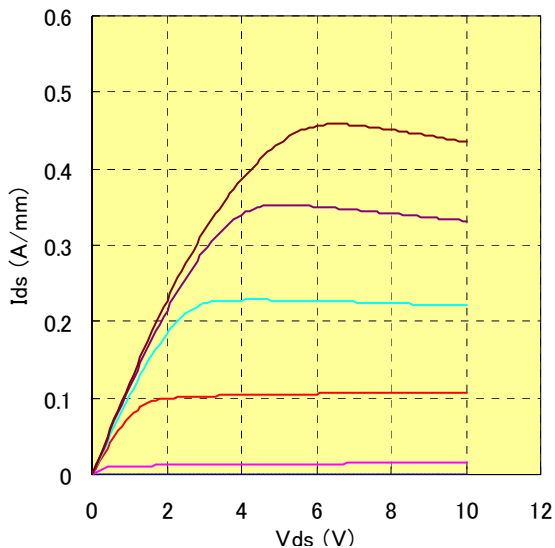


図3-1-4 Si 基板上 HEMT の FET オン特性及びオフ特性

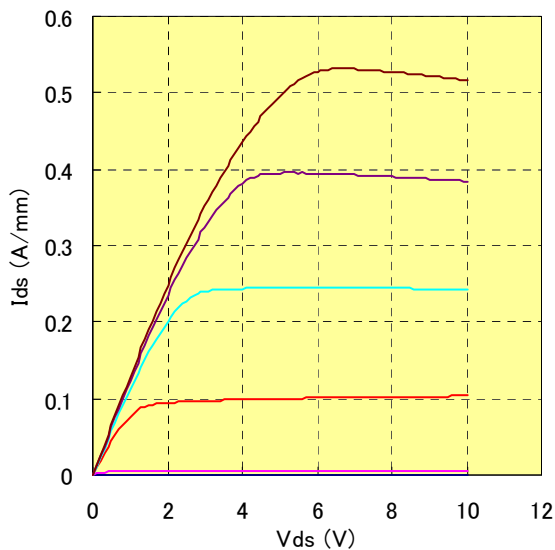
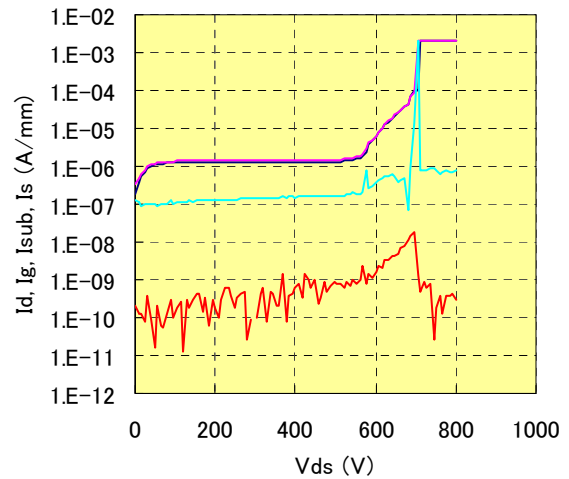
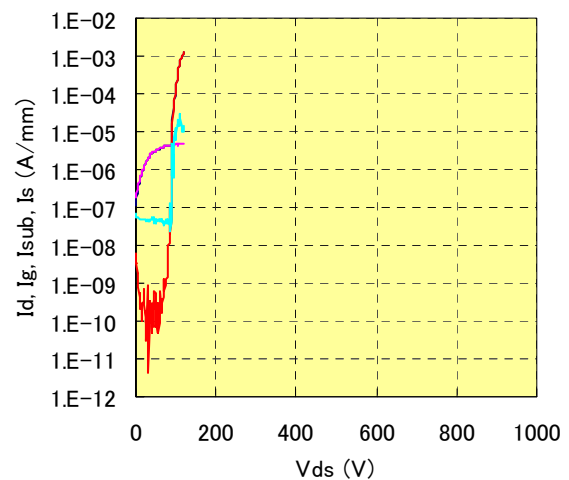


図3-1-5 GaN 基板上 HEMT の FET オン特性及びオフ特性



3-1-5. 電流コラプスの評価

電流コラプスの測定として、パルスコラプス法による測定を実施した。パルスコラプス法では、オフ下で高電圧印加し、ターンオン後 10 μ s時のオン抵抗をオシロスコープの波形より測定している。

GaN 基板上的 HEMT デバイスでは、耐圧が低く十分な測定が実施できなかった。導電型 SiC 基板及び Si 基板とは同程度、サファイア基板はコラプス特性が悪いという傾向が得られた。サファイア基板上的 HEMT デバイスのコラプスが悪いのは、エピの出来の差による順方向特性が低い影響と、基板が絶縁性のため、基板側からの電界緩和が他の基板に比べて得られないことに起因していると考えられる。

(図3-1-6:各基板上 HEMT 3mm 楕型 FET のパルスコラプス特性)

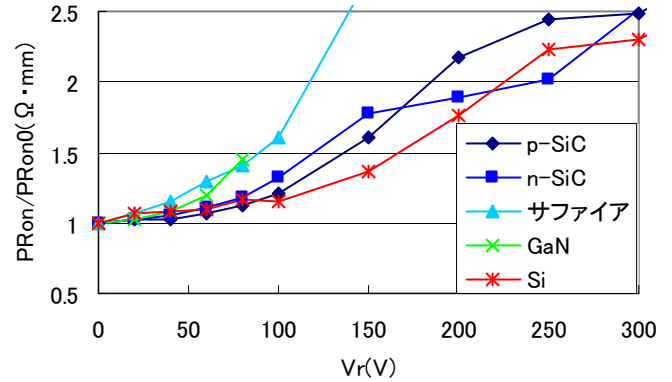


図3-1-6 パルスコラプス結果

3-2. 各種基板上デバイス試作の実施

3-2-1. GaN 基板上エピの平坦性向上

前回エピ成長時に市販 GaN 基板上でスクラッチ痕が出るという結果であったため、成長前処理条件の改善検討を実施した。成長前にエピ装置内での前処理時におけるガス流量、温度などの処理条件を検討し、変更することで表面のモフォロジが改善し、スクラッチ痕が小さくなる条件が得られた。

(図3-2-1: GaN 基板上的エピの前処理条件変更前後の表面モフォロジの比較)

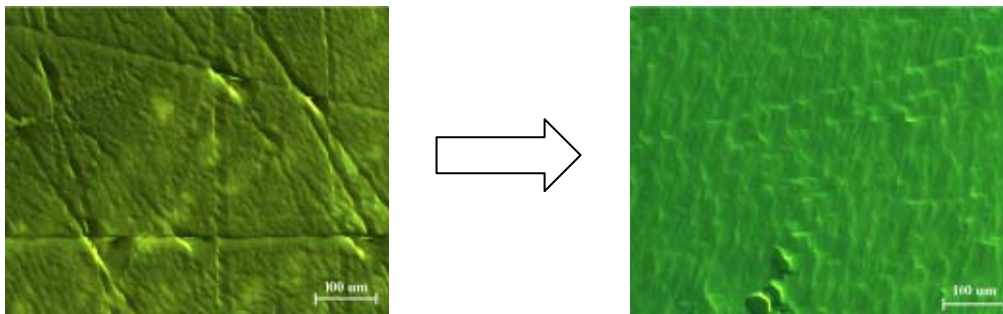


図3-2-1エピ表面の改善前と改善後の比較

3-2-2. 水銀プローブによる IV 測定

水銀プローブに IV 測定機能を追加し、エピウエハの非破壊評価手法としての検討を行った。エピの構造、成長条件などに応じて、両ショットキー電極間のリーク電流、耐圧などに差が生じることが確認された。(図3-2-2: GaN 基板上的同一構造で成長条件が異なる HEMT エピの Hg-IV 特性)

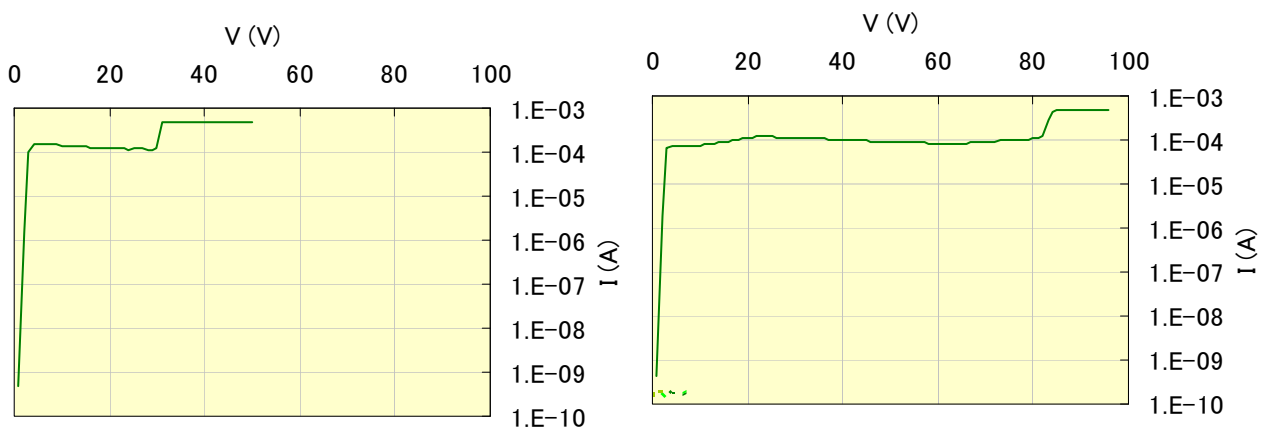


図3-2-2 IV測定例 (GaN 基板上 HEMT エピにおいて同一構造で成長条件が異なるサンプル)

3-2-3. デバイス試作と評価

前回の試作に対して、今回の試作においては、福井大試作に近づける目的でバリア層の Al 組成を下げて設計した。また前回試作時に問題となった GaN 基板上的縦方向耐圧を向上させるための検討を主目的に試作を投入した。

今回縦方向耐圧を向上させるために対策として、①成長条件の変更、②AlN 層の挿入、③厚膜化、④p-GaN 層の挿入を実施した。また今回は SI-GaN 基板が入手できなかったため、SI-SiC 基板上的 HEMT デバイスでの問題点の確認を実施した。

(図3-2-3: GaN 基板上(ref)円形 FET のオン特性及びオフ特性

図3-2-4: GaN 基板上にエピ成長条件を変更して作製した円形 FET のオン特性及びオフ特性

図3-2-5: GaN 基板上に AlN 層を挿入してエピ成長した円形 FET のオン特性及びオフ特性

図3-2-6: GaN 基板上に i-GaN 層を厚膜化し作製した円形 FET のオン特性及びオフ特性

図3-2-7: GaN 基板上に p-GaN 層を挿入してエピ成長した円形 FET のオン特性及びオフ特性)

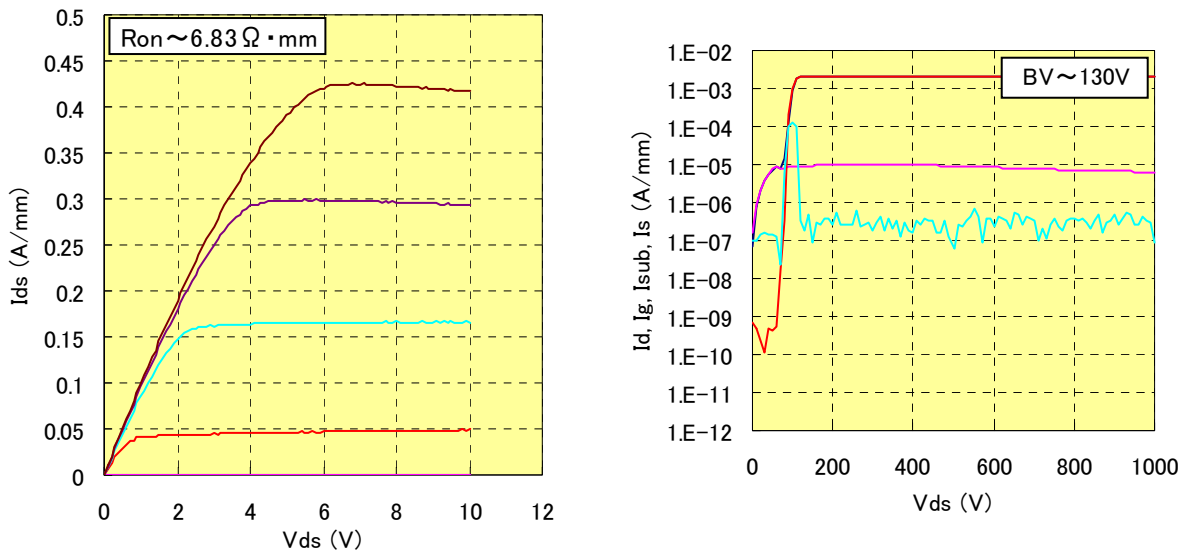


図3-2-3 GaN 基板上(ref)FET のオン特性及びオフ特性

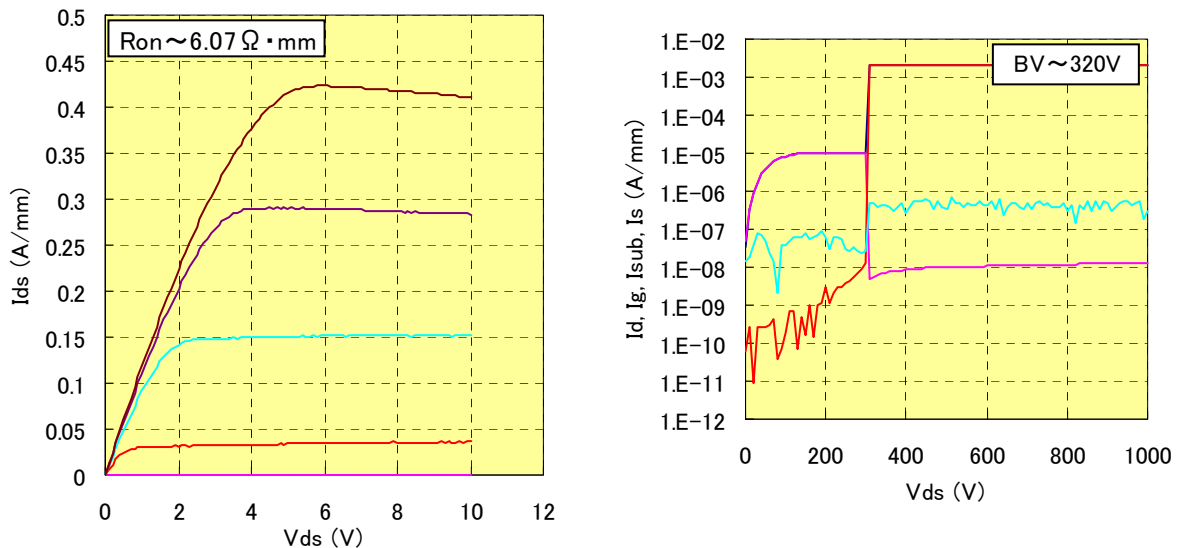


図3-2-4 GaN 基板上(成長条件変更)FET のオン特性及びオフ特性

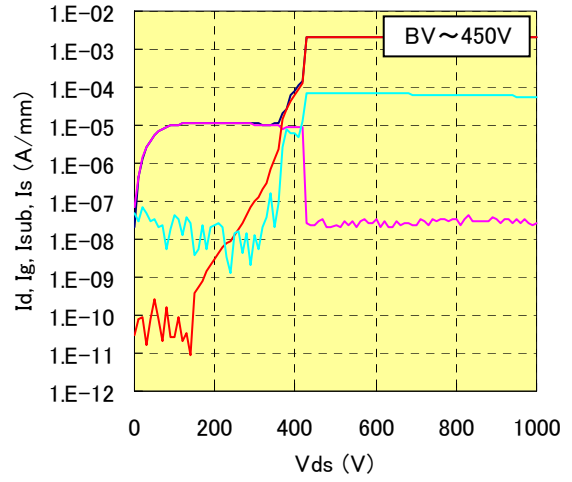
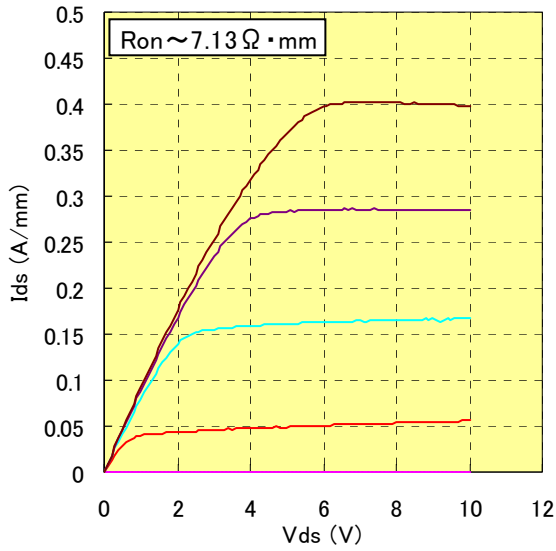


図3-2-5 GaN 基板上(AIN 挿入)のFET オン特性及びオフ特性

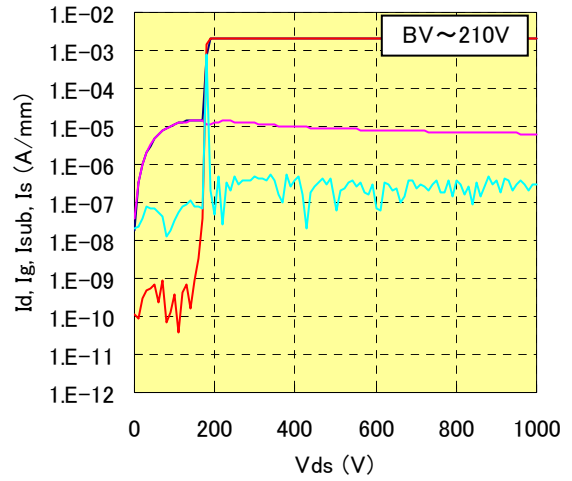
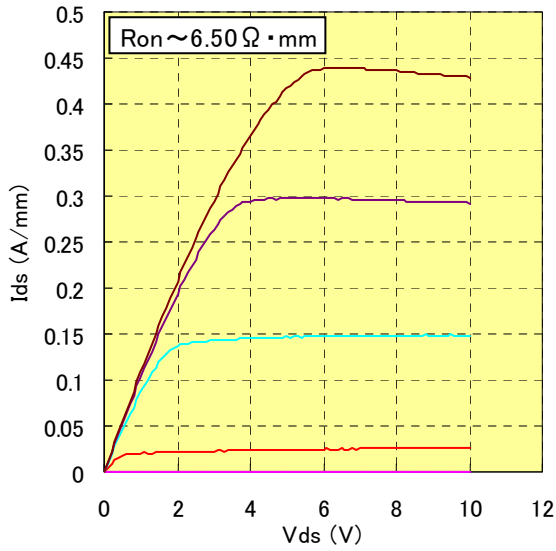


図3-2-6 GaN 基板上(GaN 厚膜化)のオン特性及びオフ特性

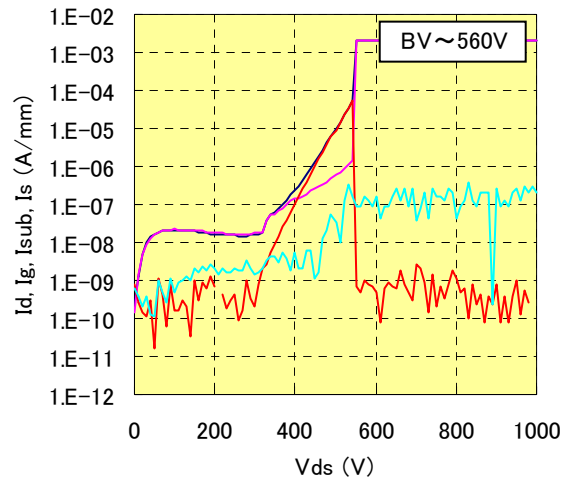
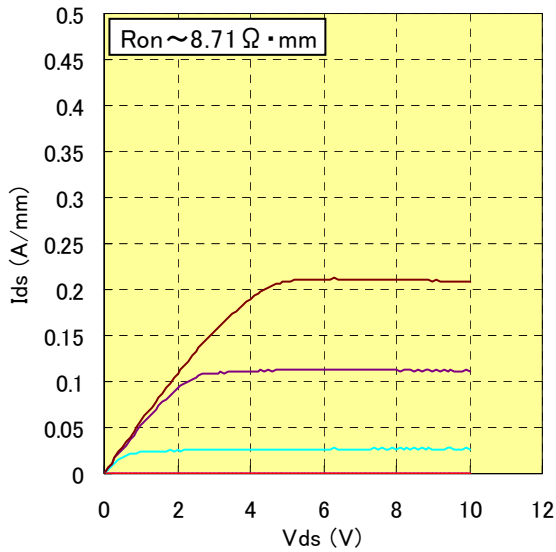


図3-2-7 GaN 基板上(p-GaN 挿入)のオン及びオフ特性

各パラメータを変更することでいずれも ref に対して、縦方向耐圧が改善する傾向が確認された。
(図3-2-8:各 GaN 基板上 FET の縦方向耐圧の比較)

成長条件を変えた場合、耐圧は 300V 程度までの向上が確認された。これは、成長条件を変えると XRC でロックアップカーブのピーク分離が見られることから、エピ層における結晶状態が改善し、その結果耐圧向上に寄与しているものと推測される。

AIN 層を基板とエピ層の間に挿入した場合縦方向耐圧は、400V 程度まで向上することが確認されたが、一方で XRC により結晶性の低下とそれに伴う FET の順方向特性の低下が見られた。また非常に基板のそりが大きくなり応力の影響により、プロセス中に破損するなどの問題が確認された。AIN を用いると現状の成長条件では SiC 基板上と同程度の膜質、デバイス特性になってしまうことから、積極的に GaN 基板を使用するメリットがなくなってしまうと考える。

エピ層を厚膜化し、2 倍程度の膜厚に設計した場合、200V 程度までの耐圧向上が見られ、ほぼ膜厚に比例した耐圧傾向を示すことが確認された。高耐圧デバイスを目指す場合、厚膜化だけでは不十分と考えられる。

p-GaN 層を挿入した場合、今回の結果においては最も耐圧の向上が確認されたが、オン動作時の抵抗の増加が確認され、p 型不純物のデバイス動作領域への拡散の影響が見られた。この構造を適用する場合、p 型不純物を拡散させない構造や条件の確立が必須となる。

これらの結果から、n 型 GaN 基板を使用して HEMT 構造を作成する場合には、基板及びエピ層の結晶性の向上、p 型不純物層の導入などが現実的と考えられる。

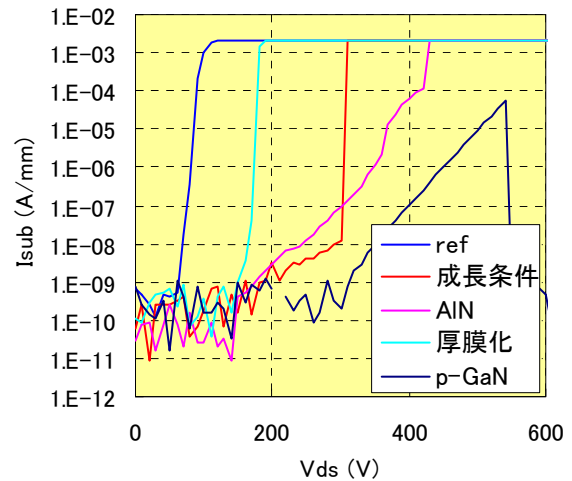


図3-2-8 縦方向耐圧の比較

SI-SiC 基板上の GaN FET の特性を 4H-n 型基板上、6H-n 型基板上の FET デバイスと比較した。

(図3-2-9:各種 SiC 基板上に作製した 3mmFET のパルスコラプス特性)

DC 特性においては、いずれも同等のオン特性を示しており、SI-SiC 基板を用いることで縦方向のリーク電流は、抑制されていることが確認された。一方電流コラプス測定においては、SI 基板を用いたデバイスのみ 100V 強から特性が著しく悪化した。この特性の悪化は、サファイア基板上で確認された傾向と同様で、基板の絶縁性により、コラプス特性が悪化していると推測される。このことから、縦方向耐圧を向上させる目的で SI-GaN 基板を用いると同様のコラプス特性の悪化が推測され、高耐圧デバイスとして用いる場合には問題となる可能性が示唆される結果となった。

今後 SI-GaN 基板を用いたデバイスの試作を実施し、確認を行う予定である。

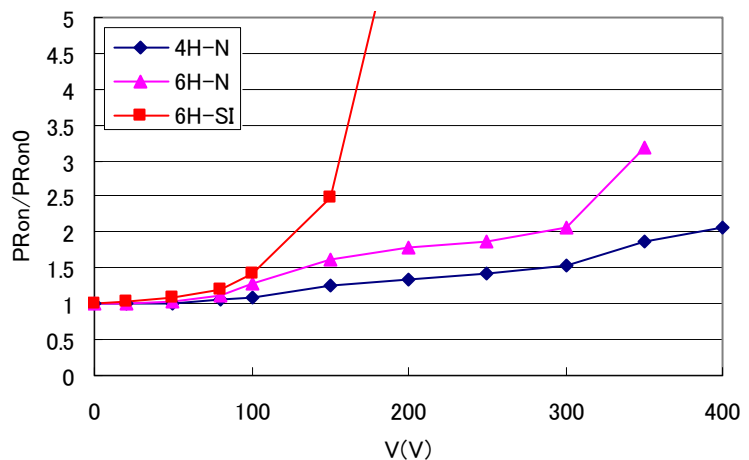


図3-2-9各種 SiC 基板上に作製した GaN FET のコラプス特性

3-3. 熱抵抗及び信頼性、実機動作の検討

3-3-1. ダイス条件の検討

熱抵抗測定及び信頼性検討を目的として、後工程の検討を行っている。サファイア基板、GaN 基板等での後工程の経験がないため、ダイス条件の検討を実施した。

ブレードを選ぶことで、サファイア基板はブレード幅 +30um 以下程度の幅でダイス可能であることを確認した。

一方現在入手可能な市販の GaN 基板については、裏面の荒れが大きいいためテープの密着が弱く、ダイスした部分が割れて飛んでしまい、また基板自体の脆さによりチップングが生じ、ダイスできないという問題が確認された。現在ダイス条件の見直しなどの対策を検討している。

(図3-3-1: GaN 基板及びサファイア基板のダイス部顕微鏡写真)

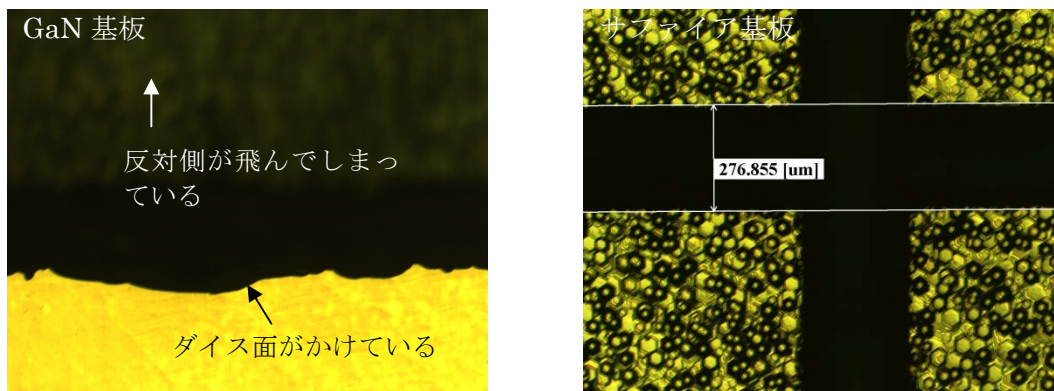


図3-3-1 GaN 基板サファイア基板のダイス部顕微鏡写真

(4) 有極性、及び無極性デバイス構造の比較

今日までに AlGaIn/GaN 系 HEMT の試作報告が多数なされているが、これらのデバイスは結晶の成長方向に極性を有するエピタキシャル結晶の上に作製されたものである。一方、無極性基板にエピタキシャル成長した結晶は、成長方向に分極電荷を持たないため、HEMT のしきい値電圧は結晶の厚さとドーピング特性によって決定される。実際に無極性デバイスを設計試作するに当たり、二次元電子ガスを形成するポテンシャル分布と電子分布をシュレディンガー方程式を用いて計算し、金属半導体界面のオーミック特性を低減できるエピタキシャル構造について、定量性ある知見を得ておくことは有益である。また、無極性デバイスとして有望なダブルヘテロ構造において、電子輸送特性に優れた InGaIn や InN をチャネル材料として用いたときに実現される高周波特性の限界特性について理論的に見積もっておくことは極めて興味深いことである。ここでは、これらの計算結果についてまとめる。

4-1. 無極性 AlGaIn/GaN 構造における接触抵抗シミュレーション

図4-1に有極性と無極性 AlGaIn/GaN ダブルヘテロ構造における伝導帯エネルギーと電子濃度分布の計算結果を示す。計算は、半導体の厚さ方向について、シュレディンガー方程式とポアソン方程式を自己無撞着に数値計算することにより行った。有極性ダブルヘテロ接合では、GaN チャネルにおけるポテンシャル形状が図に示すように鋭角三角形となる。これは、2つのヘテロ界面に正負の逆符号をもつ分極電荷が形成され、これらが深さ方向で対照的なポテンシャル形状を形成したためである。このような三角ポテンシャルの下では、チャネル電子密度の最大値が制限されるとともに、エンハンスメントモードの実現が難しいという問題が生じる。一方、無極性ダブルヘテロ接合では、上下の選択ドーピング構造がいずれも有効に二次元電子ガスの誘起に有効に寄与するとともに、ドーピング濃度の制御により、HEMT のしきい値を正確に幅広く制御することが可能となる。無極性ダブルヘテロ HEMT 構造では、オーミック電極の接触抵抗は、主として表面側 AlGaIn 障壁層を通るトンネル伝導によって支配される。

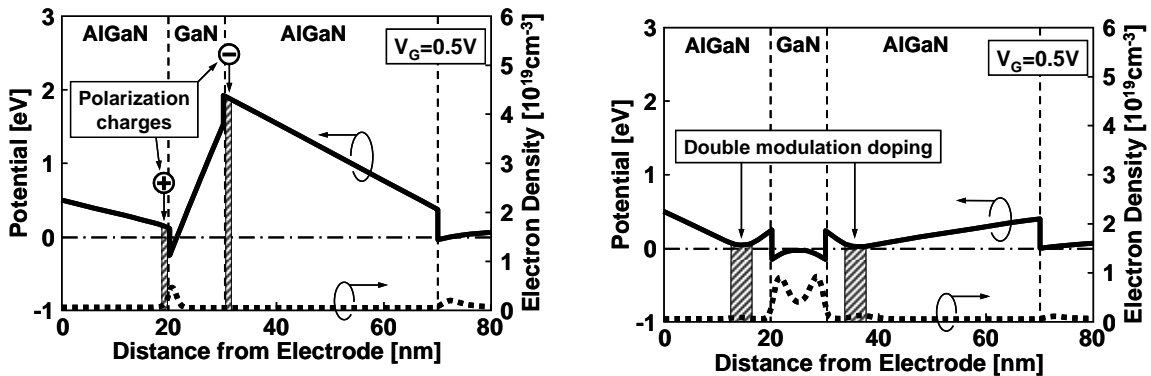


図4-1 AlGaIn/GaN ダブルヘテロ構造の伝導帯エネルギーと電子濃度分布。
有極性基板上(左)と無極性基板(右)。

伝導帯エネルギーの空間分布が決まると、ポテンシャル障壁をトンネルする電流密度は、フェルミディラック分布を仮定することにより次式のように求められる。

$$J(V, E_z) = \frac{qm_0^* kT}{2\pi^2 \hbar^3} D(E_z) \times \ln \left[\frac{1 + \exp\{(E_F - E_z)/kT\}}{1 + \exp\{(E_F - qV - E_z)/kT\}} \right]$$

ここで、 E_z は電子エネルギー、 $D(E_z)$ はトンネル確率、 V は印加電圧である。全トンネル電流 $J(V)$ は $J(V, E_z)$ を E_z に関して積分することにより求められる。

図4-2に、無極性 AlGaIn/GaN/AlGaIn ダブルヘテロ構造の表面に n-GaN 層 ($n=1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, 20nm) を設けた構造について伝導帯エネルギー分布の計算結果を示す。N-GaN キャップ層と表面 AlGaIn 障壁層を通るトンネル接触抵抗は、それぞれ 1.7×10^{-7} , $3.6 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}^2$ と計算される。この構造では、表面 AlGaIn 障壁層を通るトンネル抵抗が全体の接触抵抗を支配することがわかる。

図4-3に、無極性 AlGaIn/GaN/AlGaIn ダブルヘテロ構造の表面に n-GaN 層 ($n=1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, 20nm) と n-AlGaIn ($n=1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, 10nm, Al 組成 $x=0.1$) を設けた構造について伝導帯エネルギー分布の計算結果を示す。n-AlGaIn 中間層の導入により、表面 AlGaIn 層のポテンシャル (P2) が低下し、AlGaIn 障壁層を通るトンネル抵抗

は $3.0 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ まで減少した。この n-AlGaIn 中間層の Al 組成を 17% まで増加したときの伝導帯エネルギー分布を図4-4に示す。このとき、n-AlGaIn 中間層のポテンシャル(P1)と表面 AlGaIn 層のポテンシャル(P2)がほぼ同一に並び、全体の接触抵抗は $6.7 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ まで低減される。このとき表面 AlGaIn 障壁層を通るトンネル抵抗が支配的となるため、全トンネル接触抵抗は、図4-5に示すように、n-AlGaIn 中間層の Al 組成を 22% まで増加させることによりさらに低減できる。このとき、P2 のポテンシャルは P1 に比べて約 0.2eV だけ低くなり、表面 AlGaIn 障壁層を通るトンネル抵抗は $7.2 \times 10^{-7} \Omega \text{cm}^2$ まで減少し、全トンネル接触抵抗は最小値 $1.8 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ を示す。すなわち、n-AlGaIn 中間層のない従来構造に比べて、n-AlGaIn 中間層の導入により全トンネル接触抵抗は約4桁も低減されることが分かる。

図4-6に全トンネル接触抵抗と Al 組成の関係を n-AlGaIn 中間層のドーピング濃度 N_{d2} をパラメータとして示す。n-AlGaIn 中間層のドーピング濃度が 5×10^{18} から $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ まで増加するにつれて、トンネル接触抵抗を低減する最適 Al 組成は 0.2 から 0.24 に増加し、このとき全トンネル接触抵抗は 4.4×10^{-6} から $6.4 \times 10^{-7} \Omega \text{cm}^2$ まで低減されることが分かった。

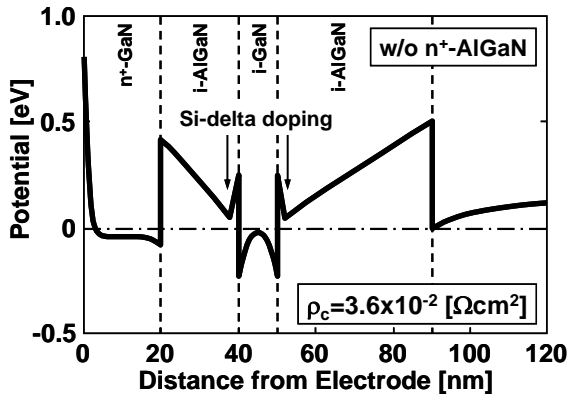


図4-2 伝導帯エネルギー分布の計算結果 (n-AlGaIn中間層なし)

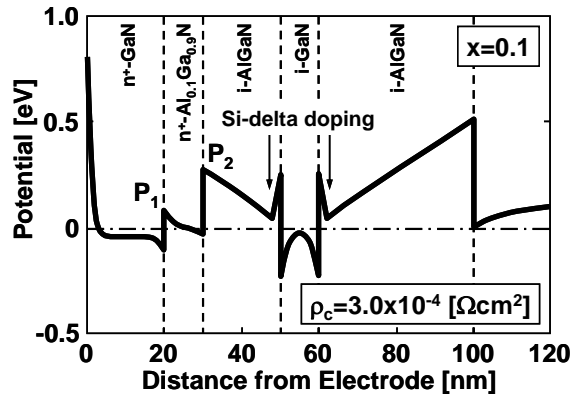


図4-3 伝導帯エネルギー分布の計算結果 (n-AlGaIn中間層あり, x=0.1)

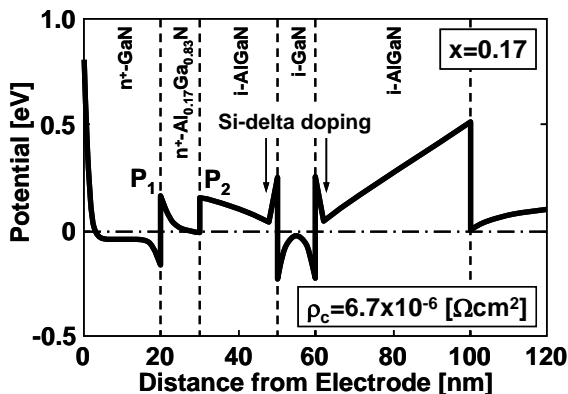


図4-4 伝導帯エネルギー分布の計算結果 (n-AlGaIn中間層あり, x=0.17)

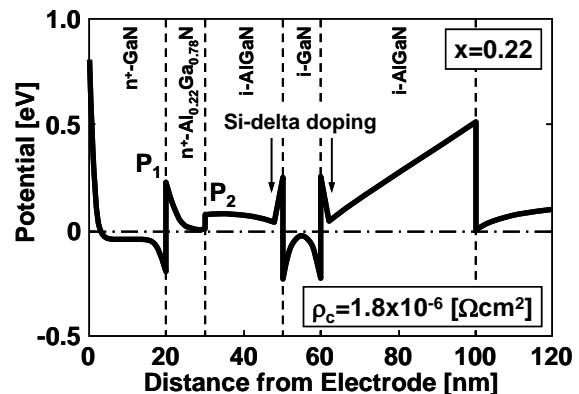


図4-5 伝導帯エネルギー分布の計算結果 (n-AlGaIn中間層あり, x=0.22)

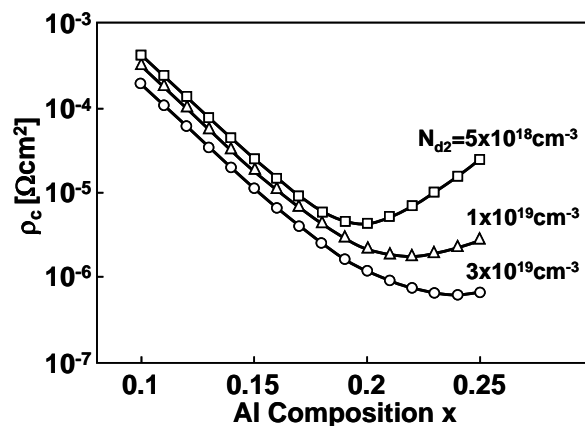


図4-6 全トンネル接触抵抗のAl組成依存性。AlGaIn中間層のドーピング濃度の増加とともに全トンネル抵抗は低減される。

4-2. 無極性 GaN 基板上 InGaN チャンネルダブルヘテロ接合 FET の高周波特性

HEMT の高周波特性はチャンネル材料の電子輸送特性に大きく依存するため、GaN より電子の有効質量の小さい InGaN(InN を含む)をチャンネル材料として用いることにより高周波特性の向上が期待できる。図4-7に InGaN の電子ドリフト速度の電界依存性の計算結果を示す。InGaN の In 組成の増加とともに、ピーク電子速度の増加、ピーク電界の減少、移動度の増加が確認できる。InNにおいて、室温のピーク電子速度は $4.2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ に達する。しかし、従来の有極性デバイスでは、分極により生じる固定電荷により、ダブルヘテロ構造特有の量子井戸型のポテンシャル形成が破綻してしまう。そこで、分極効果の影響が抑えられ、良好な量子井戸型ポテンシャルが形成できるものと考えられる無極性半導体を考慮し、各種 In 組成をもつ InGaN をチャンネル材料に用いた HEMT の解析を行い、サブ 100nm 級の短チャンネル化による高周波特性の極限について理論検討を行った。

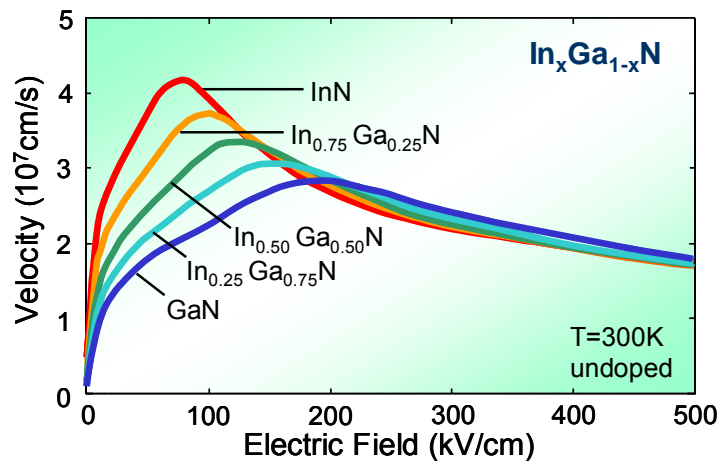


図4-7 InGaNにおける電子ドリフト速度の電界依存性

解析には、2次元アンサンブルモンテカルロシミュレーションを用いた。バンド構造の記述には、3谷からなる解析バンドモデルを用い、散乱機構として音響フォノン散乱、有極性光学フォノン散乱、等価および非等価谷間散乱とイオン化不純物散乱を考慮した。また、三元混晶半導体の物理パラメータには、二元混晶半導体の物理パラメータを線形補間したものを用いた。図4-8に本解析で用いたデバイス構造を示す。チャンネル層は真性半導体とし、In組成を変化させた。AlInN障壁層のAl組成はGaNに格子整合する組成(0.78)とし、表面障壁層の厚さは10nmとした。上下のAlInN障壁層ともにドナー面密度は $6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ とし、障壁層とチャンネル層の界面には厚さ1nmのアンドープ・スペーサ層を設けた。ソース・ゲート間距離は $0.1 \mu\text{m}$ とし、ゲート長(L_g)は10から200nmまで変化させた。本解析では無極性半導体を想定し、分極電荷の影響はないものと仮定した。

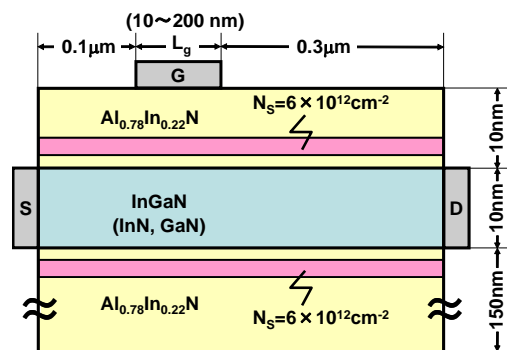


図4-8 本解析で用いた HEMT 構造

図4-9にゲート長200nmとしたときのAlInN/InN/AlInN HEMTの電子分布、電界分布を示す。印加バイアスは $V_{GS}=0\text{V}$, $V_{DS}=5\text{V}$ とした。図4-9(a)の電子分布に示されるように、このバイアス条件では、殆どの電子がチャンネル層に分布しており、良好な量子井戸チャンネル形成ができていることが分かる。また、図(b)の電界分布から、

ゲート電極端のドレイン側に電界が集中することが確認できる。この電界集中により、電子は非定常的電子輸送を伴い急速に加速される。

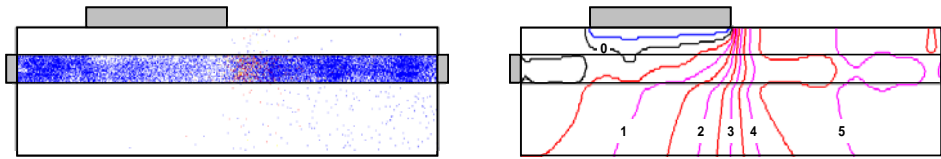


図4-9 AlInN/InN/AlInN HEMT (ゲート長 200nm) の電子分布と電界分布

図4-10に AlInN/InN/AlInN ダブルヘテロ接合 FET の直流特性を示す。ゲート長 200nm の InN チャンネルにおいて、最大ドレイン電流は 5.7A/mm, 最大相互コンダクタンス(g_m)は 2.68S/mm と大きな値を示した。また、しきい値電圧は約 -1.3V, 飽和ドレイン電圧は約 3V となった。In 組成 50% の InGaN と GaN をチャンネル材料に用いたデバイスについても検討した結果、同デバイス寸法で $In_{0.5}Ga_{0.5}N$, GaN の順に最大ドレイン電流が 3.3A/mm, 1.9A/mm, g_m が 1.62S/mm, 0.87S/mm と減少し、チャンネル材料の In 組成を高くすることにより直流特性の大幅な改善が確認された。

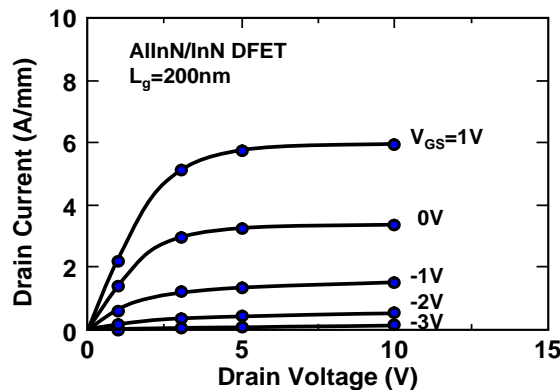


図4-10 ドレイン電流電圧特性

図4-11に各種 InGaN チャンネルダブルヘテロ接合 FET の(a) しきい値電圧のゲート長依存性と(b) 相互コンダクタンスのゲート長依存性を示す。ゲート長 50nm 付近でしきい値電圧の負方向シフトが認められ、短チャンネル効果の影響が顕著となることが分かった。また、高 In 組成ほど、短チャンネル化によるしきい値電圧の負方向シフトが大きく現れることが分かった。しかし、最大相互コンダクタンスはゲート長 50nm までは In 組成が高いほど増加傾向が強い。また、ゲート長 10nm の InN チャンネルデバイスでは g_m が約 2S/mm と大きな値を示した。この原因として、速度オーバーシュートの影響が考えられる。図4-12に InN チャンネルに沿った電子の平均ドリフト速度を示す。ゲート長は 10, 50, 200nm に対応する。InN の定常状態でのピーク電子速度は約 4×10^7 cm/s であるが、ゲート長 50nm 以下では、定常状態のピーク速度を上回り、ゲート長 10nm では 6.4×10^7 cm/s に達することが確認された。

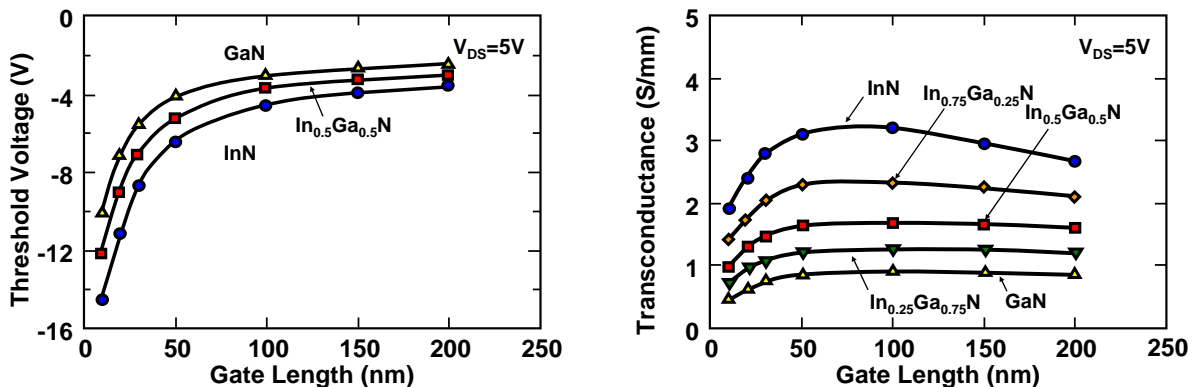


図4-11 しきい値電圧と相互コンダクタンスのゲート長依存性

図4-13にAllInN/InGaN ダブルヘテロ接合FETにおける電流利得遮断周波数のゲート長依存性を示す。ゲート長 200nm に対する各チャンネル材料 InN, In_{0.5}Ga_{0.5}N, GaN の電流利得遮断周波数はそれぞれ 300, 230, 160GHz となった。電流利得遮断周波数は相互コンダクタンス(g_m)とゲート容量(C_g)の比から求めた。チャンネル材料の In 組成の増加とともに、高周波特性の大幅な向上が確認できた。これは、先に示した直流特性(g_m)の向上によるところが大きい。ゲート長の短縮とともに、電流利得遮断周波数は劇的な改善を示した。特に InN チャンネルデバイスでは、ゲート長 50nm 以下で 1THz を超える電流利得遮断周波数を示した。しかし、極短ゲート化により短チャンネル効果の影響も強くなり、ゲート容量の減少は頭打ちとなる。GaN 及び低 In 組成 InGaN チャンネルデバイスでもゲート長 20nm 付近から電流利得遮断周波数は飽和傾向を示した。ゲート長 20nm では、チャンネルの In 組成を 50%以上に選ぶことで 1THz を超える電流利得遮断周波数が得られることが明らかとなった。

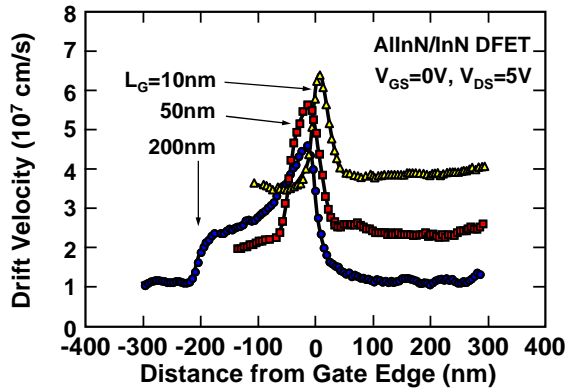


図4-12 電子の平均速度分布

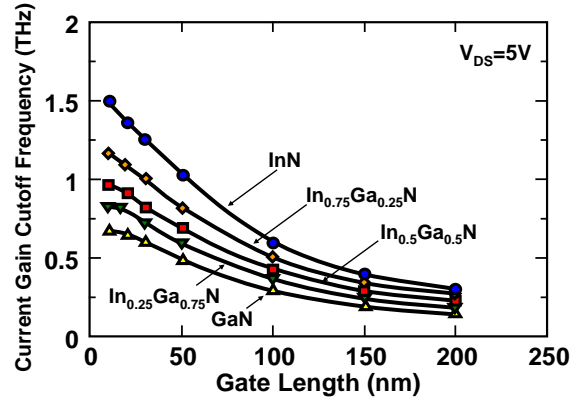


図4-13 遮断周波数のゲート長依存性

成果発表内訳

特許, 論文, 外部発表等の件数(内訳)

区分	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT [※] 出願	査読付き	その他	
年度						
H19FY	0件	0件	0件	1件	0件	4件
H20FY	1件	0件	0件	2件	0件	6件
H21FY	1件	0件	0件	2件	0件	2件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

IV 実用化の見通しについて

IV-1 高品質大口径単結晶基板の開発

(a)大口径種結晶の開発

古河機械金属株式会社

研究開発終了後、自社での開発を引き続き行い、最初の2、3年では大阪大学、豊田合成、日本ガイシと協力して、サンプル展開を図りながら、基板ユーザズベックとのマッチングを図る。また、低コスト化に向けて結晶作製プロセスの簡素化と歩留まり向上に注力する。さらに、転位密度や欠陥密度の低減に向けての自社開発を引き続き行う。その後ユーザの動向、市場規模を見ながら事業化の判断を行い、本研究開発終了後三年後を目処に、NaフラックスLPE法の種結晶数百枚/月の供給を行う。さらに、独自開発のGaN基板を含めて数千枚/月の規模での事業を見込んでいる。

年度	平成24年 (2012年)	平成25年 (2013年)	平成26年 (2014年)	平成27年 (2015年)	平成28年 (2016年)
サンプル展開			→		
歩留改善				→	
プロセス簡素化	→				
量産化技術検討			→		
結晶高品質化	→		→		
事業化				◇続行/中絶の判断	製品化

(b)高導電性窒化物単結晶基板の開発

豊田合成株式会社

本プロジェクト終了後、自社開発フェーズに移行して2年間の基板の高性能化に取り組み、平成24年度の実用化を目指す。本開発においてはプロジェクト目標を越えるマイルストーンを各年度に置き、着実な技術開発による高度化を図る。また、自社開発フェーズでは新たに量産化技術、基板化技術の課題を設定し、基板製造コストを考慮した開発を推進する。

さらに、パワーデバイスメーカーと協力してサンプルマッチングを行い、デバイス性能の立場から基板に対する課題の抽出・解決を行い、早期に基板実用化を実現する。

以上の取り組みにより平成26年度(2014年度)において、まず年間数百枚/年の規模で事業をスタートさせ、以後はパワーデバイスの市場にリンクさせて適宜設備増強を行い生産量の最適化を図る。

年度	平成23年 (2011年) 本プロジェクト 終了	平成24年 (2012年) 自社開発 フェーズI	平成25年 (2013年) 自社開発 フェーズII	平成26年 (2014年) 実用化
高品質化技術開発	転位密度 <10 ⁵ /cm ²	低転位化技術開発 <3×10 ⁴ /cm ²	→ <2×10 ⁴ /cm ²	転位密度 <1×10 ⁴ /cm ²
大口径化技術開発	基板サイズ 3~4インチ	バルク結晶 厚さ2mm化	→ 厚さ5mm化	4インチ 厚さ10mm化
導電性技術開発	比抵抗 <10 ⁻² Ω cm	低抵抗化技術開発 <5×10 ⁻³ Ω cm	→ <2×10 ⁻³ Ω cm	<10 ⁻³ Ω cm
量産化技術開発		開発設備導入	→	量産設備導入
基板化技術開発		基板化開発 設備導入	→	基板化 量産設備導入
量産化		サンプル マッチング	→	製品化

(c)高抵抗化窒化物単結晶基板の開発

日本ガイシ株式会社

プロジェクト終了後、自社開発研究に移行し、2年間で大口径化・導電性制御に関する残課題と、再現性・信頼性向上の課題を解決し、サンプル供試を開始する。この間、デバイスメーカーと協力して基板評価を実施し、実用化に向けての品質改善を進めると共に、4インチ高品質基板の量産要素技術検討および生産技術検討を行う。プロジェクト終了後3年目から、年間数百枚の規模での生産を開始し、パワーデバイス用基板市場にφ4インチの高品質 GaN 基板の供給することを目指す。

項目	年度								
	平成 19年 (2007)	~	平成 23年 (2011)	平成 24年 (2012)	平成 25年 (2013)	平成 26年 (2014)	平成 27年 (2015)	平成 28年 (2016)	
	← 研究開発			← 商品開発			→ 事業化		
①委託研究 (本プロジェクト)	→								
②委託研究終了			▼						
③商品開発研究			---	→					
④サンプル供試開始				○					
⑤品質改善				→					
⑥量産技術検討				→					
⑦事業化判断									▽
⑧設備投資							□		
⑨生産							→	→	
⑩販売							→	→	

IV-2 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発

(a)高In組成窒化物層成長技術

昭和電工株式会社

高周波通信用としての GaInN チャネル型電力トランジスタ用エピタキシャル材料としての実用化を目論む。民生用汎用マイクロ波デバイスとしての需要について、旺盛な需要がある場合に備えて、平成24年(2012年)より多数枚炉を導入し量産のための基礎技術開発をスタートする。平成25年はプロジェクトで得た技術を実用化するための特性向上・安定化技術の開発を行うとともに、市場調査を含め事業性を評価する。平成26年(2014年)よりサンプル出荷を開始、実用化に向けた技術課題の改善と、量産設備の導入を行う。平成27年(2015年)には量産化技術を確立し、製品化する。

GaInN はマイクロ波発振デバイスのチャネル層構成材料として有望である。窒化インジウム(InN)を含め高 In 組成の GaInN 薄膜成長技術は、発振周波数を更に高めた、テラヘルツ帯域の電力デバイスを実現するのに貢献できる可能性があるため、市場動向に注視し実用化、事業化をタイミングよく行う。

また、高 In 組成の GaInN 薄膜の MOVPE 成長技術は、電子デバイス産業分野のみでなく、化合物半導体光デバイス製品の実用化にも寄与できる。高 In 組成の GaInN 薄膜からは青よりも長波長の可視光を放射する発光層を構成するのに活用でき、従って、緑～赤帯域の高輝度 LED への応用展開を促せる。

開発項目 (高 In 組成 GaInN エピ材料)	平成 24 年 (2012 年)	平成 25 年 (2013 年)	平成 26 年 (2014 年)	平成 27 年 (2015 年)	平成 28 年 (2016 年)
○量産技術開発	多数枚炉開発	導入	量産設備	導入	
○エピ技術開発		エピ品質改善		量産技術開発	
○事業性判断		事業性評価			
○実用化		設備投資判断			
○量産化		サンプル出荷開始			製品化

(b)高 Al 組成窒化物層成長技術

住友電気工業株式会社

本プロジェクトで高品位の高 Al 組成 AlGaIn を開発した後は大口径窒化物半導体基板上の HEMT 用エピタキシャル膜の実用化を目指す。これは高い耐電圧と小さな動作抵抗といった大きな魅力を有する大電力駆動用の電子デバイスへの適用が可能である。ここで、電気機器の電力制御用インバータ等への採用を促進するためには低コスト化が重要な課題となる。エピ成長の低コスト化のためには多数枚化が必須となる。さらに電子デバイスの場合には光デバイスよりチップサイズが大きくなるためエピタキシャル膜の表面状態の問題が大きくなる。炉内のパーティクル落下等に起因する表面異常がデバイスの歩留を低下させる原因になるため、これの低減を図る必要がある。これらの改善に取り組んだ上で、本プロジェクトで開発した設備技術、成長技術を盛り込んだ多数枚量産 MOVPE 装置の開発を行い、エピタキシャル基板の低コスト化を進めて、市場の立ち上がりを見極めつつ製品の投入を計画する。

本プロジェクト終了後は実用的な多数枚 MOVPE 装置を2年程度で開発し、HEMT エピタキシャル基板の商品化を目指す。市場の立ち上がりとしては平成27年(2015年)、1000枚/月程度からの立ち上がりが期待できる。

開発項目	平成24年 (2012年)	平成25年 (2013年)	平成26年 (2014年)	平成27年 (2015年)
多数枚MOVPE装置の開発	設計	製作	導入	
量産用エピ開発		量産化条件出し	サンプル出荷	量産化

無極性 AlN 基板に関しては、本プロジェクトで低欠陥基板の開発が完了した後は、実用化に向けて加工技術を含めた大口径無極性 AlN 基板の量産化のための技術開発に取り組む。これらの開発には、プロジェクト終了後さらに3年程度の期間が必要と認識しており、平成 27 年(2015 年)頃には開発を完了して、高 Al 組成窒化物エピタキシャル膜成長用の基板市場に参入することを計画している。

結晶成長に関しては、成長炉の大型化、炉内温度分布制御の更なる向上等の技術開発が必要と想定している。そこで、本プロジェクトにて開発中の技術をベースに結晶の大口径化、均一性向上、低コスト化に向けて展開していく。一方、加工技術に関しても、高 Al 組成窒化物エピタキシャル膜成長用基板としての仕上げ加工技術を中心に、大面積化、均質化、歩留向上等を含めて開発を進める。その際、他材料の量産において社内に蓄積された技術と本プロジェクトで得られる技術の融合を図りながら、量産工程を確立していく計画である。

大電力素子用基板としては、無極性 AlN 基板は最も優れた性能を有すると予想され、基板市場において大きなシェアを獲得できると考えられる。AlN 基板市場の立ち上がりとしては平成 27 年(2015 年)頃を想定している。

IV-3 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価

(a)横型電子デバイスの評価

シャープ株式会社

当社は、エアコンや冷蔵庫、ソーラーシステム、液晶テレビ、携帯電話等の民生用エレクトロニクス商品、およびそれら商品に搭載される電子デバイスの製造を行なっている。京都議定書の発効や、省エネ性能の店頭表示など、世の中の環境保護機運や省エネ意識が高まる中、環境配慮型商品であることが商品価値を左右する時代になってきており、将来にわたる持続的な事業展開を図る上で、革新的な省エネを実現するデバイスの実現が重要なポイントになると考えている。

本プロジェクトの成果をインバータや高周波用等のパワーデバイスに活用し、エアコン、冷蔵庫、洗濯機、ソーラーパワーコンディショナーシステム、高周波デバイス等への適用を検討していくことにより、省エネ性能に優れた環境配慮型商品を実現し、民生用エレクトロニクス商品事業・部品事業の両面からの事業展開を目指す。

現在、インバータ用パワーデバイスにはIGBTやMOSFETなどのSiデバイスが用いられているが、電力損失の低減がSiの材料物性自体で律則される性能限界に近づきつつあり、この限界を克服する革新的な省エネデバイスが実現できれば、環境配慮型デバイスとして市場に受け入れられる可能性は高いと考える。また、高周波応用についても、既存のSiやGaAs系デバイスでは成しえない高周波・高出力・低消費電力性能により、次世代通信端末等における高速・大容量化を実現する基幹高周波デバイスとしての実用化が期待される。

プロジェクト終了後、基板の大口径化や低コスト化の推移を睨みながら、既存デバイスとのコストパフォーマンスメリットや信頼性等、実用化・事業化のために必要なポイントを明確にした上で、個別商品で年間数千万台～数億台の市場規模がある上記民生用エレクトロニクス商品、に組込まれるパワーデバイスとして、平成25年度(2013年度)以降の事業化を視野に入れて研究開発を推進していく。

	平成19年度-平成23年度 (2007年度-2011年度)	平成24年度以降 (2012年度以降)
計画	本プロジェクトの推進	実用化・事業化課題の明確化 (コスト, 性能, 信頼性) 平成25年度以降 事業化検討

(b)縦型電子デバイスの評価

豊田中央研究所

当社は、研究開発を業務とする会社であるため、本プロジェクトの成果を自社で事業化する立場には無い。本プロジェクトの成果は、GaN パワーデバイス開発に適用する予定であり、開発したパワーデバイスは、弊社と関連するグループ企業にて、平成 32 年(2020 年)前後のハイブリッド車用パワーデバイスとして実用化を目指す予定である。また本プロジェクトで開発された基板は、高性能パワーデバイスの基板として、実用化した基板メーカーから購入・活用し、開発に役立てる予定である。

	平成19年度-平成23年度 (2007年度-2011年度)	平成24年度以降 (2012年度以降)
計画	本プロジェクトの推進	グループ企業にてハイブリッド車用 パワーデバイスとして実用化をめざす 平成32年度前後 実用化目標

(c) 窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認

サンケン電気株式会社

当社は、平成24年度から実用化に向けたデバイスの検討を進める。実用化に向けては、デバイス構造や設計、プロセスの開発とデバイス特性向上以外に信頼性の確保、基板の安定入手、基板価格の低減、大口径化が重要な要素となる。また自動車応用などの高信頼性を要求される分野においては、ノーマリオフ型デバイスの実現、高温動作などが必要となる。

窒化物基板の特徴を活かした低オン抵抗、高耐圧、ノーマリオフ動作、高出力高周波などの高い性能を持つ電子デバイスの実現、基板の実用化に向けての見極め、高い信頼性の確保、量産化技術の構築などターゲットとするアプリケーションの要求に沿う性能と信頼性の確保を十分検討し、また市場調査を平行して進めることで、早期の市場投入を実現すべく開発を進める。基板作製技術等の向上により段階的に実用化されるとして、平成27年度(2015年度)以降の事業化を視野に入れて研究開発を推進していく。

実用化能力としては、弊社はパワー半導体と電源全般を専業としており、デバイスの開発、量産化能力を持ち、またディスクリートとしてのみならず窒化物電子デバイスに最適な周辺回路、モジュールなど電源用途として窒化物電子デバイスの高い能力を生かした製品の早期の実用化、市場投入を実現する能力を有している。

	平成19年度-平成23年度 (2007年度-2011年度)	平成24年度以降 (2012年度以降)
計画	本プロジェクトの推進	実用化に向けたデバイス検討 (コスト, 性能, 信頼性) 平成27年度以降 事業化目標

添付資料

・イノベーションプログラム基本計画

(別 添)

平成20・03・27産局第1号
平成20年4月1日

ITイノベーションプログラム基本計画

1. 目的

我が国が目指す高度情報通信ネットワーク社会の構築に向け、経済成長戦略大綱、IT新改革戦略、科学技術基本計画及び技術戦略マップ等に基づき、情報化の進展に伴うエネルギー消費量の増大等の課題にも考慮しつつ、その基盤となる情報通信機器・デバイス等の情報通信技術を開発し、実社会への利用を促進する。また、情報システム・ソフトウェアについて品質、信頼性及び生産性の向上を推進し、組込みソフトウェア産業強化、オープンソースソフトウェアを安心して活用するための環境整備、独創的な人材の発掘等、我が国産業競争力強化のための必要な基盤整備を実施することによって、ITの利活用の深化・拡大を図り、より豊かな国民生活を実現するとともに、我が国の経済活力の向上を図ることを目的とする。

2. 政策的位置付け

- 「経済成長戦略大綱」（2006年7月財政・経済一体改革会議。2007年6月改訂、経済財政諮問会議報告）
IT革新による競争力強化、IT革新を支える産業・基盤の強化に必要な研究開発の推進に対応
- 「第3期科学技術基本計画」（2006年3月閣議決定）
国家的・社会的課題に対応した研究開発の重点推進4分野である情報通信分野、分野別推進戦略（2006年3月総合科学技術会議）における重点分野である情報通信分野に位置づけられるもの。
- 「IT新改革戦略」（2006年1月高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部）
次世代のIT社会の基礎となる研究開発の推進等に対応。

3. 達成目標

- (1) 情報経済社会を形成する上で必要不可欠な基盤技術である情報通信機器・デバイス等に関しては、「革新的な技術の確立」と「その開発成果の普及促進」を図る。

【目標】

- ・情報通信機器・デバイス産業の付加価値額を、2020年度において、2007年度比で、約50%増加させる。
- ・半導体の微細化に係る革新的基盤技術の開発（テクノロジーノード45nm以下）
- ・情報家電の音声認識のタスク率（95%以上の達成）
- ・革新的な大型ディスプレイ技術の開発（消費電力を現状機器と比較して約50%以下）
- ・革新的なネットワーク機器技術の開発（消費電力を現状機器と比較して60%以下）

- (2) 経済社会システムの信頼性確保に大きく寄与する情報システム・ソフトウェアに関しては、品質、信頼性及び生産性の向上や産学官の開発リソースの連携強化により、「人材育成」と「ソフトウェア工学の開発」等を積極的に推進する。

【目標】

- ・情報サービス・ソフトウェア産業の付加価値額を、2015年度において、2004年度比で、約25%増加させる。
- ・組込みシステム等の不具合発生率（2011年度までに2006年度比50%減）

4. 研究開発内容 [プロジェクト]

－ 中 略 －

II. 省エネ革新

[i] 情報ネットワークシステムの徹底的省エネの実現

(1) グリーンITプロジェクト（運営費交付金）（再掲）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展によりネットワークを流れるデータ量が大幅に増加する中で、IT機器による消費電力量の大幅な増大に対応し、環境調和型IT社会の構築を図るため、個別のデバイスや機器に加え、ネットワーク全体での革新的な省エネルギー技術の開発を行う。

②技術目標及び達成時期

2012年度までに、IT機器・システムのエネルギー消費効率を2倍に向上させる基盤技術を開発する。

③研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 次世代高効率ネットワークデバイス技術開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、ネットワークで伝送されるデータ量の爆発的増加に伴い、関連機器の消費エネルギーが増大している中で、ネットワーク全体の消費電力量を抑制することが喫緊の課題であり、消費エネルギーの低減に大きく貢献するルータ・スイッチの高速化のための研究開発を実施するとともに、機器そのものの消費エネルギーを低減するための研究開発を実施する。

②技術的目標及び達成時期

2011年度までに、1チャンネルあたり40Gbps超の通信速度に対応するトラフィック計測・分析・管理技術や40Gbpsのインターフェース、さらなる通信速度向上（100Gbps超）を実現するハードウェア技術、SFQ（単一磁束量子）スイッチに関する基盤技術を開発する。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) ITSの規格化事業（第2フェーズ）

①概要

我が国ITS産業の振興と国際競争力強化に貢献するため、これまでの個別システム等の規格化から共通基盤の構築のための規格化に重点を移し、ITS情報通信基盤の規格化、情報収集・活用基盤の規格化、システム社会導入条件の整備等ISO/TC204に対応したITSの国際規格化等を実施。

②技術的目標及び達成時期

平成22年度までにITSに係る標準化案を作成しISOに対して提案又は国際規格として制定する。また自動車の電子化技術に関して、次世代では日本が主導をとるべく戦略を策定。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

[ii] 情報機器の徹底的省エネの実現

(1) 次世代大型低消費電力ディスプレイ基盤技術開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、次世代の大型液晶及び大型プラズマディスプレイに関する低消費電力ディスプレイを実現するための研究開発を行う。

②技術的目標及び達成時期

2011年度までに、液晶に関しては、高効率バックライト、革新的なTFTアレイプロセス技術・製造装置及び低消費電力型の画像処理エンジン等に係る技術を確立する。また、プラズマディスプレイに関しては、超低電圧駆動等に係る技術を確立する。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

[iii] 省エネを支えるプロセス基盤技術

(1) パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーを進めるために、シリコンよりも材料特性に優れたワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス機器システムの基盤技術の開発を行う。

②技術目標及び達成時期

2008年度までに、ワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス技術を開発する。

③研究開発期間

2006年度～2008年度

(2) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—うち窒化物系化合物半導体基盤・エピタキシャル成長技術の開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

窒化物系化合物半導体は日本が強みを有し、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、今後のIT社会を支えとなることを期待されている分野である。しかし、既存のバルク単結晶基板成長技術やエピタキシャル成長技術では、従来の半導体では実現できない領域で動作可能なハイパワー、超高効率デバイス性能を十分に引き出すには至っていない。

これを突破するため、大学あるいは研究所を拠点に材料メーカー、デバイスメーカー、装置メーカー等が相互連携して、窒化物半導体の結晶欠陥低減技術やナノ構造作製技術等の革新を図り、これらデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減の実現を図る。

②技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

●基板技術（GaN、AlNバルク結晶作製技術）

- ・ 口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。

●エピ技術（エピタキシャル成膜及び計測評価技術）

- ・ 低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
- ・ 高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
- ・ 高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

③研究開発期間

2007年度～2011年度

— 中 略 —

5. 政策目標の実現に向けた環境整備

【法律】

- ・ 情報処理の振興を目的に、昭和45年に情報処理の促進に関する法律が制定。
- ・ 半導体集積回路の回路配置の適正な利用の確保を目的に、昭和63年に半導体集積回路の回路配置に関する法律が制定。

【税制】

- ・ 情報セキュリティ強化を確保しつつ生産性の向上を図るためのIT投資に対し、35%特別償却又は7%税額控除（情報基盤強化税制）。
- ・ ソフトウェアを含む機械装置等に対し、30%特別償却又は7%税額控除（中小企業投資促進税

制)。

【国際標準化】

各プロジェクトで得られた成果のうち、標準化すべきものについては、適切な標準化活動（国際規格（ISO/IEC）、日本工業規格（JIS）、その他国際的に認知された標準の提案等）を実施する。特に、産学連携ソフトウェア工学の実践における組込みソフトウェア開発については、国際標準の動向を踏まえた開発を促進することにより、プロジェクトの成果の幅広い普及を促進する。

【関係機関との連携】

各プロジェクトのうち、研究開発を効率的・効果的に推進する観点から関係機関との連携が必要なものについては、これを積極的に行う。

但し、関係機関が行う研究開発等の独自性を妨げるものではない。

【導入普及促進】

成果の普及を図るため、これまでの終了プロジェクトの成果の全部または、一部についてはオープンソースソフトウェアとして公開する。

【プロジェクト等間の連携について】

高信頼な組込みソフトウェアの開発では、ソフトウェアエンジニアリングセンター（SEC）において提供される各種エンジニアリング手法を開発現場に適用し、当該技術の効果を明らかにしながら開発を進める。

【その他】

・グラント事業

NEDOの産業技術研究助成事業を活用し、萌芽的・革新的な情報通信関係の技術シーズの発掘を行う。また、ソフトウェア分野の独創的な技術やビジネスシーズを有した人材を発掘する。

・事業終了後の連携

産学官連携の研究体制を通して活動を行い、これらの事業の終了後も各分野の研究者・技術者が有機的に連携し、更に新たな研究を作り出す環境を構築する。

・人材育成

ハードウェア分野においては、出来る限り大学との連携を重視し、各種フェロシップ制度を活用しつつ、最先端の情報通信基盤研究現場への学生等の参画を推進することにより次世代の研究開発人材の育成を図る。また、ソフトウェア分野における独創的な人材を発掘し、育成するとともに、優秀な人材が集うコミュニティを構築するなど、発掘された人材の才能をさらに伸ばすための取組を進める。

・広報／啓発

毎年10月を「情報化月間」としている。

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7. 改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画を制定。
- (2) 平成14年2月28日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成12・12・27工総第12号）は廃止。
- (3) 平成15年1月31日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成14・02・25産局第17号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基

本計画（平成14・02・25産局第18号）は、廃止。

- (4) 平成15年3月10日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画、次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成15・01・29産局第1号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・01・29産局第2号）は、廃止。
- なお、情報通信機器高度化プログラム基本計画（平成15・01・29産局第1号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・01・29産局第2号）の一部は、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画へ移行。
- (5) 平成16年2月3日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信機器高度化プログラム基本計画（平成15・03・07産局第14号）、次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・03・07産局第7号）、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画（平成15・03・07産局第4号）は、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画に統合することとし、廃止。また、情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成15・03・07産局第14号）は、廃止。
- (6) 平成17年3月25日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成16・02・03産局第1号）は廃止。また、平成17年3月31日付け、情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成16・02・03産局第2号）は廃止。
- (7) 平成18年3月31日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成17・03・25産局第7号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成17・03・25産局第6号）は廃止。
- (8) 平成19年4月2日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成18・03・31産局第4号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成18・03・31産局第5号）は廃止。
- (9) 平成20年4月1日付け、ITイノベーションプログラム基本計画を制定。情報通信機器高度化・デバイス基盤プログラム基本計画（平成19・03・12産局第7号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成19・03・12産局第8号）は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。

ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

このプログラムは、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を可能とすることを目的とする。

2. 政策的位置付け

○第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

- ・「ナノテクノロジー・材料分野」は、特に重点的に研究開発を推進すべき分野（重点推進4分野）の一つに指定されていて、優先的に資源配分することとされている。
- ・我が国の材料技術は、基礎研究から応用研究、素材、部材の実用化に至るまでの全ての段階において世界のトップレベルを堅持しており、我が国製造業の国際競争力の源泉となっている。

○「イノベーション25」（2007年6月閣議決定）

- ・「ナノテクノロジー・材料分野」は、中長期的に取り組むべき課題として、「1. 生涯健康な社会形成」、「2. 安全・安心な社会形成」、「4. 世界的課題解決に貢献する社会形成」、及び「5. 世界に開かれた社会形成」の分野に位置付けられている。
- ・所要の措置を講じていくことが必要である事項として以下の点が指摘されている。
 - ・学際領域・融合領域における教育等人材育成、拠点形成
 - ・社会受容を促すための積極的な取り組み
 - ・知的財産確保のための戦略的な取り組み

○「経済成長戦略大綱」（2006年7月財政・経済一体改革会議）

- ・「我が国の国際競争力の強化」の取り組みとして、高度な部品・材料産業やモノ作り中小企業の強化が掲げられている。
- ・「技術戦略マップ」の活用等により、ユーザー企業との垂直連携による研究開発を推進することを通して、我が国経済発展の基盤である高品質、高性能な部品・材料産業の強化を図ることが今後の取組として記載されている。

○「新産業創造戦略2005」（2005年6月経済産業省）

- ・部材分野は、新産業群の創出を支える共通基盤技術として位置づけられている。
- ・「高度部材・基盤産業」の集積を形成していることが、「ものづくり」に不可欠な基盤技術のネットワーク化を通じた現場レベルでの迅速かつ高度な摺り合わせを可能としており、我が国「ものづくり」の強みの源泉となっていると記載されている。

3. 達成目標

- ・世界に先駆けて、ナノテクノロジーを活用した非連続な技術革新を実現する。
- ・我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追従を許さない競争優位を確保するとともに部材産業の付加価値の増大を図る。
- ・ナノテクノロジーや高機能部材の革新を先導することで、これら部材を活用した情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの幅広い産業の付加価値の増大を図る。
- ・希少金属などの資源制約の打破、圧倒的な省エネルギー社会の実現など、解決困難な社会的課題の克服を目指す。

4. 研究開発内容

[プロジェクト]

I. ナノテクノロジーの加速化領域

ナノテクノロジーを活用した不連続な技術革新を加速・促進する。

(1) 異分野異業種融合ナノテクチャレンジ（運営費交付金）

①概要

革新的なナノテクノロジーを活用し、川上と川下の連携、異業種異分野の連携で行う部材開発に

対して支援を行い、燃料電池、ロボット、情報家電、健康・福祉・機器・サービス、環境・エネルギー・機器・サービスの5分野に資するキーデバイスの実現を目指す。

②技術目標及び達成時期

マテリアル・プロセス研究、加工・計測技術研究、昨今の環境意識向上に対応した研究、社会課題を解決するための基盤技術研究に加え、異分野等の融合研究を推進することにより、2011年度までにナノテクノロジーの産業化のための基盤的技術を確立し、実用化を図る。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) ナノテク・先端部材実用化研究開発（運営費交付金）

①概要

新産業創造戦略の趣旨に則り、革新的なナノテクノロジーを活用し、川上と川下の連携、異業種・異分野の連携で行うデバイス化開発の支援を行うため、

○ナノテクノロジー活用による材料・部材の高度化を図る先導的研究開発（ステージⅠ）

○ナノテクノロジー研究成果の部材等への課題設定型実用化により目指した開発支援（ステージⅡ）

について提案公募を実施する。

②技術目標及び達成時期

2010年頃に想定される半導体微細加工の限界を克服するため、分子・原子を1つずつ制御し部品部材に組み上げる「ボトムアップ型」のナノテクノロジーなど革新的なナノテクノロジー等の活用により、情報家電・ロボット、燃料電池等新規産業5分野等において、従来の性能・効率を大幅に改善するナノテク・先端部材技術を開発し、我が国が優位にあるナノテクノロジーを基盤とした国際的な産業競争力を強化することを目標とする。

③研究開発期間

2005年度～2011年度

II. 情報通信領域

ナノテクノロジーや革新的部材開発技術を駆使して既存技術の微細化の壁を突破し、電子デバイス・光デバイスで世界をリードするとともに、高度化された製造技術の開発を行う。

(1) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—うち新材料・新構造ナノ電子デバイス

①概要

ナノエレクトロニクスは、ナノテクノロジーの最大の応用領域の一つであり、デジタル・デバイスのCMOS構造というアーキテクチャは、優れた工学概念である。また、これまでの半導体技術の微細化に基づく高集積化・高速化・低消費電力化の追求は、シリコン材料をベースとするプレーナ構造を基本とした微細加工プロセスの高度化にあった。

しかし、さらなる微細化によるデバイスのパフォーマンス向上は物理的限界に直面しつつあり、問題は、FETを、シリコン材料をベースとして作製することにより現出していると考えられる。

そのため、次世代の電子デバイスのために「シリコンで培った微細化技術やデバイス原理をこれまで同様に活用しながら、シリコンという材料の物理的限界を突破するための“新材料”や“新(デバイス)構造”を実現すること」、すなわち、「New Nano Materials/Structure on Silicon for “More Moore”」の半導体技術を、ナノテクノロジーを最大限に活用することによって研究開発を行い、将来の産業応用への目を見出していく取りかかりとする。

②技術目標及び達成時期

2011年度までに、産業界が10年後を見据えた将来の電子デバイスを開発する際に、産業技術として活用できるかどうかの実現可能性を見極め、また技術シーズを確立する。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—うち窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

窒化物系化合物半導体は日本が強みを有し、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、

今後のIT社会を支えとなることを期待されている分野である。しかし、既存のバルク単結晶基板成長技術やエピタキシャル成長技術では、従来の半導体では実現できない領域で動作可能なハイパワー、超高効率デバイス性能を十分に引き出すには至っていない。

これを突破するため、大学あるいは研究所を拠点に材料メーカー、デバイスメーカー、装置メーカー等が相互連携して、窒化物半導体の結晶欠陥低減技術やナノ構造作製技術等の革新を図り、これらデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減の実現を図る。

②技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

1) 基板技術 (GaN, AlNバルク結晶作製技術)

- ・口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。

2) エピ技術 (エピタキシャル成膜及び計測評価技術)

- ・低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
- ・高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
- ・高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

③研究開発期間

2007年度～2011年度

－ 中 略 －

5. 政策目標の実現に向けた環境整備 (関連施策)

ナノテクノロジーは、情報通信、環境、エネルギーなどの分野における科学技術の進歩や課題解決に貢献する重要な技術シーズである。そのため、ナノテクノロジーの研究開発と一体となった関連施策を実施することで、その成果を市場に出していくことが重要である。主な関連施策を、以下に示す。

[技術戦略マップ]

- ・NEDO及び経済産業省では、技術戦略マップを策定、毎年改訂し、ナノテク・部材分野の将来の方向性を見定めながら、合理的かつ効果的な研究開発プロジェクトを推進しているところ。また、技術戦略マップを活用して、多様な連携 (川上川下の垂直連携、異業種間の水平連携など) による研究開発を促進、支援し、当該分野の技術革新を促進する。

[サンプル提供・実用化促進]

- ・NEDOでは、実施するナノテクノロジー関連の研究開発プロジェクト成果のサンプルを対象として、それらを活用した用途の開発、実用化ないし製品化提案を有する企業とのマッチングを図ることで、プロジェクトの事業化を促進する取組みを実施しているところ。

[基準・標準化]

- ・ナノテクノロジーの標準化については、研究開発プロジェクトを推進する上で、適切な活動 (国際規格ISO/IEC、日本工業規格JIS、その他) を実施し、我が国のナノテクノロジー分野の研究開発、産業活動の効率向上を図り、研究開発の成果が社会で普及する環境を整備する意味でも重要である。これまでの主な取組みについては、下記のとおり。
- ・2005年5月にナノテクノロジーの標準化に向けてISO/TC229の設立がされ、「用語と命名法」、「計測とキャラクターゼーション」、「健康・安全・環境」の3つのWGにおいて、国際標準化の策定に向けて議論が開始された。
- ・また、2007年6月にシンガポールで開催された第5回総会以降、「材料規格」の分科会の設立に向けて対応しているところ。
- ・さらに、2006年9月にはナノテクノロジーに関する電気電子技術の標準化に向けてIEC/TC113が設立され、「用語と命名法□」、「計測とキャラクターゼーション□」、「性能評価」の3つのWGにおいて、国際標準化の策定に向けて議論が開始されている。(なお、□はISO/TC229とのジョイントWGとなっている。)

[広報]

- ・ナノテクノロジーに関する先端技術及び製品等の世界最大の展示会である「nano tech」が毎年日本で開催されている。2002年に開催された第1回以降、出展者来場者ともに増加傾向にあり、近年は海外、とくにヨーロッパ・アジア等の出展が目立つようになってきている。

[社会受容]

- ・ナノテクノロジーの社会受容に対する取組みは、ナノテクノロジーの産業化を推進するため、例えば工業ナノ粒子のキャラクタリゼーション技術や人の健康や環境に及ぼす影響など、潜在的な課題に関する知見を蓄積する取組みが重要である。
- ・経済産業省では、2006年度から「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」を開始し、工業ナノ粒子の有害性評価手法、また、そのリスク評価手法の確立を目標としたプロジェクトを開始しているところ。

[人材育成]

- ・経済産業省では、「製造中核人材育成事業」を実施しており、産学連携による波及効果の高い人材育成プログラムを開発、実践している。ナノテクノロジー関連の人材育成プログラムも複数実施しているところ。

(例) ナノテク製造中核人材の養成プログラム

概要：情報家電、燃料電池、ロボット、医療機器、バイオ等の応用分野において、その産業の基盤と創出を支える中堅企業を対象として、「基礎加工技能・技術、特殊な要素技能・技術に習熟し、製造技術の高度化を図る人材」及び「豊富なナノ加工プロセスの知識や先端機器を使いこなすノウハウ等を習熟し、製造現場の技能・技術を統括できる人材」を育成するもの。

- ・NEDOでは、我が国の産業技術の発展のため、先端分野や融合分野の技術を支える人材の育成と、人的交流の面から産学連携を促進するための「場」の形成を促進する取組みを実施している（NEDO特別講座）。具体的には、優れた成果を生み出しつつあり、大学が技術の中核となっている研究開発プロジェクトをコアプロジェクトとし、そのプロジェクトリーダーの所属大学に拠点を設置し、関連技術の人材育成、人的交流の拡大、周辺研究の実施を行うもの。ナノテクノロジー関連の研究開発プロジェクトも複数実施しているところ。

[他省庁との連携]

- ・総合科学技術会議／連携施策群において、「ナノバイオテクノロジー」「ナノテク研究推進と社会受容」が設置され、関係省庁と連携して実施しているところ。
- ・経済産業省が実施する研究開発プロジェクトにおいては、文部科学省など他省庁との連携の可能性について検討を行い、研究開発プロジェクトの立案、推進しているところ。

(例) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－うち新材料・新構造ナノ電子デバイスプロジェクト、希少金属代替材料開発プロジェクト など

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7. 改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け制定。
- (2) 平成14年2月28日付け制定。材料ナノテクノロジープログラム基本計画（平成12・12・27工総第16号）は、廃止。
- (3) 平成15年3月10日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成14・02・25産局第8号）は、廃止。
- (4) 平成16年2月3日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成15・03・07産局第1号）は、廃止。
- (5) 平成17年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成16・02・03産局第7号）は、廃止。
- (6) 平成18年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成17・03・25産局第4号）は、廃止。
- (7) 平成19年4月2日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成18・03・31産局第13号）は、廃止。
- (8) 平成14年2月28日付け制定。
- (9) 平成15年3月10日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成14・02・25産局第9号）は、廃止。
- (10) 平成16年3月7日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成15・03・07産局第5号）は、廃止。
- (11) 平成17年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成16・03・07産局第5号）は、廃止。
- (12) 平成18年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成17・03・25産局第3号）は、廃止。
- (13) 平成19年4月2日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成18・03・31産局第14号）は、廃止。
- (14) 平成20年4月1日付け、ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成19・03・20産局第1号）および革新的部材プログラム基本計画（平成19・03・19産局第4号）は、本イノベーションプログラム基本計画に統合することとし、廃止。

エネルギーイノベーションプログラム基本計画

1. 目的

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが不可欠である。他方、エネルギー技術開発は、長期間を要するとともに大規模投資を伴う一方で将来の不確実性が大きいことから、民間企業が持続的な取組を行うことは必ずしも容易ではない。このため、政府が長期を見据えた将来の技術進展の方向性を示し、官民双方がこの方向性を共有することで、将来の不確実性に対する懸念が緩和され、官民において長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能となる。以下に5つの政策の柱毎に目的を示す。

1-I. 総合エネルギー効率の向上

1970年代以来、官民をあげて省エネルギーに取り組み、産業構造の転換や新たな製造技術の導入、民生機器の効率改善等により世界最高水準の省エネルギーを達成している。今後、「新・国家エネルギー戦略」に掲げる、2030年までにGDPあたりのエネルギー利用効率を約30%向上を実現していくためには、産業部門はもとより、全部門において、総合エネルギー効率の向上に資する技術開発とその成果の導入を促進する。

1-II. 運輸部門の燃料多様化

ほぼ100%を石油に依存する運輸部門は、我が国エネルギー需給構造上、最も脆弱性が高く、その需給構造の次世代化は、将来に向けた早急な対策が不可欠な課題となっている。

「新・国家エネルギー戦略」に掲げる目標（2030年に向け、運輸部門の石油依存度が80%程度となることを目指す）の実現のためにも、官民が中長期的な展望・方向性を共有しつつ、技術開発と関連施策を推進する。

1-III. 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーは、エネルギー源の多様化や地球温暖化対策の観点から重要である。しかし、現時点では経済性や出力安定性といった普及へ向けての課題が存在する。

そのため、これらの課題解決に向けた技術開発の推進及び新エネルギーの導入促進のための関連施策の実施により、更なる新エネルギーの普及を推進する。

1-IV. 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

原子力発電は供給安定性に優れ、運用時にCO₂を排出しないクリーンなエネルギー源である。安全確保を大前提に核燃料サイクルを含む原子力発電を着実に推進する。

1-V. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

化石燃料資源の大宗を輸入に依存する我が国にとって、その安定供給の確保は国家安全保障に直結する課題である。このため、石油・天然ガス等の安定供給確保を目指し、我が国企業による資源国における資源開発等に対する支援等の施策を進めるとともに、その有効かつクリーンな利用を図る。

2. 政策的位置付け

- エネルギー基本計画（2007年3月閣議決定）

重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及びその施策として、

 1. 総合エネルギー効率の向上に資する技術
 2. 原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保に資する技術
 3. 運輸部門のエネルギー多様化に資する技術
 4. 新エネルギーに関する技術
 5. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用に資する技術

以上が位置づけられている。
- 新・国家エネルギー戦略（2006年5月）

世界最先端のエネルギー需給構造の実現を図るため

 1. 省エネルギーフロントランナー計画
 2. 運輸エネルギーの次世代化計画
 3. 新エネルギーイノベーション計画
 4. 原子力立国計画

以上の計画が位置づけられている。また、資源外交、エネルギー環境協力の総合的な強化を図るため、「総合資源確保戦略」が位置づけられている。
- 第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

国の存立にとって基盤的であり国として取り組むことが不可欠な研究開発課題を重視して研究開発を推進する「推進4分野」であるエネルギー分野、分野別推進戦略（2006年3月総合科学技術会議）における「推進4分野」であるエネルギー分野に位置づけられている。
- 経済成長戦略大綱（2006年7月財政・経済一体改革会議）

資源・エネルギー政策の戦略的展開として

 1. 省エネルギーフロントランナー計画
 2. 次世代自動車・燃料イニシアティブ等による運輸エネルギー次世代化
 3. 新エネルギーイノベーション計画
 4. 原子力立国計画
 5. 資源外交、環境・エネルギー協力等の総合的な強化

以上が位置づけられている。
- 京都議定書目標達成計画（2005年4月閣議決定）

「京都議定書の約束を達成するとともに、更に「脱温暖化社会」に向けて長期的・継続的な排出削減を進めるには、究極的には化石燃料への依存を減らすことが必要である。環境と経済の両立を図りつつ、これらの目標を達成するため、省エネルギー、未利用エネルギーの利用等の技術革新を加速し、効率的な機器や先進的なシステムの普及を図り、世界をリードする環境立国を目指す。」とされている。

3. 達成目標

3-I. 総合エネルギー効率の向上

転換部門における「エネルギー転換効率向上」、産業部門における「製造プロセス向上」、民生・運輸部門における「省エネルギー」などにより、エネルギー消費効率を2030年度までに少なくとも30%改善することを目指す。

3-II. 運輸部門の燃料多様化

バイオマス由来燃料、GTL、BTL、CTLなどの新燃料、電気自動車や燃料電池自動車などの導入により、現在ほぼ100%の運輸部門の石油依存度を2030年までに80%程度とすることを目指す。

3-III. 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーの技術開発や燃料電池など革新的なエネルギー高度利用を促進することにより、新エネルギー等の自立的な普及を目指すことで、エネルギー源の多様化及び地球温暖化対策に貢献する。

3-IV. 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

2030年以降においても、発電電力量に占める比率を30～40%程度以上とすることを目指すため、高速増殖炉サイクルの早期実用化、既設軽水炉代替へ対応する次世代軽水炉の開発、軽水炉技術を前提とした核燃料サイクルの確立、放射性廃棄物対策などの技術開発を推進する。

3-V. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

石油・天然ガスの化石燃料の安定供給確保を目指し、資源獲得能力の強化に資する先端的な技術開発を推進するとともに、環境負荷低減のために化石燃料の効率的かつクリーンな利用を促進するための技術開発・導入を目指す。

4. 研究開発内容

4-I. 総合エネルギー効率の向上

— 中 略 —

4-I-vi. 次世代省エネデバイス技術

(1) パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発 (運営費交付金)

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーを進めるために、シリコンよりも材料特性に優れたワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス機器システムの基盤技術の開発を行う。

②技術目標及び達成時期

2008年度までに、ワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス技術を開発する。

③研究開発期間

2006年度～2008年度

(2) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 —うち窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発 (運営費交付金)

①概要

窒化物系化合物半導体は日本が強みを有し、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、今後のIT社会を支えとなることを期待されている分野である。しかし、既存のバルク単結晶基板成長技術やエピタキシャル成長技術では、従来の半導体では実現できない領域で動作可能なハイパワー、超高効率デバイス性能を十分に引き出すには至っていない。

これを突破するため、大学あるいは研究所を拠点に材料メーカー、デバイスメーカー、装置メーカー等が相互連携して、窒化物半導体の結晶欠陥低減技術やナノ構造作製技術等の革新を図り、これらデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減の実現を図る。

②技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

- ・ 基板技術 (GaN、AlNバルク結晶作製技術)

- 口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。

- ・ エピ技術 (エピタキシャル成膜及び計測評価技術)

- 低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
- 高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
- 高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 次世代低消費電力半導体基盤技術開発 (MIRAI) (運営費交付金)

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード (微細化レベル) 45nm以細の次世代低消費電力半導体を実現するため、微細加工の基盤技術やマスク (半導体素子製造過程で用いる原板) の低コスト化・製造時間短縮に必要な基盤技術の開発等を行う。

②技術目標及び達成時期

2010年度までに、マスク設計・描画・検査の各工程に共通的なマスクデータ処理技術、繰り返しパターンやパターン重要度を利用した描画・検査高速化技術等の基本的な開発及びEUVLマスク基盤技術として、許容欠陥の指標明確化、ブランクスの位相欠陥検査技術の確立等を完了する。

③研究開発期間

2001年度～2010年度

(4) 半導体アプリケーションチッププロジェクト（運営費交付金）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、情報通信機器、特に、情報家電の低消費電力化を実現できる半導体アプリケーションチップ技術の開発を行う。

②技術目標及び達成時期

2009年度までに、情報家電の低消費電力化を実現できるアプリケーションチップ技術を開発する。

③研究開発期間

2003年度～2009年度

(5) 次世代高度部材開発評価基盤の開発（CASMAT2）（運営費交付金）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。半導体産業分野で、集積回路の消費電力低減に必要な配線形成用各種材料等の開発のネックとなっているナノレベルでの材料間の相互影響を評価可能な統合部材開発支援ツールを開発する。これにより、集積回路の種類やデザインルールに応じて、配線形成用各種材料とプロセスの最適な組み合わせの提案技術（統合的材料ソリューション提案技術）を確立する。

②技術的目標及び達成時期

2008年度までに、半導体材料開発に貢献する材料評価基盤を構築するとともに、上記の統合的材料ソリューション提案技術を確立する。また、本プロジェクトを通して得られた基礎データ等については、プロジェクト実施期間中にデータを体系的に整理し、幅広く社会に提供を図る。

③研究開発期間

2006年度～2008年度

(6) 次世代プロセスフレンドリー設計技術開発（運営費交付金）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード45nm以降の半導体に対応するSoC(System on Chip)設計技術を開発する。具体的には、テクノロジーノード45nm以細の半導体の共通設計基盤技術開発として、DFM(Design For Manufacturing)基盤技術を中核とした設計及び製造の全体最適を確保する全く新しいSoC製造フローを開発する。

②技術目標及び達成時期

テクノロジーノード45nm以細のSoC開発において製造性を考慮した共通設計基盤技術を確立し、システムLSIデバイスの省エネルギーを実現するとともに、設計生産性を従来予想に比べ2倍にすることを目標とする。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

— 中 略 —

5. 政策目標の実現に向けた環境整備（成果の実用化、導入普及に向けた取組）

5-I. 総合エネルギー効率の向上

- 事業者単位の規制体系の導入
- 住宅・建築物に係る省エネルギー対策の強化
- セクター別ベンチマークアプローチの導入と初期需要創出（高効率機器の導入補助等）
- トップランナー基準の対象機器の拡充等
- アジアにおける省エネルギー対策の推進を通じた我が国の国際競争力の向上

- 国民の省エネルギー意識の高まりに向けた取組

5-Ⅱ. 運輸部門の燃料多様化

- 公共的車両への積極的導入
- 燃費基準の策定・改定
- アジアにおける新エネルギー協力
- 国際標準化による国際競争力向上

5-Ⅲ. 新エネルギー等の開発・導入促進

- 事業者支援補助金等による初期需要創出
- 新エネルギーベンチャービジネスに対する支援の拡大
- 新エネルギー産業構造の形成
- 電気事業制度・ガス事業制度の在り方の検討

5-Ⅳ. 原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保

- 電力自由化環境下での原子力発電の新・増設の実現
- 資源確保戦略の展開
- 次世代を支える人材育成
- 中小型炉の海外市場への展開、我が国原子力産業の国際展開支援
- 原子力発電拡大と核不拡散の両立に向けた国際的枠組み作りへの積極的関与
- 国と地域の信頼強化

5-Ⅴ. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

- 資源国等との総合的な関係強化（研究開発の推進・協力、人材育成・技術移転、経済関係強化など）
- 化石燃料のクリーンな利用の開拓

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金による実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したもの）は、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

また、事業名に（採択テーマ）と記載された事業は、提案公募事業により採択されたテーマを記載したものであり、その採択や評価等は、提案公募事業の実施機関の責任の下、実施されるものである。

7. 改訂履歴

- (1) 平成16年7月7日付け、省エネルギー技術開発プログラム基本計画、新エネルギー技術開発プログラム基本計画、燃料技術開発プログラム基本計画、電力技術開発プログラム基本計画、原子力技術開発プログラム基本計画制定。固体高分子形燃料電池／水素エネルギー利用プログラム基本計画（平成16・02・03産局第6号）は、新エネルギー技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (2) 平成17年3月31日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成16・06・04産局第8号）、新エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成16・06・04産局第10号）、燃料技術開発プログラム基本計画（平成16・06・04産局第12号）、電力技術開発プログラム基本計画（平成16・06・04産局第11号）、原子力技術開発プログラム基本計画（平成16・06・04産局第13号）は、廃止。
- (3) 平成18年3月31日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成17・03・25産局第14号）、新エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成17・03・25産局第9号）、燃料技術開発プログラム基本計画（平成17・03・25産局第17号）、電力技術開発プログラム基本計画（平成17・03・25産局第12号）、原子力技術開発プログラム基本計画（平成17・03・25産局第13号）は、廃止。また、次世代低公害車技術開発プログラム基本計画（平成17・03・29産局第2号）は、省エネルギー技術開発プログラム基本計画及び燃料技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (4) 平成19年4月2日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成17・03・31産局第19号）、新エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成18・03・31産局第15号）、燃料技術開発プログラム基本計画（平成18・03・31産局第18号）、電力技術開発プログラム基本計画（平成18・03・31産局第17号）、原子力技術開発プログラム基本計画（平成18・03・31産局第16号）は、廃止。
- (5) 平成20年4月1日付け、エネルギーイノベーションプログラム基本計画制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成19・03・26産局第1号）、新エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成19・03・20産局第4号）、燃料技術開発プログラム基本計画（平成19・03・19産局第7号）、電力技術開発プログラム基本計画（平成19・03・16産局第3号）、原子力技術開発プログラム基本計画（平成19・03・23産局第2号）は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。

・プロジェクト基本計画

(エネルギーイノベーションプログラム・ナノテク・部材イノベーションプログラム・ITイノベーションプログラム)

「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発
－窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発」基本計画

ナノテクノロジー・材料技術開発部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

エネルギー資源の約8割を海外に依存する我が国にとって、これを効率的に利用すること、即ち「省エネルギー」を図ることは、エネルギー政策上の重要な課題である。このため更なる省エネルギー技術の開発・導入を進め、もって我が国におけるエネルギーの安定供給の確保を図ることを目的とする「エネルギーイノベーションプログラム」の一環として本プロジェクトを実施する。

また21世紀の革新的技術として、情報、環境、安全・安心、エネルギー等の広範な分野の基盤技術である材料技術を根幹から変貌させることが期待されるナノテクノロジー（物質の構造をナノレベルで制御することにより、機能・特性の向上や新機能の発現を図る材料技術）の基盤技術を構築することを目的とする「ナノテク・部材イノベーションプログラム」及びITの利活用の深化・拡大を図り、より豊かな国民生活を実現するとともに、我が国の経済活力の向上を図ることを目的とする「ITイノベーションプログラム」の一環としても本プロジェクトを実施する。

高周波デバイス、パワーデバイス等の高性能電子デバイスは、今後の21世紀社会を支える情報家電、コンピュータ、情報通信機器のみならず自動車、医療機器など極めて広範な分野の製品の高機能化や制御を実現する中核的役割を果たす存在であり、それを実現する材料として窒化物半導体に大きな期待が寄せられている。

しかしながら既存のバルク半導体単結晶成長技術やエピタキシャル成長技術は限界に達し、これらデバイス用に十分な品質の結晶作製に対応できず、その実用化に大きな制約となっている。

このため本プロジェクトでは従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子などの作製に必要な窒化物半導体結晶成長技術の確立を目指し、

- ① 高品質大口径単結晶基板の開発
- ② 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発
- ③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価

に取り組むことにより、我が国のエネルギー消費量削減に大きく貢献することを目的とする。

(2) 研究開発の目標

- ① 高品質大口径単結晶基板の開発

中間目標：平成21年度

2 インチ単結晶有極性面、及び無極性面の最適育成条件の検討を行い、前者では転位密度 $<10^5 \text{ cm}^{-2}$ 、後者では転位密度 $<10^6 \text{ cm}^{-2}$ の基板を実現する。またそれらの伝導度制御として、導電性基板では比抵抗 $<10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$ 、高抵抗基板では比抵抗 $>10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ の基板を実現する。同時に3インチ及び4インチ結晶大型化に必要な要素技術を明らかにする。

最終目標：平成23年度

4インチ有極性単結晶基板、及び3～4インチ無極性単結晶基板を実現し、前者では転位密度 $<5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 、後者では転位密度 $<10^5 \text{ cm}^{-2}$ 、積層欠陥密度 $<10^3 \text{ cm}^{-1}$ の特性を得る。また、それらの伝導度制御として、導電性基板では比抵抗 $<10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 、高抵抗基板では比抵抗 $>10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ の特性を得る。

② 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発

中間目標：平成21年度

高品質大口径ウエハのエピタキシャル成長のための要素技術を開発するとともに、口径2インチの有極性、及び無極性窒化物半導体バルク基板上において、以下の低欠陥高品質 GaN 及び混晶エピ層を実現する。

AlGa_xIn_{1-x}N 混晶エピ成長層において、Al 又は In 組成 $0.5 \leq x \leq 0.2$ で

転位密度 $<10^8 \text{ cm}^{-2}$

ドーピング不純物濃度 N型 $>10^{18} \text{ cm}^{-3}$ P型 $>10^{17} \text{ cm}^{-3}$

面内均一度：厚み $\pm 5\%$ 、組成： $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$

また、GaN ホモエピ成長層において、

残留ドナー濃度 $<5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ 、

転位密度：有極性基板上で $<10^5 \text{ cm}^{-2}$ 、無極性基板上で $<10^6 \text{ cm}^{-2}$

面内均一度：厚み $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$ 、ドーピング精度 $\pm 20\%$

最終目標：平成23年度

無欠陥ヘテロ接合構造を実現するために、高品質、高導電性制御されたエピタキシャル成長法を開発し、口径4インチの有極性、及び口径3～4インチの無極性窒化物半導体バルク基板上において、以下の低欠陥高品質 GaN、及び混晶エピ層を実現する。

AlGa_xIn_{1-x}N 混晶エピ成長層において、Al 又は In 組成 $1 \geq x \geq 0.5$ で

転位密度 $<10^6 \text{ cm}^{-2}$

ドーピング不純物濃度 N型 $>10^{18} \text{ cm}^{-3}$ P型 $>10^{17} \text{ cm}^{-3}$

面内均一度：厚み $\pm 5\%$ 、組成： $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$

また、GaN ホモエピ成長層において

残留ドナー濃度 $<10^{15} / \text{cm}^3$

転位密度：有極性基板上で $<5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 、無極性基板上で $<10^5 \text{ cm}^{-2}$

面内均一度：厚み $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$ 、ドーピング精度 $\pm 20\%$

また、上記エピ層からなる窒化物半導体ヘテロ構造において

2次元電子ガス移動度 $>2,500 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$

③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

中間目標：平成21年度

- ・窒化物単結晶基板上 FET と他種基板上 FET の特性の差違、及びその利害得失の明確化
- ・基板/エピ層の品質とデバイス特性との関係の明確化と課題①、②へのフィードバック

最終目標：平成 23 年度

- ・有極性単結晶基板上 FET と無極性単結晶基板上 FET の特性の差違、及びその利害得失の明確化
- ・広い混晶組成範囲における耐圧と結晶欠陥の相関の明確化と課題①、②へのフィードバック

(3) 研究開発内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を委託により実施する。

- ① 高品質大口径単結晶基板の開発
- ② 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発
- ③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO 技術開発機構」という。）が、単独ないし複数の原則本邦の企業、研究組合、公益法人等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない。）から公募によって研究開発実施者を選定し実施する。

研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、研究体には NEDO 技術開発機構が委託先決定後に指名する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

(2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO 技術開発機構は、経済産業省および研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的および目標、並びに、本研究開発の目的および目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて設置される技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成 19 年度から平成 23 年度までの 5 年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDO 技術開発機構は、技術的および政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成 21 年度、事後評価を平成 24 年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じプロジェクトの加

速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

・ 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

研究開発成果については、NEDO技術開発機構、実施者とも普及に努めるものとする。

・ 知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第26条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDO技術開発機構は、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、第三者の視点からの評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第2号に基づき実施する。

(4) その他

本研究によって得られたあらゆる知的財産、また本研究の過程または成果に基づき開発したプログラム、サンプルもしくは装置などの成果物について、本プロジェクト外（国内外）への供試・開示については、事前にプロジェクトリーダーとNEDO技術開発機構に連絡する。

その際にNEDO技術開発機構が申請書の提出を求めた場合は、これに応じ速やかに提出する。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 平成19年3月制定。

(2) 平成20年7月、イノベーションプログラム基本計画の制定により、「(1) 研究開発の目的」の記載を改訂。

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目 ① 高品質大口径単結晶基板の開発

1. 研究開発の必要性

低損失で高出力の電子デバイスとして期待される窒化物半導体ウェハは、現在 GaN 系ヘテロ構造が Si や SiC 等の異種基板上に作製されている。このため電子デバイス構造としては横型に限定される上に大きな格子不整合によりデバイス内部に多数の欠陥が発生し、耐圧、オン抵抗等のデバイス特性についても物性値から期待されるような十分な特性は得られていない。また電源などで重要なノーマリオフ動作についても実用的な高出力デバイスとしては実現されていない。

このような問題を解決するためには、本質的に結晶構造が等価で格子整合する高品質窒化物単結晶の有極性、或いは無極性基板上にデバイス構造を成長・作製することが必要不可欠である。また、横型デバイス用の高抵抗ウェハ、縦型デバイス用の低抵抗ウェハ実現に向けて、単結晶基板の伝導度制御技術の確立が重要となる。

窒化物単結晶基板を成長するには HVPE 法や Na 系フラックス溶液成長法、昇華法等が知られているが、現状電子デバイス用の高品位な結晶性を持つ大口径単結晶基板の育成は実現されていない。そこで本研究開発では、窒化物半導体電子デバイス作製に必要とされる 4 インチ級の究極の高品質有極性バルク単結晶、及び無極性バルク単結晶を育成する技術を開発し、Si デバイスと同等、或いはそれ以上の安定性を有する高出力デバイスの実用化に資する。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

窒化物半導体バルク成長法における、成長初期過程制御技術、核発生制御技術等を最適化し、必要な有極性、及び無極性窒化物単結晶育成要素プロセスの開発を行う。

転位等の欠陥挙動を解明し、転位低減化、高品質化を図る。さらに 2～4 インチ級への大口径化、長尺化を検討し、大型単結晶育成に必要な要素技術を明らかにする。

(2) 大口径種結晶の開発

結晶成長に必要な種結晶として、格子整合が良く、4 インチ級の大口径が得られる有極性、及び無極性面成長と剥離に適した下地基板の選択を行い、大口径の数百 μm 厚結晶自立基板を作製する。V/III 比、成長温度などの成長条件の最適化、横方向成長等の結晶欠陥低減手法の導入、また成長の障害となる不純物の低減など、表面性や結晶欠陥制御を検討して 2～4 インチ種結晶の実現を図る。

(3) 高導電性窒化物単結晶基板の開発

結晶の高品質化、大口径化を行うと同時に、固体、有機珪素化合物、ガスなどを用いて結晶への不純物添加を検討して、効率的なドーピング技術による導電性制御を行い、縦型デバイス動作に必要な低抵抗率の基板を実現する。

(4) 高抵抗化窒化物単結晶基板の開発

結晶の高品質化、大口径化を行うと同時に、炉環境の清浄化や原料高純度化などにより結晶への不

純物混入を極力低減して、単結晶の高純度化を図り、不純物キャリア濃度の低減による高抵抗化を目指す。また高純度化に加えて欠陥の低減、アクセプター性不純物の効果的ドーピングを検討し、添加元素の種類、添加量、添加条件などを最適化することにより直流から高周波迄の用途に適する均一で安定した高抵抗単結晶の基板を実現する。

3. 達成目標

中間目標

2インチ単結晶有極性面、及び無極性面の最適育成条件の検討を行い、前者では転位密度 $<10^5\text{cm}^{-2}$ 、後者では転位密度 $<10^6\text{cm}^{-2}$ の基板を実現する。また、それらの伝導度制御として、導電性基板では比抵抗 $<10^{-1}\Omega\cdot\text{cm}$ 、高抵抗基板では比抵抗 $>10^5\Omega\cdot\text{cm}$ の基板を実現する。同時に3インチ及び4インチ結晶大型化に必要な要素技術を明らかにする。

最終目標

4インチ有極性単結晶基板、及び3～4インチ無極性単結晶基板を実現し、前者では転位密度 $<5\times 10^3\text{cm}^{-2}$ 、後者では転位密度 $<10^5\text{cm}^{-2}$ 、積層欠陥密度 $<10^3\text{cm}^{-1}$ の特性を得る。また、それらの伝導度制御として、導電性基板では比抵抗 $<10^{-2}\Omega\cdot\text{cm}$ 、高抵抗基板では比抵抗 $>10^6\Omega\cdot\text{cm}$ の特性を得る。

研究開発項目 ② 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発

1. 研究開発の必要性

化合物半導体エピ材料の特徴としては、ヘテロ接合を用いたデバイスを作製できることにあり、中でも窒化物は高速化、高出力化、高耐圧化、省エネ化などに優れた性能を発揮できる物性を有している。このような特性を実現するためには、これらデバイス構造中のチャンネル層やドリフト層を形成する薄膜成長技術、即ち結晶欠陥や残留キャリアの低減、ヘテロ接合界面でのキャリアの散乱を抑制するための界面組成急峻性や広い範囲での平坦性、多層構造はもちろんのこと、極めて薄いチャンネル層を作製するための組成や不純物濃度を原子層レベルで制御できる薄膜成長技術が必須である。加えて GaN-AlN-InN 系窒化物は、AlGaN や InGaN でも格子不整合が大きく、分極電界や転位、欠陥、クラックなどの問題が生じている。

自動車用インバータなどでは例えば、オン抵抗 $<1.5\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、耐圧 $>2\text{KV}$ で高 g_m 、かつノーマリオフ型等の省電力タイプの電子デバイスの実現が望まれている。しかし SiC や Si 基板上でのエピ成長ではヘテロエピタキシーの制約のため、デバイス特性からの要求品質或いは物性値から期待される特性を十分に満足する段階には未だ達しておらず、高機能の横型、及び縦型窒化物半導体電子デバイス実現のためには、今後窒化物単結晶基板上で AlN-GaN-InN の高範囲に渡る高品質大口径エピタキシャル混晶成長技術が必要である。

また、これら混晶成長に関して、高 In 組成領域では線欠陥、原料の気相反応に基づく反応物による点欠陥、成長中の熱分解が大きな問題であり、高 Al 組成領域では、酸素および炭素などの不純物の混入を抑制すると共に、効率の良いドーピング技術の開発によるキャリア濃度の向上が必須である。

更に、実用的な電子デバイス用エピタキシャルウエハとしては、厚みやキャリア濃度等のウエハ特性に関して、4 インチ級の大口径にわたる均一性が要求される。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 大口径基板上的高品質エピタキシャル結晶成長技術

課題①で開発された大口径高品質窒化物単結晶基板等を用い、4 インチ級の有極性、及び無極性窒化物半導体大口径基板上的エピタキシャル成長に関して、転位等の結晶欠陥や残留キャリアを低減し、原子層レベルでの膜厚、平坦性、不純物を均一に制御する技術を開発するとともに、AlInN/InGaN や AlGaN/InGaN などのヘテロ接合を実現する成長技術を開発する

(2) 高 In 組成窒化物層成長技術

有極性、及び無極性窒化物半導体基板上への高均一、高 In 組成 InGaN 層を用いた高品質電子デバイス用大口径ウエハの成長技術、および当該 InGaN 層への不純物高濃度ドーピング技術を開発する。

(3) 高 Al 組成窒化物層成長技術

有極性、及び無極性窒化物半導体基板上への高均一高 Al 組成 AlGaN 層を用いた高品質電子デバイス用大口径ウエハの成長技術、および当該 AlGaN 層への不純物高濃度ドーピング技術を開発する

(4) 結晶成長その場観察評価技術

3. 達成目標

中間目標

原子層レベルの膜成長過程をその場観察を駆使して計測し、高品質大口径ウエハの成長のための要素技術を開発するとともに、口径2インチの有極性、及び無極性窒化物半導体バルク基板上において、以下の低欠陥高品質 GaN、及び混晶エピ層を実現する。

AlGaIn、及び InGaIn 混晶エピ成長層において、Al 又は In 組成 $0.5 \geq x \geq 0.2$ で

転位密度 $< 10^8 \text{cm}^{-2}$

ドーピング不純物濃度 N 型 $> 10^{18} \text{cm}^{-3}$ P 型 $> 10^{17} \text{cm}^{-3}$

面内均一度：厚み $\pm 5\%$ 、組成： $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$

また、GaN ホモエピ成長層において、

残留ドナー濃度 $< 5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ 、

転位密度：有極性基板上で $< 10^5 \text{cm}^{-2}$ 、無極性基板上で $< 10^6 \text{cm}^{-2}$

面内均一度：厚み $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$ 、ドーピング精度 $\pm 20\%$

最終目標

無欠陥ヘテロ接合構造を実現するために、高品質、高導電性制御されたエピタキシャル成長法を開発し、口径4インチの有極性、及び口径3〜4インチの無極性窒化物半導体バルク基板上において、以下の低欠陥高品質 GaN、及び混晶エピ層を実現する。

AlGaIn、及び InGaIn 混晶エピ成長層において、Al 又は In 組成 $1 \geq x \geq 0.5$ で

転位密度 $< 10^6 \text{cm}^{-2}$

ドーピング不純物濃度 N 型 $> 10^{18} \text{cm}^{-3}$ P 型 $> 10^{17} \text{cm}^{-3}$

面内均一度：厚み $\pm 5\%$ 、組成： $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$

また、GaN ホモエピ成長層において

残留ドナー濃度 $< 10^{15} / \text{cm}^3$

転位密度：有極性基板上で $< 5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$ 、無極性基板上で $< 10^5 \text{cm}^{-2}$

面内均一度：厚み $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$ 、ドーピング精度 $\pm 20\%$

また、上記エピ層からなる窒化物半導体ヘテロ構造において

2次元電子ガス移動度 $> 2,500 \text{cm}^2 / \text{Vs}$

1. 研究開発の必要性

現在窒化物電子デバイスは、端緒についたばかりであり、実用化したデバイスはSiCなどの基板上に形成したGaNチャネルを用いたFET構造のみである。その応用は2-5GHzの携帯電話基地局用の200-400W増幅器と30GHz帯の小型20W級増幅器に限定されている。窒化物系半導体が元来有する物性を考慮すると、今後はAlN-GaN-InN系材料を広範囲に自由に組み合わせたヘテロ接合トランジスタの実現が望まれ、その応用は高周波高出力ばかりでなく、高温動作デバイス、高耐圧デバイス、超高速デバイスなど、広い応用範囲が実現可能である。

例えば2-5GHzでは1kW以上の増幅器が実現可能となり、基地局ばかりでなく、固体デバイスを用いた超小型マイクロ波加熱（電子レンジ、半導体プロセス装置）、マイクロ波送電などに応用可能である。

またパワーエレクトロニクスにおいても、高電圧動作と高周波動作が同時に実現できるため、例えば数kW級のインバータ回路は、従来は周波数が低いためコイルやコンデンサが大型化し、モノリシック集積化が不可能であった。窒化物半導体を用いれば高電圧のまま高周波に対応可能であるためパワーエレクトロニクス機器の小型化を推進でき、エアコンなどの家電製品、情報家電、自動車におけるインバータの画期的な性能向上などその応用範囲は極めて広い。

このような電子デバイスを実現するためには、高品質窒化物半導体基板の開発、及び理論的に現在までに検討されなかった新しいエピタキシャル成長技術・不純物ドーピング技術の開発をベースに、可能な限り広い範囲の組成のヘテロ接合構造や面方位の組み合わせによるデバイス構造を従来の異種基板上ウエハーや各種窒化物半導体ウエハー上に実際にデバイスレベルで試作して、高耐圧性、低損失性、高速性などの諸特性を比較・検証するとともに、その結果を課題①、②の基板・エピ開発にフィードバックすることが必要である。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 横型電子デバイスの評価

横型のパワー高周波素子、パワースイッチング素子を想定して、評価デバイスパターンを標準化し、エピ材料・構造・品質とデバイス特性との相関関係を、プロセス要因を極力排除した評価を通して検討する。

課題②で開発された大口径高品質窒化物エピタキシャルウエハー等を用い、簡素なソース/ゲート/ドレイン電極構造による評価トランジスタパターンにおいて、キャリア濃度特性、I-V特性、C-V特性などの基本特性評価を行う。また、ゲート長を短くした実用デバイスに近いFET構造において、耐圧、オン抵抗、リーク電流、高周波特性などより実際の特性の評価を行う。

(2) 縦型電子デバイスの評価

縦型のパワー高周波素子、パワースイッチング素子を想定して、評価デバイスパターンを標準化し、エピ材料・構造・品質とデバイス特性との相関関係を、プロセス要因を極力排除した評価を通して検討する。

課題②で開発された大口径高品質窒化物エピタキシャルウエハー等を用い、簡素なソース/ゲート/ドレイン電極構造による評価トランジスタパターンにおいて、キャリア濃度特性、I-V特性、C-V特性などの基本特性評価を行う。

(3) 窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認

窒化物単結晶基板上に成長したエピタキシャルウェハーをもとに、その上の各種デバイス特性を従来のサファイア、SiC等の基板上デバイスの特性と比較検討し、その優位性を確認する。

(4) 有極性、及び無極性デバイス構造の比較

有極性、及び無極性面方位をもつ高品質窒化物基板上に成長したエピタキシャルウェハーをもとに、その上の各種デバイス特性の比較検討を行う。電圧未印加時に電流の流れないエンハンスメント型の動作、電流コラプスを抑制した低オン抵抗化、高 In 系チャネル導入による高速化、高 Al バリア導入による高耐圧化など、将来の家電・通信・交通システムへの応用を目指したデバイス構造を試作・評価して、有極性面上と無極性面上での長所、短所を明確化し、それらのデバイス可能性を検討する。

3. 達成目標

窒化物半導体単結晶基板上、及びその無極性基板上の電子デバイスの有効性を確認すると共に、耐圧、オン抵抗等、それら電子デバイスの特性を阻害するウェハ欠陥の解明を行う。

中間目標

- ・窒化物単結晶基板上 FET と他種基板上 FET の特性の差違、及びその利害得失の明確化
- ・基板/エピ層の品質とデバイス特性との関係の明確化と課題①、②へのフィードバック

最終目標

- ・有極性単結晶基板上 FET と無極性単結晶基板上 FET の特性の差違、及びその利害得失の明確化
- ・広い混晶組成範囲における耐圧と結晶欠陥の相関の明確化と課題①、②へのフィードバック

・事前評価関連資料

事前評価書

		作成日	平成 19 年 3 月 2 日
1. 事業名称 (コード番号)	ナノエレクトロニクス半導体新材料・ナノデバイス新構造技術開発 ーうち窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発		
2. 推進部署名	ナノテクノロジー・材料技術開発部		
3. 事業概要	<p>(1) 概要</p> <p>高周波デバイス、パワーデバイス等、今後の 21 世紀社会を支える重要半導体デバイスの飛躍的な性能向上と適用製品の消費電力削減を図るため、従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子などの作製に必要な窒化物半導体結晶成長技術を開発する。現状技術では実現困難な電子デバイス用高品質大口径窒化物半導体バルク単結晶基板の作製技術および高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発を行う。また、これら窒化物単結晶基板上に作成した無極性構造の電子デバイスの評価を行う。</p> <p>(2) 事業規模：総事業費 30 億円</p> <p>(3) 事業期間：平成 19 年度～23 年度（5 年間）</p>		

4. 評価の検討状況

(1) 事業の位置付け・必要性

① 事業の位置付け

本事業は、「第三期科学技術基本計画（H18.3）」、「エネルギー技術戦略の基本的考え方（H18.5）」、「新・国家エネルギー戦略（H18.5）」等における重要な省エネ技術としての位置付けを踏まえた事業である。

研究開発プログラムとしては「省エネルギープログラム」及び「ナノテクノロジープログラム」に位置付けられる。

② 事業の必要性

窒化物半導体は日本が強みを有する分野であるが、今後要求される情報通信の高速・大容量化や省エネに対応したデバイスを実現していくには、既存のバルク単結晶基板成長技術やエピタキシャル成長技術では対応できず限界に達している状況である。

総合科学技術会議「分野別推進戦略（H18.3）」や「エネルギー技術戦略の基本的考え方（H18.5）」にあるとおり、高性能デバイスは情報家電、コンピュータ、情報通信機器のみならず自動車、医療機器など極めて広範な分野の製品の高機能化や制御を実現する上で中核的役割を果たす存在であり、その実用化を図るうえで制約の一つとなっているのが高品質窒化物半導体結晶である。従ってこの作製技術を開発することは、民生、運輸、産業の各部門における省電力化に貢献することとなり、抜本的な省エネ対策強化を求められている現状において必要不可欠である。

なお、開発対象とする技術は民間各社が至近の実用化を狙って熾烈な競争を行っている現状の延長線上にある技術ではなく、大学あるいは研究所を拠点に材料メーカー、デバイスメーカー、装置メーカー等が連携して行う競争前段階の基盤技術であり、リスクも大きい。

従ってこれらの開発を効率的に行い、我が国化合物半導体産業の国際競争力を維持強化するという方針からも国からの一定の関与によって研究開発を推進することが是非共必要である。

(2) 研究開発目標の妥当性

<目標>

中間目標はH21年度、最終目標はH23年度末とする。

① 高品質大口径単結晶基板の開発

(中間目標)

- (1) 基板口径：2インチ
- (2) 転位密度：有極性基板 $<10^5\text{cm}^{-2}$ 、無極性基板 $<10^6\text{cm}^{-2}$
- (3) 抵抗率：導電性基板 $<10^{-1}\Omega\text{cm}$ 、高抵抗基板 $>10^5\Omega\text{cm}$
- (4) 結晶大型化（3~4"φ）に必要な要素技術の明確化

(最終目標)

- (1) 基板口径：3~4インチ

- (2) 転位密度：有極性基板 $<5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$ 、無極性基板 $<10^5 \text{cm}^{-2}$
- (3) 積層欠陥密度： $<10^3 \text{cm}^{-1}$
- (4) 抵抗率：導電性基板 $<10^{-2} \Omega \text{cm}$ 、高抵抗基板 $>10^6 \Omega \text{cm}$

② 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発

(中間目標)

2 “ ϕ 窒化物単結晶有極性及び無極性バルク基板上エピ成長：

- (1) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 及び $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 混晶
 - (i) 組成： $0.5 \geq x \geq 0.2$
 - (ii) 転位密度： $<10^8 \text{cm}^{-2}$
 - (iii) ドーピング不純物濃度：n型 $>10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、p型 $>10^{17} \text{cm}^{-3}$
 - (iv) 面内均一度：厚さ $\pm 5\%$ 、組成 $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度： $\pm 10\%$
- (2) GaNホモエピ層
 - (i) 残留ドナー濃度： $<5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$
 - (ii) 転位密度：有極性基板 $<10^5 \text{cm}^{-2}$ 、無極性基板 $<10^6 \text{cm}^{-2}$
 - (iii) 面内均一度：厚さ $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$
 - (iv) ドーピング精度： $\pm 20\%$

(最終目標)

3～4 “ ϕ 窒化物単結晶有極性及び無極性バルク基板上エピ製膜

- (1) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 及び $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 混晶
 - (i) 組成： $1 \geq x \geq 0.5$
 - (ii) 転位密度： $<10^6 \text{cm}^{-2}$
 - (iii) ドーピング不純物濃度：n型 $>10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、p型 $>10^{17} \text{cm}^{-3}$
 - (iv) 面内均一度：厚さ $\pm 5\%$ 、組成 $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度： $\pm 10\%$
- (2) GaNホモエピ層
 - (i) 残留ドナー濃度： $<5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$
 - (ii) 転位密度：有極性基板 $<5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$ 、無極性基板 $<10^5 \text{cm}^{-2}$
 - (iii) 面内均一度：厚さ $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$
 - (iv) ドーピング精度： $\pm 20\%$
 - (v) 2次元電子ガス移動度： $>2,500 \text{cm}^2/\text{Vsec}$

③ 窒化物単結晶基板上電子デバイスの評価

(中間目標)

- (1) 窒化物単結晶基板上FETと他種基板上FETの特性の差異、及びその利害特質の明確化
- (2) 基板/エピ層の品質とデバイス特性との関係の明確化と項目①②へのフィードバック

(最終目標)

- (1) 有極性単結晶基板上FETと無極性単結晶基板上FETの特性の差異、及びその利害特性

の明確化

- (2) 広い混晶組成範囲における耐圧と結晶欠陥の相関の明確化と項目①②へのフィードバック

<妥当性>

目標として世界トップクラスの技術的に非常に高いレベルを狙っており、多大な産業上への効果が期待できるので妥当なところである。

(3) 研究開発マネジメント

公募により事業委託先を決定し最適な研究開発体制を構築する。プロジェクトリーダーを選定し、それを中心として運営する。また研究開発委員会を2～3回/年開催し、事業の進捗状況及び進め方について検討、管理していく。事業開始後3年目において中間評価を行い、その評価結果を踏まえ以降の事業の進め方について見直しを行う。

(4) 研究開発成果

本事業の成果として期待される高品質大口径窒化物単結晶基板上のAlGaNエピタキシャル成長技術を用いたパワーデバイスを応用したインバーターが実用化されることにより、生産現場および家庭で用いられる多くの小中出力の電気製品の低消費電力化や今後さらに需要が拡大すると考えられるハイブリッドカー電源システムの小型化が図られ、エネルギー消費量を大幅に削減することが可能となる。またInGaNエピタキシャル成長技術を用いた高周波デバイスが実用化されると、次世代携帯端末、車載用ミリ波・マイクロ波レーダ等での高効率化が図られ、省エネルギー・高性能・小型化が可能となる。

その他これらデバイスの応用分野を含め広範な領域での一層のエネルギー消費削減が実現されるので、本事業の寄与は非常に高いものが期待される。

(5) 実用化・事業化の見通し

実用化は2015年以降の見通しであるが、これによる省エネ効果（原油換算値）は2020年に130万kl/年（汎用インバーターにおけるGaN化率50%を仮定）、2030年に300万kl/年（同85%）である。

(6) その他特記事項

特になし

5. 総合評価

NEDOの実施する事業として適切であると判断する

・特許論文リスト

年度毎の特許, 論文, 外部発表等リスト

高品質大口径単結晶基板の開発

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名 称	発明者
1	日本碍子㈱、 豊田合成㈱、 大阪大学	特願 2008-134836	国内	2008/05/22	取下	n型III族窒化物系化合物半導体及びその製造方法	永井誠二他
2	日本碍子㈱、 豊田合成㈱、 大阪大学	特願 2009-001737	国内	2009/01/7	出願	単結晶育成用の反応容器および単結晶の育成方法	岩井 真他
3	日本碍子㈱、 豊田合成㈱、 大阪大学	特願 2009-79794	国内	2009/03/27	出願	結晶成長装置	永井誠二他
4	日本碍子㈱、 豊田合成㈱、 大阪大学 K	特願 2009-082280	国内	2009/03/30	出願	III族窒化物系化合物半導体の製造方法	佐藤峻之他
5	日本碍子㈱、 豊田合成㈱、 大阪大学 K	2009003296.7 他	外国	2009/05/20	出願	n型III族窒化物系化合物半導体及びその製造方法	永井誠二他
6	日本碍子㈱、 豊田合成㈱、 大阪大学 K	特願 2009- 123494	国内	2009/05/21	出願	III族窒化物系化合物半導体の製造方法	永井誠二他
7	日本碍子㈱、 森勇介、北岡 康夫、三好直 哉	特眼 2009-139957	国内	2009/06/11	出願	III族金属窒化物単結晶の育成方法およびこれに用いる反応容器	岩井 真他
8	日本碍子㈱、 豊田合成㈱、 大阪大学	特眼 2009-167901	国内	2009/06/11	出願	Znがドーブされた3B族窒化物結晶、その製法及び電子デバイス	岩井 真他

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名, ページ番号	査読	発表年
1	F. Kawamura	Osaka Univ.	Effect of carbon additive on increases in the growth rate of 2 in GaN single crystals in the Na flux method	J. Cryst. Growth 310 (2008) 3946.	有	2008
2	F. Kawamura	Osaka Univ.	Growth of GaN single crystals with extremely low dislocation density by two-step dislocation reduction	J. Cryst. Growth 311 (2009) 3019.	有	2009
3	F. Kawamura	Osaka Univ.	Growth of high-quality large GaN crystal by Na flux method	Proceedings of SPIE Photonics West, 721610	有	2009
4	佐々木齊	古河機械金属(株)	Fabrication of freestanding <i>m</i> -plane GaN wafer by using the HVPE technique on an aluminum carbide buffer layer on an <i>m</i> -plane sapphire substrate	Journal of Crystal Growth 311(2009)2910-2913.	有	2009
5	佐々木齊	古河機械金属(株)	Effect of aluminum carbide buffer layer on growth and self-separation of <i>m</i> -plane GaN by hydride vapor phase epitaxy	Physica Status Solidi A 206(2009)1160-1163.	有	2009

【外部発表】

番号	発表者	所属	タイトル	学会名, 後援番号	査読	発表
1	F. Kawamura	Osaka Univ.	Growth of the full-scale GaN single crystal substrate using Na flux method	7 th International Conference of Nitride Semiconductors, C3	有	2007.9
2	M. Tanpo	Osaka Univ.	The effect of additive of carbon into the Na flux on the growth of GaN single crystals	7 th International Conference of Nitride Semiconductors, MP14	有	2007.9
3	F.	Osaka	LPE growth of large GaN	5 th International	Invited	2007.9

	Kawamura	Univ.	crystal using Na flux method	Workshop on Bulk Nitride Semiconductors		
4	F. Kawamura	Osaka Univ.	LPE growth of bulk GaN crystal by alkali-metal flux method	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2007, Fr-2A-1	Invited	2007.10
5	F. Kawamura	Osaka Univ.	Growth of thick GaN single crystals using the Na flux LPE technique.	2 nd International Symposium on Growth of Nitrides, Tu-47	有	2008.7
6	S. Katsuike	Osaka Univ.	Improvement of crystallinity of m-plane substrate by Na-flux LPE method	2 nd International Symposium on Growth of Nitrides, Tu-2	有	2008.7
7	S. Katsuike	Osaka Univ.	Growth of two-inch GaN single crystals with the thickness of several mm in Na flux method	International Workshop on Nitride semiconductors 2008, We1-D1	有	2008.9
8	F. Kawamura	Osaka Univ.	Recent progress in the growth of GaN single crystals using the Na flux method	Asian Core Workshop	invited	2008.10
9	F. Kawamura	Osaka Univ.	Growth of high-quality large GaN crystal by Na flux method	SPIE Photonics West, 721610	invited	2009.1
10	H. Ukegawa	Osaka Univ.	Growth of High-quality GaN Crystal by Na Flux Method	The 2009 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, A-2	有	2009.5
11	北野芳裕	大阪大学	高純度環境での Na フラックス法による LPE-GaN 単結晶育成	第 68 回応用物理学会学術講演会, 4p-ZR-6	無	2007.9
12	反保昌城	大阪大学	炭素添加 Na フラックスを用いた大型低転位 GaN 単結晶の育成	第 68 回応用物理学会学術講演会, 4p-ZR-7	無	2007.9
13	三好直哉	大阪大学	大型炉を用いた Na フラックス GaN 基板の厚膜化	第 55 回応用物理学関係連合講演会, 27a-B-3	無	2008.3
14	平林康弘	大阪大学	Na フラックス法による無歪バルク GaN 単結晶の育成	第 55 回応用物理学関係連合講演会, 27a-B-4	無	2008.3
15	勝池悟史	大阪大学	Na フラックス法を用いた m 面 GaN 基板上への LPE 成長	第 55 回応用物理学関係連合講演会, 27a-B-6	無	2008.3
16	川村史朗	大阪大	Na フラックス法による GaN 結晶	第 69 回応用物理学会学	無	2008.9

		学	の導電性制御	術講演会, 2a-CA-7		
17	平林康弘	大阪大学	Naフラックス法を用いた GaN 厚膜単結晶育成による高品質化の検討	第 38 回結晶成長国内会議, 05A04	有	2008.11
18	勝池悟史	大阪大学	Na フラックス LPE 法による無極性 GaN 結晶育成	第 38 回結晶成長国内会議, 05A05	有	2008.11
19	請川紘嗣	大阪大学	Na フラックス法による LPE-GaN 単結晶の低圧育成	第 56 回応用物理学関係連合講演会, 31p-ZJ-9	無	2009.3
20	ト淵	大阪大学	Low resistive Ge-doped GaN crystals prepared by Na flux method	第 1 回窒化物半導体結晶成長講演会	有	2009.5
21	平林康弘	大阪大学	Na フラックス LPE 法を用いた GaN 単結晶成長モード制御による低転位化の検討	第 1 回窒化物半導体結晶成長講演会	有	2009.5
22	ト淵	大阪大学	Low-resistive Germanium-doped GaN crystal prepared by Na flux method	第 28 回電子材料シンポジウム	有	2009.7

その他外部発表

1.COMPOUND SEMICONDUCTOR、Volume14 No.4. P.20 (2008)

2.平成21年2月18～20日, nano tech2009 展示会(国際ナノテクノロジー総合展・技術会議)出展

高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名 称	発明者
1	住友電気工業株式会社	特願 2007-262441	国内	2007-10-5	出願	窒化アルミニウム結晶の成長方法および結晶成長装置	山下 正史他
2	住友電気工業株式会社	特願 2007-332141	国内	2007-12-25	出願	III族窒化物半導体結晶の成長方法およびIII族窒化物半導体結晶の成長装置	宮永 倫正他
3	住友電気工業株式会社	特願 2008-021477	国内	2008-1-31	出願	Al _x Ga _{1-x} N単結晶の成長方法	宮永 倫正他
4	住友電気工業株式会社	2008-186209	国内	2008-7-17	出願	AlGa _N バルク結晶の製造方法およびAlGa _N 基板の製造方法	宮永 倫正他
5	住友電気工業株式会社	2008-186210	国内	2008-7-17	出願	III族窒化物結晶の製造方法およびIII族窒化物結晶	宮永 倫正他
6	住友電気工業株式会社	2008-207230	国内	2008-8-11	出願	AlN結晶の製造方法, AlN基板の製造方法および圧電振動子の製造方法	宮永 倫正他
7	住友電気工業株式会社	2009-007394	国内	2009-1-16	出願	窒化物半導体単結晶製造装置	佐藤 一成他
8	住友電気工業株式会社	2009-013410	国内	2009-1-23	出願	窒化物半導体結晶の製造方法	佐藤 一成他
9	住友電気工業株式会社	2009-072062	国内	2009-3-24	出願	窒化物単結晶, およびその製造方法	佐藤 一成他
10	住友電気工業株式会社	JP2008/073365	PCT	2008-12-24	出願	Al _x Ga _{1-x} N単結晶の成長方法	宮永 倫正他
11	住友電気工業株式会社	CA2646139	外国	2008-12-10	出願	III族窒化物半導体結晶の成長方法およびIII族窒化物半導体結晶の成長装置	宮永 倫正他
12	住友電気工業株式会社	CN20081018858 6.3	外国	2008-12-25	出願	同上	宮永 倫正他
13	住友電気工業	EP08021449.7	外国	2008-12-10	出願	同上	宮永 倫正他

	株式会社						
14	住友電気工業株式会社	KR0133364/08	外国	2008-12-24	出願	同上	宮永 倫正他
15	住友電気工業株式会社	US12/339579	外国	2008-12-19	出願	同上	宮永 倫正他
16	住友電気工業株式会社	特願 2009-116687	国内	2009-5-13	出願	窒化物単結晶製造方法および窒化物単結晶	佐藤 一成他
17	住友電気工業株式会社	特願 2009-116688	国内	2009-5-13	出願	窒化物単結晶製造方法および窒化物単結晶	佐藤 一成他
18	住友電気工業株式会社	特願 2009-121080	国内	2009-5-19	出願	III族窒化物結晶の製造方法およびIII族窒化物結晶	宮永 倫正他
19	住友電気工業株式会社	特願 2009-164877	国内	2009-7-13	出願	AlGa _N バルク結晶の製造方法およびAlGa _N 基板の製造方法	宮永 倫正他
20	住友電気工業株式会社	特願 2009-174378	国内	2009-7-27	出願	窒化物単結晶基材の製造方法及び窒化物単結晶基材	佐藤 一成他
21	住友電気工業株式会社	JP2009/062856	PCT	2009-7-16	出願	AlGa _N バルク結晶の製造方法およびAlGa _N 基板の製造方法	宮永 倫正他
22	住友電気工業株式会社	JP2009/061699	PCT	2009-6-26	出願	III族窒化物結晶の製造方法およびIII族窒化物結晶	宮永 倫正他

【外部発表(学会含む)】

番号	発表者	所属	タイトル	学会名	発表年月
1	佐藤 一成	住友電気工業株式会社	無極性面 AlN 単結晶の作製と評価	第 38 回結晶成長国内会議	2008.11
2	高須賀英良	住友電気工業株式会社	Al 原料ガスのクラスター形成を考慮した AlGa _N -MOVPE シミュレーション	第 56 回応用物理学関係連合講演会	2009.3
3	橋本 信	住友電気工業株式会社	AlGa _N チャネル HEMT における結晶性と 2 次元電子ガス特性	第 56 回応用物理学関係連合講演会	2009.3
4	佐藤 一成	住友電気工業株式会社	昇華法 AlN 長尺単結晶における転位挙動の観察・評価	第 56 回応用物理学関係連合講演会	2009.3

5	押村 吉徳	名城大学	Feドープ半絶縁性 GaN 自立基板を用いた AlGaIn/GaN HEMT の作製と評価	第 56 回応用物理学関係 連合講演会	2009.3
---	-------	------	---	------------------------	--------

その他外部発表

- ・ 平成21年2月18～20日, nano tech2009展示会(国際ナノテクノロジー総合展・技術会議)出展

窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名 称	発明者
1	(株)シャープ	特願 2009-033522	国内	2009/02/17	出願	電子デバイス及びオーミック電極形成方法	矢船 憲成
2	(株)シャープ	特願 2009-156732	国内	2009/07/02	出願	電子デバイス及びオーミック電極形成方法	矢船 憲成

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名, ページ番号	査読	発表年
1	葛原正明	福井大	Simulation of Tunneling Contract Resistivity in Non-polar AlGaIn/GaN Heterostructures	IEICE Trans. Electron., E92-C, pp.691-695	有	2009
2	葛原正明	福井大	Theoretical Investigation of GaN-Based Diodes with a Recessed Composite Schottky-Barrier Structure	Jpn. J. Appl. Phys., 48, 04C103	有	2009
3	葛原正明	福井大	Optimum rapid thermal activation of Mg-doped p-type GaN	Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, pp.2865-2867	有	2008
4	葛原正明	福井大	Theoretical simulation of DC and RF performance for AlInN/InGaIn/AlInN	IEICE Electronics Express, 5, pp.1074-1079	有	2008

			double-heterojunction FET using a Monte Carlo approach			
5	葛原正明	福井大	Prospect of III-Nitride Semiconductor Transistors	IEICE J90-C, pp.960-966,	有	2007

【外部発表(学会含む)】

番号	発表者	所属	タイトル	学会名	発表年月
1	向野美郷	福井大	Reverse current-voltage characteristics of AlGaIn/GaN heterojunction FET fabricated on GaN substrate	2009 Int'l Meeting for Future of Electron Devices, Kansai,	2009.5
2	葛原正明	福井大	III-Nitride Heterojunction FETs: Future Perspectives	IEEE Int'l Conf. on Electron Devices and Solid-State Circuits	2008.12
3	葛原正明	福井大	Future Prospects of Nitride Semiconductor Electron Devices	MWE 2008 Microwave Workshop	2008.12
4	牧野弘	福井大	Theoretical investigation of GaN-based diodes with a recessed composite Schottky-barrier structure	Extended Abs. 2008 Int. Conf. Solid State Devices and Materials	2008.9
5	近岡大成	福井大	Simulation of Tunneling Contact Resistivity in Non-Polar AlGaIn/GaN Heterostructures	2008 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices	2008.7
6	酒井亮輔	福井大	Simulation of Breakdown Characteristics in Graded Field Plate AlGaIn/GaN HEMTs	2008 Int'l Meeting for Future of Electron Devices, Kansai	2008.4
7	葛原正明	福井大	GaN HEMT development for microwave power applications - current status	GigaHertz Symposium 2008	2008.3
8	永森基	福井大	Optimum Rapid Thermal Activation for Mg-doped p-type GaN	Extended Abstracts of the 2007 Int'l Conf. Solid State Devices and Materials	2007.9
9	西田猛利	福井大	Comparative Study of Multi-Step and Graded Field Plate for AlGaIn/GaN-HEMTs	7th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics	2007.8

10	児玉和樹	福井大	RF Performance Simulation of Double-Heterojunction FETs with an InGaN Channel	2007 Int'l Meeting for Future of Electron Devices, Kansai	2007.4
----	------	-----	---	---	--------

その他外部発表

・平成21年2月18～20日, nano tech2009 展示会(国際ナノテクノロジー総合展・技術会議)出展

2. 分科会における説明資料

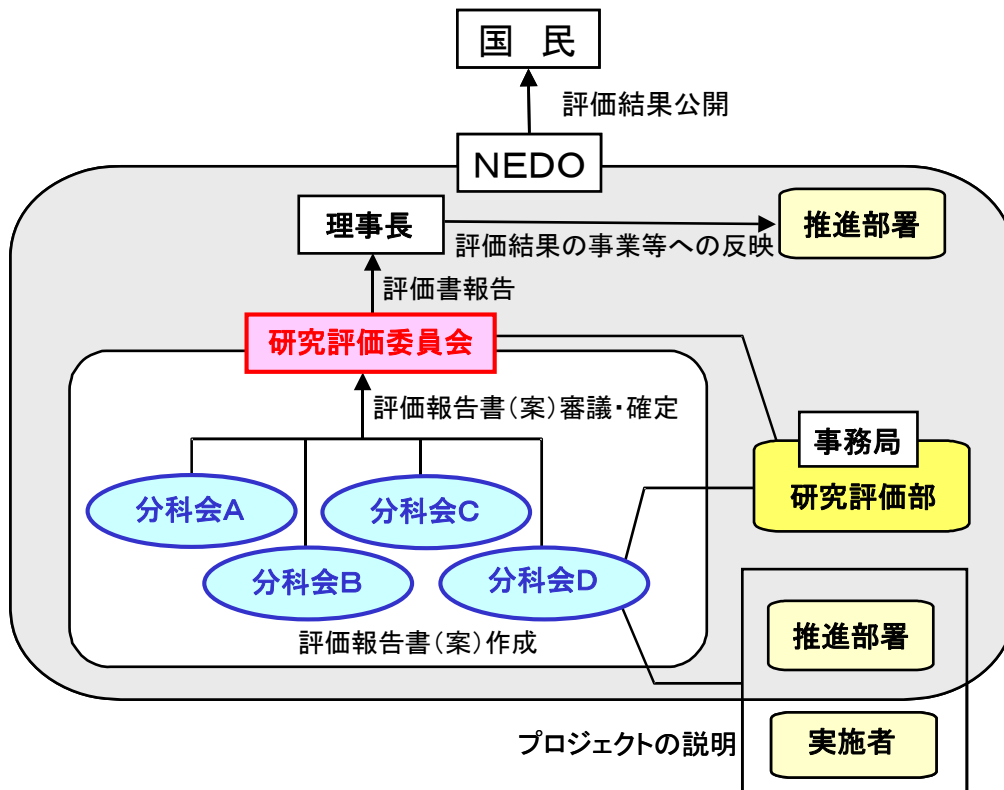
次ページより、プロジェクト推進・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

参考資料 1 評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて研究評価を実施する。

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）における研究評価の手順は、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、評価報告書（案）を策定の上、研究評価委員会において確定している。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置



1. 評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において。

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
- 社会に対する説明責任を履行するとともに、
経済・社会ニーズを取り込む
- 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を
促進する

としている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

2. 評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員選定に当たっては以下の事項に配慮して行う。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題その他社会的ニーズ
関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、分科会委員名簿にある7名を選任した。

なお、本分科会の事務局については、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構研究評価広報部が担当した。

3. 評価対象

平成19年度に開始された「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発一窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発」プロジェクトを評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プ

プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

4. 評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び研究実施者からのヒアリングと、それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価及び実施者側等との議論等により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、研究実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

5. 評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、研究評価委員会による『各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格、中間・事後評価の別等に応じて、各分科会において判断すべき者である。』との考え方に従い、第1回分科会において、事務局が、研究評価委員会により示された「標準的評価項目・評価基準」（参考資料 1-7 頁参照）をもとに改定案を提示し、承認されたものである。

プロジェクト全体に係わる評価においては、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義や実用化への見通し等について評価した。各個別テーマに係る評価については、主にその目標に対する達成度等について評価した。

評価項目・評価基準

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ エネルギーイノベーションプログラム・ナノテク・部材イノベーションプログラム・ITイノベーションプログラムの目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。

- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(4)情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1)中間目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながる事が期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3)知的財産権等の取得

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。

- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

(5) 成果の最終目標の達成可能性

- ・ 最終目標を達成できる見込みか。
- ・ 最終目標に向け、課題とその解決の道筋が明確に示され、かつ妥当なものか。

4. 実用化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性

- ・ 実用化イメージ・出口イメージが明確になっているか。
- ・ 実用化イメージ・出口イメージに基づき、開発の各段階でマイルストーンを明確にしているか。それを踏まえ、引き続き研究開発が行われる見通しは立っているか。

(2) 波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

標準的評価項目・評価基準（中間評価）

2008. 3. 27

【中間評価 標準的評価項目・評価基準の位置付け（基本的考え方）】

標準的評価項目・評価基準は、第17回研究評価委員会（平成20年3月27日付）において以下のとおり定められている。（本文中の記載例による1…、2…、3…、4…が標準的評価項目、それぞれの項目中の(1)…、(2)…が標準的評価基準、それぞれの基準中の…が視点）

ただし、これらの標準的評価項目・評価基準は、研究開発プロジェクトの中間評価における標準的な評価の視点であり、各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格等に応じて、各分科会において判断すべきものである。

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 特定の施策（プログラム）、制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2)研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(4)情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1)中間目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながる事が期待できるか。

- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

(5)成果の最終目標の達成可能性

- ・ 最終目標を達成できる見込みか。
- ・ 最終目標に向け、課題とその解決の道筋が明確に示され、かつ妥当なものか。

4. 実用化、事業化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。

(2)事業化までのシナリオ

- ・ コストダウン、競合技術との比較、導入普及、事業化までの期間、事業化とそれに伴う経済効果等の見通しは立っているか。

(3)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

※基礎的・基盤的研究及び知的基盤・標準整備等の研究開発の場合は、以下の項目・基準による。

*基礎的・基盤的研究開発の場合

3. 研究開発成果について

(1)中間目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

(5)成果の最終目標の達成可能性

- ・ 最終目標を達成できる見込みか。
- ・ 最終目標に向け、課題とその解決の道筋が明確に示され、かつ妥当なものか。

4. 実用化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 実用化イメージ・出口イメージが明確になっているか。
- ・ 実用化イメージ・出口イメージに基づき、開発の各段階でマイルストーンを明確にしているか。それを踏まえ、引き続き研究開発が行われる見通しは立っているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。

(2)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

* 知的基盤・標準整備等の研究開発の場合

3. 研究開発成果について

(1)中間目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は公開性が確保されているか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 研究内容に新規性がある場合、知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。

- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

(5)成果の最終目標の達成可能性

- ・ 最終目標を達成できる見込みか。
- ・ 最終目標に向け、課題とその解決の道筋が明確に示され、かつ妥当なものか。

4. 実用化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 整備した知的基盤についての利用は実際にあるか、その見通しが得られているか。
- ・ 公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されているか、その見込みはあるか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ J I S化、標準整備に向けた見通しが得られているか。注) 国内標準に限る
- ・ 一般向け広報は積極的になされているか。

(2)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

本研究評価委員会報告は、独立行政法人新エネルギー・産業技術
総合開発機構（NEDO 技術開発機構）研究評価部が委員会の事
務局として編集しています。

平成21年10月

NEDO 技術開発機構
研究評価部

統括主幹 竹下 満
主幹 寺門 守
担当 橋山 富樹

* 研究評価委員会に関する情報は NEDO 技術開発機構のホームページに
掲載しています。

(<http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/index.html>)

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地
ミュージア川崎セントラルタワー20F
TEL 044-520-5161 FAX 044-520-5162