

窒化アルミニウム単結晶の昇華法成長における ヘテロエピタキシャル成長機構

産業技術総合研究所 加藤 智久¹・三浦 知則²
環境・エネルギー研究所 島田 真至³・鎌田 弘之³・山本 和寛⁴・
齋藤 学³・高嶋 秀行³・直江 邦浩⁵

Hetero-epitaxial Growth Mechanisms of AlN Single Crystals in Sublimation Growth

Dr. T. Kato, T. Miura, M. Hatada, H. Kamata, K. Yamamoto,
M. Saito, H. Takashima, and K. Naoe

窒化アルミニウム (AlN) 単結晶は AlN 系半導体からなる低損失電子デバイスや深紫外発光デバイス用の基板として有望である。当社では、炭化珪素 (SiC) を種結晶とした昇華法による AlN 単結晶成長技術を開発している。成長初期に着目して行った表面モフォロジー観察により、SiC 上のピラミッド (六角錐状小丘) 形成および AlN 核生成の各プロセスについて新規なモデルを導き出し、提案する。また、AlN の島状結晶とピラミッドのファセットは見かけ上 30 度ずれていたが、結晶学的評価により、両者の面内配向は揃っていることを明らかにする。

An aluminum nitride (AlN) single crystal is a promising material as a substrate for AlN based semiconductors such as high performance electronic devices and DUV emitting devices. We have developed growth technology of AlN single crystals by sublimation-recombination method which uses silicon carbide (SiC) as a seed crystal. We have observed surface morphology at the initial stage of the crystal growth. As a result, a new model of the AlN crystal growth is proposed for the formation process of hexagonal pyramids on SiC and the nucleation of AlN. The facets of the AlN islands and the hexagonal pyramids are differed 30 degrees in appearance, but crystallographic analysis has clarified that the AlN islands and the hexagonal pyramids have the same orientation.

1. ま え が き

近年、省エネおよび二酸化炭素削減の観点から、グリーン・イノベーションの推進が加速しており、太陽光発電やスマートグリッド、電気自動車などが開発されている。これらには電力エネルギーの変換・制御における高効率化の技術が必要不可欠であり、パワーデバイスの低損失化・高耐圧化などが求められる。そこで注目されているのが、シリコン (Si) や砒化ガリウム (GaAs) といった現行の半導体に比べ、バンドギャップの広い、SiC や窒化ガリウム (GaN) などのワイドギャップ半導体である。主な半導体の物性値を表 1 に示す^{1) 2) 3)}。ワイドギャップ半導体の一種である AlN は、半導体の中で最

も広いバンドギャップを有しており、絶縁破壊強度は SiC や GaN よりも高い。そのため、小型で低損失・高耐圧な電子デバイスが作製可能であり、GaN との混晶である窒化アルミニウムガリウム (AlGaN) を利用したヘテロ接合トランジスタの開発が進められている⁴⁾。

表1 各種半導体材料の物性値^{1) 2) 3)}
Table 1. Physical properties of important semiconductors.^{1) 2) 3)}

材 料	AlN	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	Diamond
バンドギャップ/eV	6.28	1.12	1.43	3.26	3.39	5.47
電子移動度 /cm ² V ⁻¹ s ⁻¹	1100	1350	8500	720 ^a /650 ^c	900	1900
絶縁破壊強度 /10 ⁶ V cm ⁻¹	11.7	0.3	0.4	2	3.3	5.6
熱伝導度 /W cm ⁻¹ K ⁻¹	3.4	1.5	0.5	4.5	1.3	20
バンドタイプ	D	I	D	I	D	I

a: a軸方向, c: c軸方向 D: 直接遷移型, I: 間接遷移型

1 先進パワーエレクトロニクス研究センター (博士 (工学))

2 先進パワーエレクトロニクス研究センター

3 先進技術研究室

4 太陽光発電研究室

5 先進技術研究室長

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
バンドギャップ	Bandgap	価電子帯の頂上から伝導体の底までのエネルギー差
ラマン散乱測定	Ramann scattering measurement	入射光と異なった波長をもつ散乱光（ラマン光）を測定することにより、元素の同定や結晶構造の解析などを行う手法
EDS	エネルギー分散型X線分析, Energy dispersive X-ray spectrometry	電子線照射により発生したX線のエネルギースペクトルから元素を同定する手法
EBSD	電子線後方散乱回折, Electron Backscatter Diffraction	試料表面で生じる電子線後方散乱回折により得られた菊池線から、試料の結晶系や結晶方位に関する情報が得る手法
ポリタイプ	Polytype	同じ化学組成をもつ物質が示す異なった原子配列順位
ラテラル成長	Lateral growth	横方向への成長
ファセット	Facet	特定の結晶面で構成された平らな面
エピタキシャル成長	Epitaxial growth	下地基板の結晶面の影響を受けて配向する成長様式.. 成長結晶と同種基板を使用する場合をホモエピタキシャル, 異種基板を使用する場合をヘテロエピタキシャルと呼ぶ
ステップ	Step	原子的なスケールでの段差
テラス	Terrace	ステップで接続される原子的なスケールでの平坦部

さらにAlNやAlGaInなどの窒化物半導体はバンド構造が直接遷移型であるため、発光デバイスに適しており、深紫外領域のLEDやLDへの応用が可能である。深紫外領域の光⁵⁾は、有害物質の分解や殺菌、浄水、各種医療分野、高密度光記録など様々な分野への応用が期待されている⁶⁾。

現在、AlN、AlGaIn成長の基板としては、主にサファイアが使用されている。しかし、サファイアはAlN、AlGaInとの格子不整合比や熱膨張係数差が大きいいため、AlN、AlGaIn層の転位密度が高くなってしまい、効率や寿命に課題が生じている⁷⁾。そこで、サファイアよりもAlN、AlGaInとの格子不整合比が小さいAlN基板が希求されている⁸⁾。

SiやGaAsなどのバルク成長にはチョクラルスキー（CZ）法をはじめとする液相法が主に使用され、高品質の大口径インゴットが生産されている。しかし、AlNは窒素の解離圧が高いため、液相法の適用が困難であり、昇華法（レーリー法）⁹⁾やハイドライド気相成長（Hydride Vapor Phase Epitaxy, HVPE）法¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾などの気相法が主に適用されている。昇華法は、原料を高温下で昇華させ、低温部で過飽和状態とすることで再凝結させる成長法である。昇華法の中でも種結晶を用いる方法を改良レーリー法^{13)~18)}とよぶ。改良レーリー法は核生成を制御することができるので、大口径化が比較的容易となるメリットがある。

そこで当社では改良レーリー法を採用し、AlN単結晶の技術開発を行っている。種結晶には、AlNとの格子不整合比が小さく、AlNの成長温度においてAlNよりも蒸気圧が低いSiC基板を用いた、ヘテロエピタキシャル成

長では、異種材料同士の界面において、核生成や格子ひずみなどを制御することが重要であるため、初期成長過程に関する研究が行われている。

Y. Shiらは、SiC基板上には六角錐状小丘（ピラミッド）が形成され、その頂点から成長するAlNの微小な島状結晶の六角形ファセットが30度回転していることを確認しており、結晶方位も30度回転していると報告している¹⁴⁾。G. R. Yazdiらはピラミッドの形成やその頂点から成長する微小な島状結晶の成長メカニズムについて考察しており、ピラミッドはエッチピットに形成され、4H-SiC基板上には2H-SiCからなるピラミッドが形成されていたと述べている¹⁵⁾¹⁶⁾。また、R. R. Sumathiらはピラミッドから成長するAlN島状結晶の結晶性について議論している¹⁷⁾。さらに、C. HartmannらはSiC基板の極性の違いによるAlN核生成への影響を調査しており、(000-1)ではピラミッドが形成されないことを観察している¹⁸⁾。

上記のように先例の主張は様々であり、特にピラミッドの形成プロセス、および、SiCとAlNの配向については明確でない。本報の目的はこの2点を解明することである。そのために成長初期の表面および断面の観察を行い、ピラミッドの形成途中の様子を確認した。また、SiCとAlNの結晶方位測定を行った。さらに、電界放射型走査電子顕微鏡（FE-SEM）を用いることで、SiCの表面構造を観察した。本報では、それらの結果について報告する。

2. 実験方法

昇華法を用い、4H-SiC、6H-SiC基板の(0001)Si面

上にAlNを成長させた。成長には高周波誘導加熱炉を利用した。図1に成長炉の模式図を示す。結晶成長容器として黒鉛もしくはタングステン製の坩堝を使用した。温度管理は成長坩堝を覆った断熱材の穴を介して、放射温度計で坩堝上下部の温度を測定し、温度調節にフィードバックをすることで実施した。原料と基板間の温度勾配は、坩堝に沿った垂直コイルの位置で調整した。成長は13~101 kPaの窒素雰囲気中において、1700~2025℃の温度で行った。黒鉛坩堝を使用する際はAlN単結晶への不純物の混入を避けるために、炭化タンタル坩堝の中で成長させた。成長時間は0~6 hrとした。

試料の表面モフォロジーは走査型電子顕微鏡(SEM)、光学顕微鏡、FE-SEMで観察した。それぞれの結晶の元素は顕微ラマン散乱測定とエネルギー分散型X線分析(EDS)測定で分析した。顕微ラマン散乱測定では波長532 nmのレーザを使用し、SiC基板に垂直な方向から入射した。SiC基板とAlNのエピタキシャル関係を調べるために断面の電子線後方散乱回折(EBSD)測定を行った。結晶方位の確認のためにX線回折装置を使用し、 ϕ スキャン測定と極点図測定を行った。SEM観察、FE-SEM観察、EDS測定、EBSD測定では導通をと

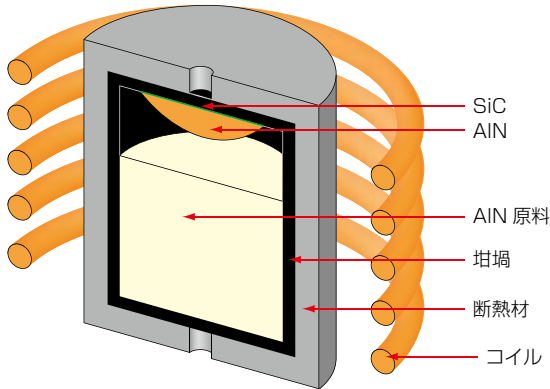


図1 装置の模式図

Fig. 1. Schematic illustration of the crystal growth geometry.

るために金蒸着を行った。X線源にはCuK α 線を使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 ピラミッドの形成とAlNの核生成

3.1.1 6 hr成長後の表面観察

核生成を観察するため、6 hr成長を行い、成長初期のSiC基板を観察した。図2に成長初期のSiC基板のSEM画像を示す。図2に示すように、6 hr成長後のSiC基板には対角線の長さが15~200 μm 、高さが10~150 μm のピラミッドが多数形成されていた。また、ピラミッドの頂点にも六角板状や六角錐状の微小な島状結晶が付着していた。これらの相および構造の同定のために、EDS測定と顕微ラマン散乱測定を行った。それらの結果を図3、図4にそれぞれ示す。図3に示すよう

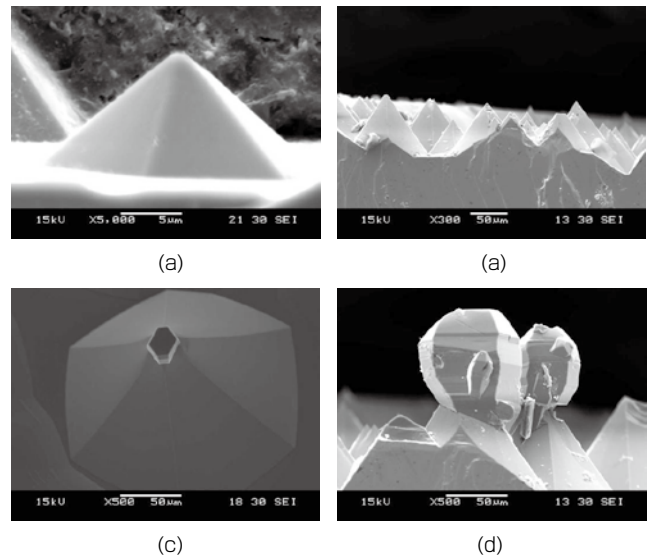


図2 加熱初期のSiC (0001) 基板

Fig. 2. SEM images of pyramids formed on SiC (0001) substrates at initial growth.

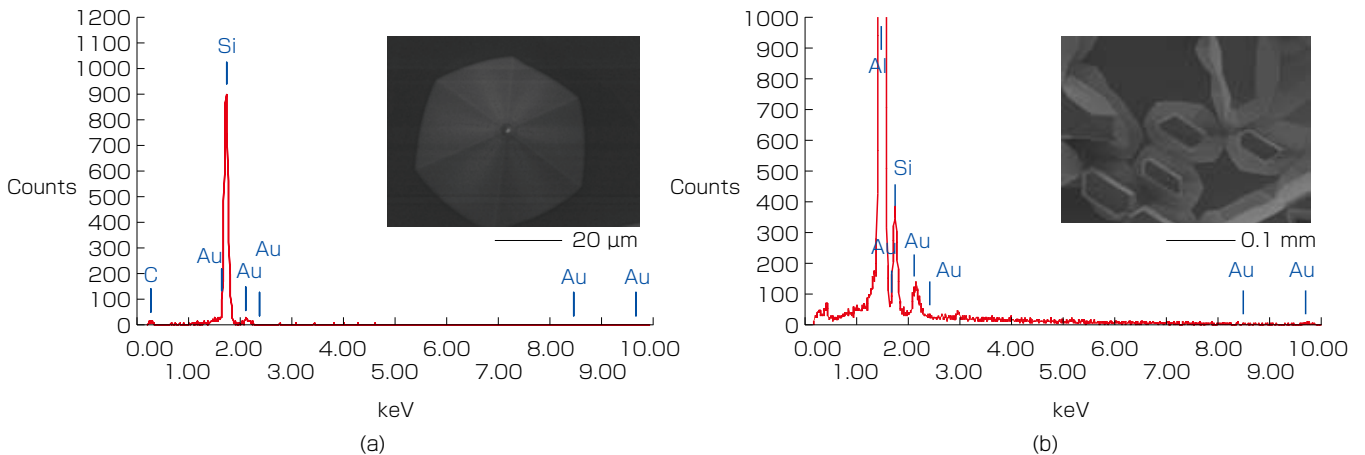


図3 (a) ピラミッドと (b) ピラミッド上に成長した島状結晶のEDS測定結果

Fig. 3. EDS of (a): a pyramidal hillock and (b): a particle grown on the pyramidal hillock.

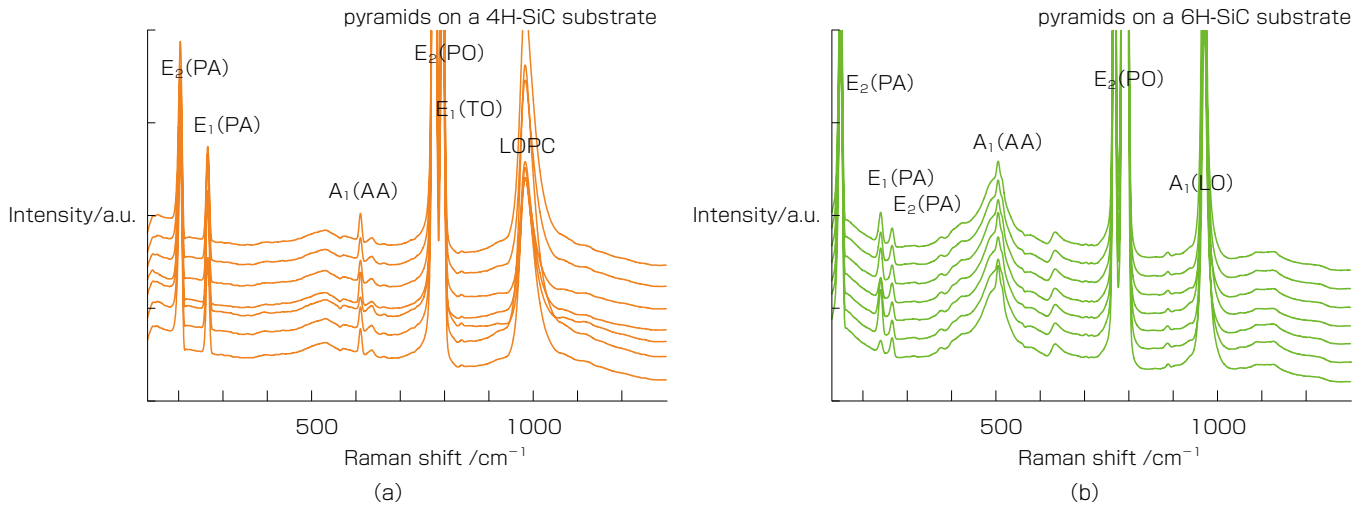


図4 (a) 4H-SiC基板と (b) 6H-SiC基板に形成されたピラミッドの顕微ラマン散乱測定結果
 Fig. 4. Raman scattering measurements of the pyramids grown on (a): 4H-SiC substrate and (b): 6H-SiC substrate.
 PA : Planar acoustic mode, AA : Axial acoustic mode, PO : Planar optic mode,
 TO : Transverse optical mode, LOPC : Longitudinal optical phonon coupling mode

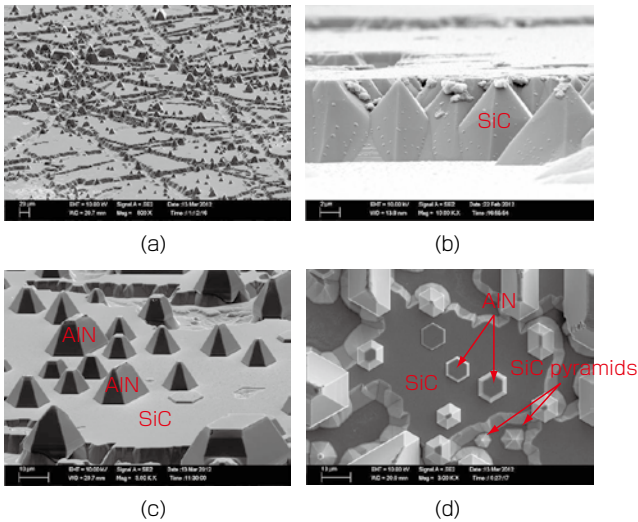


図5 ピラミッドの形成過程 (0 hr成長) と AlNの核生成
 Fig. 5. Formation process of SiC pyramids and nucleation of AlN.

に、ピラミッドはSiCであり、その頂点に成長している微小な島状結晶はAlNであることが確認された。成長初期のAlN島状結晶はSiCの分解により発生したSiを不純物として多く含んでいる。図4に示すように、ピラミッドのポリタイプは使用した基板のポリタイプと一致しており、G. R. Yazdiらの報告^{14) 15)}と異なる結果が得られた。また、ラマン則上は出現しないはずのピークも確認できることから、ピラミッド部は結晶面が傾いている可能性がある。SiC、AlNの結晶構造は六方晶であり、ピラミッド、AlN島状結晶の各六角形はそれぞれの結晶構造に由来するファセットによるものだと考えられる。AlN島状結晶は基板と平行なファセット面を有していることから、成長初期はラテラル成長が優先的であると考えられる。

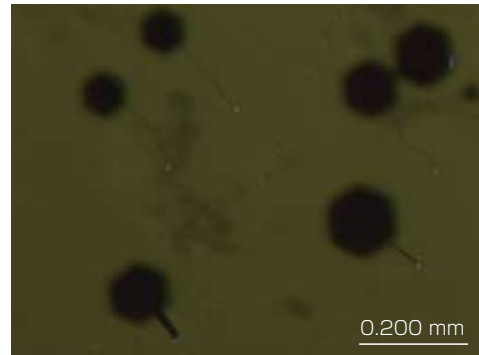


図6 ピラミッド部に観察される線欠陥
 Fig. 6. Line defects observed at pyramids.

3. 1. 2 0 hr成長後の表面観察

ピラミッドの形成プロセスを調べるため、成長温度まで昇温した直後に加熱を停止 (0 hr成長) し、ピラミッドが完成する直前の様子を観察した。図5に0 hr成長後のSEM画像を示す。0 hr成長でも微小なAlN島状結晶の成長は確認されたが、ピラミッドの形成は完了しておらず、形成途中の様子を観察することができた。図5(a), (b)が示すように、SiC基板は線状のエッチング痕が複数観察され、その側壁がピラミッドの側壁を形成していた。エッチングされていない面は元々の基板の表面位置と一致していたことから、このピラミッドはSiC基板がAlNの昇華ガスによるエッチングで分解する際に、分解されずに残った部分であることがわかった。また、図5(c), (d)より、AlN島状結晶はピラミッドの頂点だけではなく、エッチングされていない平坦部(元々の基板表面)でも成長しているのが確認できる。エッチングされてできた平坦部には核生成が確認されなかった。

図6にピラミッドが形成されている面と反対側のSiC(000-1)C面を、透過光により観察した光学顕微鏡写

真を示す。SiC(000-1)C面にはピットができており、そのピットがある場所とSiC(0001)Si面のピラミッドがある場所は線欠陥でつながっていることが確認できた。核生成は一般的に結晶粒界や転位などの欠陥上で優先的に起こる。ピラミッドに貫通線欠陥が存在していると仮定すると、ピラミッドの形成サイトとAlNの核生成サイトが一致してもおかしくない。

以上より、ピラミッドは、AlNの昇華ガスにより、SiC基板が $\{11-2m\}$ を発達させながらエッチングされることで形成されることがわかった。また、ピラミッドには貫通線欠陥が存在していることから、ピラミッドの頂点は優先核生成サイトとして働きやすいと考えられる。

3. 1. 3 AlN島状結晶のラテラル成長

図7にさらに成長が進行したAlNのSEM画像を示す。核生成したAlN島状結晶はラテラル成長により、つながって膜状になる。AlN島状結晶の各六角形はそれぞれ同じ方位を向いていることから、基板の情報を受け取ってエピタキシャル成長していることがわかる。多核成長であるが、それぞれの結晶方位が同じなので、つながると単結晶となる。

3. 2 SiCとAlNの面内配向関係

図8にAlN島状結晶とピラミッドの角度関係を表すSEM画像を示す。ピラミッドの六角形とピラミッド頂

点から成長したAlN島状結晶の六角形は30度ずれていることが確認できる。また、図9に示すように、SiC基板のステップとピラミッドの六角形も30度ずれており、SiC基板のステップとAlN島状結晶の六角形は平行である。基板のm面 $\{10-10\}$ オリエンテーションフラットと比較すると、ステップは $\{10-10\}$ と平行であり、ピラミッドの六角形は $\{11-2m\}$ 、AlN島状結晶は $\{10-1n\}$ で形成されている六角形であることがわかった。したがって、モフォロジーの観察からは、SiCとAlNの結晶方位はずれていないと考えられる。

AlNとSiCの配向関係を結晶学的に確認するため、SiCとAlNに対し $\{10-12\}$ 極点図測定と ϕ スキャン測定を行った。 ϕ スキャン測定にはAlNの $(10-12)$ と $(11-22)$ 極とSiCの $(10-12)$ と $(11-24)$ と $(10-14)$ 極を使用した。それぞれの結果を図10、図11に示す。 ϕ スキャン測定結果において、a面が傾いた4H-SiC $(11-24)$ 、AlN $(11-22)$ とm面が傾いた4H-SiC $(10-14)$ 、4H-SiC $(10-12)$ 、AlN $(10-12)$ のピークが確認できる ϕ 位置は、SiCとAlNで同じであるのがわかる。したがって、AlNとSiCの配向関係は $(10-10)$ AlN // $(10-10)$ SiC、 $(11-20)$ AlN // $(11-20)$ SiCであり、やはり結晶方位のずれは確認できなかった。極点図測定でも極が集積する ϕ 位置は同じであることが確認され、面内配向が同じ

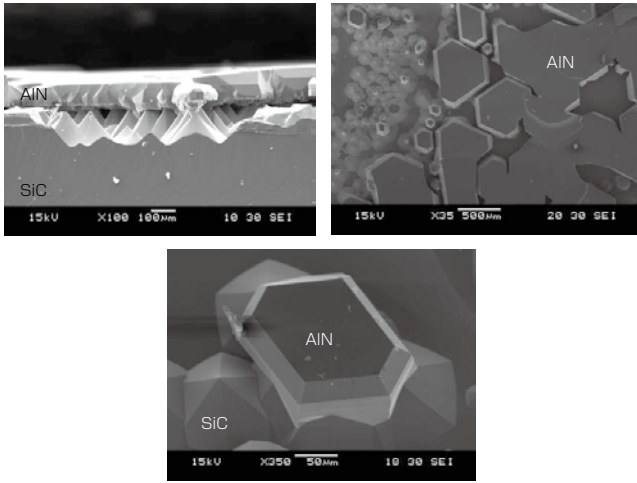


図7 AlN島状結晶の横方向成長
Fig. 7. Lateral growth process of AlN.

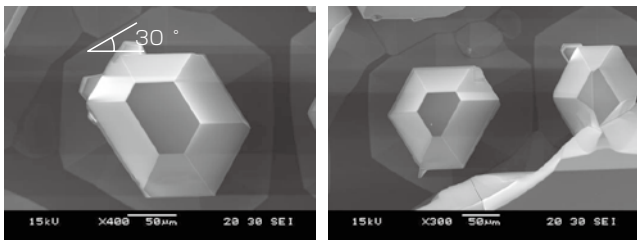


図8 ピラミッド上に成長したAlNのSEM画像
Fig. 8. SEM images of AlN crystals grown on SiC pyramids. In spite of the smaller lattice mismatch between AlN and SiC, the hexagon of AlN is shifted by 30 degree from the hexagon of SiC pyramid.

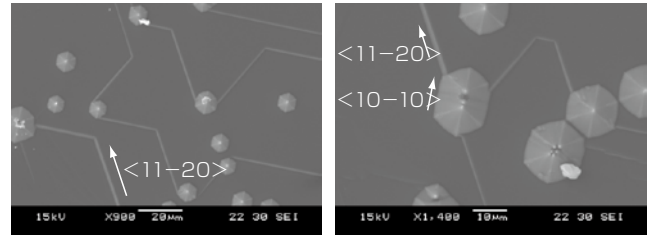


図9 SiC基板上的ステップとピラミッドの角度関係
Fig. 9. SEM images of steps on an SiC substrate and SiC pyramids. The Steps are rotated 30 degree with respect to SiC pyramids.

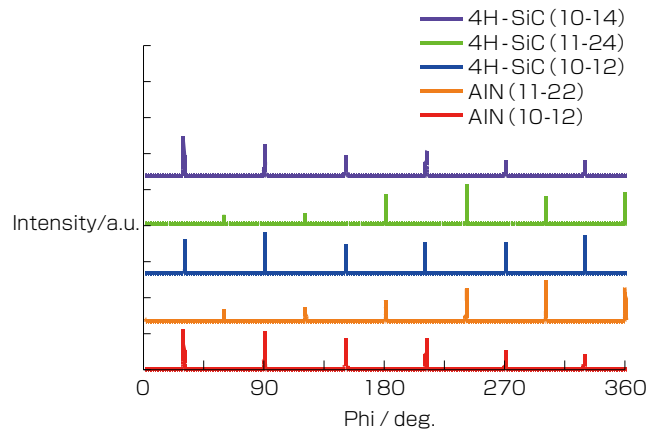


図10 4H-SiCとAlNの ϕ スキャン測定
Fig. 10. Phi scan measurements using $(10-12)$ and $(11-22)$ reflection of AlN and $(10-12)$, $(11-24)$ and $(10-14)$ reflection of SiC.

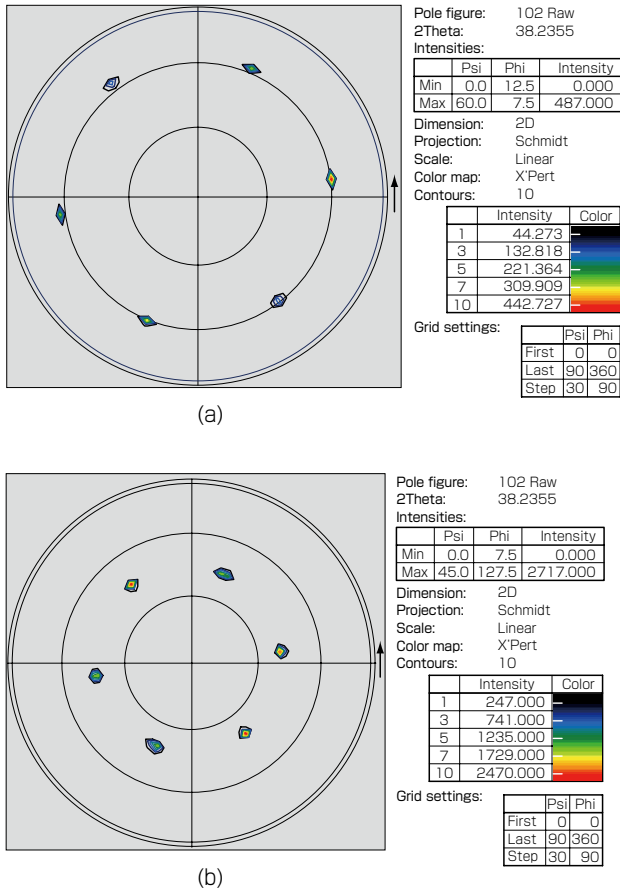


図11 (a) SiCと(b) AlNの{10 -1 2}極点図(10-12)回折線を用い、成長方向と垂直な面を投影面としている。
Fig. 11. {10 -1 2} Pole figures of (a) SiC and (b) AlN were drawn by using each (10 -1 2) diffraction. The projection plane is perpendicular to the growth direction.

であることが確かめられる。また、SiCとAlNの断面のEBSD測定も行った。その結果を図12に示す。やはりSiCとAlNの面内方位は一致していた。

以上より、SiCとAlNの面内結晶方位は揃っていることがわかった。ただし、AlNの成長で現れるファセット面は{10-1 n}であり、SiCのエッチングで現れるファセット面は{11-2 m}であることから、見かけ上形成される六角形が30度ずれていることが明らかとなった。

3.3 ピラミッドの表面構造観察

図13にピラミッドのFE-SEM画像を示す。ピラミッドの表面には120度の角度を持った多数の微小突起が確認でき、ピラミッドを形成している{11-2 m}は{10-10}と平行なステップで構成されていることが観察された。つまり、ピラミッドの見かけ上のファセット{11-2 m}は、AlN島状結晶のファセット{10-1 n}と比較すると30度面内回転しているが、微細なファセットではAlN島状結晶と揃っていることがわかった。また、このステップ-テラス構造はピラミッドを形成している面の中央({11-2 m} <11-2 n>)では端に比べ、大きく、疎になっている。AlN島状結晶とピラミッドで形成される六角形が30度ず

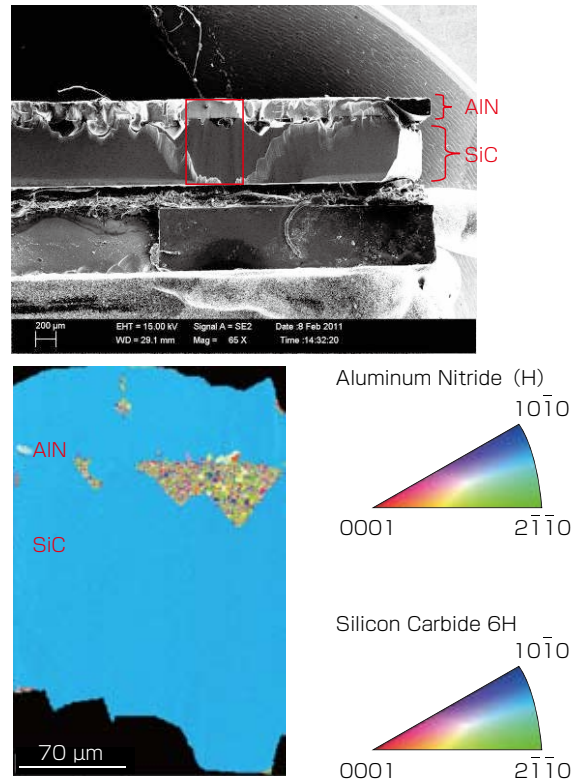


図12 SiCとAlNの断面EBSD測定
Fig. 12. EBSD image of cross section of interface between SiC and AlN.

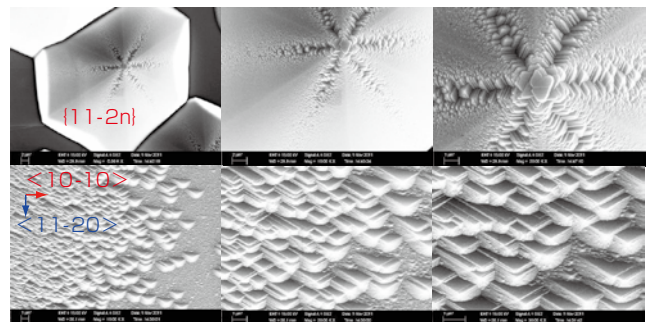


図13 ピラミッドのFE-SEM画像
Fig. 13. FE-SEM images of a pyramid of SiC. The minute protrusions with the angle of 120 degrees can be observed on the surface of SiC pyramid.

れる原因は現在不明だが、表面エネルギーの異方性がAlNとSiCで異なっていることが関係している可能性がある。SiCではm面よりもa面の方が表面エネルギーは高く、不安定であるという報告があり¹⁹⁾、エッチングで現れるピラミッドが{11-2 m}で構成されていることと一致する。

4. む す び

SiC基板を種結晶として使用したAlN単結晶の昇華法成長において、ピラミッドの形成プロセスと、SiCとAlNの配向関係を解明するため、短時間成長を行い、観察と結晶方位測定を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- ①ピラミッドは、AlNの昇華ガスにより、SiC基板が $\{11-2m\}$ を発達させながらエッチングされることで形成される。また、ピラミッドには貫通線欠陥が存在していることから、ピラミッドの頂点は優先核生成サイトとして働きやすい。
- ②微小なAlN島状結晶の六角形とピラミッドの六角形は、30度回転している。しかし、それぞれのファセット面は $\{10-1n\}$ と $\{11-2m\}$ であり、結晶方位はずれておらず、出現するファセット面が異なるだけである。
- ③ピラミッドのファセット面である $\{11-2m\}$ は、 $\{10-10\}$ と平行なステップからなる多数の微細突起で構成されており、微細なファセットではAlN島状結晶 $\{10-1n\}$ と揃っている。
- 欠陥制御には横方向成長 (Epitaxial lateral overgrowth, ELO) 法がしばしば用いられている²⁰⁾。ピラミッドの大きさや密度、分布を制御することができれば、ELO法と同様の効果を期待でき、AlNの欠陥を制御することができると考えられる。本報ではピラミッドの新規な形成プロセスを提案した。この知見を元に、ピラミッドの制御方法を開発することで、高品質結晶の育成が期待できる。

参 考 文 献

- 1) T. P. Cho, Mater. Sci. Forum, vol.338/342, p.1155, 2000
- 2) J. C. Rojo, L. J. Schowalter, K. Morgan, D. I. Florescu, F. H. Pollak, B. Raghathamachar, M. Dudley, Mater. Sci. Res. Soc. Symp. Proc., vol.680E, E2.1.1, 2001
- 3) P. B. Perry, RF. Ruz, Appl. Phys. Lett., vol.33, p.319 1978
- 4) T. Nanjo, M. Takeuchi, M. Suita, T. Oishi, Y. Abe, Y. Tokuda, and Y. Aoyagi: "Remarkable breakdown voltage enhancement in AlGaN channel high electron mobility transistors", Appl. Phys. Lett. 92, 263502, 2008
- 5) Y. Taniyasu, M. Kasu and T. Makimoto: "An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres", Nature, vol.441 pp.325-328, 2006
- 6) 平山ほか:「AlGaN系深紫外LEDの進展と展望」応用物理, 第80巻, 第4号, pp.319-324, 2011
- 7) Hideki Hirayama, Sachie Fujikawa, Norimichi Noguchi, Jun Norimatsu, Takayoshi Takano, Kenji Tsubaki, and Norihiko Kamata: "222-282 nm AlGaN and InAlGaN-based deep-UV LEDs fabricated on high-quality AlN on sapphire", Phys. Status Solidi A206, No. 6, pp.1176-1182, 2009
- 8) R. Dalmau, S. Craft, B. Moody, R. Schlessler, S. Mita, J. Xie, R. Collazo, A. Rice, J. Tweedie, and Z. Sitar: "Challenges in AlN Crystal Growth and Prospects of the AlN-based Technology", CS MANTECH Conference, May 16th-19th, 2001, Palm Springs, California, USA
- 9) G. A. Slsck and T.F. McNelly: "AlN single crystals", J. Crysta. Growth, 34, 263, 1976
- 10) Yusuke Katagiri, Shinya Kishino, Kazuki Okuura, Hideto Miyake, Kazumasa Hiramatsu: "Low-pressure HVPE growth of crack-free thick AlN on trench-patterned AlN template," Journal of Crystal Growth, 311, pp.2831-2833, 2009
- 11) Jie-Jun Wu, Yusuke Katagiri, Kazuki Okuura, Da-Bing Li, Hideto Miyake, Kazumasa Hiramatsu: "Effects of initial stages on the crystal quality of nonpolar a-plane AlN on r-plane sapphire by low-pressure HVPE," Journal of Crystal Growth, 311, pp.3801-3805, 2009
- 12) Takuya Nomura, Kenta Okumura, Hideto Miyake, Kazumasa Hiramatsu, Osamu Eryu, Yoichi Yamada: "AlN homoepitaxial growth on sublimation-AlN substrate by low-pressure HVPE," Journal of Crystal Growth, 350, pp.69-71, 2012
- 13) Hiroyuki Kamata, Kunihiko Naoe, Kazuo Sanada and Noboru Ichinose: "Single-crystal growth of aluminum nitride on 6H-SiC seed crystals by an open-system sublimation method", Journal of Crystal Growth Vol. 311 (5), pp.1291-1295.
- 14) Y. Shi, B. Liu, J. H. Edgar, H. M. Meyer III, E. A. Payzant, L. R. Walker, N. D. Evans, J. G. Swadener, J. Chaudhuri and Joy Chaudhuri: "Initial Nucleation Study and New Technique for Sublimation Growth of AlN on SiC Seed crystal," Phys. Stat. Sol., (a) 188, No. 2, pp.757-762, 2001
- 15) G. R. Yazdi, M. Beckers, F. Giuliani, M. Syvajarvi, L. Hultman, and R. Yakimova: "Freestanding AlN single crystals enabled by self-organization of 2H-SiC pyramids on 4H-SiC substrates," Appl. Phys. Lett. 94, 082109, 2009
- 16) G. R. Yazdi, M. Syvajarvi, R. Yakimova: "Formation of needle-like and columnar structures of AlN," Journal of Crystal Growth, 300, pp.130-135, 2007
- 17) R. R. Sumathi, R. U. Barz, P. Gille, and T. Straubinger: "Influence of interface formation on the structural quality of AlN single crystals grown by sublimation method," phys. status solidi C, 1-3, 2011
- 18) C. Hartmann, M. Albrecht, J. Wollweber, J. Schuppang, U. Juda, C. Guguschev: "SiC seed polarity-dependent bulk AlN growth under the influence of residual oxygen," Journal of Crystal Growth, 2012
- 19) K. Togase, K. Terao, S. R. Nishitani, T. Kaneko and N. Ohtani: "First-principle calculation on Surface Energy of SiC", Kwansai Gakuin University, CALPHAD XXXVIII (Prague, Czech Republic), 09/May/18
- 20) Hideki Hirayama, Sachie Fujikawa, Jun Norimatsu, Takayoshi Takano, Kenji Tsubaki, and Norihiko Kamata: "Fabrication of a low threading dislocation density ELO-AlN template for application to deep-UV LEDs", Phys. Status Solidi C6, No. 52, S359-S359, 2009