

窒化アルミニウムをプラットフォームとした 超伝導量子デバイスの開発

東京理科大学 先進工学部マテリアル創成工学科 小林 篤

Fabrication of Superconductor Quantum Devices on Aluminum Nitride Platforms

Atsushi Kobayashi

Department of Materials Science and Engineering, Tokyo University of Science

窒化アルミニウム (AlN) は、窒化ニオブ (NbN) 超伝導体のエピタキシャル成長用基板に適しており、これらを組み合わせることで、超伝導量子コンピュータや量子通信デバイスの開発が期待されている。本研究では、AlN 基板上にマイクロメートル級の NbN 単結晶領域を作製することに成功した。この技術は、NbN 超伝導体を用いた量子デバイスを作製する上で、重要な基盤技術となり得る。

Aluminum nitride (AlN) is suitable as a substrate for the epitaxial growth of niobium nitride (NbN) superconductors, and their combination is anticipated to advance the development of quantum computers and quantum communication devices based on superconductors. In this study, we successfully fabricated micrometer-scale single-crystal regions of NbN on an AlN substrate. This technique could become a crucial foundational technology for the fabrication of quantum devices using NbN superconductors.

1. はじめに

物質の量子的な振る舞いを利用した量子技術は、高速演算処理と安全な通信を実現する可能性を秘めた新技術である。ここ数年の量子コンピュータハードウェア技術の進展は目覚ましく、一部の量子コンピュータでは古典コンピュータの性能を凌駕する量子超越性が実証されつつある。量子情報技術への期待の高まりとともに、超伝導体エレクトロニクス関連技術も急速に発展している。新しい量子情報システムの構成デバイスとなる、超伝導磁束量子ビット、超伝導マイクロ波共振器、交流ジョセフソン接合レーザー、超伝導単一光子検出器などの開発が進められている。

窒化物半導体は、すでに高輝度 LED・レーザー、高移動度トランジスタ、電力制御用パワーデバイスとして社会実装され、デバイスプロセス技術が成熟した材料である。特に窒化アルミニウム (AlN) は深紫外発光・超高耐圧といった特徴をもち、窒化物半導体結晶成長用基板としても有用な材料である。同じく窒化物である窒化ニオブ (NbN) は、AlN と結晶格子整合性が高い超伝導体で、高感度単一光子検出器や量子コンピュータの量子ビットを構成する材料として期待されている。もしも、NbN 系超伝導体と窒化物半導体デバイスの基板となる AlN をエピタキシャル成長によって融合できれば、既存技術の延長線上にはない新構造超伝導量子コンピュータ、量子もつれ単一光子受発光素子、マヨラナ粒子トランジスタなど新機能量子デバイスが実現する可能性がある。しかしながら、これまで

NbN 超伝導体/AlN 界面の高品質エピタキシャル接合が実現していないため、構造特性や量子物性は未解明である。上述の量子デバイスを創成するためには、NbN/AlN 界面物性の理解と制御が必要不可欠である。本研究では、欠陥密度の低い NbN/AlN 界面をエピタキシャル成長によって作製し、デバイスサイズの NbN 単結晶薄膜を作製することを目的とした。巨大グレイン NbN 作製技術の開発を通じて、量子もつれ光を発する超伝導 LED やオンチップ単一光子受発光素子など、AlN をプラットフォームとした窒化物半導体の新たな応用分野を開拓することを目指す。

2. 実験方法

HVPE 法で作製された AlN/サファイアテンプレートを基板として用いた。NbN のエピタキシャル成長前に、AlN テンプレート基板を 1200~1700°C で 3 時間アニールした。その後、スパッタリング法で NbN を成長させた。AlN および NbN の結晶性は、X 線回折 (XRD) および電子後方散乱回折 (EBSD) で評価した。また、表面モフォロジーを原子間力顕微鏡で観察した。

3. 結果と考察

高温アニール前後の AlN の結晶性を X 線ロックアップカーブ (XRC) 半値幅で評価した。1700°C のアニール前後で AlN の 0002 回折の XRC 半値幅はほぼ変化しないが (95 から 102 arcsec)、10-12 回折 XRC 半値幅は高温アニール後に 289 から 240 arcsec に減少した。これらの結果は、高温アニールによって AlN の刃状転位密度が減少していることを示唆している。XRC 半値幅から算出したアニール処理後の AlN の刃状転位密度は $7.0 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ であった。図 1 に、アニール処理による AlN の表面形状の変化を示す。未処理の AlN 表面は原子ステップから構成されるマウンド状のモフォロジーとなっていた (図 1 (a))。この形状は 1200°C でアニールしても大きく変化しなかった (図 1 (b))。一方、1600°C および 1700°C でアニール後には表面構造が変化し、原子レベルで平坦な幅広いテラスが形成され

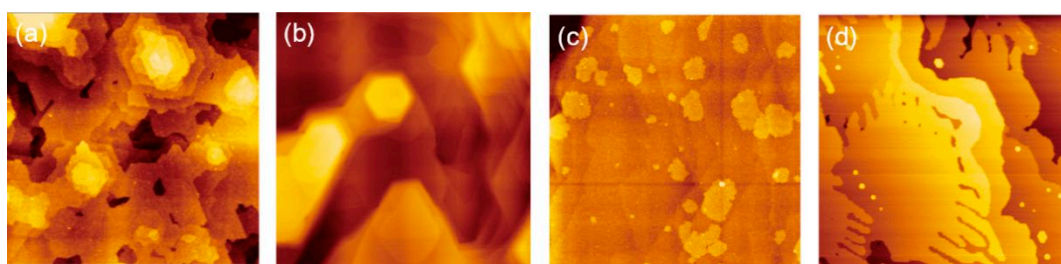


図 1 (a)未処理、(b) 1200°C、(c) 1600°C、(d) 1700°C でアニール処理した AlN の AFM 像 ($2 \times 2 \mu\text{m}^2$)

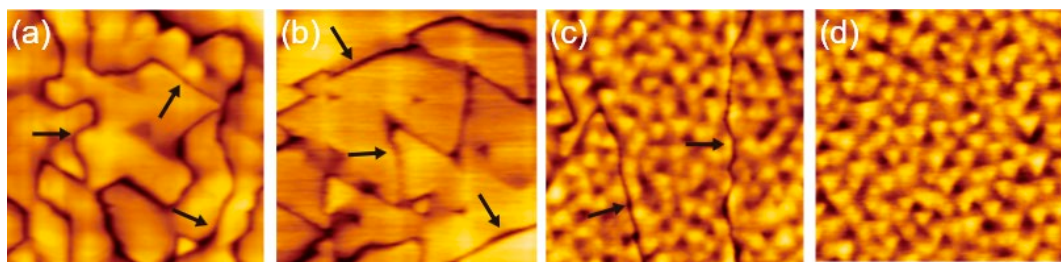


図 2 (a)未処理、(b) 1200°C、(c) 1600°C、(d) 1700°C でアニール処理した AlN 上に成長した NbN の AFM 像 ($0.5 \times 0.5 \mu\text{m}^2$)

た。1700℃でアニールされた AlN のテラスは、1600℃でアニールされたものよりも広がっている(図 1(c,d))。

図 2 に、未処理の AlN および 1200℃、1600℃、1700℃でアニールした AlN 上に成長した NbN の表面 AFM 像を示す。NbN 表面は三角形のグレインで形成されており、未処理の AlN および 1200℃、1600℃でアニールした AlN 上に成長した

NbN には双晶境界(図中の矢印)が存在する。一方、1700℃でアニールした AlN 上に成長した NbN には、観察領域内で双晶境界は存在しなかった。すなわち、高温アニール処理によって AlN 表面の原子ステップ密度を減らすことが、NbN の双晶境界密度の低減に効果的であるといえる。

AlN 上に成長した NbN の結晶方向を EBSD で評価した。図 3 (a) は未処理の AlN 上に成長した NbN の EBSD 方位マップと $\langle 111 \rangle$ 極点図である。一方、図 3 (b) は 1700℃でアニール処理された AlN 上に成長した NbN の方位マップと $\langle 111 \rangle$ 極点図である。極点図は、マップ内の白い四角形の範囲(1×1μm²)から取得した。図 3 (a) の解析領域では、6 回回転対称の極点図が得られており、NbN が双晶となって成長していることが分かる。一方、1700℃でアニールした AlN 上に成長した NbN の EBSD マップは単色になっており、極点図も 3 回対称性を示している。すなわち、この領域では双晶のない単結晶の NbN が成長していると言える。

高温アニール処理を施した AlN 表面上に成長した単結晶 NbN の範囲は約 1μm 四方であり、これは AlN 基板のテラス長(0.5μm)よりも広い。つまり、全ての AlN ステップが NbN の双晶を形成させるわけではない。この現象について考察する。AlN は六方晶ウルツ鉱構造であり、 $\langle 0001 \rangle$ 方向に 2 原子層の周期性を有しているのに対し、NbN は立方晶岩塩型で $\langle 111 \rangle$ 方向に 3 原子層の周期を有する。NbN がレイヤー・バイ・レイヤーモードで成長すると、NbN は AlN 表面上で異なった積層構造を取る(図 4)。図 4 では、NbN の積層を A、B、C、AlN を A と B で示している。奇数層のステップがある AlN 表

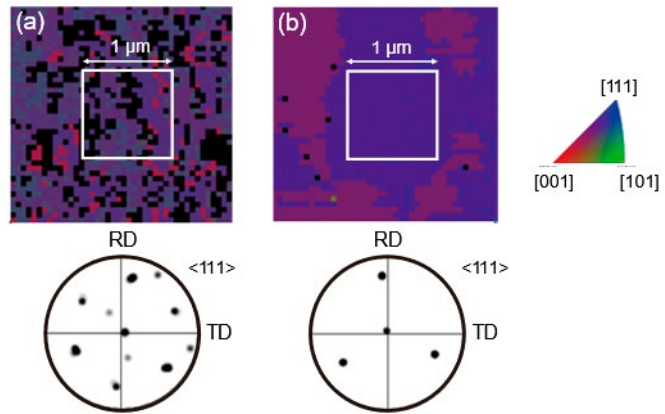


図 3 NbN の EBSD 方位マッピングと極点図 (a) 未処理 AlN、(b) 1700℃アニール AlN 上

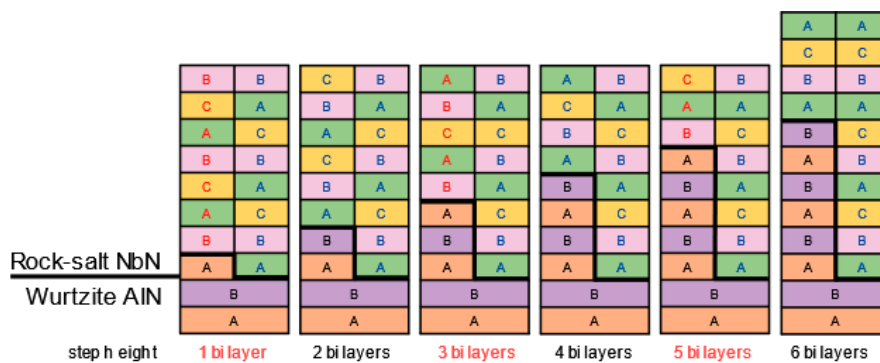


図 4 六方晶 AlN と立方晶 NbN の積層関係

面上では NbN の双晶が形成されてしまう。一方、AlN のステップが偶数層の場合、ステップの上下で NbN の積層順序が一致し、NbN の双晶境界は形成されない。以上の考察より、高温アニールによって AlN の偶数層ステップが形成されることで、NbN 単結晶領域が拡大していると結論付けられる。今後、アニール条件を精密に制御することで、AlN 表面全面に偶数層ステップを形成できるようになれば、より巨大な NbN 単結晶領域を得ることができるだろう。

4. 結論

本研究では、NbN 超伝導薄膜の結晶品質を向上させる技術の開発を行った。NbN と格子整合度が高い AlN を下地基板として採用することで、エピタキシャル NbN 薄膜が成長することが分かった。さらに、AlN に高温アニール処理を施すことで原子レベルで平坦な表面が露出することを確認し、その上に NbN を成長させることで双晶のない単結晶領域がマイクロメートルオーダーで得られることが明らかになった。本研究で開発した結晶成長技術は、NbN 超伝導体を用いた単一光子検出器やエピタキシャル量子ビットを作製する上で、重要な基盤技術となり得る。

5. 謝辞

本研究は、日本板硝子材料工学助成会の研究助成を受けて行ったものである。同会のご支援に感謝申し上げます。