

# 一般財団法人日本産業科学研究所

## 令和5年度研究助成報告書

東京理科大学先進工学部  
准教授・小林篤

### 窒化物半導体・超伝導体接合を利用した量子デバイスの開発

#### 研究の背景と目的

窒化ニオブ(NbN)は、窒化物半導体の AlN や GaN と結晶格子整合性が高い超伝導体で、化学的に安定な超伝導素子材料として期待されている。もしも、NbN 系超伝導体と成熟したプロセス技術のある窒化物半導体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の新機能量子デバイスが実現する。

ごく最近、窒化物半導体の発光素子やトランジスタと窒化物超伝導体を自在に積層させることで、これまでにない量子素子を作製しようとする試みが国内外で活発になってきている。例えば、オンチップ単一光子受発光素子や、電子をクーパー対に置き換えた量子もつれ光 LED、超伝導電極を介して駆動する高移動度電子トランジスタなどの開発が期待されている。しかしながら、これまでに窒化物半導体と窒化物半導体を単結晶でエピタキシャル接合させた事例はなく、これら新機能量子素子の原理実証は実現していない。

研究代表者はこれまでに、パルススパッタエピタキシー法と呼ばれる独自の結晶成長法で、窒化物半導体や窒化物超伝導体の薄膜成長とデバイス作製をおこなってきた。パルススパッタエピタキシー法は、電気パルスを用いてトリガーとして原料原子を  $1\sim 2$  個/ $\mu\text{m}^2$  の密度で供給することのできる結晶成長法である。この手法を使えば、これまで困難であった窒化物半導体と窒化物超伝導体のエピタキシャル融合が実現する。

ボトルネックとなっているのは、両材料の結晶構造が異なることである。窒化物半導体 (AlN、GaN、InN) が六方晶ウルツ鉱型構造であるのに対し、窒化物超伝導体 (NbN、TiN、NbTiN) は立方晶岩塩型構造であるため、接合界面には高密度の結晶欠陥が生じてしまい、世界中のどの研究グループも単結晶接合に成功していない。

単結晶の半導体と超伝導体を融合した量子デバイスを創成するためには、界面物性の理解と制御が欠かせない。しかしながら、過去に、窒化物半導体上への NbN 系単結晶超伝導薄膜の作製プロセス開発を試みた例がなく、界面の諸特性は未解明である。

本研究では、窒化物超伝導体と窒化物半導体の融合による量子機能発現を目指し、単結晶 (エピタキシャル) 接合技術を確立することを目的とする。

## 研究成果

パルススパッタエピタキシー装置を用いて、窒化物半導体ウェハ上に NbN 薄膜をエピタキシャル成長させ、それらの結晶構造、電気伝導特性、超伝導転移温度の関係性を実験的に明らかにした。高分解能 X 線回折法によって結晶を評価したところ、薄膜の作製温度によって、NbN 結晶の回折角度が変化、結晶構造の連続的な変化が起きていることが明らかになった。加えて、ホール効果測定の結果から、NbN 薄膜の電子濃度と電子移動度も結晶構造に強く依存することが明らかになった。さらに、作製した NbN 薄膜は全て極低温において超伝導状態に相転移することがわかった。超伝導転移温度は NbN の結晶構造に依存し、デルタ型 NbN 薄膜で 15K を記録した。今後は本研究成果を基に、半導体・超伝導体融合システムの開発に取り組むべく、薄膜結晶成長に関する研究を進めていく。

## 研究成果の公表状況

- 小林 篤, 「窒化物半導体・超伝導体・強誘電体のエピタキシャル融合」, 第4回半導体ナノフォトニクス研究会 2023年11月22日 (特別招待講演)
- Takahiro Kawamura, Toru Akiyama, Atsushi Kobayashi, Electronic States at the Interface of  $\beta$ -Nb<sub>2</sub>N/AlN Superlattices, 14th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-14) 2023年11月15日(口頭発表)
- Atsushi Kobayashi, Shunya Kihira, Takahito Takeda, Masaki Kobayashi, Takuya Maeda, Takayuki Harada, Toru Akiyama, Takahiro Kawamura, Kohei Ueno, Hiroshi Fujioka, Sputtering Epitaxial Integration of AlN and NbN for Polarity Control and Crystal Phase Manipulation, 14th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-14) 2023年11月14日(口頭発表)