

MgO 基板上的のエピタキシャル Nb 薄膜を用いた超伝導トンネル接合検出器の作製 STJ Photon Detectors using Epitaxially-Grown Nb Thin Films on MgO(100) Substrates

プロジェクト代表者: 明連広昭 (理工学研究科・助教授)
Hiroaki Myoren (Graduate School of Science & Engineering, Associate Professor)

1. はじめに

超伝導トンネル接合(Superconducting Tunnel Junction : STJ)は、エネルギー分散型のフォトン検出器として期待され、研究が進められている。近年では超伝導トンネル接合素子の高いエネルギー分解能や高速計数特性に着目し、接合そのものによる直接検出ばかりでなく基板を吸収体として用いた、いわゆる基板吸収型の STJ フォトン検出素子が提案されている。具体的な研究には、基板吸収型 α 線検出器、基板吸収型 THz 波検出器等が挙げられる。基板を吸収体として用いることから、本来検出面積が STJ 素子の面積(数十ミクロン角程度)に制限されていたことが基板の面積まで拡大することができるようになった。[1] さらに STJ 素子では検出が困難な THz 波検出器では、THz 波帯において吸収係数の大きな基板を吸収体として利用する。吸収体で THz 波を吸収し、その吸収エネルギーをフォノンのエネルギーとして STJ 素子に伝えることで検出が可能となった。[2]

MgO(100)単結晶基板上的のエピタキシャル Nb 薄膜を用いた STJ 素子では、Nb 薄膜中の欠陥が減少することによって準粒子寿命が延び、フォトン検出器としての高性能化が期待できる。さらに STJ 素子が高帯域であることに着目すると、たとえば基板中の Mg により熱中性子が吸収されたときに発生する、即発 γ 線を STJ 素子で検出する熱中性子検出器の実現の可能性がある。また、基板表面に 2 次元的に配置した STJ 素子アレイを用いれば、基板相当面積での熱中性子の位置検出器も可能となると考えられる。

本研究では、MgO(100)単結晶基板上へ Nb 薄膜がエピタキシャル成長する作製条件を見いだすこと、エピタキシャル Nb 薄膜を用いた STJ 素子を作製し X 線および中性子線検出器の実現することを目的として実験を行った。

2. エピタキシャル成長 Nb 薄膜の作製

MgO(100)単結晶基板上に MgO と同じ NaCl 構造をもつ NbN が室温においてもエピタキシャル成長すること[3]、および NbN の (100) 面の Nb の平面配置が 45 度回転した体心立方の Nb の (100) 面と同じ配置を取ることに着目して、エピタキシャル成長した Nb 薄膜を MgO(100)基板上に成長するための成長条件を探索した。表1はそれぞれの結晶構造と格子定数を示す。

表1 格子定数

材料	結晶構造	格子定数(nm)	格子定数 $\times \sqrt{2}$ (nm)
Nb	bcc 構造	0.330	0.467
NbN	NaCl 構造	0.439	
MgO	NaCl 構造	0.421	

Nb 薄膜の作製条件(直流スパッタ電力:300W、Ar ガス流量:100sccm、Ar 圧力:0.93Pa)に固定し、NbN バッファ層の作製条件を変えて Nb 薄膜の成長面方位を X 線回折法を用いて測定した。図1は、NbN バッファ層を直流スパッタ電力 300W、ガス流量 Ar:80sccm、N₂:1.2sccm、放電圧力 0.93Pa、放電電流 0.68mA で作

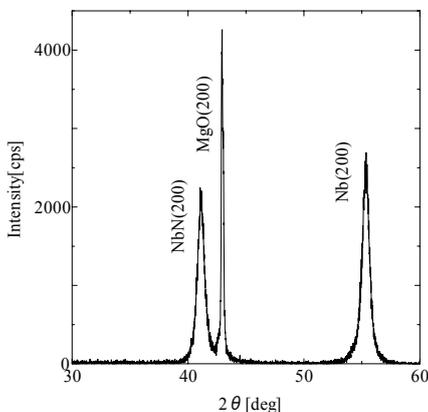


図1 MgO(100)基板上に作製した NbN/Nb 薄膜の X 線回折パターン

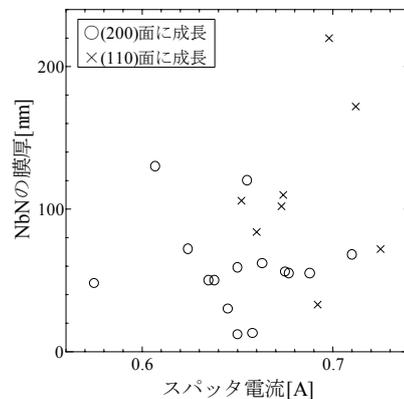


図2 NbN バッファ層スパッタ時の放電電流と膜厚と Nb 薄膜の成長方位の関係

製し、Nb を 150nm 堆積した場合の X 線回折パターンを示す。その結果、NbN は(200)面に、Nb 膜は(200)面に成長することが分かった。しかし、同じ条件で Nb(110)面が成長することもあった。そこで、NbN バッファー層のスパッタ中の放電電流の値と膜厚に着目して Nb の成長方向をまとめた結果を図 2 に示す。同図から、NbN をスパッタするときの放電電流が 0.65A 以下のとき、Nb は(100)面に成長しやすいことが分かった。

(100)面と(110)面成長した Nb 薄膜の表面平坦性を原子間力顕微鏡(AFM)により観察した。図3は、Nb が(100)面成長した場合の AFM 像を示す。二乗平均粗さは 0.443nm となり、超伝導トンネル接合を作製するのに十分な表面平坦性を有することが確認された。

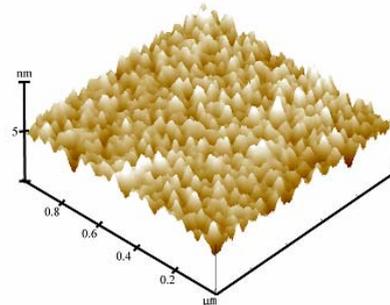


図3 (100)面成長した Nb 薄膜の AFM 像

また、四探針法により電気抵抗の温度依存性を調べたところ、(100)面方位に成長した Nb 薄膜の超伝導転移温度は $T_c=9.2K$ 、 $RRR=[R(300K)/R(10K)]$ は 4 以上となり、いずれも(110)面方向に成長した Nb 薄膜よりも良好な値を示した。

4. STJ 素子の作製

X 線回折結果を基に、Nb が(100)面成長する条件で MgO 基板上に NbN、Nb を堆積させた後に一旦大気中に試料を取り出し、別の装置で AlOx トンネルバリアおよび上部 Nb 層を堆積した。その後、反応性イオンエッチング法により微細加工して STJ 素子を作製した。作製した素子の断面図を図4に示す。同図における各膜厚は NbN:50nm、下部電極エピタキシャル成長 Nb:150nm、Al:20nm、Al-AlOx:20nm、上部電極 Nb:150nm で、層間絶縁膜 SiO₂:350nm、Nb 配線層:580nm である。

図5は、作製した素子の電流－電圧特性を示す。超伝導ギャップの観測される超伝導トンネル接合の電流－電圧特性を得ることができなかった。平成18年度中に、NbN/Nb エピタキシャル成長を行ったスパッタリング装置にトンネルバリアの自然酸化を行うロードロック室を設けて、超伝導トンネル接合素子の超伝導/トンネルバリア/超伝導構造を真空を破らずに作製し、超伝導トンネル接合素子の X 線および中性子線に対する応答を測定する予定である。

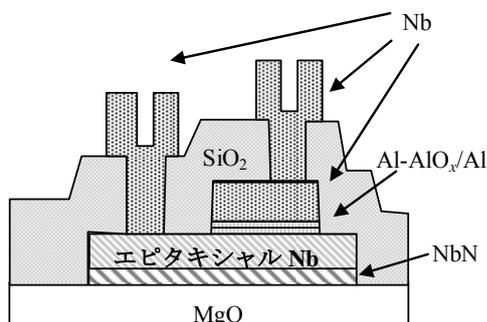


図4 STJ 素子断面図

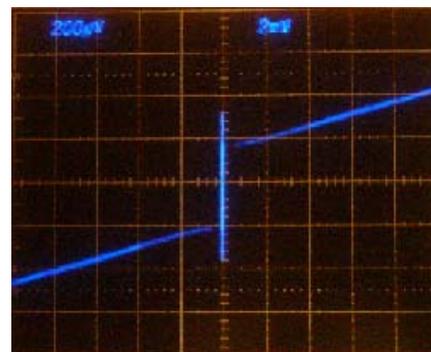


図5 作製した STJ 素子の電流－電圧特性(x:2mV/div,y:200μA/div.)

5. まとめ

MgO(100)単結晶基板上に NbN 薄膜がエピタキシャル成長することを利用して、(100)面方向にエピタキシャル成長した Nb 薄膜を作製できる条件を見いだした。これにより、準粒子寿命の長い STJ 素子が作製できるとともに、MgO 基板による中性子基板吸収型検出器の応答実験が可能になると期待される。

参考文献

- [1] Kurakado M., Kamihirata S., Kagamihata A., Hirota K., Hashimoto H., Sato H., Hotch H., Shimizu H. M., Taniguchi K., “Two-dimensional position resolution and correction of position dependence of pulse heights of superconducting series-junction detectors”, Nucl. Instr. Meth. A, Vol. 506, pp.134-142 (2003).
- [2] Otani C., Taino T., Nakano R., Hoshino K., Shibuya T., Myoren H., Ariyoshi S., Sato H., Shimizu H.M., Takada S., Kawase K., “A Broad-Band THz Radiation Detector Using a Nb-Based Superconducting Tunnel Junction,” IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.15, No.2, pp.591- 594 (2005).
- [3] Myoren H., Shimizu T., Iizuka T. and Takada S., “Properties of NbTiN Thin Films Prepared by Reactive DC Magnetron Sputtering,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.11, no.1, pp.3828-3831 (2001).