

結晶成長させた窒化物を用いた超伝導量子ビット

金 鮮美 〈情報通信研究機構未来 ICT 研究所 kimsunmi@nict.go.jp〉

寺井弘高 〈情報通信研究機構未来 ICT 研究所 terai@nict.go.jp〉

山下太郎* 〈名古屋大学大学院工学研究科 taro@tohoku.ac.jp〉

猪股邦宏 〈産業技術総合研究所新原理コンピューティング研究センター kunihiro.inomata@aist.go.jp〉

超伝導量子ビットは、電子や原子、イオンや光子といった微視的粒子からなる量子ビットとは異なり、巨視的な電気回路上に発現する量子力学的重ね合わせ状態やエンタングルメントの制御を可能とした「人工原子」の一種である。これは主にアルミニウム (Al) ベースの**ジョセフソン接合**により構成され、回路設計の改良や作製プロセスの改善・工夫など様々な研究を経て、コヒーレンス時間は20年程かけて当初のそれよりも約5桁向上した。しかしながら、超伝導量子ビットの心臓部であるジョセフソン接合には、酸化絶縁膜として非晶質酸化アルミニウム (AlO_x) が含まれるため、そこに存在する**欠陥二準位系**がデコヒーレンス源として作用することが懸念されている。したがって、さらなるコヒーレンス時間の改善に向け、ジョセフソン接合材料の改良が必要不可欠と考えられる。

このようなジョセフソン接合材料の筆頭候補となり得るのが、窒化物系超伝導体である窒化ニオブ (NbN) と絶縁膜となる窒化アルミニウム (AlN) の組み合わせである。**エピタキシャル成長**技術によって作製される全窒化物 $\text{NbN}/\text{AlN}/\text{NbN}$ ジョセフソン接合では、絶縁膜として機能する AlN も結晶化しているため、非晶質 AlO_x 中に存在するような欠陥二準位系に起因するデコヒーレンスの抑制が期待される。

また、 NbN の超伝導転移温度は約 16 K であり、 Al のそれ (約 1 K) と比較して一桁高いことから、 Al ベースの超伝導量子ビットよりも高温動作が期待できること、さらに、デコヒーレンス源の一つである準粒子の励起に高いエネルギーが必要となる

ため、その要因となる熱や赤外光に対する外乱に強固になると予想され、より安定動作可能な超伝導量子ビットの実現が期待できる。

異種材料間におけるエピタキシャル成膜技術では、格子定数がほぼ等しいという条件が前提となる。つまり、 $\text{NbN}/\text{AlN}/\text{NbN}$ 接合を基板上にエピタキシャル成長させるためには、 NbN とほぼ同じ格子定数を持つ酸化マグネシウム (MgO) 基板を用いることがこれまでの定石であった。ところが、 MgO は高周波領域における誘電損失が大きく、 MgO 基板上的 $\text{NbN}/\text{AlN}/\text{NbN}$ 接合を用いた超伝導量子ビットでは、コヒーレンス時間が $0.5 \mu\text{s}$ 程度と MgO 基板の誘電損失に大きく制限される結果となっていた。

我々は、今回、この問題を解決するために TiN バッファ層を用いることでシリコン基板上に全窒化物 $\text{NbN}/\text{AlN}/\text{NbN}$ 接合からなる超伝導量子ビットを実現し、平均値としてエネルギー緩和時間 (T_1) $16.3 \mu\text{s}$ 、位相緩和時間 (T_2) $21.5 \mu\text{s}$ のコヒーレンス時間を達成した。これは MgO 基板上に作製された従来の全窒化物超伝導量子ビットと比較して、 T_1 は約 32 倍、 T_2 は約 43 倍と一桁以上の飛躍的な改善を示す結果である。窒化物系超伝導体薄膜のエピタキシャル成長技術と積層型ジョセフソン接合作製プロセスは、斜め蒸着による Al ベースのジョセフソン接合作製プロセスでは実現不可能な三次元積層構造も比較的容易に作製可能となり、高度な半導体プロセスとの相性も良いことから、量子回路の設計に大きな自由度と可能性をもたらすことが期待される。

用語解説

超伝導量子ビット：

量子コンピュータで使われる量子情報の最小単位で、0 と 1 の重ね合わせの状態を、超伝導体で構成される量子回路で実現する量子ビットが超伝導量子ビットである。

ジョセフソン接合：

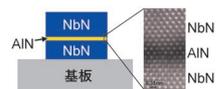
二つの超伝導電極を極薄の絶縁体で隔てた構造の接合である。

欠陥二準位系：

誘電物質中の格子欠陥などで生じる GHz 帯のエネルギーを持つ量子二準位系で、量子ビットと結合するとコヒーレンス時間低下の原因となる。

エピタキシャル成長：

エピタキシャル成長 (Epitaxial growth) は、薄膜結晶成長技術の一つで、基板上に結晶面をそろえて配列する成膜法である。



エピタキシャル成長法で作製した窒化物ジョセフソン接合の概略図 (左) と接合付近の透過電子顕微鏡写真 (右)。

* 現所属：東北大学大学院工学研究科