

超伝導転移温度の高い 2 ホウ化マグネシウム薄膜の室温成膜法を開発

～省エネルギーな超伝導素子の実用化へ期待～

公立大学法人大阪府立大学(理事長：辻洋)大学院工学研究科の穴戸寛明助教、吉田卓矢(博士前期課程2年)、石田武和教授は、超伝導転移温度が 27 K(約-246℃・注1)と従来型の超伝導素子材料よりも高い超伝導転移温度を示す 2 ホウ化マグネシウム(MgB₂)のエピタキシャル膜(注2)を、110℃の従来にない低温で成膜することに成功しました。

超伝導(注3)は、リニアモーターカーや送電線など大型機器への応用だけではなく、超高感度な磁気センサーとして、脳磁計、心磁計、地下資源探査などにも応用されています。ところが、従来の超伝導素子は 4.2 K(約-269℃)程度の極低温まで冷やさなければ動作せず、冷却に大掛かりな装置や高価な寒剤が必要でした。今回、研究チームは 27K で超伝導転移を示す MgB₂ 薄膜の成膜に成功しましたが、20 K(約-253℃)程度であれば冷却に必要な装置を大幅に簡略化でき、コストの削減、省スペースが達成されます。

これまでの応用研究を大きくブレークスルーするこの技術により、半導体等で広く普及している一般的な微細加工法フォトリソグラフィを用いて、MgB₂の微細構造や多層構造の作製がどこでも簡便に安価に行うことが可能となり、MgB₂の飛躍的な普及につながるとともに、MgB₂薄膜での超伝導素子の応用に大きく道が開かれることが期待されます。また、国が進める水素化社会で一層の活用が見込まれる液体水素での冷却でも実用化できます。

なお、本研究の成果は、応用物理学速報誌アプライド・フィジックス・エクスプレス(Applied Physics Express ; <http://iopscience.iop.org/1882-0786/>) に 10 月 21 日にオンライン(オープンアクセス)掲載されます。論文タイトル：Ambient temperature epitaxial growth of MgB₂ thin films with a Mg buffer layer (Mg 中間層を用いた常温での MgB₂ 薄膜のエピタキシャル成長)

著者：穴戸寛明、吉田卓矢、石田武和

研究成果のポイント

1. 基板の上にマグネシウム(Mg)層を下地層として製膜することで 2 ホウ化マグネシウム(MgB₂)超伝導体の 110℃での製膜に成功しました。膜の性質もエピタキシャル(単結晶)膜と優れたものであることが分かりました。
2. 得られた MgB₂ 超伝導体薄膜は超伝導転移温度 27 K にて超伝導を示しました。これは従来の超伝導素子よりも簡易な冷凍機で超伝導素子を動作させられます。
3. 今回開発された成膜手法を応用することにより簡便に微細構造や多層構造を持った超伝導素子が簡便に低コストで作製することができます。これは今まで実用化が進んでいなかった MgB₂ 超伝導体の素子応用を強力に推進する可能性があります。

1. 研究詳細

MgB₂ 薄膜を利用した超伝導素子の研究はこれまでも行われてきましたが、成膜に 250℃～800℃ の高温が必要とされていました。MgB₂ 素子などの応用を進めるためには MgB₂ の微細構造の加工が必要で、特別なテクニック（物理的エッチング）を用いられてきました。この方法では、加工により超伝導の性質が劣化する問題もありました。また、高度な機能を持たせるために欠かせない多層の積層構造の構築も困難でした。簡便な微細加工技術がないことが、高周波や高速の電子デバイスとして優れた性質をもつ MgB₂ の応用を推進するための大きな問題となっていました。今回、研究グループはマグネシウム(Mg)層を下地層として採用することで、その上に MgB₂ 層を成膜するために必要な温度を 110℃まで大幅に低下させることに成功しました。この新技術により、150℃以下の低温での成膜では、フォトリソグラフィが適用できるようになります。

2. 研究背景

2 ホウ化マグネシウム(MgB₂)は 2001 年に青山学院大学（当時、現在は岡山大学）の秋光純教授のグループにより発見された超伝導体で、40 K(約-233℃)に迫る高い超伝導転移を持つことから大きな期待を集めてきました。超伝導素子として利用するには薄膜を成膜し、更に加工して微細構造を作り込み、かつ絶縁体などとの積層構造を繰り返すプロセスが欠かせません。発見当初から薄膜化は試みられており、700℃程度的高温であれば成膜ができると報告されていました。半導体の微細加工で最もよく用いられているリフトオフプロセス(注 4)と呼ばれる有機物（レジスト）を使う簡便な微細加工手法を適用するには 150℃以下で成膜する必要がありましたが、その技術はこの 15 年の間、誰も開発に成功していませんでした。また積層構造を作る際も、低温での成膜が可能となれば明瞭な上下の境界層を実現できるため、素子の性能も高まります。そのため、以降も成膜温度の低温化への試みの競争が続けられており、200℃程度まで引き下げることで成功していました。

3. 研究成果

今回の大阪府立大学の新技術は成膜温度を一気に 110℃まで下げることに成功したもので、MgB₂ の応用を推進し、イノベーションを実現するためのブレークスルー技術と考えられます。本グループは基板上にマグネシウム(Mg)層を下地層として蒸着することにより、標準的なリフトオフプロセスが可能となる 110℃での MgB₂ エピタキシャル薄膜の成膜を実証しました（図 1 参照）。Mg は MgB₂ の構成元素であり、両者の親和性は極めて高いものとなります。そのため従来は達成できなかった低い温度での成膜に初めて成功できたのです。得られた膜は 27 K で超伝導転移を示しました。超伝導転移により抵抗は急激に減少し、およそ 0.8 K の温度幅でゼロ抵抗に達しました（図 2 参照）。また、X 線による構造解析から MgB₂ 膜は優れた結晶性を示すエピタキシャル膜であることが分かりました。これは新開発の膜が従来にない低温での成膜にも関わらず良好な超伝導性と結晶性を持っていることを示しています。

4. 今後の展開

今回開発された成膜手法を応用すれば、半導体の微細加工で最もよく用いられているリフトオフプロセスと呼ばれる簡便な微細加工手法を適用し、多くの研究機関や企業で簡便に微細構造を作製することができます。また高機能な超伝導電子回路を作製するには欠かせない、超伝導体層と絶縁体層・金属層が複数回積み重なった多層構造の作製も可能となってきます。これにより、今まで実用化が進んでいなかった MgB₂ 超伝導体の素子応用を強力に推進する可能性があります。また、MgB₂ の超伝導転移温度

が高いことから、従来の超伝導素子の弱点であった大型・高価な冷却装置が必要な点についても、より小型・簡易な装置への置き換えが可能となり、広く社会に普及が進むと期待されます。国が推進する水素化社会の実現に不可欠で大量に製造されている液体水素での冷却でも動作する安価な素子の製造が可能になります。

5. 研究助成資金等

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金、基盤研究(S) (研究代表者 石田武和) 同じく若手研究(A) (研究代表者 宍戸寛明)、大阪府立大学大学院工学研究科 FI 推進研究奨励研究費 (研究代表者 宍戸寛明) などの支援を受けて行われました。

6. 解説図

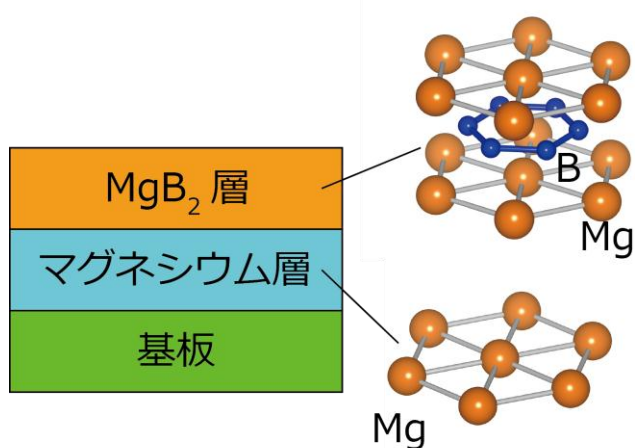


図1. マグネシウムの中間層を用いて、その上に2ホウ化マグネシウム薄膜を製膜した。

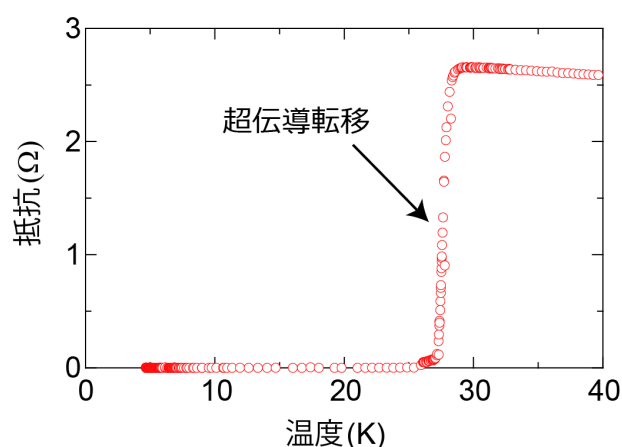


図2. 2ホウ化マグネシウム薄膜の電気抵抗の温度変化で、シャープな超伝導転移を示す。

7. 有識者のコメント：秋光純教授（岡山大学）

MgB₂は典型的なBCS型(従来型)の超伝導だと思われてきた(最近新しく発見されたSH₃も同じ範疇に属する超伝導だと信じられている。)この種の超伝導は、軽い、安価、安定、元素数が少ないなど応用にとって多くのメリットがあり、応用面で多くの研究が行われている。そのなかで最近大きな2つのブレークスルーが日本人によって成し遂げられた。1つは熊倉グループ(NIMS)による、高いJ_c(臨界電流)の実現である。他は、大阪府立大学石田グループによる本研究であり、低温での高品質の薄膜の作製に成功したことである。この温度はフォトレジストが使える温度であり、この手法が成功することにより、SQUID素子(注5)やSFQ回路(注6)への応用が爆発的に発展する可能性がある。MgB₂の超伝導応用への新しい第一歩であると思われ、MgB₂の発見者として、この基盤技術の開発を高く評価したい。

8. 参考：用語の解説

1. ケルビン

国際単位系 (SI) の基本単位で、温度の単位。物質を構成する原子・分子の熱による振動がすべて静止する温度を零度、水の三重点を 273.16 度 (K) と定義されています。セ氏温度に 273.15 度を加えた値で表します。単位の表記は K。絶対温度。

2. MgB₂ エピタキシャル薄膜

2001 年、日本の研究者 (秋光教授ら) により発見された新しい超伝導体です。マグネシウムやボロンは資源小国である日本でも簡単に入手できることから、我が国でも実用化に向けた開発が進められてきました。本研究では 4 H-SiC 単結晶基板の全面に Mg 層を 30 nm (1 億分の 3 メートル) 成長させ、更にその上に 2 ホウ化マグネシウム (MgB₂) 層を 100 nm (1000 万分の 1 メートル) 成長させました。Mg、MgB₂ 共に結晶の方位は単結晶基板の方位と良く揃っています。このような膜をエピタキシャル膜と呼びます。蒸着は分子線エピタキシー法と呼ばれる真空蒸着法の一つで 10⁻⁶ Pa (パスカル; 1000 億分の 1 気圧) の超高真空下で行いました。

3. 超伝導

超伝導体は超伝導転移温度以下で電気抵抗が急激に減少しゼロを示します。そのためエネルギーのロスなしに大きな電流を流すことが可能となります。ただし流せる電流には上限があり、臨界電流 J_c 以上の電流を流すと超伝導は壊れてしまうため、実用上は大きな臨界電流を持たせることが重要になります。抵抗がゼロになる性質を利用して、強力な電磁石 (超伝導磁石) が作られています。強力な超伝導磁石はリニアモーターカーや MRI のほか、超伝導の性質を生かした電子素子としても利用されています。

4. リフトオフプロセス

主に半導体において発展してきた代表的な微細加工技術です。基板表面にレジストと呼ばれる有機化合物の膜を張ります。レジストの一部を紫外線、電子線などで照射し、現像を行うことで照射された部分のみを剥離もしくは保持します。この上から成膜を行い、残ったレジストを溶媒に溶かしてやります。するとレジスト上に成膜された膜はレジストと一緒に剥離し、基板上に蒸着された膜だけが残ります。これにより微細構造を作製することができます。

5. SQUID 素子 (Superconducting QUantum Interference Device 超伝導量子干渉計)

超伝導体のリングの一部を超伝導体-絶縁体-超伝導体のような接合にすることで、超高感度な磁気センサーとして利用するものです。超伝導を利用した素子の代表例で広く使われています。その感度は脳や心臓が作る地磁場の 100 万分の 1 程度の微弱な磁場を検出して診断に役立つ脳磁計、心磁計、地下資源探索器として実用化されているほどです。

6. SFQ 回路 (Single Flux Quantum 単一磁束量子回路)

超伝導体のリングの内に量子化された磁束があるかないかを 0 と 1 に対応させたデジタル回路です。超高速・超低消費電力なデジタル回路として研究開発が盛んに進められています。磁束の出し入れのコントロールのため超伝導体のリングの一部に超伝導体-絶縁体-超伝導体のような接合を挿入する必要があります。大規模回路を実装するためには精度の高い微細構造と多層膜構造が必要になります。また個々の接合が近い特性を持つことも重要です。