MERIT 自発融合研究報告書

原子層超伝導体 Si(111)-($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)R30°-Sn の電気伝導測定

佐藤 瞬亮 [1], 王 旭韜 [2]

[1] 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
[2] 上海交通大学物理学・天文学研究科

著者紹介

佐藤 瞬亮　これまでの研究では既存の超高真空強磁場印加型 4 探針電気伝導測定装置を改良し、トンネル分光測定を可能にする装置開発を行ってきた。本研究では電気伝導測定を担当した。

王 旭韜　超高真空中で電気伝導測定・トンネル分光測定・超伝導反磁性を測定可能な装置を立ちあげ、カルシウムをインターカレートしたグラフェンに関する研究を行ってきた。本研究では試料作製を担当した。

1　研究背景

Si(111) 上に 1/3 原子層のスズを蒸着した Si(111)-($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)R30°-Sn 表面超構造は Mott 絶縁体となることが知られているが [2, 3]、基板として p 型にヘビードープされた Si(111) ウエハを用いるとスズ原子層にホールドープすることができ、それによって系が金属的に振る舞うようになる。さらに、走査トンネル分光 (STS) 測定によって 4.7 K 以下の低温では超伝導ギャップが確認されている [4]。この系の超伝導は、強い電子相関によってクーパー対が形成される非従来型のペアリングによるものだと予測されている [5]。また、Mott 絶縁体にホールドープすることによって超伝導が発現するというシナリオは、銅酸化物系超伝導体と共通する傾向であるが、この系は銅酸化物系超伝導体と比較して遥かに単純なものであり、こうしたシンプルな物質系を調べることによって、高温超伝導に対する理解をも深めることができると期待されている。

2　目的

本研究ではトンネル分光測定で超伝導が観測されている原子層超伝導体 Si(111)-($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)R30°-Sn について *in situ* 電気伝導測定を行い、電気抵抗の温度依存性・磁場依存性からその超伝導特性について明らかにすることを目指す。

3 実験方法

東京大学理学系研究科物理学専攻長谷川修司研究室が所有する超高真空強磁場印加型 4 探針電気伝導測定装置 [1] を用いて試料作製と電気伝導測定を行う。この装置では反射高速電子線回折 (RHEED) パターンを観察しながら分子線エピタキシー法によって基板上に結晶成長をさせて試料作製ができ、さらに、作製した試料を真空中から取り出すことなく電気伝導測定を行うことが可能である。試料の作製から測定まで一貫して超高真空中で行うため、大気暴露による試料劣化・構造変化などの可能性を排除することができる。電気伝導測定時の試料の到達最低温度は約 0.8 K であり、試料面直方向に磁場を最大 7 T まで印加することができる。

4 試料作製

先行研究 [4] では、STS 測定によってホウ素がヘビードープされた Si 基板上に $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})$-Sn 構造を作製し、超伝導ギャップを観測している。つまりヘビードープ基板のフラッシュによりトーパントのホウ素を表面偏析させて $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 超構造を形成し、その上に $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})$-Sn 構造を作製することが超伝導発現に必要とされている。しかし電気伝導測定の場合、以前研究室のメンバーがヘビードープ基板を用いて測定を試みた際には、基板のキャリア密度が高すぎたために基板の電気伝導度の方が低温でも支配的となり、スズ原子層に由来する振る舞いを明確に観測できなかった。

そこで今回は基板として、抵抗率の高い支持層 (1–100 Ω · cm) の上に、ホウ素がヘビードープされた p 型活性層 (0.001–0.005 Ω · cm) を貼り合わせた SOI(Silicon-On-Insulator) 基板のうち条件に合うものを探して購入し、用いることにした。活性層は先行研究と同じボロンヘビードープであるため $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})$-B 構造が作製できると期待でき、さらに低温では支持層が絶縁化するので基板の電気伝導度への影響を小さくすることができる。これにより、スズ原子層の電気伝導特性の観測が可能になると考えられる。なお、本研究で用いた基板の支持層・活性層の厚さはそれぞれ (500 ± 15) µm, (50.0 ± 2.0) µm である。

基板を超高真空チャンバー内に移送して脱ガスを行ったのち、約 1250 °C で 5 秒間 Si 基板を加熱することで表面を清浄化した。清浄な Si(111) 表面は 7×7 倍の周期をもった超構造をつくるが、それに対応する RHEED パターンが観察された（図 1(a))。その後、約 1250 °C で 30 秒間基板を加熱する操作を繰り返し行ったところ、Si(111)-(7×7) 超構造のスポットは徐々に不明瞭になっていき、1×1 の RHEED パターンのみが観察されるようになった（図 1(b))。ここからさらに基板を約 1250 °C で 30 秒間加熱する操作を繰り返し行うとドーパントのホウ素が表面付近で偏析したことによる $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ のパターンが出現した（図 1(c))。

表面を清浄化した Si 基板を約 600 °C に保ち、そこへスズを 1/3 原子層程度蒸着すると $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ のシャープな RHEED パターンが出現した（図 1(d, e))。なお、表面が図 1(a-c) に対応するいずれの基板上でもスズを蒸着することで明瞭な $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ のスポットを持った RHEED パターンが観察された。なお、図 1(d) は図 1(a) のような Si(111)-7×7 表面上にスズを蒸着したときの、図 1(e) は図 1(c) のような Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-B 表面上にスズを蒸着したときの RHEED パターンである。Si(111) 基板表面におけるドーパント（ホウ素）の偏析の程度によらず、スズの蒸着によって Si(111)-$(\sqrt{3}\times\sqrt{3})$-Sn 表面超構造を作製できたといえる。

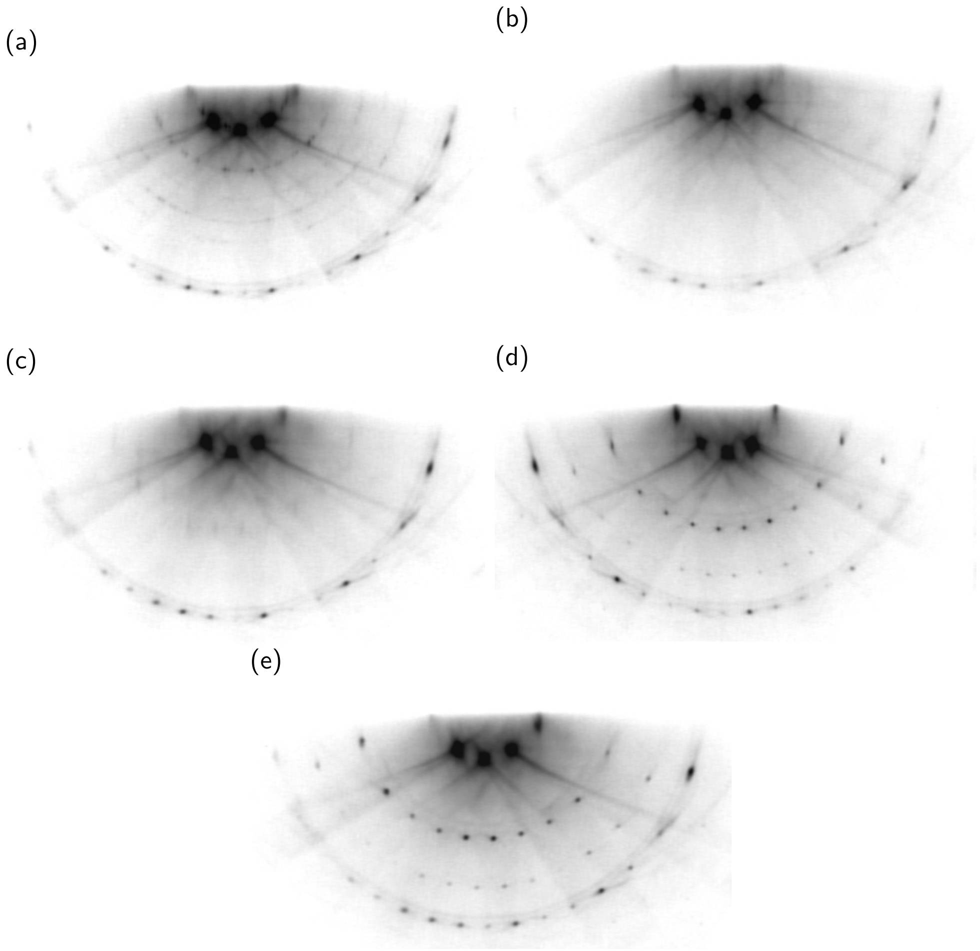

図 1　(a) SOI 基板の表面を清浄化して得られた Si(111)-7 × 7 表面の RHEED パターン。(b, c) 基板を約 1250 °C に加熱する操作を繰り返すと表面にドーパントのホウ素が偏析して (b) のように 7 × 7 のスポットが見えなくなり、さらに同様の操作を続けることによって (c) のように $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$-B 構造ができる。(d) 基板を約 600 °C に保ちながら Si(111)-7 × 7 表面上にスズを 1/3 原子層蒸着することによって Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)-Sn が得られる。(e) 表面にホウ素が偏析して (c) のようになった基板上でも (d) と同様にスズを蒸着することによって Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)-Sn が得られる。なお、(b) のような表面の基板についても、スズの蒸着によって同様の RHEED パターンが得られた。(a-e) いずれも電子線の入射方向は $\langle\bar{1}10\rangle$ である。

5　電気伝導測定

図 1(a) のような Si(111)-(7 × 7) 表面上にスズを蒸着して作製した Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)-Sn 試料について電気伝導測定を行った。抵抗率の温度依存性を図 2 に示す。1.4 K から 5.0 K の範囲で 1.3 Ω/□ 程度とほぼ一定のシート抵抗が得られた。超伝導が発現した場合は装置の分解能を考慮すると 0.1 Ω/□ のオーダーの抵抗率が得られるはずであるため、測定した試料は超伝導転移をしていないと考えられる。

図 (b, c) のようにホウ素の偏析が進んだ表面上にスズを蒸着して作製した試料はスズ原子層へより強くホールドープされるためにより強く超伝導発現が期待されるが、実験装置のトラブルが生じて測定スケジュールが

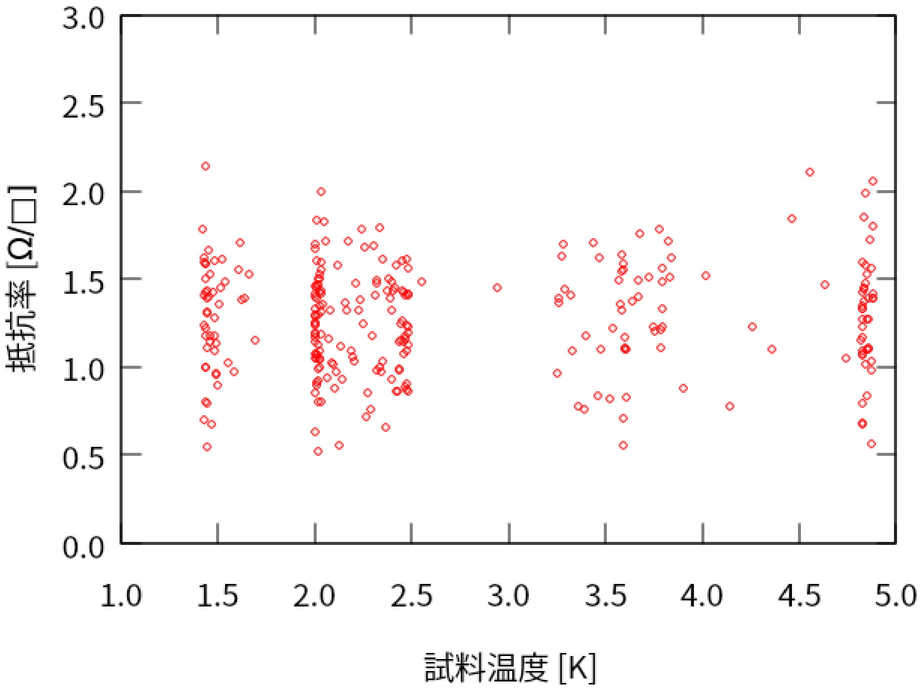

図 2　Si(111)-(7 × 7) 表面上にスズを蒸着して作製した Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)-Sn 試料の抵抗率の温度依存性。1.4 K から 5.0 K の温度で 1.3 Ω/□ 程度とほぼ一定の値を示した。

後ろ倒しになったため、自発融合研究の期間中に測定を行うことができなかった。

6　まとめ

SOI 基板上に 1/3 原子層のスズを蒸着することによって、通常の Si 基板上と同じく Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)-Sn 表面超構造を作製することに成功した。ドーパントのホウ素が基板表面に偏析している程度によらず、この表面超構造が作製できることも確かめられた。

電気伝導測定では、ホウ素偏析をせずに Si-7 × 7 表面上にスズを蒸着した試料では 1.4 K まで冷却しても超伝導転移が見られなかった。また、SOI 基板を用いたことで試料の常伝導抵抗は 1.3 Ω/□ 程度まで高くできていることが確認できた。これは本研究で用いた装置の測定下限抵抗値を考えても、超伝導転移を観測するために十分な大きさであると考えている。

STS による先行研究を踏まえると、ホウ素が表面に偏析した基板上にスズを蒸着した試料で超伝導転移が強く期待される。今回の自発融合研究の期間では装置トラブルのためにそうした試料の測定を行うことができなかった。装置復旧後、ボロン偏析表面に Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)-Sn の超構造の作製を行い、電気伝導測定によって、早期の超伝導の観測を目指していきたい。

7　謝辞

本研究の遂行にあたり、指導教員である東京大学理学系研究科物理学専攻の長谷川修司教授、上海交通大学物理・天文学研究科の刘灿华教授には多大なご支援・ご指導を賜りましたこと、お礼申し上げます。また、研究を進めるにあたって東京大学長谷川研究室の秋山了太助教にご指導・ご協力をいただきました。終わりに、本融合研究の承認をいただきました副指導教員の中村泰信教授と、融合研究の機会を提供してくださった MERIT プログラムに感謝いたします。

参考文献

[1] M. Yamada, T. Hirahara, R. Hobara, S. Hasegawa, H. Mizuno, Y. Miyatake, T. Nagamura, e-J. Surf. Sci. Nanotec. **10**, 400 (2012).

[2] T. Hirahara, T. Komorida, Y. Gu, F. Nakamura, H. Idzuchi, H. Morikawa, and S. Hasegawa, Phys. Rev. B **80**, 235419 (2009).

[3] G. Li, P. Höpfner, J. Schäfer, C. Blumenstein, S. Meyer, A. Bostwick, E. Rotenberg, R. Claessen, and W. Hanke, Nat. Commun. **4**, 1620 (2013).

[4] X. Wu, F. Ming, T. S. Smith, G. Liu, F. Ye, K. Wang, S. Johnston , and H. H. Weitering, Phys. Rev. Lett. **125**, 117001 (2020).

[5] S. Wolf, D. Di Sante, T. Schwemmer, R. Thomale, and S. Rachel, Phys. Rev. Lett. **128**, 167002 (2022).