

修士学位論文要約（令和 4 年 3 月）

プラズマ CVD による超伝導体/グラフェンナノリボン 接合素子の直接合成

佐藤 尚郁

指導教員：金子 俊郎， 研究指導教員：加藤 俊顕

Direct Synthesis of Superconductor / Graphene Nanoribbon Junction Device by Plasma CVD

Naofumi SATO

Supervisor: Toshiro KANEKO, Research Advisor: Toshiaki KATO

Graphene nanoribbon (GNR) gather intense attentions because of their superior electrical features. Until now, we developed a novel method based on the advanced plasma CVD with nanoscale metal catalyst (metal nanobar) for position selective synthesis of GNR in wafer scale. In this study, we attempted to grow GNR from MoRe (Molybdenum-rhenium) nanobar, known as a superconductor metal, for the integrated synthesis of GNR-based Josephson junction devices. Systematic investigation revealed that GNR can be synthesized from the MoRe nanobar. The color mapping of the differential resistance dV/dI as a function of gate voltage V_g and source-drain current I_{sd} measured at cryogenic temperatures shows the critical current tends to be modulated by V_g , indicating the Josephson junction may be formed through the MoRe/GNR/MoRe structure. Furthermore, the clear oscillations of critical current caused by Fabry-Pérot interferences were observed in the specific gate voltage region. This means that the carriers in the GNR are ballistically transported in our GNR Josephson device. These results can contribute to realizing large scale integration of GNR-based high performance Josephson junction devices.

1. はじめに

グラフェンを1次元リボン構造にしたグラフェンナノリボン(GNR)は高いキャリア移動度などの優れた電気特性から、優れた半導体デバイスへの応用が期待されている。本研究グループではこれまで、金属ナノバーと呼ばれる金属の微小構造触媒を用いた独自のプラズマCVDプロセスを開発している¹⁾²⁾。本手法は集積化合成が可能であることに加え様々な種類の金属触媒から GNR 合成が可能であることから、集積化デバイスとしての応用が期待されている。そこで、本研究では超伝導金属である MoRe (モリブデンレニウム)合金を金属触媒に用いる方法に着目した。近年超伝導デバイスは量子コンピューターなどへの応用が期待されており、注目が集まっている。この超伝導デバイスの作成には、2つの超伝導体の間に半導体や絶縁体を挟んだ接合であるジョセフソン接合素子を用いる。そこで本研究では、超伝導金属ナノバーから GNR を合成することによる、GNR ジョセフソン接合の大規模集積化合成を目指して実験を行った。

2. 超伝導金属ナノバーの作成

まず、MoRe ナノバーの作成と、ナノバーの超伝導化に取り組んだ。ナノバー全体での超伝導化のためには、リード線部分の超伝導状態がナノバー部分に浸透

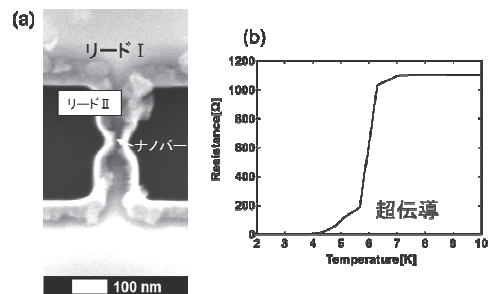


図 1 MoRe ナノバーの (a) SEM 画像、及び (b) 抵抗値の温度変化。

する必要がある。この超伝導状態の浸透の長さを超伝導侵入長と呼ぶ。すなわち、超伝導化のためには超伝導侵入長がナノバー長よりも長くなる必要がある。そこで、ナノバー長とリード線の幅を変化させたナノバーを作成して、超伝導化するナノバー構造を探索した。その結果、図 1(a)の走査型電子顕微鏡(SEM)像に示すような二段階に変化させたリード線構造と、設計長 80 nm のナノバー構造で低温測定を行ったところ、MoRe ナノバー全体での超伝導化に成功した(図 1(b))。

3. 超伝導金属／GNR 接合素子の創製

次に、超伝導化を確認した MoRe ナノバーからの GNR 合成を行った。MoRe ナノバーにプラズマ CVD を行った結果、SEM 像から非常に短い短尺 GNR が合成された可能性が示唆された (図 2(a))。また、このデバイスをを用いて電気伝導特性評価を行ったところ、 $V_g = 0V$ 付近で電荷中性点を持つような典型的なグラフェンの特性が観測され、MoRe ナノバーからの GNR 合成に成功した可能性が示唆された (図 2(b))。

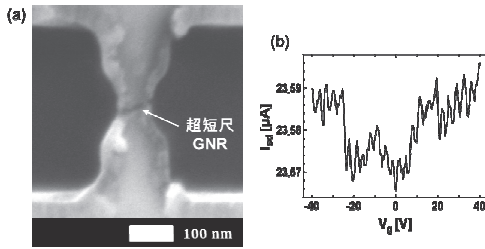


図 2 MoRe ナノバーから合成した超短尺 GNR の (a)SEM 画像, 及び(b)電気伝導特性。

4. 超伝導金属／GNR 接合素子の特性評価

最後に、作成した MoRe/GNR 接合素子の低温下での電気伝導特性評価を行った。ゲート電圧 V_g とソースドレイン間電流 I_{sd} を変化させたときの微分抵抗のカラーマッピングを図 3(a)に示す。ここから、 I_{sd} が小さい値の範囲において微分抵抗がゼロとなり超伝導化していることが確認できた。また、臨界電流付近の電流値で固定した、微分抵抗のゲート依存性を再プロットした結果、ゲート電圧の変化によって、超伝導状態と非超伝導状態をスイッチングできることが確認できた (図 3(b))。以上の結果から、GNR ジョセフソン接合を基板上に直接合成することに成功した

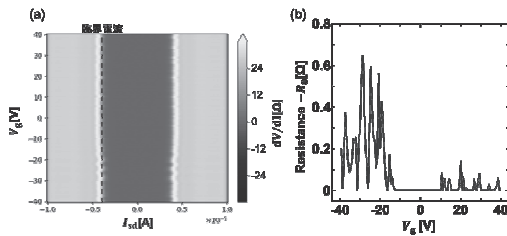


図 3 4.2 K 下で測定した MoRe/超短尺 GNR 接合素子の(a)微分抵抗の I_{sd} と V_g 依存性, 及び(b)臨界電流付近での微分抵抗のゲート電圧依存性。

と考えられる。

ここで、図 3(a)に着目すると、臨界電流がゲート電

圧の変化によって振動していることが確認できる。これは、GNR 中のキャリアが無散乱で伝導するバリスティック伝導を示すときに現れる現象の可能性がある。そこで MoRe/グラフェンのジョセフソン接合での研究例を参考に検証実験を行った³⁾。バリスティックジョセフソン接合であることの証明に、常伝導状態のコンダクタンス振動周期と、臨界電流の振動周期の比較が用いられる。この両振動の周期が一致すれば、グラフェンのバリスティック性が超伝導状態でも維持されていることを表しており、バリスティックジョセフソン接合であると実証することができる。そこで、2つの振動の比較を行った結果を図 4 に示す。図 4 より、2つの振動周期が一致していることが確認できることから、本研究の GNR ジョセフソン接合がバリスティックジョセフソン接合であることを実証することに成功した。

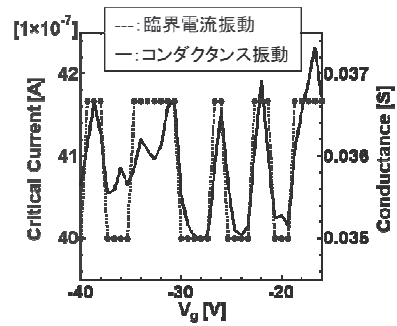


図 4 GNR ジョセフソン接合における、常伝導状態コンダクタンス振動と超伝導状態臨界電流振動の振動周期比較。

5. まとめ

プラズマ CVD による GNR ジョセフソン接合の直接合成に向けて研究を行い、超伝導金属ナノバーからの GNR 合成に初めて成功した。また、極低温測定より、ゲート電圧による超伝導状態と非超伝導状態のスイッチングを観測し、GNR ジョセフソン接合の直接合成に成功した。さらに、臨界電流のゲート電圧による振動の解析から、バリスティックジョセフソン接合であることを実証した。本研究は、これまで基礎物性研究にとどまっていたバリスティックジョセフソン接合研究を、集積化による応用研究へと発展させる可能性を示した点で、極めて重要な成果と言える。

文献

- 1) T. Kato and R. Hatakeyama, Nature Nanotechnology 7 (2012) 651.
- 2) H. Suzuki, T. Kaneko, Y. Shibuta, M. Ohno, Y. Maekawa and T. Kato, Nature Communications 7 (2016) 11797.
- 3) V. E. Calado et al., Nature Nanotechnology 10 (2015) 761.