

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21856

研究課題名(和文)フォノン照射による原子分子薄膜の超流動化

研究課題名(英文)Realization of Superfluidity in Adsorbed Molecular Films by Phonon Irradiation

研究代表者

白濱 圭也(Shirahama, Keiya)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：70251486

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、様々な原子分子の吸着薄膜にフォノンを照射して非平衡超流動状態を実現し、物理学の発展に資することを目的とする。薄膜が吸着した固体基板に100GHz程度の超高周波フォノンを生成し、薄膜を局在状態から空間的に広がった励起状態に遷移させる。フォノン生成には超伝導トンネル接合を用いる。本研究ではNb-AlO_x-Nb超伝導トンネル接合素子を作成しその電流電圧特性を調べて素子の改善を進めるとともに、2つの接合を貼り合わせることでフォノンの生成と検出を試みた。フォノン生成を示唆する信号が得られているが測定上の問題から完全な同定には至っていない。今後装置の改良を進め、非平衡超流動状態の実現を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導は発見から1世紀を経てもなお量子技術への応用等で物理学の最先端で研究されている。超流動は超伝導と酷似した現象で、同じ物理的機構で生じるが超流動を示す物質は非常に少ない。また、光で非平衡超伝導を誘起する研究が、新奇超伝導状態を得る手法として注目されている。本研究は、本来超流動を示さない物質に外場を与えることで非平衡超流動を実現する野心的な試みであり、超流動が実現した場合その学術的価値は極めて高い。特にトポロジカル超流動などの新奇な超流動の発現が期待され、新しい物理概念の発展に貢献すると期待される。また水素等の分子薄膜の吸蔵・輸送特性の解明にも役立ち、燃料貯蔵などの工学応用も期待できる。

研究成果の概要(英文)：We aim to realize non-equilibrium superfluid states by irradiating phonons on adsorbed thin films of various atoms and molecules. Such novel superfluid states will contribute to the development of physics. Ultrahigh-frequency phonons of about 100 GHz are generated on the solid substrate on which a monoatomic layer of molecules is adsorbed, so that the molecules undergo transitions from a localized state to a spatially extended excited state. A superconducting tunnel junction is used for phonon generation. We fabricated a Nb-AlO_x-Nb superconducting tunnel junction device, investigated its current-voltage characteristics to improve the device, and tried to generate and detect phonons by bonding the two junctions. We have obtained signals that suggest phonon generation, but have not yet been able to identify them completely due to measurement problems. In the future, we will improve the apparatus and try to realize a non-equilibrium superfluid state in molecular films such as hydrogen.

研究分野：低温物理学

キーワード：物性物理 量子流体固体 超流動 低温物性 フォノン 非平衡 水素 ヘリウム

1. 研究開始当初の背景

液体ヘリウム等の粘性が極低温で消失する「超流動」は、物質の電気抵抗が消失する超伝導(超電導)と酷似した現象であり、共通する機構で発現すると考えられている。両者は発見から1世紀を経た現在でも物理学の中心的課題として盛んに研究されているが、超伝導物質が多数存在してそれぞれが一大研究分野をなすのに対し、超流動を示す物質は液体ヘリウム、冷却原子系など少数に限られる。従って、多様な物質で新しい超流動が見つければ、物理学の発展に大きな貢献をもたらす。

また近年、フェムト秒レーザーの照射により、本来超伝導を示さない物質を非平衡超伝導状態に変化させたり、超伝導転移温度を瞬間的に上昇させる実験が行われるようになった。このような光誘起非平衡超伝導の研究は、既存の超伝導物質にない新奇な現象をもたらす可能性があり、非常に注目されている。超流動の研究においても、通常は超流動を示さない物質を外場により励起して、非平衡状態の超流動を観測できる可能性がある。実際、半導体量子井戸中に形成されるエキシトンポラリトン凝縮体は非平衡超流動の典型例として盛んに研究され、液体ヘリウムや冷却原子系と相補的な知見が数多く得られている。

2. 研究の目的

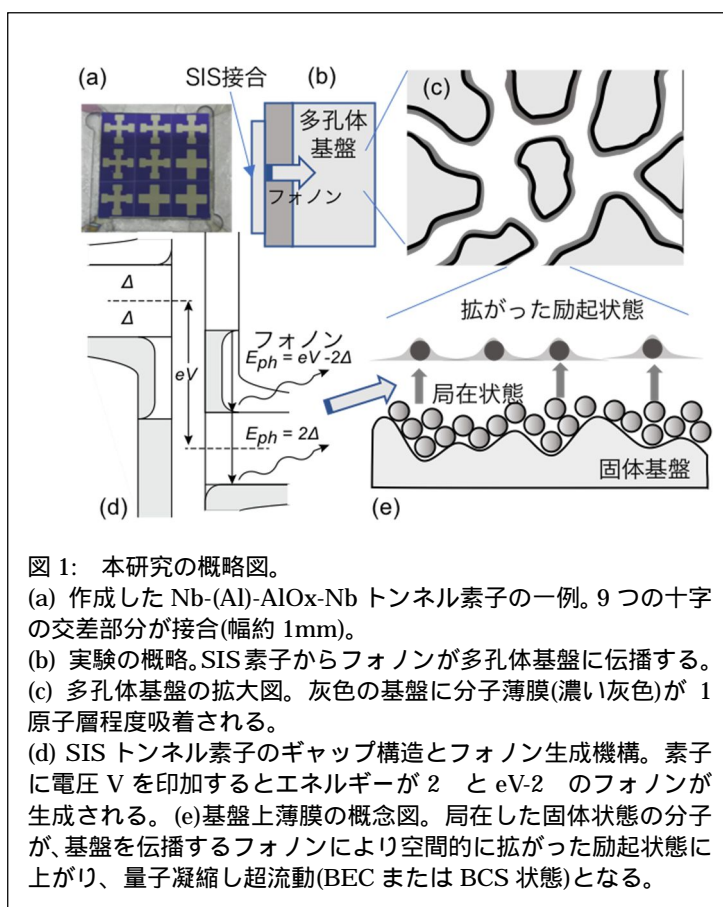
本研究は、固体基板に吸着した原子・分子薄膜を、基板中にフォノンを発生させ、その照射によって超流動化する方法を確立して、物理学の発展に資することを目的とする。フォノン照射による非平衡超流動実現の着想は、本研究代表者らが発見したヘリウムおよび水素、ネオン薄膜における「弾性異常」現象に基礎を置く。この研究では、原子や分子を固体基板に単原子層程度物理吸着させると、基底状態では空間的に局在するが、温度を上げると波動関数が空間的に広がった状態にエネルギーギャップを超えて励起され、弾性率の減少をもたらすことを明らかにした。さらにボース粒子であるヘリウム(^4He)はある臨界吸着量でギャップが消失して、広がった状態をヘリウム原子が占有することで超流動が起こることがわかった。

従って、広がった励起状態に吸着分子を強制的に励起すれば、再び基底状態に緩和する時間内にボース・アインシュタイン凝縮を起こし、非平衡超流動の生成が期待される。熱平衡状態では熱エネルギーで励起されるため、基板中に短時間にフォノンを発生させることで、吸着分子を励起させるのが本研究の基本的なアイデアである。

3. 研究の方法

吸着分子のエネルギーギャップは吸着量によるが約10K(ケルビン)程度の大きさであるため、励起には10~100GHzオーダーの超高周波フォノンの生成が必要となる。本研究ではフォノンの生成手段として、超伝導トンネル接合を利用する。2つの超伝導体薄膜が薄い酸化膜で隔てられたトンネル接合(SISまたはジョセフソン接合)に電位差 V を与えると、2つの超伝導体のフェルミエネルギーが eV (e は電気素量)だけずれるが、このずれが超伝導体のエネルギーギャップ 2 を超えると、エネルギーが $eV-2$ および 2 のフォノンが生成されることが知られている。

そこで本研究では、まずフォノン生成可能な超伝導トンネル接合素子の作成を進めた。フォノン周波数は臨界温度に比例するため、高い臨界温度で良好な接合が得られるニオブ(Nb)を素子材料に用い、絶縁膜には酸化アルミニウム(AlOx)を採用した。アルゴンプラズマスパッタでシリコンウェハー上にNb層を形成後、Alを電子ビーム蒸着し

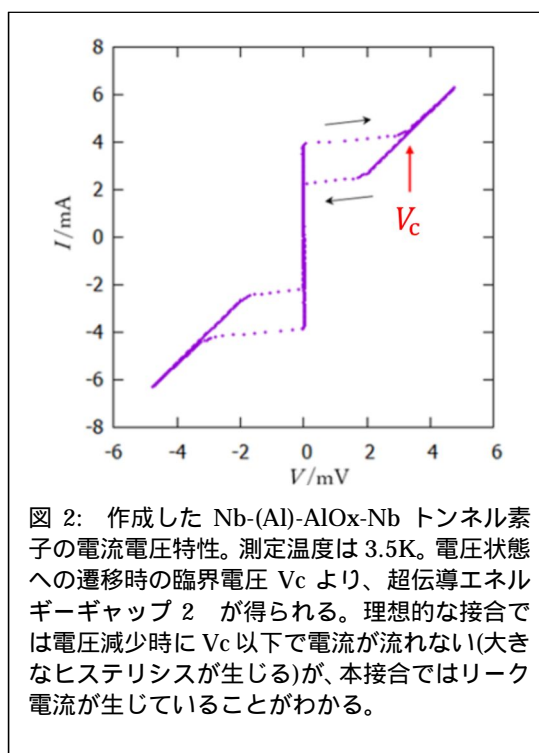


熱参加することで絶縁膜を作成し、更に Nb 層を形成して、Nb-(Al)-AlO_x-Nb 接合素子の作成を行った。作成した素子を GM 冷凍機クライオスタットで 3.5K まで冷却し、電流電圧 (I - V) 特性を測定した。測定結果より素子性能を判定して、作成条件を改良し再測定することを繰り返し行った。

4. 研究成果

作成したトンネル接合素子の I - V 特性の一例を図 2 に示す。ゼロ電圧で電流が流れることからジョセフソン接合としての動作を確認した。しかし臨界電圧 V_c 以下で電流がゼロとなる理想的な接合の挙動とは異なり V_c 以下で電流が流れていることから、接合に不均一部分が存在し、リーク電流が生じていることがわかった。 V_c の値からエネルギーギャップ 2Δ を求めると 3.24 meV が得られ、文献値 (3.1 meV) とほぼ同程度となった。従って一定の特性を有する素子が作成できたが、不均一部分の存在により特性が損なわれていることがわかった。スパッタ条件の改良を重ねて、特性の向上を試みている。

以上のように素子特性に改善の余地があるものの、電圧印加によりフォノン生成が可能な素子が完成したので、これを用いてフォノン伝播の実験を進めている。実験は 2 つの素子ウェハーを貼り合わせて、一方の素子で生成したフォノンを他方で検出する。これまでのところ高周波フォノンの伝播を示唆する信号が得られているものの、電磁的クロストークの影響が大きくフォノン検出の確定には至っていない。測定回路系を改善するとともに、シリコン単結晶ブロックを用いて励起検出素子間の間隔を大きくして、フォノンの観測を試みる予定である。フォノン生成を確認後は、多孔質ガラスに素子を装着して、吸着したヘリウム薄膜の超流動特性の測定を試みる。更に測定を水素薄膜に拡張する予定である。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Keiya Shirahama
2. 発表標題 Helium and hydrogen in porous media: past and present perspectives
3. 学会等名 Workshop "Forty years of super - solid physics" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nago, Y. Miyoshi, T. Makiuchi, R. Ishiguro, R. Toda, S. Murakawa, K. Shirahama
2. 発表標題 Fabrication of phonon generator devices for study of quantum phase transition in molecular films
3. 学会等名 International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiya Shirahama
2. 発表標題 Elastic anomaly as a probe for superfluidity of helium and hydrogen films
3. 学会等名 International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Shirahama group
<http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/sirahama/sirahama-lab-jp.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石黒 亮輔 (Ishiguro Ryosuke) (40433312)	日本女子大学・理学部・准教授 (32670)	
研究分担者	永合 祐輔 (Nago Yusuke) (50623435)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・助教 (32612)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------