



Title	Studies of Electronic Properties in Atomically Thin Superconducting Films Modulated by Surface Acoustic Waves
Author(s)	横井, 雅彦
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/76375
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (横井 雅彦)

論文題名

Studies of Electronic Properties in Atomically Thin Superconducting Films Modulated by Surface Acoustic Waves
(表面弾性波照射により変調される原子層超伝導薄膜の電気伝導特性の研究)

論文内容の要旨

2004年にNovoselovとGeimがグラファイトシート1枚であるグラフェンを発見したことを契機に、2次元性の強い層状物質を機械的に剥離することで、結晶性のよい2次元金属、半導体、超伝導体、磁性体などを作製できるようになった。このような低次元系の物理は、量子ホール効果などの興味深い物理現象を生み出すだけでなく、バルク結晶では行えないキャリア密度の電界制御など、物性制御の観点からも非常に重要な研究テーマである。

電界制御とは異なる原子層物質の制御方法として、表面弾性波を用いる手法がある。表面弾性波とは、圧電性を有する基板表面に局在した弾性波で、基板上に作製した楕形電極にMHz~GHzの交流電場を印加することで誘起される。本研究では、原子層超伝導薄膜NbSe₂に表面弾性波を照射することで、その伝導特性の変調を行った。圧電性の高いLiNbO₃基板上に超伝導NbSe₂薄膜を転写し、表面弾性波を照射しながら電流電圧特性を測定した。通常の超伝導体薄膜と同様に、ゼロ抵抗状態が観測され、臨界電流以上では有限の電圧が生じる。しかし、ゼロ電流付近に着目すると、有限の電圧が観測され、しかも電流とは逆符号の電圧が生じた。このことは抵抗が負になることを意味している。負の抵抗の振幅は、表面弾性波のパワーを増大するほど大きくなり、また温度の上昇とともに減少する。一方、比較実験として、別の原子層超伝導体NbS₂薄膜や、単体Nb薄膜を用いて同様の実験を行ったが、負の抵抗は観測されなかった。この結果から、表面弾性波照射で誘起される負の抵抗は、NbSe₂超伝導薄膜のみで生じる電荷密度波と密接に関わっていることが分かる。

NbSe₂薄膜では、表面弾性波照射によって、電荷密度波におけるソリトン-反ソリトンの対が形成され得る。このソリトン対は電荷をもつため、時間依存する静電容量と等価と見なすことができ、これと超伝導ドメインが直列に繋がるジョセフソン接合モデルを構築することで、実験で観測されたゼロ電流付近の負の抵抗を定性的に再現することができた。

本研究で得られた成果は、原子層超伝導薄膜の新たな一面を開拓したものであり、将来的には、周期的な外場で量子状態が制御可能なフロッケ・エンジニアリングの舞台となり得る。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (横 井 雅 彦)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教授 小林 研介
	副 査	教授 浅野 建一
	副 査	教授 松野 丈夫
	副 査	教授 越野 幹人
	副 査	准教授 新見 康洋
論文審査の結果の要旨		
2004 年に Novoselov と Geim がグラファイトシート 1 枚であるグラフェンを発見したことを契機に、2 次元性の強い層状物質を機械的に剥離することで、結晶性のよい 2 次元金属、半導体、絶縁体、超伝導体、磁性体などを作製できるようになった。このような低次元系の物理は、量子ホール効果などの興味深い物理現象を生み出すだけでなく、バルク結晶では行えないキャリア密度の電界制御など、物性制御の観点からも非常に重要な研究テーマである。 電界制御とは異なる原子層物質の制御方法として、表面弾性波を用いる手法がある。表面弾性波とは、圧電性を有する基板表面に局在した弾性波で、基板上に作製した楕形電極に GHz 帯域の交流電場を印加することで人工的にフォノンを誘起できる。本研究で横井氏は、原子層超伝導薄膜 NbSe₂ に表面弾性波を照射することで、その伝導特性の変調を行った。圧電性の高い LiNbO₃ 基板上に超伝導 NbSe₂ 薄膜を転写し、表面弾性波を照射しながら電流電圧特性を測定した。一見すると、通常の超伝導体薄膜と同様に、ゼロ抵抗状態が観測され、臨界電流以上では有限の電圧が生じる。しかし、ゼロ電流付近に着目すると、有限の電圧が観測され、しかも電流とは逆符号の電圧が生じた。このことは抵抗が負になることを意味している。負の抵抗の振幅は、表面弾性波のパワーを増大するほど大きくなり、また温度の上昇とともに減少する。またこの傾向は、異なる 3 つの試料でも再現した。 その一方、比較実験として、別の原子層超伝導体 NbS₂ 薄膜や、単体 Nb 薄膜を用いて同様の実験を行ったが、負の抵抗は観測されなかった。この結果から、表面弾性波照射で誘起される負の抵抗は、NbSe₂ 超伝導薄膜のみで生じる電荷密度波と密接に関わっていることが分かる。 マイクロ波を照射することによって、有限の抵抗がゼロになることは、過去にも半導体 2 次元電子系で報告されている。しかし通常、オームの法則が成立する限りでは、負の抵抗状態は熱力学の第二法則を破ることになり、実現しない。一方、超伝導状態では、オームの法則は成り立たず、また今回の実験のように、外部からマイクロ波のエネルギーを注入しているため、負の抵抗状態はエネルギー保存則にも抵触しない。 本研究で観測された負の抵抗を理解する上で重要な点は、NbSe₂ 薄膜でのみが電荷密度波状態をもつことである。表面弾性波を照射することで、電荷密度波にソリトン-反ソリトンの対（正電荷と負電荷）が形成され得る。このソリトン対はちょうど時間依存する静電容量と等価と見なすことができ、これと超伝導ドメインが直列に繋がるジョセフソン接合モデルを構築することで、実験で観測されたゼロ電流付近の負の抵抗を定性的に再現することができた。 本研究で得られた成果は、原子層超伝導薄膜の新たな一面を開拓したものであり、将来的には、周期的な外場で量子状態が制御可能なフロッケ・エンジニアリングの舞台となり得る。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。		