

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654100

研究課題名（和文）

半導体超構造によるディラック電子系の設計と作製

研究課題名（英文）

Making of Dirac Fermion Systems using Semiconductor Superstructures

研究代表者

長田 俊人 (OSADA TOSHIHITO)

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号：00192526

研究成果の概要（和文）：

半導体平面超格子構造を用いて質量ゼロの Dirac 電子系を実現することを目的とした。第1段階としてミニバンド構造を持つ2次元 Bloch 電子系の実現を試みた。そのために GaAs/AlGaAs 基板上に60～80nm周期で格子状に穴を穿ったZEPを絶縁膜としてゲート電極を形成した FET 素子を作製し条件の最適化を試みた。しかしバンド再構成を示唆する結果は得られず、格子の不均一性の局限が今後の課題となった。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this research was to realize the 2D massless Dirac fermion system in the semiconductor lateral superlattice structure. As the first step, we have tried to realize the 2D Bloch electron system with the reconstructed mini-band structure. We prepared the GaAs/AlGaAs FET devices with the laterally modulated gate electrode. The array of holes are fabricated on the ZEP gate insulating layer with the typical period of 60-80nm. The experimental results have not shown the sign of the band-reconstruction. The randomness of the array is an issue in the feature.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：メゾスコピック系・局在 ディラック電子系

## 1. 研究開始当初の背景

近年、グラフェン、ゼロギャップ有機導体、トポロジカル絶縁体表面などの固体電子系で、質量ゼロの Dirac 電子系が相次いで発見され、その研究が急速に進展している。擬スピン自由度、後方散乱消失、Klein トンネル、半整数量子 Hall 効果など、従来の固体電子系にない Dirac 電子系特有の性質が解明され、それを応用した新しいデバイスの理論的提案も数多く行われている。しかし現状ではグラフェンの実用化技術は十分に確立しておらず、また素子化しても物質系が異なるため

従来の半導体素子との集積化は困難である。仮に制御性が高く技術蓄積も豊富な従来の半導体系で質量ゼロの Dirac 電子系が実現できるならば、基礎研究のみならずデバイス応用の観点からも大きな発展が期待できる。

半導体2次元電子系に周期ポテンシャルを導入した平面超格子構造により、特徴的な Bloch 電子バンドの実現を企図した研究は過去に幾つか存在する。Albrecht らは平面超格子構造でバンド再構成を実証し [PRL83, 2234(1999)]、Albrecht ら及び Melinte らは強磁場中での Hofstadter 準位構造を観測した [PRL86,147(2001); PRL92,036802(2004)]。また

田村・白石らは半導体カゴメ格子型量子細線構造で平坦バンド強磁性を実現することを提案した[APL78,3702(2001); PRB65,085324(2002); PRB65,081307(2002)]。

2009年にCalifornia大学Berkeley校のC.-H. ParkとSteven Louieが半導体アンチドット超格子で質量ゼロのDirac電子系が作製できることを理論的に示した[Nano Lett. 9, 1793(2009)]。

## 2. 研究の目的

半導体超構造中に質量ゼロのDirac電子系を実現し、グラフェン等で研究が進んでいるDirac電子の特異な量子物性を半導体物理学に導入することが本研究の最終目的である。そのためにParkとLouieの提案を参考に、Diracコーン分散を示すサブバンド構造を実現する半導体平面超格子構造の設計・作製と伝導特性評価を行い、Dirac電子系の実証を行うことを目標とした。

## 3. 研究の方法

まず質量ゼロのDirac電子型ミニバンド構造を有する半導体2次元超格子構造の検討を行う。次に本グループが保有する分子線エピタキシー装置、電子線リソグラフィ装置を使用して超構造を試作する。第1段階は面内超格子によるバンド再構成によりBloch電子系のミニバンド構造が形成されることを確認し、第2段階でDiracコーン分散を持つBloch電子系に拡張する。Bloch電子系形成の確認は現有の低温強磁場装置(13T超伝導マグネット+希釈冷凍機)を用いて測定した磁気抵抗のShubnikov-de Haas振動に現れる微細構造によって行うこととした。

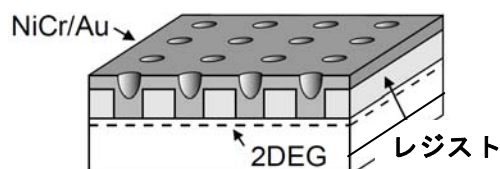
## 4. 研究成果

### (1) 質量ゼロのDirac電子型ミニバンド分散を持つ半導体平面超格子構造の検討

ParkとLouieによる、半導体アンチドット超格子構造による質量ゼロのディラック電子系作製の理論的提案を参考にして、実現可能な半導体平面超格子構造の検討を行った。Park-Louieが提案する構造は、2次元電子系に3角格子状に多数の穴を周期的に穿ったアンチドット格子である。しかし現実のGaAs/AlGaAsヘテロ構造の2次元電子系に単純に穴を穿った場合、穴周辺の電子系が空乏化する結果、実質的なアンチドット径は400nm程度も増大してしまう。さらにアンチドットの不揃いのため系に大きな乱雑さも導入される。そのためアンチドット超格子によるBloch電子系の形成は極めて困難である

と考えられた。

より現実的で有望な構造は、周期的変調ゲート電場により2次元電子系に周期ポテンシャルを導入する方法であると思われる。この方法はかつてHofstadter準位構造の観測に用いられたもので、平面超格子でBloch電子系を形成した実績のある方法である。静電的に周期ポテンシャルを導入するため、各周期の不揃いによる乱雑さが小さく、電子波のBragg回折によるBloch状態形成が可能であると期待された。



[図1] 周期的変調ゲート電極を持つ2次元電子FET素子構造

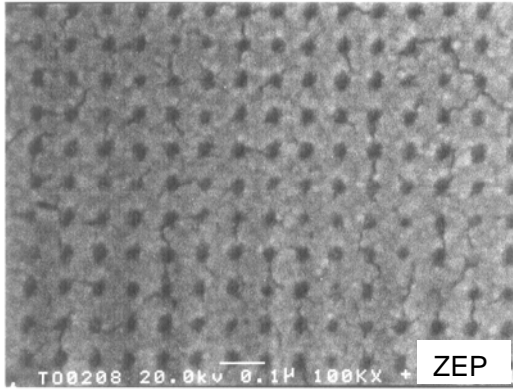
### (2) 周期的変調ゲート電極を有する半導体2次元電子系FET素子の作製と評価

#### ①高移動度GaAs/AlGaAs基板の作製

ナノスケール周期変調ゲート構造を持つ半導体2次元電子FET素子のための高移動度のGaAs/AlGaAsヘテロ接合基板(HEMT基板)を現有の分子線エピタキシー装置で成長した。ここで数10nm周期の2次元周期ポテンシャルを導入するためには、表面から2次元電子系が存在するヘテロ界面までの深さ、すなわちAlGaAs層厚を数10nm程度以下に抑え、かつそれによる移動度の減少を局限する必要がある。2次元電子系の深さを45~60nmとして実験を行ったところ、45nmで電子密度 $4.3 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ (Fermi波長38nm)、移動度 $150000 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ (平均自由行程 $1.5 \mu\text{m}$ )の基板を得ることができた。

#### ②周期的変調ゲート電極構造の作製

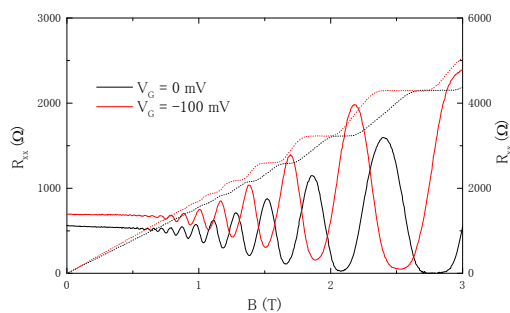
①で得られたHEMT基板状に電子線リソグラフィ法を用いて変調ゲート電極構造を作製する。まず基板上に電子線レジスト(ZEP520)を塗布した後(膜厚50nm)、Bloch電子系を形成するための平面超格子パターンを現有の電子線描画装置(最小線幅20nm)を用いて描画した。基板のFermi波長、AlGaAs層厚が共に50nm程度であるので、パターンの周期は50nm程度が望ましい。レジストの穴の配列を周期60~80nmの正方格子パターンに描画した。描画条件は、加速電圧:20kV、ビーム電流:10pA、単位画素ドーズ時間:200 $\mu\text{s}$ 、現像時間:30sである。周期80nmの場合の現像後のZEP膜のSEM写真を[図2]に示す。このZEP膜をゲート絶縁膜として、その上に金属膜(Au/NiCr)を真空蒸着して変調ゲート電極を形成した。



【図2】 正方格子状の周期的変調を導入したゲート絶縁膜のSEM像

### ③ Bloch 電子系ミニバンド構造の確認

作製した変調ゲート FET 素子における超格子効果の有無の確認を磁気抵抗測定により行った。平面超格子のミニバンド幅は格子定数の自乗に反比例し、格子定数が 50nm でも高々 2meV 程度である。従ってこのミニバンド構造の詳細を実験で捉えるには極低温実験が必須となる。そのため測定には現有の希釈冷凍機 (>50mK) + 超伝導マグネット (<13T) システムを使用した。超格子効果でバンドがミニバンドに裁断されていれば、磁気抵抗の Shubnikov-de Haas 振動には、それを反映した微細構造が現れることになる。【図3】は作製した FET 素子の 2 つのゲート電圧における磁気抵抗および Hall 抵抗の磁場依存性であるが、ゲート電圧による電子数の変化は見えるものの、周期的ポテンシャル変調によるバンド再構成の兆候 (微細構造) は見られなかった。



【図3】 変調ゲート FET 素子の異なるゲート電圧における極低温磁気抵抗と Hall 抵抗

【図2】の変調ゲート絶縁膜の SEM 像より、パターンのがれが大きいことがわかる。今回の結果は、周期的変調によるバンド再構成で形成されたミニバンドがぼけてしまったためであると推測される。

実際に三角格子パターンで質量ゼロの Dirac 電子系を実現するためには、ゲート絶縁膜の変調パターンの乱れの局限が実験技術上の大きな課題となることがわかった。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

① "Magnetotransport in organic Dirac fermion system at the quantum limit: Interlayer Hall effect and surface transport via helical edge states", Toshihito Osada, Phys. Status Solidi B **249**, No.5, 962–966 (2012), 査読有, DOI: 10.1002/pssb.201100587.

② "Specific Heat of the Multilayered Massless Dirac Fermion System", Takako Konoike, Kazuhito Uchida, and Toshihito Osada, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, No.4, 043601-1-4 (2012), 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.81.043601.

③ "Specific heat study of massless Dirac fermion system  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> under pressure", T. Konoike, K. Uchida, and T. Osada, Phys. Status Solidi C **9**, No.5, 1177-1179 (2012), 査読有, DOI: 10.1002/pssc.201100663.

④ "Anomalous Interlayer Hall Effect in Multilayer Massless Dirac Fermion System at the Quantum Limit", Toshihito Osada, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, No.3, 033708-1-4 (2011), 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.80.033708.

⑤ "Magnetotransport of Massless Dirac Fermions in Multilayer Organic Conductors", T. Osada, K. Uchida, and T. Konoike, J. Phys.: Conf. Ser. **334**, 012049-1-5 (2011), 査読有, DOI: 10.1088/1742-6596/334/1/012049.

⑥ "Quantum Hall Transport across Monolayer-Bilayer Boundary in Graphene", A. Tsukuda, H. Okunaga, D. Nakahara, K. Uchida, T. Konoike, and T. Osada, J. Phys.: Conf. Ser. **334**, 012038-1-5 (2011), 査読有, DOI: 10.1088/1742-6596/334/1/012038.

[学会発表] (計 1 1 件)

① 「量子極限下有機多層ディラック電子系のエッジ伝導」(27aXN-7) 長田俊人, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26-29 日, 広島大学 (広島) .

② "Surface Magnetotransport due to Helical Edge State in the Organic Dirac Fermion system

at the Quantum Limit", T. Osada, M. Sato, K. Uchida, and T. Konoike, International Symposium on Materials Science Opened by Molecular Degrees of Freedom (MDF2012), 2012年12月1-4日, 宮崎.

③「強磁場下多層ディラック電子系におけるヘリカル表面状態の層間伝導特性 II」(19pEB-3), 長田俊人, 日本物理学会2012年秋季大会, 2012年9月18-21日, 横浜国立大学(横浜).

④"Surface transport due to helical edge state in the organic Dirac fermion system under high magnetic fields", T. Osada, M. Sato, K. Uchida, and T. Konoike, The 20th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF-20), 2012年7月22-27日, Chamonix (France).

⑤"Quantum Hall Ferromagnet with Helical Edge State Observed in an Organic Massless Dirac Fermion System", T. Osada, M. Sato, and T. Konoike, The 6th International Conference on the Fundamental Science of Graphene and Applications of Graphene-Based Devices (Graphene Week 2012), 2012年6月4-8日, Delft (Netherlands).

⑥「強磁場下多層ディラック電子系におけるヘリカル表面状態の層間伝導特性」(25aBK-8), 長田俊人, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月24-17日, 関西学院大学(兵庫).

⑦"Magnetotransport in Organic Dirac Fermion System at the Quantum Limit: Interlayer Hall Effect and Surface Transport via Helical Edge State", T. Osada, The 9th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets (ISCOM 2011), 2011年9月25-30日, Gniezno (Poland).

⑧「低温強磁場における有機多層ディラック電子系のヘリカル表面状態 II」(21pTR-8), 長田俊人, 佐藤光幸, 鴻池貴子, 日本物理学会2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学(富山).

⑨「グラフェン接合系における量子ホール端伝導」(23pTE-7: シンポジウム講演), 長田俊人, 日本物理学会2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学(富山).

⑩ "Quantum Hall Transport in Monolayer-Bilayer Graphene Heterojunction", T. Osada, A. Tsukuda, H. Okunaga, and K. Uchida, The 19th International Conference on Electronic

Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS19), 2011年7月25-29日, Tallahassee (USA).

⑪ "Interlayer Magnetotransport of Massless Dirac Fermions in Zero-gap Organic Conductors", T. Osada, The 19th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS19), 2011年7月25-29日, Tallahassee (USA).

〔図書〕(計1件)

①「グラフェンの機能と応用展望II」(斉木幸一郎監修) 第16章「グラフェンの量子ホール伝導」, 長田俊人, pp.169-184 (シーエムシー出版、東京、2012).

〔その他〕

ホームページ等

<http://osada.issp.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長田 俊人 (OSADA TOSHIHITO)  
東京大学・物性研究所・准教授  
研究者番号: 00192526

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし