

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25286006

研究課題名(和文) 開放系量子ドットのコヒーレントネットワークにおける波動関数の操作と利用

研究課題名(英文) Control of wave function in coherent network of open quantum dots

研究代表者

青木 伸之 (Aoki, Nobuyuki)

千葉大学・融合科学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60312930

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,400,000円

研究成果の概要(和文)：リードと強く結合した開放系量子ドットにおける波動関数分布を走査ゲート顕微法(SGM)を用いて視覚化し、さらにその再分布現象を明らかにすることで、波動関数分布を利用した電子波デバイス応用を目指した研究を展開した。従来の半導体ヘテロ接合基板を用いた開放系量子ドットを作製し、磁気伝導度ゆらぎを評価した。また、量子ポイントコンタクトの高磁場SGM観察を行い、分数量子プラトーの観測に成功した。さらに、SGM観察の高分解能化を狙い、h-BNを用いたグラフェンの高移動度化を行い、移動度 $100,000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超える準バリスティック試料の作製が可能となり、量子ゆらぎのエルゴード性の適用の可否を議論した。

研究成果の概要(英文)：We have studied coupled open quantum dots having a strong connection to leads for a scanning gate microscopy (SGM) in order to visualize and control the wave function within the dots for realization of future electron-wave devices. In addition to open quantum dots fabricated in conventional semiconductor hetero-junction, quantum point contacts have been studied at high magnetic field using SGM. We have also studied high-mobility graphene samples using h-BN to realize a further-multiple-coupled quantum dots. Quasi-ballistic transport has been achieved in BN/Gr/BN hetero-structure and the transport properties have been discussed.

研究分野：半導体物性

キーワード：開放系量子ドット 走査ゲート顕微法 波動関数パターン 量子ドットネットワーク グラフェン 高移動度化

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体2重結合量子ドットや超伝導量子ドットといった量子コンピュータの実現に向けた量子ドットデバイスが研究されてきているが、これらの素子は基本的に閉鎖系であり、その動作はクーロンブロック現象により支配されている。そこでは電子の離散エネルギー準位におけるスピン状態や電荷数のみが扱われ、もはや量子ドットの中で波動関数がどのように分布しているかは考慮していない。これに対し、これまで申請者らのグループを中心に研究されてきた開放系量子ドットでは、ドット内の電子波のダイナミクスが主役であり、波動関数形状とその時間発展に対する研究がなされてきた。その中で近年、リードと強く結合した開放系であっても、量子ドットに特有の離散的エネルギー準位の多くは生き残っていることがわかってきた。このような特徴的なエネルギー準位に対応する強固な電子軌道はポインターステートと呼ばれ、実験・シミュレーションの両面から研究が進められていた。その研究の中で申請者等は、ナノスケールで分解した観察が可能な走査ゲート顕微鏡(SGM)に着目した研究を進めてきた。原子間力顕微鏡(AFM)探針を「可動ゲート電極」として利用した局所の変調法を確立し、波動関数分布やポテンシャル分布の実空間で観察する数々の研究成果を残してきた。初めに行った不規則性の強い量子ポイントコンタクト(QPC)のSGM観察では、伝導チャネルの量子化に基づく波動関数モードに対応したピークに加え、量子ゆらぎの観測に成功した。さらに開放系量子ドットのSGM観察では、特定の磁場中において量子力学的シミュレーションで得られた電子密度分布とそれに対応する古典的電子軌道、およびSGM観察で得られた量子ゆらぎ像の間に明瞭な類似性を示すことに成功していた。このように、これまで計算機シミュレーションでしか示すことができなかった電子波分布の情報を、実空間で視覚化できる可能性を得ることができた。ここで、SGM像で観測されるゆらぎの各々は、一つのポインターステート(電子状態)に対応していると考えられるが、どのような分布形状を持っているのか、つまりSGM観察中のドット内の電子分布は明らかになっていない。しかし、これらの結果は、AFM探針による変調が量子ドット内の電子波分布を変化させ、異なる電子状態への人為的なコントロールが可能であることを表しており、それを利用した超高速演算可能な電子波デバイスの実現の発想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、AFM探針を用いた変調による開放系量子ドット内の電子波分布の再分布現象を明らかにし、2重、4重の結合量子ドットへと拡張して、最終的には開放系量子

ドットネットワークを利用した量子波デバイスへと発展させる。そのため、()初めに単一の開放系量子ドットに対するAFM探針からの変調効果について調査する。AFM探針がもたらすポテンシャルによるドット内の電子波分布の再分布現象と、それに伴って生じる新たなポインターステートの形状とその変遷について、海外研究協力者らによる理論計算と実験結果と共に明らかにする。次に、()コヒーレントにつながった2重結合型開放系量子ドットに対し、量子ドット間を往来する(デコヒーレンスしない、すなわち“ロバスト”)な電子軌道を変調し、一方ドットをAFM探針で変調することによる他方のドットの電子分布の変化を検証する。これにより、複数の量子ドット内の波動関数のリモートコントロールの基礎を確立する。()さらに、そのようなロバストな電子軌道がどのように情報プロセスに利用できるかを検証する。()対象を規則的に並んだコヒーレントな開放系量子ドットネットワークに拡張し、ロングレンジの空間的な相関が複雑系の中でどのように機能するかを検討し、コヒーレントに結合した量子ドットネットワークを利用したセルラーオートマタなどの電子波デバイスへの応用の可能性を探索することを目的として、研究を進めた。

3. 研究の方法

(1) AlGaAs/GaAs ヘテロ界面の2次元電子ガス(2DEG)に形成した単一の開放系量子ドットに対し、AFM探針を近づけることで量子ドットの伝導度が変化する。この様な伝導度の変化をマッピングしていく方法がSGM観察であるが、得られるSGM像と計算機シミュレーションで期待される電子密度分布には明らかな相関が得られている。しかし、探針が存在した状態でのドット内の電子波の再分布(途中の状態)に関しては、いまだ明らかになっていない。そこで、海外研究協力者らと共にソフトウォールポテンシャルを考慮した波動関数計算を行い、SGM観察中の波動関数の再配置とエネルギー共鳴状態(探針誘起ポインターステート)について明らかにすることを試みた。また、SGMを用いて量子ポイントコンタクト構造を観測することで、多体効果に起因した分数構造を観測することを試みた。

(2)このような研究を進めるに当たり問題となったのが、結合量子ドットを形成した場合、結合された量子ドット全体にわたってコヒーレンスが保たれている必要があることであった。そのため、AlGaAs/GaAs ヘテロ界面の2DEGを使用した場合、従来のエッチングを用いた方法では、1つのドットの大きさが1ミクロン程度の広がりを持つことになるため、4重結合量子ドットを形成するには $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ の範囲でコヒーレンスが保たれる

必要がでてくる。さらに、量子ドット内に形成される離散的エネルギーの間隔はドットの大きさに反比例して減少することになるため、量子ドットネットワークの寸法を縮小する必要が出てきた。これを解決するための手段として、グラフェンに注目した。グラフェンは $10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上の移動度が得られる高移動度物質であり、バリスティック伝導を実現できる2次元電子材料である。また、半導体ヘテロ界面と異なり試料表面そのものが伝導層となるため、SGM観察の際の探針/試料間距離を縮めることが可能となり、SGM像の解像度の向上に有利となると期待される。しかし、従来のグラフェン試料は SiO_2 層を絶縁層としたバックゲート構造が用いられており、 SiO_2 表面との相互作用を強く受けるため、平均自由行程は数ナノメートルオーダーとなる拡散伝導領域での研究が主体となっていた。本来期待される高移動度性を発揮するためには、試料を基板から浮かせた“サスペンド構造”の適用が必要であり、そのような構造は量子ドット構造の形成に必要な微細加工との共存が難しい状況となっていた。しかしながら、近年グラフェンと同様の2次元ハニカム構造を有する絶縁性物質である六方晶窒化ホウ素 ($h\text{-BN}$) を基板として用いることで、グラフェンの移動度を飛躍的に向上させることが明らかになり、我々も $h\text{-BN}$ を用いたグラフェンの高移動度化の手法を取り入れることにした。

4. 研究成果

(1) 量子ポイントコンタクト構造のSGM観察 $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ ヘテロ接合2次元電子ガス中にスプリットゲート構造によって量子ポイントコンタクト (QPC) 構造を形成した。これに対して、SGM探針を表面から 100 nm 離し、 -4.5 V の電圧を印加した。その後、垂直磁場を印加し、SGM観察を行った (図 1a)。ソースとドレイン間に交流電流 (1.2 kHz , 10 nA) を印加して対角測定を用いてコンダクタンスの測定を行った。図 1b に、垂直磁場 $B = 8.5 \text{ T}$ を印加した際のゲート電圧特性 (占有率 $\nu = 1$ に対応) を示す。測定は $T = 1.8 \text{ K}$ で行った。実線はSGM探針が無い場合のゲート電圧特性を表しており、いくつかの分数プラトーが確認できた。点線は、負の電圧を印加したSGM探針をQPCの中心に固定した状態でのゲート電圧特性を表している。ゲート電圧による空乏化された2次元電子ガスはSGM探針のポテンシャルによってさらに空乏化されてキャリア密度が減少し、全体的にコンダクタンスが減少した。しかし、ピンチオフ付近では、コンダクタンスが上昇するといった異常な現象を観測した。これらの結果は、QPC内に局在している電子が、SGM探針のポテンシャルによって活性化させられ、コンダクタンスに寄与するようになったためだと考えられる。このような現象は、温度が高くなると

観測されなかったことから、古典的なポテンシャルが原因ではなく、量子現象であることを示唆する結果と考えることができる。図 1b に矢印で示す2つのゲート電圧に対してのスキューの結果を、図 2a, c に示す。探針がくびれから離れているとき、静電ポテンシャルがエッジチャンネルを後方散乱するほど強くないため、コンダクタンスが維持されている。しかし探針がくびれに近づくとき、後方散乱を生じ、コンダクタンスが減少する。また、SGM画像がリング状に見える部分は、量子化されたコンダクタンスプラトーの存在を表している。図 2b ラインプロファイルの解析から、図 2a の暗い領域はそれぞれ $1/3 G_0$ 分数プラトー ($G_0 = 2e^2/h$) に対応していることが明らかとなった。さらに図 2c, d に示すように、ゲート電圧が -2.18 V のとき、探針がくびれの中心に近づくとき、コンダクタンスが上昇する現象がSGM像に観測された。これはゲート電圧特性の結果と一致していることから、SGMによる新たな量子構造である可能性が得られた。

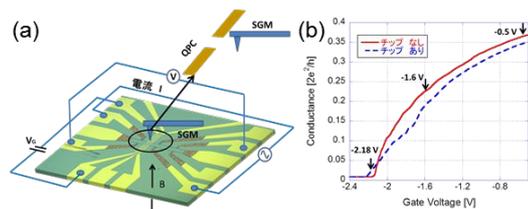


図 1 (a) QPC における SGM 観察の模式図。(b) 探針がない場合 (実線) とある場合 (点線) のゲート電圧特性。

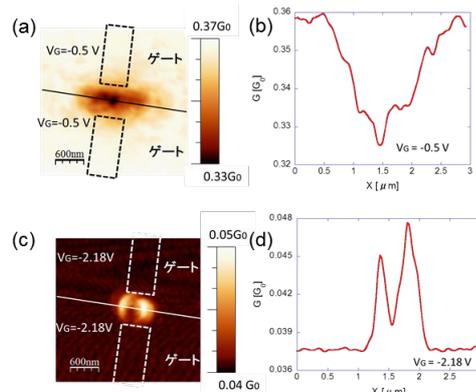


図 2 $V_g = -0.5 \text{ V}$ での (a) SGM 像と (b) チャネル方向のラインプロファイル。 $V_g = -2.18 \text{ V}$ での (c) SGM 像と (d) チャネル方向のラインプロファイル。

(2) 半導体結合量子ドットにおける磁気輸送特性 本研究では量子ドットに垂直磁場を印加した際の磁気伝導の測定を行い、その磁気伝導中に観測される伝導度のゆらぎに対して走査ゲート顕微法という手法を用いることでゆらぎの構造に対する解析を行うことを目的としている。そのため、 $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ ヘテロ接合2次元電子ガス中にスプリットゲート構造による量子ドット試料を同じ基板上に作製し、その磁気伝導特性を調べた。測定温度は 0.3 K で行った。1つのドットの大きさは、リソグラフィサイズで

1000 nm×600 nm であり、ドット間の QPC のサイズは長さ 100nm、間隔 400 nm となっている。図 3a、b は単一量子ドット試料の AFM 像と磁気伝導特性、図 3c、d は 2 重結合量子ドットのそれである。2 つの試料の特性を比較すると、結合量子ドットでは単一量子ドットで観測されなかった 0.08T 付近でのピークを観測することができたことから、2 つのドット間を往来する軌道に対応していると考えられる。また、結合量子ドット試料ではゼロ磁場での弱局在ピークがとても小さいことがわかる。これも結合量子ドットの特徴の一つといえる。

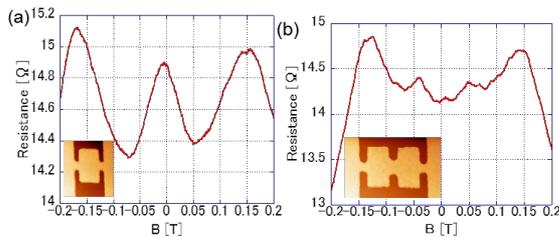


図 3 (a)単一と(b)2重結合開放系量子ドットの磁気伝導特性。

(3) 4 重結合量子ドットの波動関数分布に関するシミュレーションと試料作製 図 4 はブラジル・リオグランデ連邦ドスール大学の C.R.daCunha 博士との共同研究で進められた、4 重結合量子ドットの波動関数分布と伝導度ゆらぎに関するシミュレーションである。ドットのポテンシャルは矩形のハードを - ルポテンシャルとなっているため、実際のソフトを - ルポテンシャルとは異なるが、ドット内の波動関数パターンの変化によって試料の伝導度が変化している様子が示された。波動関数分布が入り口から出口にわたって高い電子密度状態につながった場合と、電子波がドット内に閉じ込められて（局在化して）いて伝搬できない場合には伝導度が極小値となる様子が示されている。このシミュレーション結果と先の AlGaAs/GaAs ヘテロ接合における開放系量子ドットとを比較すると、実際の試料では伝導度ゆらぎの振幅が非常に小さいことがわかる。これは実際に SGM 観察を行った際に現れる伝導度ゆらぎの SGM 応答も非常に小さいことを示唆しており、

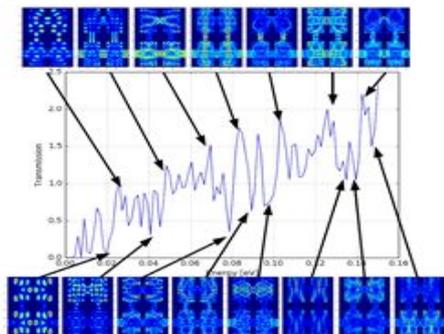


図 4 4重結合開放系量子ドットにおけるフェルミレベル（ゲート電圧）変化に対する波動関数の再分布と伝導度の関係のシミュレーション。

量子ドットの大きさを縮小して離散的なエネルギーレベルの間隔を広げることが必要であるということがわかった。このような現象を観測するために、AlGaAs/GaAs ヘテロ接合基板に、電子線リソグラフィを使用して多重結合量子ドットの作製を行った。4 重結合ドットを形成するためには、中央の部分を空乏化する必要があるが、金属スプリットゲートを用いた構造では空中配線の形成が必須となるため、それを諦めてエッチングによる結合量子ドットの形成を始めた。リン酸系エッチング液の割合と濃度の調整、エッチング温度、レジストの密着性、レジスト描画条件と線幅といった諸問題を最適化することで、図 5 に示すような 4 重結合量子ドットを作製できるまでに至った。ここでの 1 つの量子ドットのサイズはおよそ 500 nm×500 nm となっている。現在この試料の伝導特性と SGM 観察を引き続き進めている。

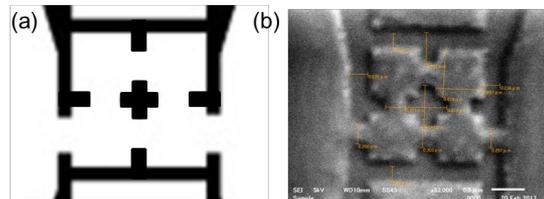


図 5 4重結合開放系量子ドットのリソグラフィパターンとエッチングによって作製した試料の走査電子顕微鏡画像。スケールバーの長さは 500nm である。

(4) 開放系量子ドット形成に向けた高移動度グラフェン試料の作製 前述のように、他重結合量子ドットを従来の AlGaAs/GaAs ヘテロ接合基板にエッチング等で作製した場合、試料のサイズが数ミクロンに達してしまい、コヒーレンスが保てなくなってしまうことが懸念される。また、2 次元電子ガス相は試料表面から 70 nm の位置に存在しているため、リフトモードの 100nm を加味すると、試料-探針間の距離は 170 nm にもなってしまい、SGM 観察の解像度が上がらない原因となっていた。そのため、高移動度なグラフェン試料を用い、結合量子ドットを形成することをめざし、*h*-BN を用いた高移動度化を開始した。韓国・成均館大学の G.-H. Kim 教授から協力をいただき、ドライトランスファープロセスを開始した。これにより、単層グラフェンの上下を *h*-BN 薄片でサンドイッチした構造を作製することが可能となり、移動度が低温で 1×10^6 cm²/Vs に届くグラフェン資料の作成が可能となった。これにより、低温での平均自由行程が 500 nm 程度にまで達することになり、準バリスティック伝導領域での伝導現象を議論することができるようになった。その成果の一例としては、これまで SiO₂ 表面に作製された拡散伝導系試料で観測されてきた、磁気ゆらぎとゲート電圧ゆらぎの振幅が異なるエルゴード性の破れが、準バリスティック試料においても同様に観測され

ることが明らかになったことが挙げられる。図6に示すように、SiO₂上の低移動度試料(図6a)とh-BNを用いた高移動度グラフェン試料(図6b)の特性を比較すると、どちらの試料においてもゲート電圧に対するゆらぎの振幅に比べて磁気伝導度ゆらぎの振幅が小さいことがわかる。この比をとると、どちらの試料でも値は1.8となり、エルゴード性が破れていることを示す結果となった。

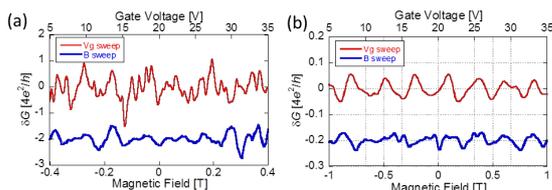


図6 グラフェン試料における伝導度ゆらぎ。(a)はh-BNを用いた高移動度試料、(b)はSiO₂表面の低移動度試料。

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8件)

Chiashain Chuang, Li-Hung Lin, Nobuyuki Aoki, Takahiro Ouchi, Akram M. Mahjoub, Tak-Pong Woo, Reuben K. Puddy, Yuichi Ochiai, C. G. Smith, and Chi-Te Liang: Mesoscopic conductance fluctuations in multi-layer graphene, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, Vol.103, pp.043117-1-4 (2013). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4816721>

J. Fransson, M.-G. Kang, Y. Yoon, S. Xiao, Y. Ochiai, J. L. Reno, N. Aoki, and J. P. Bird: Tuning the Fano resonance with an intruder continuum, *Nano Lett.*, 査読有, Vol.14, pp.788-793 (2014). DOI: dx.doi.org/10.1021/nl404133d

N. Aoki, C. R. da Cunha, R. Akis, D. K. Ferry and Y. Ochiai: Scanning gate imaging of a disordered quantum point contact, *J. Phys.: Condens. Matter*, 査読有, Vol.26, pp.193202-1-13 (2014). [pp.075601-1-7, \(2016\).](https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/ShaoHua Xiang, Kazuhiro Fuji, Shun Sato, Shiran Xiao, Jonathan P. Bird, <u>Nobuyuki Aoki</u> and <u>Yuichi Ochiai</u>: Metal-Insulator Transition in the Quasi-One-Dimensional Transport of Fractional Quantum Hall States, <i>J. Phys.: Condens. Matter</i>, 査読有, Vol.27, pp.202201-1-6 (2015). DOI:10.1088/0953-8984/27/20/202201</p>
<p>C. Chuang, M. Matsunaga, F.-H. Liu, T.-P. Woo, <u>N. Aoki</u>, L.-H. Lin, B.-Y. Wu, <u>Y. Ochiai</u> and C.-T. Liang: Probing weak localization in chemical vapor deposition graphene wide constriction using scanning gate microscopy, <i>Nanotechnology</i>, 査読有, Vol.27,</p>
</div>
<div data-bbox=)

DOI:10.1088/0957-4484/27/7/075601

S. Xiao, Y. Yoon, Y.-H. Lee, J. P. Bird, Y. Ochiai, N. Aoki, J. L. Reno, and J. Fransson: Detecting weak coupling in mesoscopic systems with a nonequilibrium Fano resonance, *Phys. Rev. B*, 査読有, Vol.93, pp.165435-1-13, (2016).

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.93.165435>

C. R. da Cunha, M. Mineharu, M. Matsunaga, N. Matsumoto, C. Chuang, Y. Ochiai, G.-H. Kim, K. Watanabe, T. Taniguchi, D. K. Ferry, and N. Aoki: Conductance fluctuations in high mobility monolayer graphene: Nonergodicity, lack of determinism and chaotic behavior, *Scientific Reports*, 査読有, Vol.6, pp.33118-1-8, (2016).

DOI: 10.1038/srep33118

Masahiro Matsunaga, Ayaka Higuchi, Guanchen He, Tetsushi Yamada, Peter Krüger, Yuichi Ochiai, Yongji Gong, Robert Vajtai, Pulickel M. Ajayan, Jonathan P. Bird, and Nobuyuki Aoki: Nanoscale-Barrier Formation Induced by Low-Dose Electron-Beam Exposure in Ultrathin MoS₂ Transistors, *ACS Nano*, 査読有, Vol.10, pp.9730-1-8, (2016).

DOI: 10.1021/acsnano.6b05952

[学会発表](計11件)

Nobuyuki Aoki, Roland Brunner, Adam M. Burke, Richard Akis, Ronald Meisels, David K. Ferry, and Yuichi Ochiai: Visualization of electron states in open quantum dots by using scanning gate microscopy, The 40th International Symposium on Compound Semiconductor (ISCS 2013), ThA-4, Kobe International Convention Center (Hyogo・Kobe), May 19-23, 2013.

Nobuyuki Aoki, Roland Brunner, Adam Burke, Richard Akis, Ronald Meisels, David K. Ferry, and Yuichi Ochiai: Scanning gate imaging of electron states in open quantum dots, The 16th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications, A2-0-01, Jeju (Korea), July. 2-5, 2013

項少華、佐藤駿、グエン・タン・ルーン、向笠直紀、S. Xiao、青木伸之、J.P. Bird、落合勇一: 量子細線における電子強相関現象の観測と解析、日本物理学会第69回年次大会、8aAV-3、p.474、中部大学(愛知県・春日井市)、9月7日~10日、2014.

Nobuyuki Aoki: Scanning gate imaging of conductance fluctuations in CVD grown monolayer graphene, Chiba

University-Ajou University Symposium 2014, 12P-6, p.14, Chiba University (Chiba-Chiba), December 11-12, 2014.
項少華、佐藤駿、グエン・タン・ルーン、松永正広、向笠直紀、鈴木敦士、青木伸之、J.P.バード、落合勇一：走査ゲート顕微鏡観察による量子細線における分数プラトールの観測、日本物理学会第70回年次大会、21aBK-4、p.44、早稲田大学（東京都・新宿区）3月21日～24日、2015年。
M. Mineharu, M. Matsunaga, A. Takeda, I. Lee, G.-H. Kim, J. P. Bird, D. K. Ferry, Y. Ochiai, and N. Aoki: Conductance Fluctuations in Bilayer Graphene Encapsulated in h-BN, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21), Th-PE-59, p.465, Sendai International Conference Center (Miyagi-Sendai), July 26-31, 2015.
鈴木敦士、佐藤駿、グエン・タン・ルーン、松永正広、向笠直紀、鬘谷俊介、J. P. Bird、落合勇一、青木伸之：走査ゲート顕微法による結合量子ドットにおける伝導の観察、日本物理学会2015年秋季大会、17aAG-1、p.87、関西大学（大阪府・吹田市）、9月16日～19日、2015。
Masaaki Mineharu, Masahiro Matsunaga, Yuichi Ochiai, Inyeal Lee, Gil-Ho Kim, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, David K. Ferry, Jonathan Bird and Nobuyuki Aoki: Conductance Fluctuations in High-Mobility Bilayer-Graphene/h-BN Heterostructures, ISANN2015, p.108, Hawaii (U.S.A.), Nov.30-Dec.4, 2015.
峰晴正彰、松永正広、青木伸之、落合勇一、D.K. Ferry, J.P.Bird、渡邊賢司、谷口尚、I. Lee, G-H. Kim、BN/graphene/BN試料における量子伝導現象の観測、日本物理学会第71回年次大会、19aBA-6、p.1297、東北学院大学（宮城県・仙台市）、3月19日～3月22日、2016。
Masaaki Mineharu, Masahiro Matsunaga, Yuichi Ochiai, Inyeal Lee, Gil-Ho Kim, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, David K Ferry, Jonathan P. Bird and Nobuyuki Aoki: Anomalous Conductance Fluctuations in Bilayer Graphene in h-BN layers, Compound Semiconductor Week (CSW2016), MoB4-2, p.13, Toyama International Conference Center (Toyama-Toyama), June 26-30, 2016。
鬘谷俊介、鈴木敦士、R. Brunner、D.K. Ferry、落合勇一、青木伸之：開放系結合量子ドットにおける磁気輸送現象とSGM観察、日本物理学会第72回年次大会、17aA21、p.45、大阪大学豊中キャンパス（大阪府・豊中市）、3月17日～3月20日、2017。

〔図書〕(計 1 件)

落合勇一、関根智幸、青木伸之 共訳(David K. Ferry 著) コロナ社、詳説 半導体物性、2016、総ページ 229、担当 171～226

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://adv.chiba-u.jp/nano/qnd/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青木 伸之 (AOKI, Nobuyuki)
千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授
研究者番号：60312930

(2) 研究分担者

落合 勇一 (OCHIAI, Yuichi)
千葉大学・名誉教授
研究者番号：60111366

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

項 少華 (XIANG, Shaohua)
松永 正広 (MATSUNAGA, Masahiro)
鈴木 敦士 (SUZUKI, Atsushi)
峰晴 正彰 (MINEHARU, Masaaki)
荘 家翔 (CHUANG, Chiashain)