

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22540326
 研究課題名（和文） グラフェンの光応答と電気伝導
 研究課題名（英文） Optical Response and Transport in Graphene
 研究代表者
 安藤 恒也（ANDO TSUNEYA）
 東京工業大学・理工学研究科・教授
 研究者番号：90011725

研究成果の概要（和文）：

グラフェン上の電子の運動を記述する Weyl 方程式に由来する(1)トポロジカル異常が及ぼす最も典型的な効果である反磁性帯磁率のデルタ関数特異性の起源を解明するためにさまざまな研究を行い、その(2)電気伝導に及ぼす効果と散乱体依存性、また、(3)格子振動と電子-格子相互作用の磁場効果によって現れる電気伝導の磁気フォノン共鳴、単層/2層グラフェン境界でのカイラル電子特有の反射・透過効果と電子状態などについて、理論的に明らかにした。また、グラフェンが円筒状に丸まったナノチューブの(4)光吸収と励起子効果、特に、その環境効果について明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The electron motion in graphene is governed by the Weyl equation for massless neutrino. This equation has a topological singularity at zero energy, leading to various interesting phenomena. The most intriguing property is the delta-function singularity in the diamagnetic susceptibility, the origin of which is clarified through theoretical studied from various aspects. Effects on transport properties are also the subject of the intensive study, including the magneto-phonon resonance. Environment effects on excitons in carbon nanotubes are also studied.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			0
年度			0
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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 グラフェン

1. 研究開始当初の背景

申請者は、主にカーボンナノチューブとの関連でグラフェンに関する理論研究を進め

てきた。零磁場での電気伝導度、動的伝導度、磁場中での伝導度テンソルなどの計算を行い、 $k=0$ のトポロジカル異常と直接また間接的に関連して、いろいろな特異性が示されて

いる。例えば、簡単なボルツマン方程式による計算では零磁場の伝導度がフェルミエネルギーに依らず一定となるが、実際には、 $k=0$ 付近では伝導度が急激に減少し、磁場に依らず普遍的な値をとること、ランダウ準位間ギャップでのホール伝導度が半整数倍に量子化されることなどを理論的に予言した。この系の対称性についても散乱体のポテンシャル到達距離によって反局在のシンプレクティック対称性から、弱局在の直交対称性へと変化することや、結晶の $\pi/3$ 回転対称性の効果により、弱局在補正のないユニタリー対称性へ変化することをすでに指摘している。特に、平成 21 年度に終了した基盤研究(C)では、単層及び 2 層グラフェンの電子-格子相互作用、多層グラフェンの電子状態の単層と 2 層グラフェンへの分解、反磁性等について精力的な研究を展開してきた。この研究では、これまでのこのような研究をさらに発展させることを目指している。

2. 研究の目的

この研究では、これまでのこのような研究をさらに発展させることにより、単層及び 2 層グラフェンの電子状態、輸送現象、電子間相互作用、光学的性質の特徴を理論的に明らかにする。研究内容はもちろん実験の発展により変化するが、当初に取り組むテーマは以下のとおりである。

(1) トポロジカル特異性: $k=0$ でのトポロジカル異常に関連すると考えられる物理現象の理論的予言と理解を目指す。その典型例が反磁性帯磁率のデルタ関数的特異性である。その理解を目指し、空間及び時間変化する磁場に対する応答、周期磁場下のバンド構造、不規則性の効果など、さまざまな角度からその起源を探る。

(2) 電気伝導: 格子空孔や Stone-Wales 欠陥などさまざまな散乱メカニズムに対する特徴を明らかにする。特にバンドギャップが電界に比例して変化する 2 層グラフェンに注目する。2 層グラフェンでは不純物ポテンシャルによってもギャップが開く等、その状態が大きく変化する。

(3) 格子振動と電子-格子相互作用: 2 層グラフェンにおける面垂直方向の振動の有効ハミルトニアンを導出し、格子振動に対する電子-格子相互作用の効果とその磁場効果を明らかにする。

(4) 光吸収と励起子効果: バンド構造に対する電子間相互作用の効果、光吸収スペクトルに対する励起子効果、単層及び 2 層グラフェンのサイクロトロン共鳴とバンド間ランダウ準位共鳴に対する電子間相互作用に対する Kohn の定理の破れなど。

これらの具体的な計算には主に有効質量近似を用いた解析的手法を用いるが、必要に応じて数値シミュレーション、さらには強束縛模型による数値計算を行う。

3. 研究の方法

これまでの申請者のカーボンナノチューブに関する理論研究の出発点はグラフェンであり、ナノチューブの物性を理論的に記述するための出発点として、すでにグラフェンの物性の記述方法はかなり確立している。例えば、フェルミエネルギー近傍の電子状態を記述しその特徴を明らかにするには有効質量近似が最適である。有効質量近似では、電子の運動はニュートリノに対する 2 行 2 列の Weyl 方程式(質量ゼロのディラック方程式)で記述される。

長波長音響型フォノン、長波長光学フォノン、電子の K 点と' 点の間で散乱を引き起こすブリュアン域境界フォノンとの相互作用のハミルトニアンもこれまでの研究で確立した。2 層グラフェンでは、層間相互作用のために、単層の場合の線形な分散から放物線型の自由電子的な分散へと電子状態が大きく変化する。ただし、磁場中のランダウ準位は零エネルギーで二重縮退するという特異性を持っている。この特徴を記述する有効ハミルトニアンも確立している。

グラフェンの実験研究はこれから急速に発展すると予想されるので、それと全く独立に進めることは現実的ではない。また、大学院生等による比較的息の長い研究テーマと実験と関連したホットなテーマを区別して進める必要がある。後者のテーマに関しては、ナノチューブに関して共同研究を行った経験のある国内の研究者、及びイギリス、フランス、米国などの海外の研究者とダイナミカルに共同研究を進める

4. 研究成果

(1) 異常反磁性帯磁率

単層グラフェンの電子状態を記述する Weyl 方程式は波数の原点にトポロジカル特異点を持つ。この特異性はグラフェンの輸送現象の零エネルギー異常としてさまざまな形で現れる。この零エネルギー異常の典型例が反磁性帯磁率のデルタ関数特異性である。その起源や物理的な意味を理解し、付随する現象を明らかにするために、これまでさまざまな研究を行ってきた。

その一つとして、は空間変化する磁場に対する応答を考察した。波数 q の変動磁場に対する帯磁率は $q < 2k_F$ でゼロとなり、グラフェンはフェルミ波長に比べて長波長の磁場には全く応答しない。また、波数 q を一定にして、

フェルミエネルギーを変化すると、帯磁率がゼロでないエネルギー領域が $k_F < q/2$ に現れるが、その面積が q によらず一定となる。すなわち、 $q=0$ の長波長極限では、エネルギーのデルタ関数に近づく。

現実のグラフェンのように不純物散乱が強い場合には、この波数依存性は大きく変化する。短距離型散乱体を仮定し、セルフコンシステント・ボルン近似で反磁性帯磁率の波数依存性を計算した。不純物散乱があると $q < 2k_F$ でも応答するようになること、また、ピークが散乱強度の増加とともに消滅することを示している。

さらに、ギャップの効果も異常反磁性帯磁率の起源を理解する上で重要である。適当な基板を選ぶと、二つの副格子点のエネルギーが異なる場合が実現でき、その場合はそのエネルギー差に対応したギャップが生じる。そのときの反磁性帯磁率はギャップ中でのみ値を持ち、伝導帯あるいは価電子帯に入ると不連続に常磁性方向に変化する。また、当然、零ギャップの極限ではデルタ関数に近づく。

この跳びはランダウ準位の構造から理解できる。実際、このランダウ準位は真空中の電子と全く同一である。ただし、 K と K' が擬スピンの上向きと下向きに対応する。擬スピンのゼーマン・エネルギーによりパウリ常磁性が、また、運動エネルギーからはランダウ反磁性が生じる。このとき、反磁性は常磁性の $1/3$ となり、バンド内では常磁性を示す。2次元における状態密度の不連続性から、バンドに入ると不連続に常磁性方向にジャンプする。バンド内での帯磁率がエネルギーに依存せず一定であることが示されるので、エネルギーが無限大で、帯磁率が零になることを仮定すれば、ギャップ内だけで大きな反磁性を示すことが定量的にも示せる。

ギャップが開いた場合の空間変動する磁場に対する帯磁率も解析的に計算される。その結果、ギャップの有無に全く関係なく、 $q < 2k_F$ の長波長の磁場に全く応答しないことが示される。また、そのエネルギー依存性から、零ではない領域の面積が波数に依存しないことも、ギャップの有無に関係がないことも示せる。ギャップが開いた場合の不純物散乱の効果もセルフコンシステント・ボルン近似で考察した。

ギャップのあるグラフェンの帯磁率の表式からただちに、Biのような3次元ディラック系の反磁性帯磁率を求めることができる。3次元系の場合には、磁場の方向の波数が保存量となり、ランダウ準位は各波数に依存したギャップで置き換えることで求められ、帯磁率はギャップ中でのみ値を持つ2次元の結果を波数で積分することで求められる。もち

ろん、その結果は前から知られている結果をよく再現する。

(2) 電気伝導

グラフェンの電気伝導特性を理解することは重要な課題である。例えば、散乱体強度が電子濃度で大きく変化しない場合、ボルツマン伝導率は零エネルギーでのユニバーサルな伝導率から、それ以外の場合、散乱強度に反比例する伝導率へ不連続に跳ぶことが示されている。一方、スコッチテープでグラファイトをはがしてシリコン基板上に作製されたグラフェンでは、伝導率がほぼ電子濃度に比例し、零エネルギーの最小伝導率は、試料によりばらつき、理論予言より3~4倍大きい値をとることが多い。

この電気伝導特性をより明確化するために、短距離ポテンシャルに限られていたこれまでのセルフコンシステント・ボルン近似の手法を任意の散乱ポテンシャルの場合に拡張することを行った。ポテンシャル到達距離が d のガウス型のポテンシャルの場合、状態密度は $|\epsilon| < \gamma/d$ の範囲が大きな影響を受け、また、伝導率は零エネルギー付近を除きボルツマン伝導率に比べて大きくなる。また、到達距離 d の小さい場合を除き、最小伝導率は散乱強度とともに大きく増大し、 d が格子定数 a より十分大きくなると d に異存しないユニバーサルな依存性を示す。

また、荷電散乱体の場合には、遮蔽効果が電子濃度で大きく変化するため、遮蔽定数を濃度ごとにセルフコンシステントに決定する必要がある。その結果、零エネルギーでの最小伝導率はほとんど散乱体濃度に依存せず、短距離散乱体のときの約2倍程度となる。これは、最小伝導率が散乱体の性質に依存しているが、その濃度にはほとんど依存しないという中途半端な普遍性を持つことを示している。零エネルギー近傍を除くと伝導率はボルツマン方程式の結果にほぼ等しい。

荷電散乱体の有効ポテンシャルはグラフェンを支える基板と周りの誘電媒質などの環境に強く依存する。グラフェン上での有効誘電率は基板の誘電率(~ 3.9)と媒質の誘電率の平均となる。この環境効果を理論的に考察した。例えば、誘電率 ~ 5 では、ほぼ有効誘電率が倍になり、伝導率が4倍になることが期待されるが、実際には3~4割程度の上昇にとどまる。これは、グラフェンのディラック電子による遮蔽効果がそれだけ減少するために、媒質とディラック電子の遮蔽効果が相殺するためである。すなわち、環境誘電媒質の効果は、主に散乱ポテンシャルの有効到達距離を変化させる。

この方法を反磁性帯磁率に応用することもできる。ガウス型ポテンシャルの散乱体の

場合、デルタ関数の`ぼけ`はほぼ $\sim\gamma/d$ となり、散乱強度が増加すると、幅はあまり変化せず、形状が大きく変化する。また、エネルギーを散乱ポテンシャルの到達距離で決まるエネルギー γ/d でスケールすると d に依存しないユニバーサルな関数で表される。また、ぼけ幅が γ/d 程度であることは、デルタ関数の反磁性帯磁率に寄与する零エネルギーの状態が散乱ポテンシャルでエネルギー γ/d 程度の状態まで混じることによって起因する。荷電散乱体の場合には、電子濃度で遮蔽効果が大きく変化するために形状が大きく変化し、ピークの分裂が起きることを示した。

セルフコンシステント・ボルン近似は2層グラフェンの場合にも長距離ポテンシャルの散乱体へ拡張することができる。到達距離が小さいときの最小伝導率は散乱強度に依存せず、単層グラフェンの場合の2倍となるが、それ以外には、最小伝導率は散乱強度とともに大きく増大する。これは単層グラフェンの場合と同様である。一方、荷電散乱体の場合には、最小伝導率は不純物濃度により変化する。すなわち、2層グラフェンの最小伝導率はユニバーサルではなく、単層グラフェンの場合よりも散乱体への依存度が大きいことが結論される。

以前の研究で、六角形ブリュアン域の中心 Γ 点の光学フォノン(196 meV)と角のK点のフォノン(162 meV)が、加速された電子のエネルギー損失を引き起こすのに重要であることが示されている。その中では特に、K点のフォノンはエネルギーが低く、また電子との結合定数が大きいために、寄与が大きい。これらのフォノンは振動数がほとんど波数に依存しないために、磁場中の電気伝導の磁気振動現象を引き起こす。この磁気フォノン共鳴を理論的に考察した。

(3) 単層/2層グラフェン境界の電子状態

スコッチテープを用いて機械的にグラファイトから剥離して作られたグラフェンには層数の異なる部分が生じることが多い。このような層数の異なるグラフェンの境界付近の電子状態は興味深い研究対象である。特に、2層グラフェンの零エネルギー付近の状態は、層間ホッピングによる影響をあまり受けない格子点の状態ではほぼ決まるために、この境界の構造に強く影響を受ける。

境界の影響を最も強く受けるのは、境界での電子波の透過・反射である。そこで、単層グラフェン側から入射した電子波の透過確率の入射角依存性を計算した。透過確率は入射角に強く依存し、垂直入射ではなく斜め入射の場合に最大となる。この特徴は境界の構造には依存しない。この入射角依存性はK点とK'点で反対となるため、境界に斜めに入射

した電子波の透過強度はK点とK'点で異なり、谷間分極が生じる。したがって、これは、グラフェンにK点とK'点の電子濃度が異なる谷分極を引き起こす有力な方法となる。ただし、エネルギーが2層グラフェンの励起伝導帯あるいは価電子帯の領域に入ると、この非対称な入射角依存性は急激に弱まる。

磁場中の零エネルギー近傍のランダウ準位は、単層グラフェンと2層グラフェンで大きく異なっている。単層/2層グラフェン境界付近では、これらのランダウ準位の間でどのように移り変わるのかは興味深い問題である。単層/2層グラフェン境界付近での磁場中のランダウ準位を計算し、サイクロトン軌道の中心座標が境界付近にあるときには、軌道位置にほとんど依存しない界面ランダウ準位が存在することを明らかにした。この界面ランダウ準位は局所状態密度に大きな寄与をするため、走査型トンネル顕微鏡等によって観測することが期待される。

(4) カーボンナノチューブの励起子

ナノチューブの光スペクトルには電子間相互作用の効果が顕著に表れることがこれまでの理論で予言されている。実際、バンドギャップが大きく増大し、それとともに励起子効果も強く、束縛エネルギーはバンドギャップの増加のかなりの部分を占める。その結果、励起子は相互作用のないときのバンドギャップとあまり変わらないエネルギーをもち、光吸収のほとんどは励起子で決まる。

ナノチューブを取り巻く環境はさまざまであり、例えば、通常のパンドルでは回りをさまざまなナノチューブで取り囲まれ、単離する場合にも界面活性剤などの誘電物質で包まれる。そこで、ナノチューブの回り、あるいは内部に存在する誘電媒質がバンド構造と励起子に及ぼす影響について、理論的考察を行った。その結果、バンドギャップと励起子束縛エネルギーへの効果がほぼ打ち消し合い、励起子のエネルギー自身は大きな影響を受けないことを示した。

光の電場が軸垂直方向の偏光の場合には伝導帯と価電子帯の間の非対称性を与える補正が大きな効果を引き起こし、反電場効果を受けない励起子準位(暗励起子と呼ばれる)が吸収・発光に顔を出す。この垂直偏光の励起子は環境効果により、暗励起子の相対強度が大きく変化することを示した。

2層ナノチューブでは、通常、外側と内側のチューブの構造が整合していない。この場合、各格子点での波動関数の位相が大きく変化するため、層間の電子遷移が、非整合性により相殺しほとんど現れない。しかし、一つのチューブに生じた電荷分布によるポテンシャルにより、他の層でも電荷分布が誘起さ

れ、それによるポテンシャルが元のチューブにも影響を及ぼす。この層間遮蔽効果の理論的考察を行った。その結果、励起子に対する層間遮蔽効果はバンドギャップと励起子束縛エネルギーへの効果がほぼ相殺するために、非常に小さくなることを示した。さらに、垂直偏光のスペクトルは層間相互作用により、Fano型の非対称なスペクトルへと大きく変化することを示した。

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 34 件, すべて査読有り)

- 1 Y. Tomio, H. Suzuura, and T. Ando, Cross-polarized excitons in double-wall carbon nanotubes, *Phys. Rev. B* **86**, 245428/1-11 (2012).
- 2 Y. Tomio, H. Suzuura, and T. Ando, Fano effect on dynamical conductivity for perpendicular polarization in double-wall carbon nanotubes, *J. Phys. : Conf. Ser.* **400**, 042062/1-4 (2012).
- 3 S. Uryu and T. Ando, Environment effects on cross-polarized excitons in carbon nanotubes, *Phys. Rev. B* **86**, 125412/1-12 (2012).
- 4 Y. Tomio, H. Suzuura, and T. Ando, Interwall screening and excitons in double-wall carbon nanotubes, *Phys. Rev. B* **85**, 085411/1-12 (2012).
- 5 Y. Arimura and T. Ando, Diamagnetism of graphene with gap in nonuniform magnetic field, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 024802/1-7 (2012).
- 6 M. Koshino and T. Ando, Orbital magnetism of Dirac systems, *J. Phys. Conf. Ser.* **334**, 012005/1-7 (2011).
- 7 Y. Arimura, M. Koshino, and T. Ando, Diamagnetic response of disordered graphene to nonuniform magnetic field, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 114705/1-6 (2011).
- 8 M. Noro, M. Koshino, and T. Ando, Diamagnetism of graphene with long-range scatterers, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 114701/1-9 (2011).
- 9 T. Ando, Charged impurity scattering in graphenes: Effects of environmental screening, band gap, and AA stacking, *J. Phys. : Conf. Ser.* **302**, 012015/1-8 (2011).
- 10 S. Uryu and T. Ando, Breakdown of exchange approximation for cross-polarized excitons in carbon nanotubes, *J. Phys. : Conf. Ser.* **302**, 012004/1-4 (2011).
- 11 M. Koshino and T. Ando, Singular orbital magnetism of graphene, *Solid State Commun.* **151**, 1054-1060 (2011).
- 12 T. Ando, Zero-mode anomalies of massless Dirac electron in graphene, *J. Appl. Phys.* **109**, 102401/1-7 (2011).
- 13 N. Mori and T. Ando, Magnetophonon resonance in monolayer graphene, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 044706/1-6 (2011).
- 14 S. Uryu and T. Ando, Effect of electron-hole asymmetry on cross-polarized excitons in carbon nanotubes, *Phys. Rev. B* **83**, 085404/1-10 (2011).
- 15 T. Ando, Effects of environmental dielectric screening on optical absorption in carbon nanotubes, *Physica E* **43**, 798-803 (2011).
- 16 T. Ando, Tuning of optical phonons by Fermi level in graphene, *Physica E* **43**, 645-650 (2011).
- 17 T. Ando, Bilayer graphene with long-range scatterers studied in a self-consistent Born approximation, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 014707/1-8 (2011).
- 18 M. Koshino, T. Nakanishi, and T. Ando, Interface Landau levels in graphene monolayer-bilayer junction, *Phys. Rev. B* **82**, 205436/1-12 (2010).
- 19 T. Nakanishi, M. Koshino, and T. Ando, Transmission through a boundary between monolayer and bilayer graphene, *Phys. Rev. B* **82**, 125428/1-14 (2010).
- 20 M. Noro, M. Koshino, and T. Ando, Theory of transport in graphene with long-range scatterers, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 094713/1-7 (2010).
- 21 A. Toyoda and T. Ando, Theory of electron scattering by lattice defects in graphene, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 094708/1-9 (2010).
- 22 M. Koshino and T. Ando, Anomalous orbital magnetism in Dirac-electron systems: Role of pseudo-spin paramagnetism, *Phys. Rev. B* **81**, 195431/1-9 (2010).
- 23 T. Nakanishi and T. Ando, Conductance images between two STM probes in graphene, *Physica E* **42**, 726-728 (2010).
- 24 T. Kaneko, M. Koshino, and T. Ando, Symmetry crossover in quantum wires with spin orbit interaction, *Phys. Rev. B* **81**, 155310/1-5 (2010).
- 25 H. Tsukahara and T. Ando, Pseudo-band-structure of disordered lateral superlattice in magnetic field, *J. Phys.*

- Soc. Jpn. **79**, 024709/1-10 (2010).
- 26 T. Ando, Environment effects on excitons in semiconducting carbon nanotubes, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 024706/1-10 (2010).
- 27 S. Uryu and T. Ando, One-dimensional characters of excitons in carbon nanotubes, Proc. SPIE **7608**, 76081J/1-12 (2010).

[学会発表] (計 68 件)

- 1 T. Ando, Theory of chiral electrons in graphene and nanotubes, International Symposium on Nanoscience and Quantum Physics, The International House of Japan, Tokyo, December 17 - 19, 2012
- 2 T. Nakanishi and T. Ando, Effect of boundary structure on conductance between multilayer graphenes, 31st International Conference on Physics of Semiconductors, Zurich, Switzerland, July 29 - August 3, 2012
- 3 T. Ando, S. Uryu, and M. Koshino, Theory of optical and electronic nanotube-devices, International Symposium on Carbon Nanotube Nano-electronics, Nagoya, Japan, June 11 - 13, 2012
- 4 T. Ando, Theory of Dirac electrons in graphene, 2012 MRS Spring Meeting, Moscone West, San Francisco, USA, April 9 - 13, 2012
- 5 T. Ando, S. Uryu, Y. Tomio, and H. Suzuura, Excitons in carbon nanotubes: Effects of dielectric environment and inter-wall interaction, Workshop on Carbon Nanotube in Commemoration of the 20th Anniversary of Its Discovery (2011-CNT20), The International House of Japan, Tokyo, December 12 - 13, 2011
- 6 T. Ando, Physics of chiral electrons in graphene, 26th Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop on Novel Quantum States in Condensed Matter 2011 (NQS2011), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, November 7 - December 9, 2011
- 7 T. Ando, Exotic transport properties of monolayer and bilayer graphene, International Conference Advanced Carbon Nanotubes, St Petersburg, Russia, July 4 - 8, 2011
- 8 T. Ando, Physics of chiral electrons in graphenes, The 15th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications, Ramada Plaza Jeju Hotel, Cheju, Korea, July 5 - 8, 2011

- 9 T. Ando, Chiral electrons and zero-mode anomalies in graphene, Topical Research Meeting on Physics: Graphene and Related Two-Dimensional Materials, Institute of Physics, London, UK, June 1 - 2, 2011
- 10 T. Ando, Roles of pseudo-spin in electronic and transport properties of graphene, Frontiers in Nanoscale Science and Technology Workshop 2011 (FNST 2011), RIKEN Wako Campus, Wako, Saitama, Japan, January 5 - 7, 2011
- 11 T. Ando, Theory of monolayer and bilayer graphene: Pseudo-spin physics, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors, COEX, Seoul, Korea, July 25 - 30, 2010
- 12 安藤恒也, グラフェンの電子状態と電気伝導—理論的側面から, 日本表面科学会放射光表面科学部会・SPRING-8 利用者懇談会顕微ナノ材料科学研究会合同シンポジウム, 東京工業大学蔵前会館, 2010年12月10日 - 11日
- 13 安藤恒也, グラフェンの基礎物性, 真空・表面科学合同講演会合同シンポジウム「グラフェン研究の最前線」, 大阪大学コンベンションセンター, 2010年11月4日 - 6日
- 14 越野幹人, 安藤恒也, ナノチューブとグラフェンの電気伝導, 2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会シンポジウム「ナノチューブナノエレクトロニクスはどこまで進んだか」, 長崎大学文教キャンパス, 2010年9月14日 - 17日

[図書] (計 1 件)

- 1 T. Ando, Phonons and electron-phonon interaction in graphene and nanotube, Graphene and Its Fascinating Attributes, edited by S. Pati, T. Enoki, and C. N. R. Rao (World Scientific, Singapore, 2011), pp. 135-150.

[その他]

ホームページ等

<http://www.stat.phys.titech.ac.jp/ando>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 恒也 (ANDO TSUNEYA)
東京工業大学・理工学研究科・教授
研究者番号: 90011725

(2) 研究分担者: なし

(3) 連携研究者: なし