

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 4 日現在

機関番号：10101
 研究種目：挑戦的萌芽研究
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23656204
 研究課題名（和文）グラフェン pn 接合における負の屈折率の実証
 研究課題名（英文）Demonstration of negative refraction in grapheme pn junction
 研究代表者
 陽 完治 (YOH KANJI)
 北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・教授
 研究者番号：60220539

研究成果の概要（和文）：電気測定の結果、全体的には負の屈折をしている傾向が見えたがフェルミ波長に相当する周期で正負のパターンが交互に現れたため、結論として負の屈折を確定することはできなかった。この干渉パターンのようなトップゲートおよびバックゲート電圧依存性は弾道電子（ホール）波がエッジで反射されて干渉パターンが生じている可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The overall electrical measurement results indicate negative refraction overlapped with some interference pattern. The interference pattern is thought to come from multiple reflection of the injected electron waves. As a result,

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 | 2,900,000 | 870,000 | 3,770,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子電気材料工学

キーワード：負の屈折、クライン・トンネル、グラフェン、pn 接合

1. 研究開始当初の背景

単原子層のグラファイトであるグラフェンは、その特異な電子伝導特性で知られるようになった。リニアな分散関係の示唆するゼロ質量（実際は狭ギャップ半導体と同じくらい小さい）が理論的に予測され、実際にも室温で $200,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ もの高移動度は十分に驚異的なものであった。そのような高性能トランジスタ材料としてのポテンシャルが高いことばかりではなく、相対論的粒子の振る舞いが模倣できることが予測された。実際、長い間パラドックスをいわれていたクライントンネリングの模倣実験がグラフェンの pnp(または npn)構造の障壁をトンネルする現象として観測された。実はこれ以外に面白い現象が予測されている。それは光学系でいうとベセラゴレンズと呼ばれ

るメタマテリアルのような（電子波が）負の屈折率を有する現象である。これが電子で実現できれば電子波のビームスプリッターなど面白い応用が予測される。このような実験を他に先駆けて実行し、新たな応用を見つけようという提案である。

2. 研究の目的

本研究は、トップゲートおよびバックゲートにより形成されたグラフェン pn 接合を横断して弾道的に伝導するキャリアの特異な屈折現象を実験的に検証することを目的とする。負の屈折率の実験に成功すれば、ディラックフェルミオンとしてのもう一つの特性を世界で初めて検証したことになる。また余裕があれば、それを応用してメタマテリアルの電子版とも言うべき負の屈折率を利用し

た新しいタイプのデバイス（ベセラゴレンズなど）を試作することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 単層グラフェンを用いてトップゲートとバックゲートの組み合わせで pn 接合を作製する。

(2) そのサイズが平均自由行程程度のサイズで負の屈折率を検証するデバイス进行設計する。

(3) 定常状態でキャリアの偏りを検知することで負の屈折率が成立する散乱条件を調べる。

(4) 負の屈折率の検証。

「負の屈折率」の検証が達成された場合、電子波を集光したり、(電子波) ビームスプリッターのような新規な素子を電子デバイスで実現する提案をおこなう。

具体的には、図のように電子線描画を用いて電子波の通るパスを1次元に加工しホールを pn 接合面に入射させ、回折電子が定常状態では散乱確率に対応した電子分布が堆積するため電圧端子で観測するという方法でおこなう。

4. 研究成果

負の屈折現象の基礎になる先行実験としてはグラフェン中の電子(ホール)の弾道的な伝導とチャンネル中の電子波のクライントネル現象に伴って現れるファブリペロー共振の実証がある。これを実証するため図1のようなラテラル pnp 構造を作製した。チャンネル長は電子の平均自由行程と同程度以下である必要がある。平行電極に垂直方向に入射したホール波がゲート下で電子に転換し、ドレイン端で再びホールとなって100%の確率で抜けて行く(クライントネリング)が起こる。垂直から少し傾いた角度でゲート端の達した電子は反射を繰り返シファブリペロー共振を起こす。透過した電流のコンダクタンスの測定結果を図2に示す。図中の黒色の実線はシミュレーション結果である。

以上のクライントネリングの実験においては電極に対して垂直に入射する電子(ホール)およびわずかに垂直から傾いた角度の電子(ホール)波の振る舞いを調べる pnp 構造あるいは npn 構造となっていたわけであるが、負の屈折率の実証実験をおこなう場合は、pn 接合のみでよい。ただし大きな角度で pn 接合界面に注入させなければならないので弾道電子を設定した入射角度に沿って進むような導波路を用意しなければならない。また、pn 接合を通過するとき拡散的にならないようにポテンシャルの傾きが十分に急峻である必

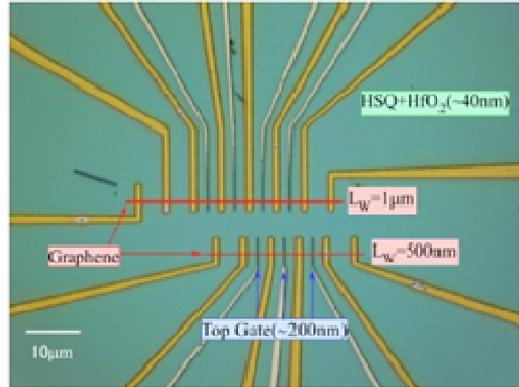
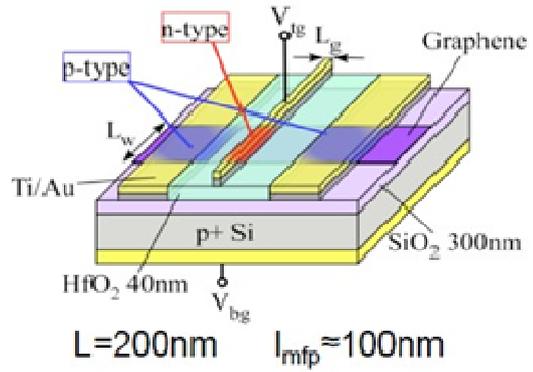


図1 グラフェンにおけるクライントネル現象を実証するためのラテラル pnp デバイス構造の模式図(上)およびその顕微鏡写真(下)

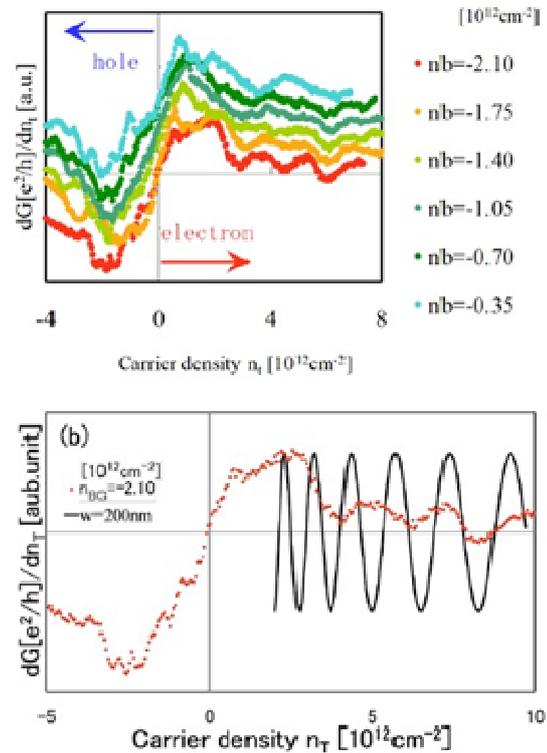


図2 グラフェン pnp 接合における電流振動。小さな振動(上図)はファブリペロー共振を示す。下図の実線(黒)はシミュレーション結果

要がある。以下の手順でデバイスを作製し、負の屈折率の検証を試みた。

(1) 単層グラフェンを用いてトップゲートとバックゲートの組み合わせでpn接合を作製する。

(2) そのサイズが平均自由行程程度のサイズで負の屈折率を検証するデバイスを設計する。

(3) 定常状態でキャリアの偏りを検知することで負の屈折率が成立する散乱条件を調べる。

(4) 負の屈折率の検証。

トップゲートの下に溜まった電荷にアクセスすることは簡単にはできないので電流端子の電極を1次元ナノリボンの電子領域にコンタクトさせるようにした。電子からホールへの変換は拡散的になされることで実現するためグラフェンナノリボンの導波路の長さは平均自由行程よりも長くした。逆に、屈折後のキャリアは弾道的伝導をさせて電圧モニター端子でのキャリアの蓄積を行うことで屈折方向を確認するため注入口からモニター端子までの距離は平均自由行程以下になるように設計しなければならない。デバイスの概念図と模式図を図3に示す。

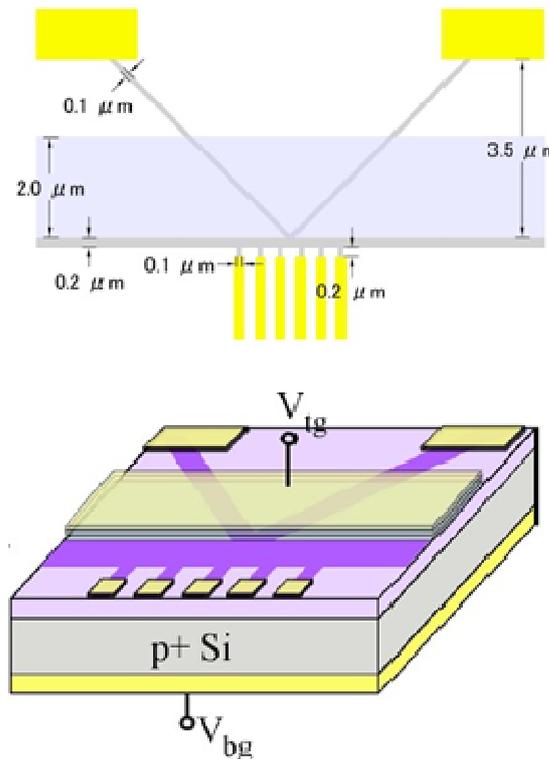


図3 デバイスの概念図（上）とデバイスの模式図（下）

またpn接合界面において急峻にポテンシャルを変化させる必要があるためトップゲート下

に用いる絶縁体薄膜の厚さをできるだけ薄く、誘電率の高い材料を用いる方法でpn接合界面のボケを最低限におさえ界面領域での断熱的にホールから電子へ変化させる工夫を施した。電気測定の結果、全体的には負の屈折率をしている傾向が見えたが電子波のフェルミ波長に相当する周期で正負のパターンが交互に現れたため、結論として負の屈折率を確定することはできなかった。この干渉パターンのようなトップゲートおよびバックゲート電圧依存性は弾道電子（ホール）波がエッジで反射されて干渉パターンが生じている可能性がある。（図4 参照）

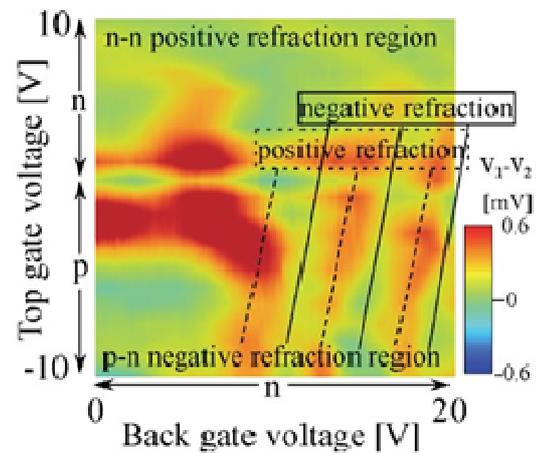
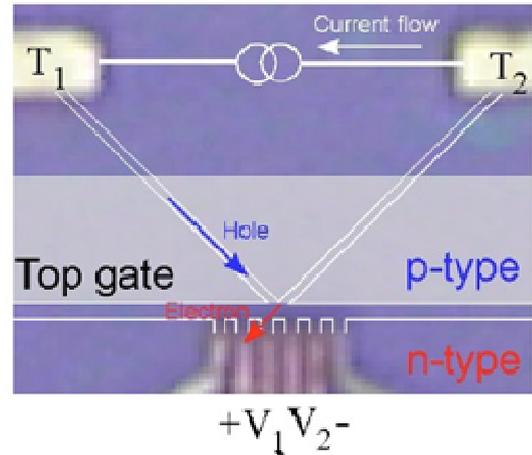


図4 負の屈折率検証実験に用いた「デバイス A」の顕微鏡写真（上図）と測定温度 21K で測定した測定結果（下図）。ここで測定電圧とは写真の $V_2 - V_1$ を表し、トップゲート電圧とバックゲート電圧のパラメータとして2次元にマッピングしてある。下半分は負の屈折と正の屈折が交互に現れておりその周期はほぼフェルミ波長程度でありことが分かる。デバイス A においては、写真（上図）でもわかるようにホールが45度の角度で入射し屈折波は電子波である。

同様に別のデバイス（「デバイス B」）を絶対温度 18K で測定した。この場合は電子が導波

路から入射し、屈折波はホールである。この場合もデバイス A と同様に屈折波の波数程度の周期で負の屈折と正の屈折が交互に現れ

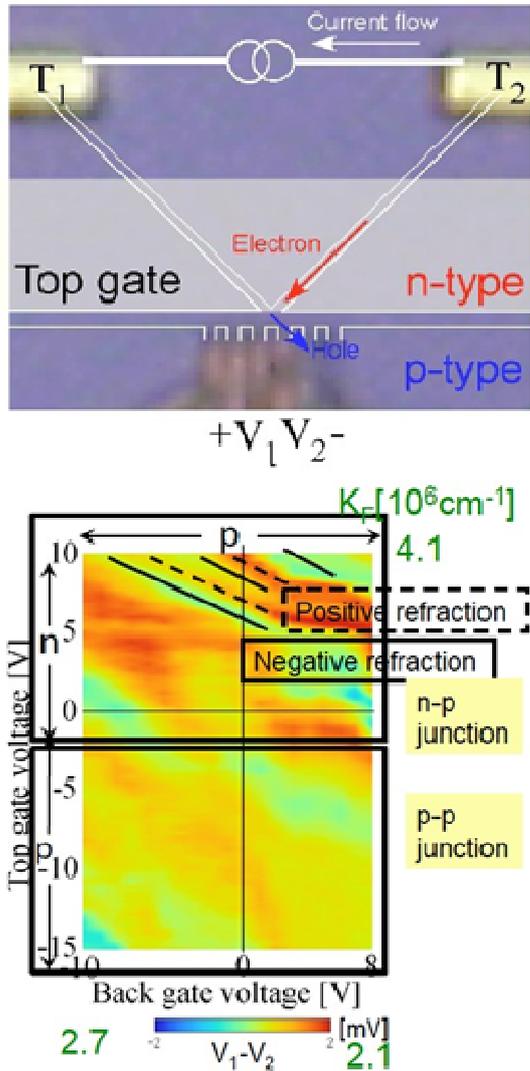


図 5. 負の屈折検証実験に用いた「デバイス B」の顕微鏡写真（上図）と測定温度 18K で測定した測定結果（下図）。ここで測定電圧とは写真の $V_2 - V_1$ を表し、トップゲート電圧とバックゲート電圧のパラメータとして 2 次元にマッピングしてある。下半分は p 領域から p 領域へホールが入射するので正の屈折しか起こりえない。確かに全体的に正の電圧が得られている。上半分は n から p に移るので負の屈折が期待できる。結果は、確かに負の屈折を示す（青い）領域もあるが、正の屈折を表す正電圧の領域と負の屈折が交互に現れておりその周期はほぼフェルミ波長程度でありことが分かる。

る干渉パターンが得られた。全体的には負の屈折率を示唆する結果ながら重なって現れている電子波の干渉のようなパターンを最小にとどめるために考えられる電子波の反

射を起こしそうな壁を取り除き改良型実験パターンを設計し直した。反射による多数回の反射を避けるように改良した構造とその測定結果を図 6 に示す。

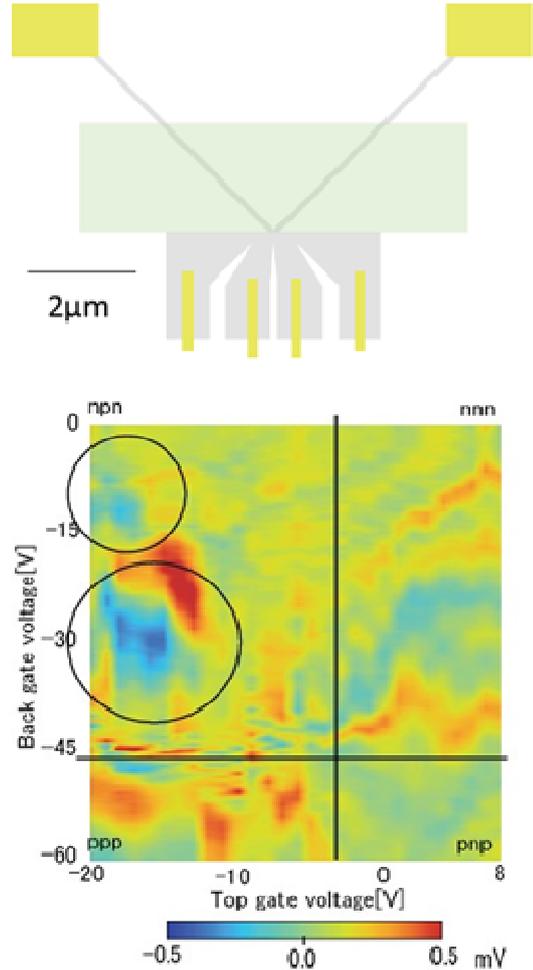


図 6. 反射による干渉を極力抑えたデバイス構造の模式図（上図）と測定結果（下図）。明瞭な干渉パターンは確かに弱くなったが、明瞭な負の屈折が観測される青色領域（黒い丸で表示）は限られた範囲であることが分かった。

再実験の結果完全には干渉パターンを減らすことは出来なかったが、ある程度押さえ込めることはできた。明らかな負の屈折を表す青い領域は限られたトップゲートとバックゲートの組み合わせの場所に閉じ込められている。このことは、負の屈折が起こる接合界面のポテンシャルの傾きの条件を満たす（拡散にならない）のかもしれない。屈折した弾道電子を電気的に浮かせた端子の静電ポテンシャルで測定することの限界があるのかもしれない。今後は単電子プローブを用いて屈折した電子（ホール）の軌跡を直接観測する方法により決定的な証拠をつかみたいと考える。

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 4 件)

- ①. Keita Konishi, Zhixin Cui, Takahiro Hiraki and Kanji Yoh, "Spin Injection into Epitaxial Graphene on Silicon Carbide," in press **J.Crystal Growth** 査読有
 - ②. Liumin Zou^{a1}, Keita Konishi^{a1}, Morihisa Hoga^{a2} and Kanji Yoh, "Fabrication of Graphene Network via nanoimprint Technology," **MRS Proceedings**, 1407 : mrsf11-1407-aa05-81 (4 pages) Materials Research Society (2012). 査読有
 - ③. Keita Konishi and Kanji Yoh, "Fabrication of p-n-p graphene structure and observation of current oscillation," *Jpn.J.Appl.Phys.*, 50, 06GF13(2011). 査読有
 - ④. Liumin Zou, Keita Konishi, and Kanji Yoh, "Proposal of Graphene Bandgap Control by Hexagonal Network Formation," **Jpn. J.Appl.Phys.**, 50, 06GF14 (2011). 査読有
- [学会発表] (計 14 件)
- ①. 小西敬太, 陽 完治 「SiC 上のエピタキシャルグラフェンへのスピン注入(III)」第60回応用物理学会関係連合講演会、講演番号 27p-G12-29 (神奈川工科大学、2013年3月27日)
 - ②. 陽 完治 「グラフェン中の量子輸送特性とランジスタ応用—スピンドバイスへ向けて—」電子情報技術産業協会 (JEITA) 日本半導体ロードマップ委員会セミナー (電子情報技術産業協会、東京大手町) 2013年3月22日
 - ③. 小西 敬太, 陽 完治 「SiC 上のエピタキシャルグラフェンへのスピン注入(II)」第73回応用物理学会学術講演会 (愛媛大学・松山大学、2012年9月11日～14日)、講演番号12p-C2-3
 - ④. 鄒 柳民, 閻 子威, 小西敬太, 法元盛久, 陽 完治 「グラフェンネットワークによるバンドギャップの制御(4)」第59回応用物理学会関係連合講演会、講演番号17p-B2-2 (早稲田大学、2012年3月15日～3月18日)
 - ⑤. 小西敬太, 鄒柳民, 閻子威, 陽 完治 「SiC 上のエピタキシャルグラフェンへのスピン注入」第59回応用物理学会関係連合講演会、

講演番号16a-B2-3 (早稲田大学、2012年3月15日～3月18日)

- ⑥. Kanji Yoh, "Spin Injection and Transport Characteristics of Single Layer Graphene Grown on 4H-SiC", International Symposium on Graphene Devices (ISGD-3), Paris, France, November 5 – 9, 2012
- ⑦. Keita Konishi, Zhixin Cui, Takahiro Hiraki and Kanji Yoh, "Spin Injection into Epitaxial Graphene on Silicon Carbide," International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE), Nara, September 24 – 27, 2012
- ⑧. Liumin Zou, Keita Konishi, Morihisa Hoga and Kanji Yoh, "Fabrication of Graphene Nanoribbon Network via Nanoimprint Lithography," Materials Research Symposium (MRS), Hynes Convention Center, Boston, MA, U.S.A., November 27 – December 2, 2011
- ⑨. 陽 完治 「グラフェン中の量子伝導 (招待講演)」早稲田大学各務記念材料技術研究所オープンセミナー「グラフェン研究の最前線」(早稲田大学西早稲田キャンパス、2011年10月28日)
- ⑩. 鄒 柳民, 閻 子威, 小西 敬太, 陽 完治, 石川 幹雄, 法元 盛久 「グラフェンネットワークによるバンドギャップの制御」第72回応用物理学会学術講演会 (山形大学、2011年8月30日～9月2日)、講演番号31a-K-10
- ⑪. 小西敬太, 鄒 柳民, 陽 完治 「グラフェンpn接合における弾道キャリアの屈折特性」第72回応用物理学会学術講演会 (山形大学、2011年8月30日～9月2日)、講演番号1p-E-4
- ⑫. Keita Koishi, Tomotsugu Ishikura, Zhixin Cui, and Kanji Yoh, "Magneto-resistance measurements of multi-layer graphene with spin polarized in parallel to current," 5th International Workshop on Spin Currents, Sendai International Center, Sendai, July 25 – 28, 2011.
- ⑬. Keita Konishi, Liumin Zou and Kanji Yoh, "Electron refraction at the pn junction in graphene," The 19th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Electron Systems (EP2DS19), National High Magnetic Field Lab, Tallahassee, Florida, U.S.A., July 25 – 29, 2011

〔図書〕(計1件)

陽 完治：グラフェンが拓く材料の新領域 -
物性・作製法から実用化まで- (分担執筆) 第
5編 第1章 「グラフェン薄膜トランジス
タ」 pp.139-145 (株式会社エヌ・ティー・
エス 2012年6月12日発行)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rciqe.hokudai.ac.jp/spin/yoh/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

陽 完治 (YOH, KANJI)

北海道大学・量子集積エレクトロニクス研
究センター・教授

研究者番号：60220539