

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390071

研究課題名(和文)低温走査トンネル顕微鏡による単ドーパント原子の電界誘起イオン化ダイナミクス観察

研究課題名(英文) Electric induced ionization dynamics of single dopant atom observed by low temperature scanning tunneling microscopy

研究代表者

内藤 裕一 (Naitou, Yuichi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・主任研究員

研究者番号：80392637

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ヘリウムイオン顕微鏡は、加速したヘリウムイオンを薄膜サンプルに ~ 2.5 のビーム径で照射し、観察と加工を同時に行うことができる。He⁺は軽く、照射部周囲へのダメージが集束イオンビームよりも小さいので、薄膜試料の加工とは相性が良い。そこで当提案者らは、グラフェンにヘリウムイオンをドーズすることで、グラフェンの金属-絶縁体転移をnmスケールで誘起することに世界で初めて成功した。これらはグラフェン中にヘリウムイオンによって形成された欠陥が、グラフェンを部分的にアンダーソン絶縁体に転移させた結果である。この手法を応用して、デバイス構造をグラフェン上を直接描画することができる。

研究成果の概要(英文)：Helium ion microscopy (HIM) was used for direct nano-patterning of single-layer graphene (SLG) on SiO₂/Si substrates. This technique involves irradiation of the sample with accelerated helium ions (He⁺). Doses of 2.01016He⁺;cm² from a 30 kV beam induced a metal-insulator transition in the SLG. The resolution of HIM patterning on SLG was investigated by fabricating nanoribbons and nanostructures. Analysis of scanning capacitance microscopy measurements revealed that the spatial resolution of HIM patterning depended on the dosage of He⁺ in a non-monotonic fashion. Increasing the dose from 2.01016 to 5.01016He⁺;cm² improved the spatial resolution to several tens of nanometers. However, doses greater than 1.01017He⁺;cm² degraded the patterning characteristics. Direct patterning using HIM is a versatile approach to graphene fabrication and can be applied to graphene-based devices.

研究分野：走査型プローブ顕微鏡

キーワード：走査型プローブ顕微鏡 走査型容量顕微鏡 グラフェン ドーズ ヘリウムイオン ヘリウムイオン顕微鏡 金属-絶縁体転移 アンダーソン局在

1. 研究開始当初の背景

現在の情報化社会においてコンピュータをはじめとする情報通信機器の超高性能・極低省電力化は欠かせない。すでにその物理的限界に近いと言われながらも、未だこうした情報通信機器の超高性能・極低省電力化を担うのは半導体超高集積回路の基本要素デバイスであるシリコンベースの電界効果トランジスタ (Field Effect transistor: FET) である。FET の物理寸法は、そのゲート長がいまや十数 nm まで縮小されており、商用 FET のチャンネル電流ですら、少数ドープ原子の離散的な分布がその輸送特性に影響を及ぼしている。例えば、離散的なドープ原子の並び方が、FET のチャンネル電流特性のゆらぎの主な原因になっているという報告もある。いっぽう、半導体表面近傍に離散的に存在する少数、あるいは単一のドープ原子が持つ特有の電子機能を積極的に見出して活用しようとする試みは、“Solitary Dopant Electronics” と呼ばれ、現在世界的に研究が活性化しつつある分野である。(P. M. Konenraad and M. E. Flatte, Nature materials 10, 91(2011))

2. 研究の目的

少数のドープ原子が与える巨視的な物性変化として、アンダーソン局在による金属-絶縁体転移がある。これは不純物原子を金属もしくは半導体中にドーピングすることによって、電子が局在化して、ある不純物濃度で絶縁体となる現象である。2次元と1次元の系では、極僅かのドープ原子でアンダーソン局在が観測される。本研究では、代表的な2次元電子材料系であるグラフェンにドーピングすることで金属-絶縁体転移の観察を行った。

3. 研究の方法

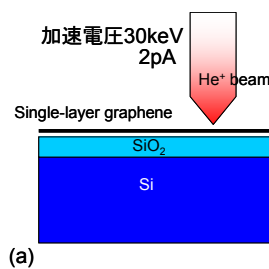
本研究では、グラフェンの金属-絶縁体転移を観察する必要がある。絶縁体領域上では低温走査型トンネル顕微鏡 (STM) が使えないため、また金属と絶縁体を識別する必要から、我々は自作の走査型容量顕微鏡 (SCM) を使用した。SCM によるグラフェンの電特観察の例はこれまでも多数が報告されている。我々は新たに追加した検出系を利用することで、SCM により金属・半導体・絶縁体を識別することができる。

グラフェンへの不純物原子ドーピングは、ヘリウムイオン顕微鏡 (helium ion microscope, HIM) を用いた。HIM はヘリウムイオン (H⁺) をグラフェン面内にドーピングする事ができる。

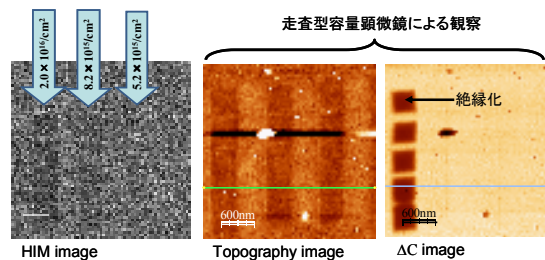
4. 研究成果

(1) 単層グラフェン (SLG) に加速した H⁺ を照射すると、結晶欠陥の分布が生じる。これらは、SLG 上で電荷散乱源となる。我々は、SiO₂/Si 基板上的 SLG に於いて、アンダー

ソン局在による金属-絶縁体転移を室温で SCM によって観察した。



(a) HIM による H⁺ のグラフェン面内へのドーピング模式図



H⁺ ドーズ量が少なくとも $2.0 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$ で絶縁化することがわかる。グラフェン中の結晶欠陥密度に換算すると $\sim 2\%$ となる。また SCM による表面形状像では、絶縁化する・しないに関わらず、H⁺ ドーズ領域で $\sim 1 \text{ nm}$ 程度の凹みが生じる。これはグラフェンに欠陥があると SiO₂/Si 基板との間に相互作用が生じることによる。

観察では、H⁺ ドーズ量が $1.2 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$ 、すなわち結晶欠陥密度に換算して、 1.2% 以上の欠陥が生じるとアンダーソン局在が顕在することがわかった。また局在長はおおよそ $20 \sim 50 \text{ nm}$ 程度と見積もられた。

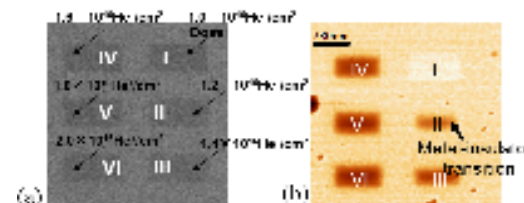
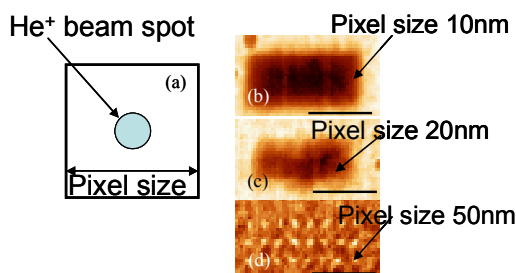


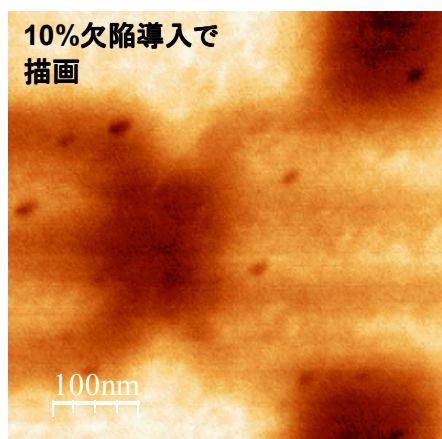
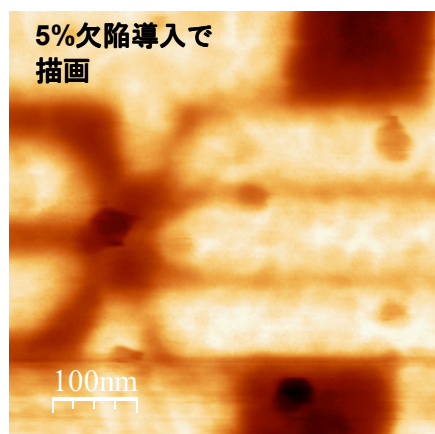
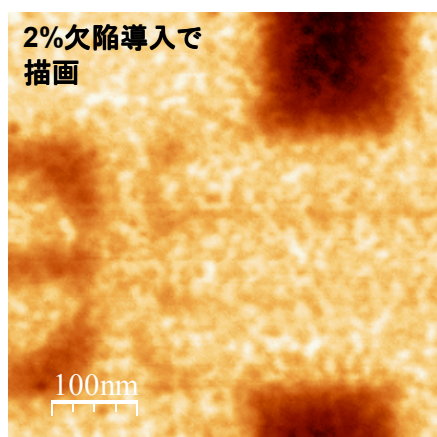
図 20 (a) SiO₂/Si 上のグラフェンに He⁺ をドーズした HIM 像。(b) 同領域を走査プローブ顕微鏡で観察した結果、ある閾値でグラフェンが絶縁体に転移している。



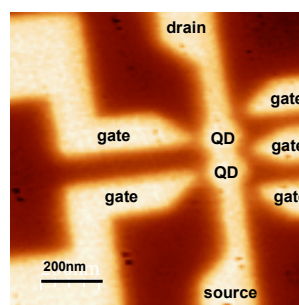
(a) グラフェン上の H⁺ ビームスポットとピクセルサイズ。(b), (c) ピクセルサイズ 10nm~20nm では絶縁体のまま (d) ピクセルサイズ 50nm では局在長を超えるので絶

縁体にならない。スケールバーは 200nm

(2)我々はさらに SLG 上に H⁺ドーズによって部分的に絶縁体化させることで平面型デバイスを作ることを目指した。まず、最小描画線幅は~50nm であることが判った。これは局在長が 20nm~50nm であることと一致する。また、H⁺ドーズ量が 5.0 × 10¹⁶ion/cm² までは描画分解能はほぼ単調に増加するものの、~10¹⁷ion/cm² 台 (欠陥密度にして 10%以上) ではグラフェン下地の SiO₂/Si 基板が膨張し、描画分解能が低下することが判明した。



それらを考慮した設計ルールで、以下に示すような 2 重量子ドットの描画に成功した。



アンダーソン局在による金属-絶縁体転移を利用した 2 重量子ドット系

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 3 件)

Y. Naitou, T. Iijima, and S. Ogawa "Direct nano-patterning of graphene with helium ion beams" Applied Physics Letters 106, 033103 (2015). (査読あり)

Y. Naitou and S. Ogawa "Anderson localization of graphene by helium ion irradiation" Applied Physics Letters 108, 171605 (2016). (査読あり)

Yuichi Naitou and Shinichi Ogawa "Conductivity change of defective graphene by helium ion beams" AIP Advances 7, 045203 (2017). (査読あり)

[学会発表] (計 1 件)

Y. Naitou and S. Ogawa, " Direct nano-patterning of graphene by Anderson localization " 応用物理学会、パシフィコ横浜、2017 年 03 月 16 日 (招待講演)

[図書] (計 0 件)

[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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内藤 裕一 (Yuichi Naitou)

産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス
研究部門・主任研究員

研究者番号：80392037

(2) 研究分担者

金子 晋久 (Nobu-hisa Kaneko)

産業技術総合研究所・物理計測標準研
究部門・研究グループ長

研究者番号：30371032

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()