

「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する
革新材料・プロセス研究」
平成19年度採択研究代表者

尾辻 泰一

東北大学電気通信研究所ブロードバンド工学研究部門・教授

グラフェン・オン・シリコン材料・デバイス技術の開発

§ 1. 研究実施の概要

本研究は、次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス技術の開拓のために、独自のアイデアに基づくグラフェン・オン・シリコン (GOS: Graphene On Silicon) 材料・プロセス技術の開発を通し、相補的スイッチングデバイス (CGOS) 技術、及びプラズモン共鳴テラヘルツ (THz) デバイス (PRGOS) 技術の開発を行うものである。具体的には、まず、Si 基板上に SiC をエピタキシャル成長させその最上面をグラフェン化するというアイデアで、GOS の実現を図る。次に、この GOS プロセス技術を既存 CMOS プロセス技術に導入して新しい CGOS (Complementary GOS) と呼ばれる超高速・低消費電力の相補型トランジスタロジックを実現し、シリコンテクノロジーによる 1THz 以上の電流遮断周波数と超 100GHz クロック動作の実現をめざす。さらには、電子輸送に基づく CGOS の動作限界をさらに 1 桁以上超えるプラズモン共鳴と呼ばれる新たな動作原理に基づく THz 帯信号処理デバイス (PRGOS: Plasmon Resonant GOS) を CGOS プロセスに完全整合するシリコンテクノロジーにより実現する。最終的には、CGOS と PRGOS を融合した新しい集積デバイス技術を開発し、電子輸送限界を超えた超高周波帯域の開拓をめざすものである。これにより、シリコンテクノロジーをベースとしながら、キャリア輸送限界を超えた新しい超高速大規模集積デバイスの実現が期待される。

21年度は、研究計画の第3年次にあたり、GOS 材料デバイス技術の研究開発を加速・深化させることを主眼に推進し、以下のような成果を収めた。

第一に、GOS 成長技術に関して、21 年度までに導入した装置を駆使し、GOS 系におけるグラフェン化処理による sp^2 結合炭素の出現、Dirac 型分散関係確認、Si(100), (111)面上でのグラフェン化、Si 基板面方位と界面構造制御性の関係解明、SiC 選択エピ成長によるパタン微細化・結晶高品質化、水素処理による sp^2/sp^3 結合構造及びバンド分散の可逆的制御等を実現した。

第二に、成長した GOS を用いて作製したバックゲート型 FET の電流・電圧特性を解析して正味のチャンネル電流を導出するモデルを確立し、得られたチャンネル電流特性においてアンバイポーラ特性を確認するとともに、電子移動度が $2000\sim 6000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ と見積もられることを見出した。更に、トップゲート型 FET についても作製し、ゲート電圧によるドレイン電流変調の効果を確認した。

第三に、グラフェン層から SiC と Si 基板を介してソース・ドレインコンタクトを取る構造によりアンバイポーラ特性を回避できるソース・ドレイン構造を考案し、2次元デバイスシミュレーションにより効果を確認した。

第四に、グラフェン固有のアンバイポーラ特性を回避する相補型論理回路構成について検討を進め、GOSFET オフ電流の低減によりインバータ伝達特性を CMOS に近づけることができること、GOSFET オフ電流とインバータ漏れ電流の関係を明らかにした。

第五に、強電界・強光励起化におけるグラフェンの基本的性質の解析を行なった。

第六に、前年度に構築された理論モデルをもとにして、薄膜ゲートのグラフェン・ナリボン FET におけるトランスコンダクタンスが $5000\text{ mS}/\text{mm}$ に達することを明らかにした。また、二層グラフェン FET の直流ならびに高周波 AC 解析モデルを用いて、これらの特性を明らかにした。

第七に、研究計画を変更し、グラフェンのゼロ・バンドギャップ、長平均自由行程を最大限に生かした THz 赤外帯域における信号処理・フォトニックデバイスの創生を目指し、グラフェン TUNNET、二層グラフェンあるいはグラフェン・ナリボンを用いた THz 波中赤外線におけるフォトランジスタ、多層グラフェンを用いた THz 波中赤外線におけるレーザーの実現可能性を解析した。

第八に、我々が理論的に予測した光励起グラフェンにおける THz 帯負性導電率ならびに THz 帯利得の実験的実証に成功した。

第九に、グラフェンチャンネルの THz 帯プラズモン共鳴特性のモデリングならびに測定実験を推進した(現在進行中)。

第十に、研究会「次世代デバイス応用を企図したグラフェン形成機構の解明及び制御の研究」、2009/10/6、開催地：東北大学(宮城県仙台市)を開催し、グラフェン基礎研究に従事する内外の第一線で活躍する研究者を招聘し、従来法である、六方晶 SiC バルク基板上グラフェンの成長機構の理解と評価に関する最先端の研究情報を収集するとともに、本 JST-CREST 研究課題で推進する独自の GOS プロセス技術と従来法との類似点と相違点を明らかにすることができた。

§ 2. 研究実施体制

(1)「GOS/PRGOSデバイス(尾辻泰一)」グループ

① 研究分担グループ長：尾辻 泰一(東北大学、教授)

② 研究項目

グラフェン・オン・シリコン(GOS)デバイスならびにプラズモン共鳴型 GOS(PRGOS)テラヘルツデバイス技術の開発

(2)「GOSプロセス(末光眞希)」グループ

① 研究分担グループ長:末光 眞希 (東北大学、教授)

② 研究項目

グラフェン・オン・シリコン(GOS)プロセス技術の開発

(3)「GOSモデリング(リズィーヴィクトール)」グループ

① 研究分担グループ長:RYZHII Victor (会津大学、教授)

② 研究項目

グラフェン・オン・シリコン(GOS)デバイスモデリング技術の開発

(4)「CGOSロジック(佐野栄一)」グループ

① 研究分担グループ長:佐野 栄一 (北海道大学、教授)

② 研究項目

相補型グラフェン・オン・シリコン(CGOS)論理集積回路技術の開発

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

本研究は、次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス技術の開拓のために、独自のアイデアに基づくグラフェン・オン・シリコン (GOS: Graphene On Silicon)材料・プロセス技術の開発を通し、相補的スイッチングデバイス(CGOS)技術、及びプラズモン共鳴 THz デバイス(PRGOS)技術の開発を行うものであり、GOS 形成、GOSFET デバイスプロセス、デバイスモデリング、CGOS 論理ゲート、および PRGOS デバイスプロセスの主要課題に対して、独自技術の開発に挑むものである。

GOS 形成技術に関しては、本年度の主たる成果は、以下の七つである。第一に、GOS 形成過程を X 線光電子分光装置により「その場」観察し、グラフェン化処理により sp^2 結合炭素が増大することを GOS 系において初めて確認した。第二に、形成したグラフェンの電子分散を角度分解紫外光電子分光複合装置により評価し、グラフェン化処理により Dirac 型分散関係が出現することを GOS 系において初めて確認した。第三に、SiC 及びグラフェン薄膜の成長条件の最適化を行い、昨年度までの Si(110)基板に加え^[12]、Si(100)、(111)面基板に対しても Si 基板上グラフェン薄膜の形成に成功した。第四に、SiC(111)面上の GOS 形成過程を低速電子線回折装置により「その場」観察し、グラフェン化処理により結晶対称性が 30 度回転し、立方晶 SiC(111)の Si 面に関する限り、六方晶 SiC バルク基板の Si 面上と同様のグラフェン化過程が生じていることを明らかにした。第五に、X 線光電子分光装置にてグラフェン/SiC 界面構造を詳細に解析し、Si 基板面方位の選択により、同界面構造の制御が可能であることを明らかにした。第六に、SiO₂ パターニングにより選択 SiC エピタキシャル成長が可能であることを有機シラン GSMBE 系において初めて明らか

にし、かつ、パターンの微細化によって SiC の高品質化が可能であることを明らかにした。第七に、グラフェンの sp^2/sp^3 結合構造及びバンド分散の可逆的制御が水素処理により可能なことを、GOS 系において初めて明らかにした。

GOSFET デバイス技術に関しては、グラフェンをチャンネルとした FET を実現するための要素技術を確認し、Si-CMOS を凌駕する FET 特性とそれを利用した論理素子の実現へと展開する。平成 21 年度は、第一にバックゲート型 FET において電流-電圧特性の詳細な解析を行い、ゲート漏れ電流を含むドレイン電流の測定値からグラフェンチャンネルを流れる正味の電流成分を抽出する手法を確立した。それによりアンバイポーラ特性を確認し、電子移動度を $2000\sim 6000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ と見積もられることを見出した。第二に、Si 基板上に形成したグラフェン上に誘電体膜を形成することによってトップゲート型 FET を作製し、トップゲート電圧によるドレイン電流変調を初めて確認した(図 1)。一方で、バックゲート型、トップゲート型 FET 共にドレイン電流密度や相互コンダクタンスはグラフェンの電気伝導特性から予想されるものに比較して著しく小さく、寄生抵抗、特にオーミック電極のコンタクト抵抗が大きく影響していることを確認した。今後はコンタクト抵抗低減に向けた電極形成技術の開発を推進すると共に、ゲート誘電体膜の薄層化等トップゲート型 FET のトランジスタ特性の向上と速度性能優位性の検証を進める。

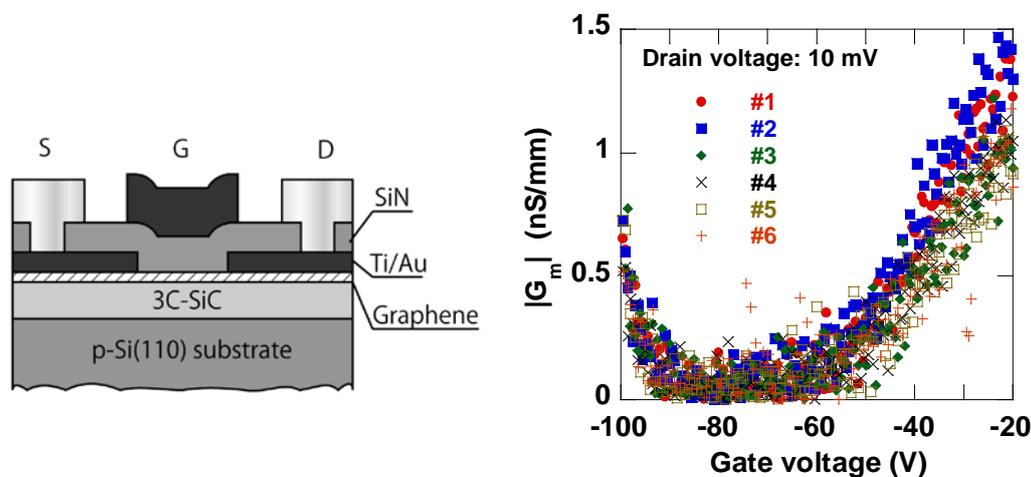


図 1: トップゲート型 GOSFET の断面構造(左)及び、相互コンダクタンス(G_m)のゲート電圧依存性(右)。特性は 6 つの素子について評価し、ほぼ同じ特性が得られている。(H.-C. Kang et al., Int. Semiconductor Device Research Symp., TP1-03, MD, USA, Dec. 9-11, 2009.)

デバイスモデリングに関しては、研究分担者・リズィヴィクトールのオリジナルによりディラックフェルミオン・キャリア輸送型デバイスモデリングの開発を進めるとともに、プラズモン共鳴型デバイスのモデリングも行い、デバイス・回路設計のための基盤技術構築を図るとともに、デバイス・回路シミュレータへと展開する。平成 21 年度は、強電界・強光励起化におけるグラフェンの基本的性質の解析を行なった^[1, 3]。前年度に構築された理論モデルをもとにして、薄膜ゲートのグラフェン・ナリボン FET におけるトランスコンダクタンスが $5000\text{ mS}/\text{mm}$ に達することを明らかにした。また、二

層グラフェンFETの直流ならびに高周波AC解析モデルを用いて、これらの特性を明らかにした^[4]。グラフェンTUNNET、二層グラフェンあるいはグラフェン・ナリボンを用いた THz 波—中赤外線におけるフォトトランジスタ^[1,7,13,16]、多層グラフェンを用いた THz 波—中赤外線におけるレーザー^[8-10, 15]の実現可能性を解析した(図 2^[9])。今後は、多層グラフェンFETにおける直流および高周波AC解析モデルを構築、THz 波—中赤外線における光検出器のモデルの構築を行ない、それぞれのデバイスの解析を行なう。また、グラフェンデバイスの実現にむけたシミュレーションによるサポートを行なう。

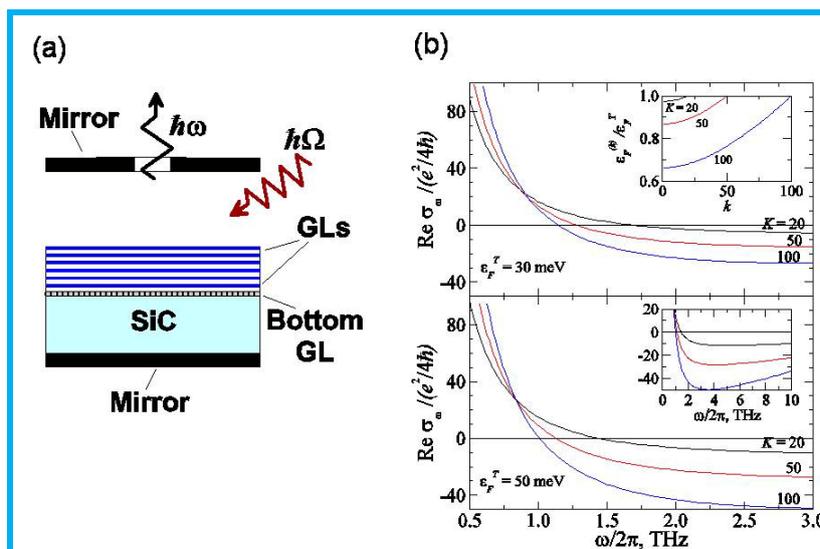
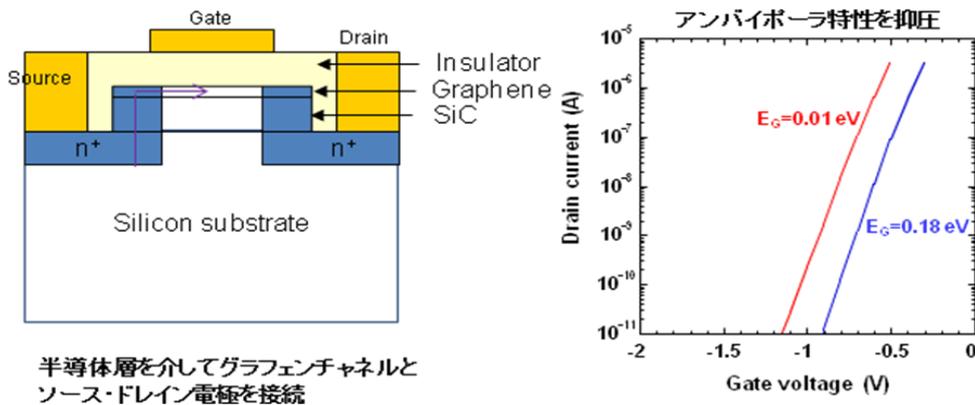


図 2 : (a)多層グラフェンを用いたレーザーの模式図^[9]、(b)光ポンプ時における伝導率の周波数依存性 (K はグラフェン層数、 ϵ_F^r は最上層における擬フェルミエネルギー)。

CGOS 論理ゲートの開発に関しては、GOSFET の最適化構成法の検討と Si-CMOS に対する速度性能優位性の検証、ならびに研究分担者・佐野栄一と研究代表者・尾辻泰一のオリジナルによる CGOS 論理ゲートの構造設計を行う。平成 21 年度は、第一に、グラフェン層から SiC と Si 基板を介してソース・ドレインコンタクトを取る構造によりアンバイポーラ特性を回避できるソース・ドレイン構造を考案し、2次元デバイスシミュレーションにより効果を確認した(図 3)^[5]。第二に、GOSFET による相補的論理動作を得る回路構成として、電子・ホール伝導の遷移電圧(V_{th})が異なる二種類の FET を縦型接続した相補型論理回路について検討を進めた。昨年度の解析方法の不備を修正した結果、GOSFET オフ電流の低減によりインバータ伝達特性を CMOS に近づけることができること、GOSFET オフ電流とインバータ漏れ電流の関係を明らかにした。



半導体層を介してグラフェンチャネルとソース・ドレイン電極を接続

図3：グラフェン層からSiCとSi基板を介してソース・ドレインコンタクトを取る構造によりアンバイポーラ特性を回避できるソース・ドレイン構造の構造図(左)と電流・電圧特性のシミュレーション結果(右)。アンバイポーラ特性が抑制されていることが確認できる^[5]。

GOS THzレーザーの研究開発に関しては、我々が理論的に予測した光励起グラフェンにおけるTHz帯負性導電率ならびにTHz帯利得の実験的実証に成功した。フェムト秒赤外レーザーでGOSならびにGOS直上に設置したCdTe非線形光学結晶を励起した。GOSのグラフェンでは生成した光電子正孔対が光学フォノンを超高速に放射するバンド内緩和を経て、再結合(直接遷移)し、THz帯フォンを放射する。一方、CdTe結晶では非線形光学効果によってTHz波が放射される。この放射THz波がGOSからのTHz放射を誘導し、コヒーレントな放射が得られる。これを時間分解計測した結果、THz帯負性導電率による利得増幅効果の検証に成功した。今後は室温THzレーザー動作の実証へと進む。

PRGOSデバイスの開発に関しては、キャリア輸送型電子デバイスの速度性能限界を打破するプラズモン共鳴という新しい動作原理に立脚したプラズモン共鳴型デバイスに、質量消失効果を有するグラフェンチャネルを導入することにより、従来不可能であったシリコンベースの室温動作THz帯電磁波発生デバイスを開発する。平成21年度は、第一に、グラフェンナリボンのTHz帯プラズモン分散特性のモデリングを進め、THz電磁波の入射角度依存性を明らかにした^[14]。第二に、20年度設計製作したGOSリボンサンプルを対象として、THzATR(Attenuated Total Reflection: 全反射減衰)測定法(京都大学理学研究科: 田中耕一郎教授のご協力による)を用いて、時間分解による過渡応答測定を実施した。しかしながら、全反射減衰するはずの入射THz波がGOS試料を透過する事態が生じ、その原因究明に忙殺された。その後、尾辻グループ所有のTHz時間領域分光システムの電気光学センサーをTHzプローブ光生成にも流用できることを実験的に確認できたため、当該装置を用いてGOSのTHzプラズモン特性評価を実施するように方針変更を決めた。22年度は当該実験を推進するとともに、PRGOSの有効性を検証するためにGOSFETを基本構造とするプラズモン共鳴型THzエミッターの試作評価を進める。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

- [1] V. Ryzhii, M. Ryzhii, N. Ryabova, V. Mitin, and T. Otsuji, "Graphene nanoribbon phototransistor: proposal and analysis," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 48, pp. 04C144-1-5, 2009.
- [2] E. Sano and T. Otsuji, "Theoretical evaluation of channel structure in graphene field-effect transistors," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 4, pp.041202-1-5, 2009.
- [3] O. G. Balev, F. T. Vasko, and V. Ryzhii, "Carrier heating in intrinsic graphene by a strong electric field," *Phys. Rev. B*, Vol. 79, pp. 165432 1-8, 2009.
- [4] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, and N. Kirova, "Device model for graphene bilayer field-effect transistor," *J. Appl. Phys.*, Vol. 105, pp. 104510 1-9, 2009.
- [5] E. Sano and T. Otsuji, "Source and drain structures for suppressing ambipolar characteristics of graphene field-effect transistors," *Appl. Phys. Express*, vol. 2, pp. 061601-1-3, 2009.
- [6] V. Ryzhii, M. Ryzhii, V. Mitin, and M. S. Shur, "Graphene tunneling transit-time terahertz oscillator based on electrically induced p-i-n junction," *Appl. Phys. Express*, Vol. 2, pp. 034503-1-3, 2009.
- [7] V. Ryzhii and M. Ryzhii, "Graphene bilayer field-effect phototransistor for terahertz and infrared detection," *Phys. Rev. B*, Vol. 79, pp. 245311-1-7, 2009.
- [8] A. A. Dubinov, V. Ya. Aleshkin, M. Ryzhii, T. Otsuji, and V. Ryzhii, "Terahertz laser with optically pumped graphene layers and Fabri-Perot resonator," *Appl. Phys. Express*, Vol. 2, pp. 092301-1-3, 2009.
- [9] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, A. A. Dubinov, and V. Ya. Aleshkin, "Feasibility of terahertz lasing in optically pumped epitaxial multiple graphene layer structures," *J. Appl. Phys.*, Vol. 106, pp. 084507-1-6, 2009.
- [10] V. Ya. Aleshkin, A. A. Dubinov, and V. Ryzhii, "Terahertz laser based on optically pumped graphene: model and feasibility of realization," *JETP Lett.*, Vol. 89, pp. 63-67, 2009.
- [11] E. Sano and T. Otsuji, "Bandgap engineering of bilayer graphene for field-effect transistor channels," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 9, pp.091605-1-3, 2009.
- [12] H. Fukidome, Y. Miyamoto, H. Handa, E. Saito, and M. Suemitsu, "Epitaxial Growth Processes of Graphene on Silicon Substrates," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.49, 01AH03-1-4, 2010.
- [13] V. Ryzhii, M. Ryzhii, M. S. Shur, and V. Mitin, "Negative terahertz dynamic conductivity in electrically induced lateral p-i-n junction in graphene," *Physica E*,

vol. E42, pp. 719-721, 2010.

- [14] V. V. Popov, T. Yu. Bagaeva, T. Otsuji, and V. Ryzhii, "Oblique terahertz plasmons in graphene nanoribbon arrays", *Phys. Rev. B*, vol. 81, pp. 073404 - 1-4, 2010.
- [15] V. Ryzhii, A. A. Dubinov, T. Otsuji, V. Mitin, and M. S. Shur, "Terahertz lasers based on optically pumped multiple graphene structures with slot-line and dielectric waveguides", *J. Appl. Phys.*, vol.107, pp. 054505 - 1-5, 2010.
- [16] V. Ryzhii, M. Ryzhii, V. Mitin, and T. Otsuji, "Terahertz and Infrared Photodetection using p-i-n Multiple-Graphene-Layer Structures", *J. Appl. Phys.* vol. 107, pp. 054512 -1-7, 2010.

(4-2) 知財出願

- ① 平成21年度特許出願件数(国内 1 件)

- ② CREST 研究期間累積件数(国内 3 件)