

尾辻 泰一

東北大学電気通信研究所・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. 研究実施体制

(1)「GOS/PRGOSデバイス(尾辻泰一)」グループ

- ① 研究代表者: 尾辻 泰一 (東北大学・電気通信研究所、教授)
- ② 研究項目
 - ・研究開発統括
 - ・GOS デバイスの設計・プロセス・評価技術の開発
 - ・PRGOS デバイスの設計・プロセス・評価技術の開発

(2)「GOS プロセス(末光眞希)」グループ

- ① 主たる共同研究者: 末光 眞希 (東北大学・電気通信研究所、教授)
- ② 研究項目
 - ・グラフェン・オン・シリコン GOS 材料の結晶成長・評価技術の開発

(3)「GOSモデリング(リズィーヴィクトール)」グループ

- ① 主たる共同研究者: リズィー ヴィクトール (会津大学・コンピュータ理工学部、教授)
- ② 研究項目
 - ・ディラックフェルミオン・キャリア輸送型 GOS デバイスマデリング
 - ・ディラックフェルミオン・プラズモン共鳴型 PRGOS デバイスマデリング

(3)「CGOSロジック(佐野 栄一)」グループ

- ① 主たる共同研究者: 佐野 栄一 (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)
- ② 研究項目
 - ・CGOS 論理のデバイス・回路モデリング
 - ・CGOS 論理回路の設計と評価

§2. 研究実施内容

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、本年度は、(1) 当該研究で採用するモノメチルシラン (MMS)・ガスソース (GS) MBE 法による Si 基板上 3C-SiC 薄膜製膜過程の評価と制御、(2) 3C-SiC のグラフェン化過程の理解と制御、及び(3) グラフェン FET (GFET) の作製に関し、以下の3つの成果を挙げた。

[1] MMS-GSMBE による Si 基板上 3C-SiC 薄膜形成に関する成果

- ① 吸着重水素の昇温脱離 (D_2 -TPD) を用いた SiC 表面化学組成評価法を開発した[2]。
- ② 同法を用い、当該 CREST 研究で採用するモノメチルシラン・ガスソース MBE 法による Si 基板上 3C-SiC 薄膜製膜では、使用する Si 基板面方位及び SiC 成長条件によって 3C-SiC 表面の終端状態を制御可能であることを明らかにした。すなわち 3C-SiC(111)/Si(111) 及び 3C-SiC(100)/Si(100) 表面では Si 終端表面を[4]、3C-SiC(110)/Si(110) 表面は Si と C 終端の共存表面を[4]、さらに、3C-SiC(111)/Si(110) 回転エピ表面では C 終端表面を[22]、それぞれ実現可能とした。
- ③ とくに 3C-SiC(111)/Si に関しては、3C-SiC(111)/Si(111) 表面の Si 終端に対して 3C-SiC(111)/Si(110) 表面の C 終端と、同じ(111)対称性を持ちながら異なる表面終端を有する二種類の 3C-SiC(111) 表面を提供する技術を確立した(図1)。前者表面上の GOS は界面層を持った AB 積層となるのに対し、後者表面上の GOS は界面層を持たない turbostratic なグラフェン積層となるため、両者の電子物性は大きく異なる [22]。このように容易にグラフェン物性を制御可能なのは GOS 技術の大きな特徴である。

[2] 3C-SiC のグラフェン化過程の理解と制御に関する成果

- ① グラフェン積層構造および界面構造が、Si 基板面方位により制御可能であることを、断面 TEM 観察により直接明らかにした。とくに 3C-SiC(111)/Si(111) 上 GOS の Gr/SiC 界面にはバッファ層が存在するのに対し、3C-SiC(100)/Si(100) 上 GOS では Gr/SiC 界面にはバッファ層が存在しないことを TEM により直接確認した[1]。
 - ② 3C-SiC(111)/Si(111) 上の GOS 過程を、LEED 及び XPS で調べた結果、この Si 終端 3C-SiC(111) 面上のグラフェン形成過程は Si 終端 6H-SiC(0001) 面上のそれと同一プロセスを辿ること、また Gr/3C-SiC(111) 界面には、6H-SiC(0001) 面上と同様のバッファ層が存在することを明らかにした[5]。
- こうしたグラフェン構造の面方位依存性はエッジの化学構造 (armchair vs. zigzag edge) に

も反映される(図 2)。3C-SiC(111)/Si(111)上 GOS では armchair edge が支配的であるのに対し、3C-SiC(100)/Si(100)上 GOS ではそのような選択性を持たないことをラマン散乱の詳細な解析から明らかにした[21]。

③酸素を微量に添加することで、従来より 250°C 低い 1000°C でのグラフェン化に成功した[6]。

[3] グラフェン FET (GFET) に関する成果

①高分子ゲート絶縁膜[7]あるいは蒸着 Al のポスト酸化による Al₂O₃ ゲート絶縁膜[6]を用いた GFET を製作した。その結果、ゲートスタック形成工程は、グラフェン品質に大きく影響し、注意深く最適化する必要があることを明らかにした[21]。

②GOS 上に GFET を作製し、電気特性のウエハサイズでの均一性を確認した[21]

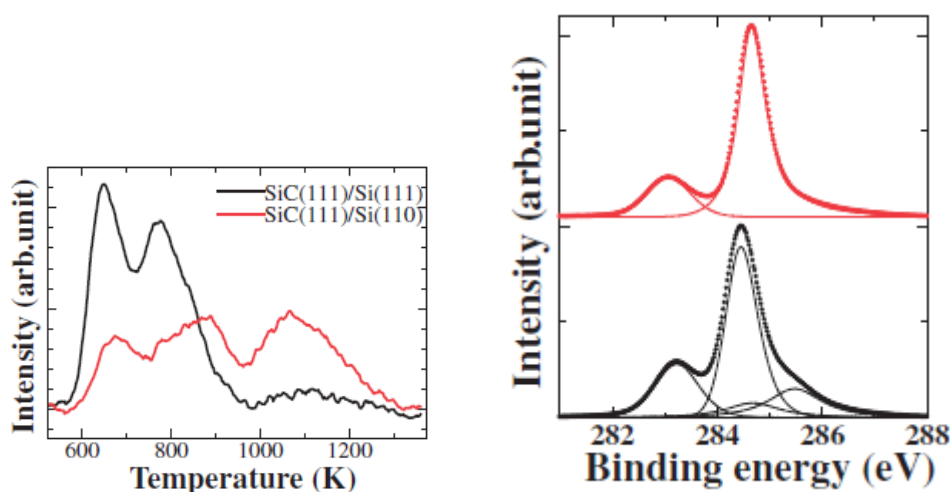


図 1. 左：3C-SiC/Si 表面からの D2-TPD スペクトル。SiC(111)/Si(111)表面からのスペクトル（黒）は C-D ピークが弱く Si 終端であることを示すのに対し、SiC(111)/Si(110)表面からの TPD スペクトル（黒）は C 終端 3×3 構造特有の強い C-D ピークを示し、表面が C 終端になっていることを示す。右：C1s-XPS スペクトル。SiC(111)/Si(111)表面からのスペクトル（下）は界面層の存在を示すピーク（285.5 eV）を示すが、SiC(111)/Si(110)表面はこれを示さない。

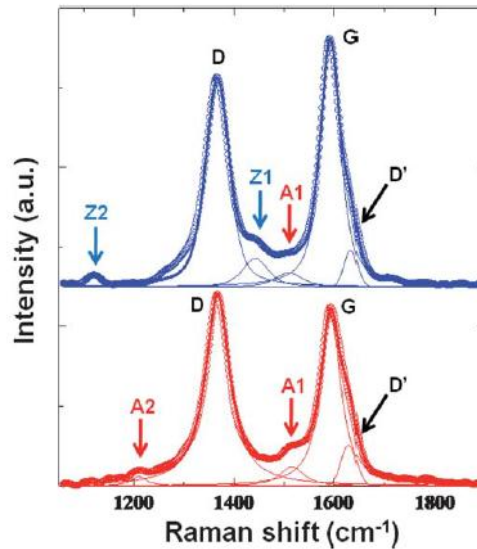


図 2. グラフェンエッジの Si 基板面方位依存性. 3C-SiC(111)/Si(111)上 GOS からのラマン散乱スペクトル (下) は、アームチェア (ac) エッジ起因の D バンドに加え、ac エッジ炭素の C-H 振動に起因する A1 および A2 バンドが観察されることから、ac エッジが支配的であると分かる. これに対し、3C-SiC(100)/Si(100)上 GOS からのスペクトル (上) は、D、A1、A2 に加えてジグザグ(zz)エッジ炭素の C-H 振動に起因する z1、z2 モードが観察されることから、ac、zz 両方のエッジが混在していることが分かる[21].

GOSFET デバイス技術に関しては、グラフェンをチャネルとした 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。本年度の主たる成果は以下の3つである。

- [1]HMDS 気化導入を用いたプラズマ CVD により成膜した SiCN をグラフェン FET のゲート絶縁膜に応用するためのプロセスを確認し、試作した FET において明瞭なアンバイポーラ特性を確認した[19](図 3)。
- [2]光電子制御 CVD により成膜したダイヤモンドライクカーボン(DLC)をグラフェン FET のゲート絶縁膜に応用するプロセスを確認し、試作した FET においてアンバイポーラ特性を確認した[25](図 4)。また、ゲート長 50nm の短ゲート FET を試作、RF 特性の評価を行い、電流利得遮断周波数として 4.5GHz を得た(本成果は未公開)。
- [3]アルミニウム薄膜をグラフェン上に堆積して自然酸化させることによって形成した Al_2O_3 やスピンドット塗布したポリマー材料についてもグラフェン FET のゲート絶縁膜材料として適用可能であることを確認した[7, 8] (図 5)。また、 Al_2O_3 ゲート FET についてはセルフアラインメント・ゲート形成プロセスを開発し、ゲート長 3 μm で電流遮断周波数 13GHz の良好な高周波性能を実現した。グラフェン FET の性能律速要因として重要であるアクセス領域の寄生抵抗を大幅に低減する見通しを得た(本成果は 24 年春季応用物理学会学術講演会で公表予定)。

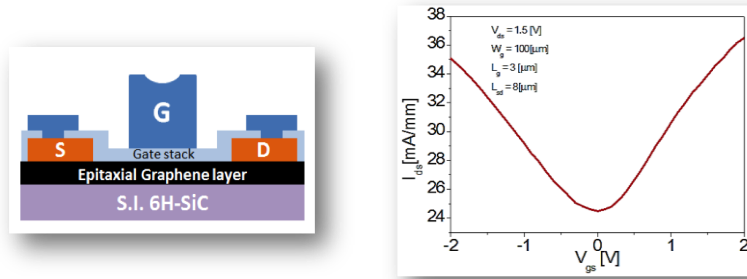


図 3. SiCN ゲート絶縁膜を用いたグラフェン FET の断面構造と伝達特性.

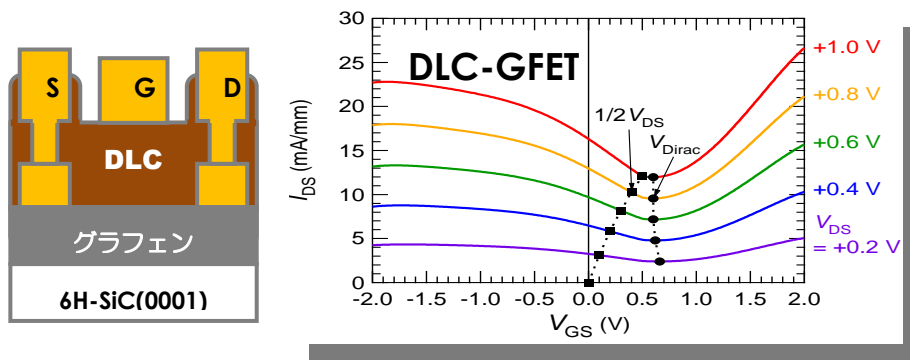


図 4. DLC をゲート絶縁膜に導入したグラフェンチャネル FET と伝達特性.

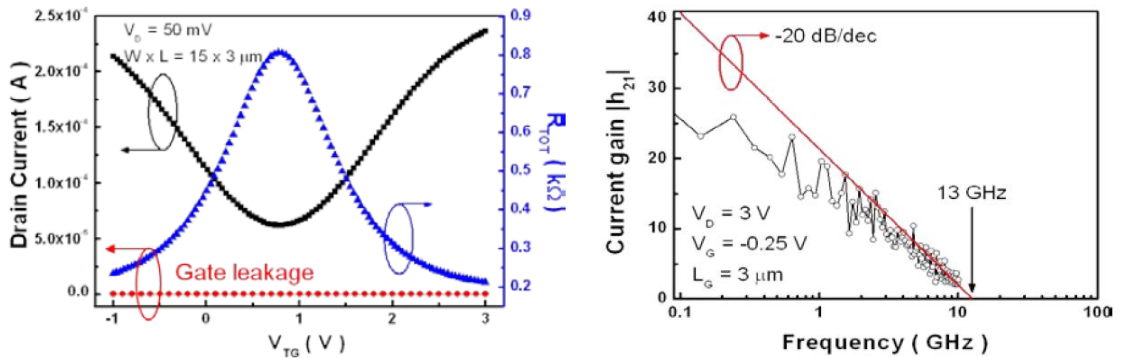


図 5. Al 自然酸化 Al_2O_3 をゲート絶縁膜に用いたグラフェン FET の伝達特性 (左) と高周波特性 (右).

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 論理ゲートの試作・検証を行う。本年度の主たる成果は、以下の3つである。

- [1] CGOS 論理ゲートの解析を進めた結果、オン時リーク電流を十分低減するためには GOSFET のオンオフ比を 10^4 以上にすることが必要であることがわかった[23]。通常のグラフェン

FET においては、オン電流と最小コンダクタンスによりオンオフ比が決まり、 10^4 以上のオンオフ比を実現することはかなり困難である。SiC(111)/Si(111)面上に成長させた AB スタックグラフェンにおいては、A および B サイトのポテンシャル非対称性によりバンドギャップを発現させる可能性がある。

- [2] そこで、0.3eV 程度のバンドギャップがあるグラフェン中の電子輸送特性を解析した。このため、電子・フォノン散乱と電子・電子散乱を考慮したフルバンド・モンテカルロ解析プログラムを開発した[15, 16, 23]。解析の結果、回路の動作速度を決定する高電界下での電子速度は、バンドギャップがある場合でも 4×10^7 cm/s と、グラフェン中の電子速度 80%程度であることを明らかにした。ホット状態の電子はグラフェン中でも”有効質量”を獲得することと、電子・電子散乱が両者の差を小さくすることが要因と考えられる。
- [3] [2]のフルバンド・モンテカルロ解析手法を GOSFET に適用し、GOSFET 中での電子輸送の解析とインバータ遅延時間の予測を行った。結果を図 6 に示す。ソース寄生抵抗値として ITRS に従った場合でも 10nm ゲート CGOS においてサブピコ秒の遅延時間が期待できること、DLC からのドーピング効果によるソース寄生抵抗低減技術を開発すればテラヘルツ動作論理を実現できることを明らかにした[23]。

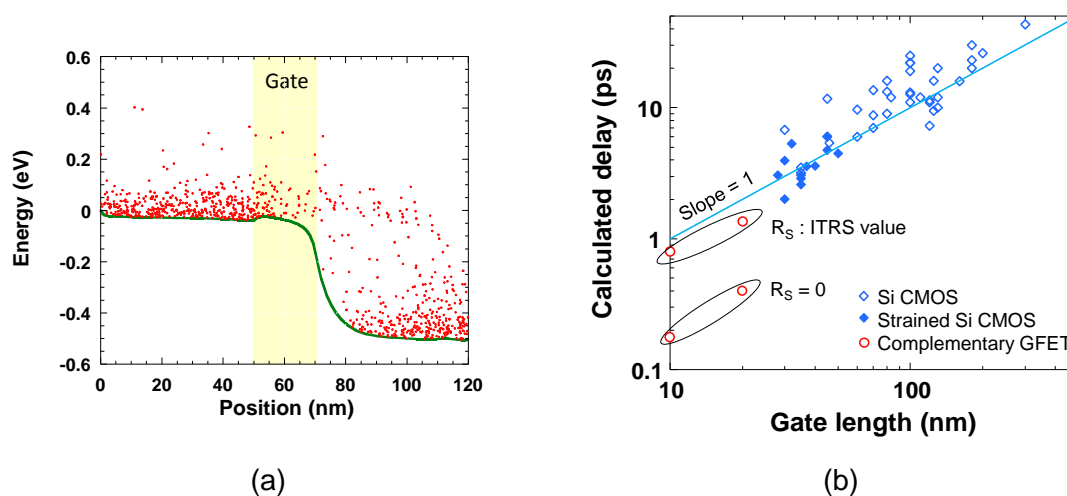


図 6. GOSFET のモンテカルロ解析結果。 (a) 電子分布のスナップショット、 (b) インバータ遅延時間の Si CMOS との比較。

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しう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。今年度の代表的な成果は、以下のとおりである。

- ・22年度実施成果[Ryzhii グループによって定式化されたグラフェンチャネルの THz 帯プラズモン共鳴特性の実験検証を目的としてグラフェンリボンアレイ試料を設計・作成し、そのテラヘルツ

帯プラズモンモードのフェムト秒時間分解計測に成功し、理論の妥当性を実証]をベースとして、さらに、実験検証を進めた。単層グラフェンと比較して、2層グラフェンのテラヘルツ放射スペクトルは低域のカットオフ周波数が上昇する傾向が明瞭に観測された(図7)。バンド構造がパラボリック化していることに起因するキャリア緩和過程の違いに対応するものと推察され、理論解析との照合を進めている。各種国際会議を通して得られた成果の公表を進めた。

震災の影響により、研究の中断を余儀なくされたが、今後は、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。

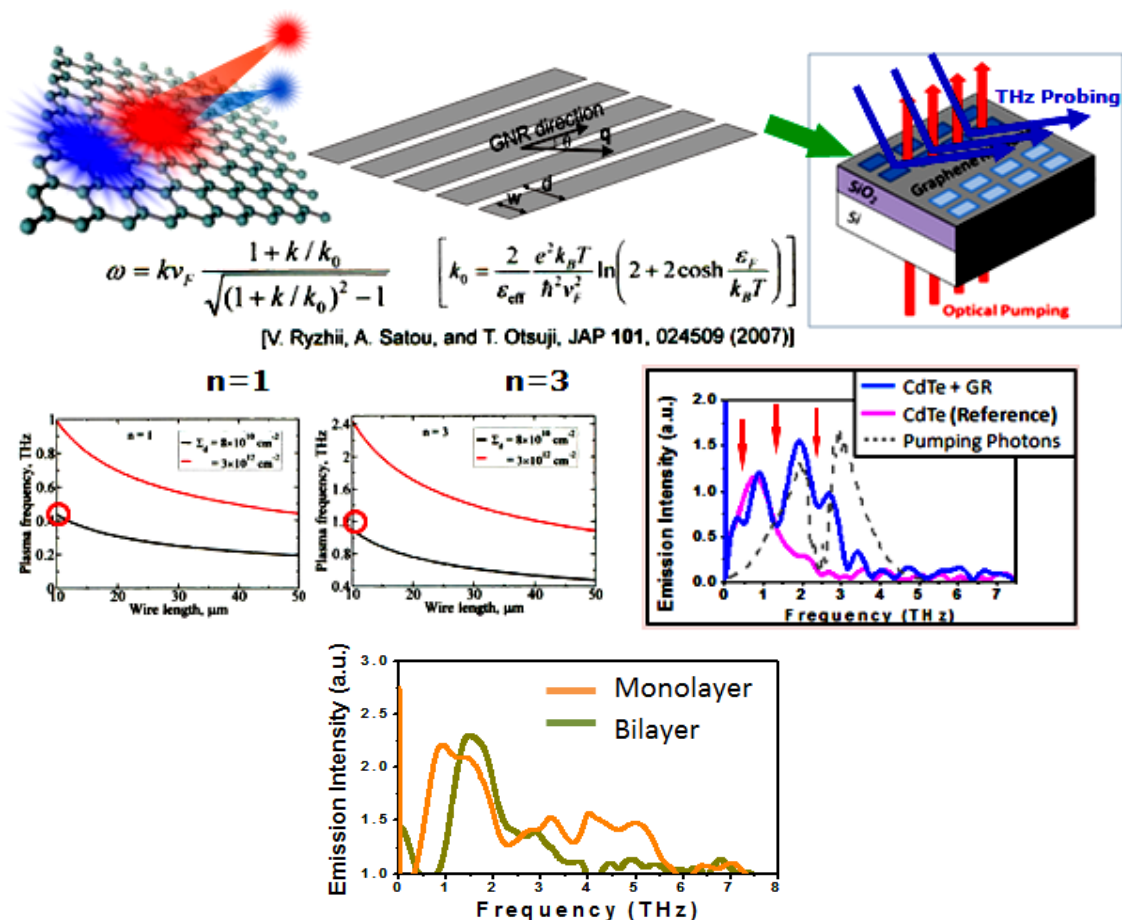


図7. PRGOS リボンのプラズモン共鳴。理論計算による基本モード周波数(中段左)と3字モード(中段中央)のリボン幅依存性。中段右: フェムト秒 THz パルス励起により、サンプル表面から反射された THz 電場の時間分解測定で得られた Fourier スペクトル。理論計算(赤丸印)とよく一致する。下段: 単層グラフェンと2層グラフェンのスペクトルの違い。2層グラフェンは低周波側のカットオフが0.7 THz 上昇している。

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、研究分担者・佐野栄一グループの協力を得て、バンド構造解析ならび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。

今年度の代表的な成果は、以下の4つである。

- [1] 多層グラフェンFETの解析モデルを構築し、AC/DC特性の解析を行なった。トランスコンダクタンスは層数が増えるとともに増大していくが、ゲートに近い層で垂直電場の遮蔽効果が起こるため、層数を増やすとトランスコンダクタンスの増大が少なくなることを明らかにした。
- [2] 単層グラフェン FET、バイレイヤーFET に関して半解析モデルを構築し、弱非局所ポテンシャル近似で得られた解析解との比較を行なった。結果として、弱非局所ポテンシャル近似による二次元ポアソン方程式の近似解でもトランジスタ特性を精度良く計算できることが分かった。
- [3] バイレイヤーFET におけるモンテカルロ・シミュレータを構築した。このモデルでは散乱過程として不純物散乱を考慮し、エネルギー分散にはゲート電圧依存の有効質量で記述される二次分散を仮定した。シミュレーションとこれまで構築してきた解析モデルによる結果はよく一致し、後者の妥当性が立証された。
- [4] グラフェン中の電子-ホールプラズマを記述する流体力学方程式を構築した。このモデルを使い、電子-ホールプラズマのプラズマ波分散関係および電子-ホール散乱による減衰定数を、フェルミ準位がディラック点付近にある場合と遠く離れた場合で解析的に導出した(図8) [27]。モノポーラ(n型またはp型)プラズマの場合、無衝突運動論的モデルで導出した分散関係とはほぼ一致し、電子間・ホール間散乱が分散関係に影響しないことが明らかになった。また、対称バイポーラプラズマ(n=p)の場合、圧力勾配のみに起因する“電子-ホール音波”モードの存在を予言した。このモードでは、電子とホールの密度はいたるところで同じであり、電子とホールは同じ方向に振動するため電子-ホール散乱に起因する減衰を受けない[14]。

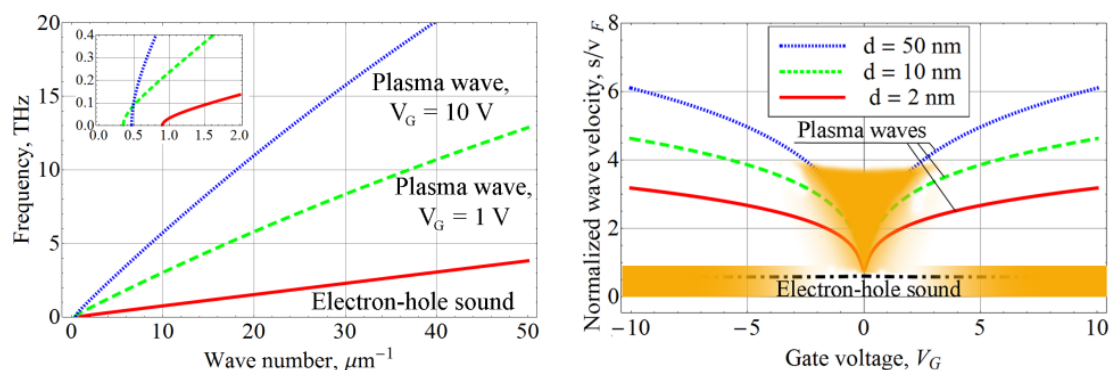


図 8. 異なるゲート電圧下におけるプラズマ分散関係 (左). プラズマ速度のゲート電圧およびゲート・チャネル間距離 d に対する依存性 (右).

当初の計画では想定されていなかった新たな展開・成果として、以下が上げられる。

- Ryzhii グループが主導して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 帯利得の実験検証を進めた。GOS に比べて結晶品質の優れる剥離グラフェンを用いて、テラヘルツ帯誘導増幅放出の検証を進めた。フェムト秒赤外レーザーでグラフェンをポンピング後に入射する THz プローブパルスのタイミングを負性導電率が最大となる 2 ps 付近から

3.5 ps まで遅延させたところ、利得スペクトルの高域側が狭窄した。これは、再結合およびバンド間光学フォノン放出を介したキャリアの平衡化が進み、負性導電率が減少する理論・数値解析結果とよく対応する。また、利得スペクトルの位相特性を観測した結果、利得ピーク周波数付近で正常分散を示し、理論(損失は異常分散、利得は正常分散)を支持する。以上の実験事実を総合し、THz 帯誘導増幅放出実現の確証を得た[26]。本研究「グラフェンテラヘルツレーザーの創出」は、23 年度科研費・特別推進研究として採択され、本 CREST 研究計画とは切り離して、室温 THz レーザー動作の実証へと進めてゆく。

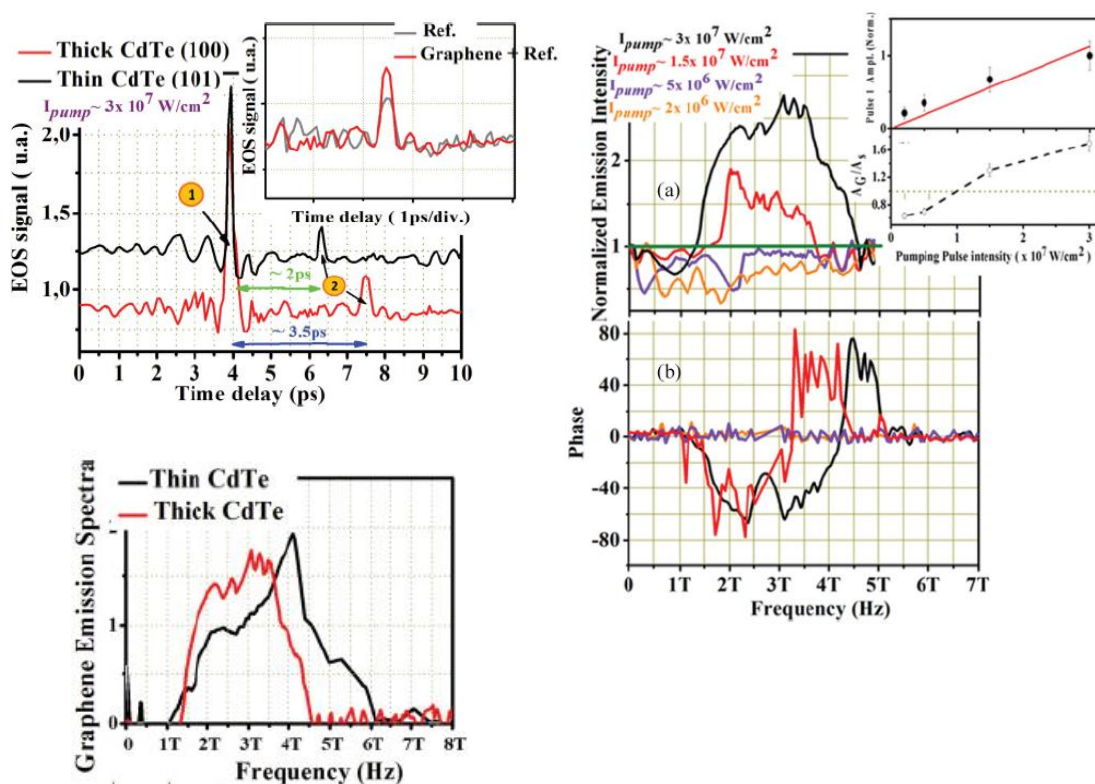


図 9. フェムト秒 IR レーザーによる光学励起グラフェンからの THz 誘導放出. 時間応答波形 (左上図)、利得スペクトルのポンピング閾値特性 (右図)、利得スペクトルの THz プローブパルス照射タイミング依存性 (左下図).

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

- [1] S. Koga, I. Katayama, S. Abe, H. Fukidome, M. Suemitsu, M. Kitajima and J. Takeda, "High-Frequency Coherent Phonons in Graphene on Silicon", *Applied Physics Express*, Vol. 4, pp. 045101-1-045101-3, 2011. (DOI: 10.1143/APEX.4.045101)
- [2] H. Handa, R. Takahashi, S. Abe, K. Imaizumi, E. Saito, M.H. Jung, S. Ito, H. Fukidome and M. Suemitsu, "Transmission Electron Microscopy and Raman-Scattering Spectroscopy Observation on the Interface Structure of Graphene Formed on Si Substrates with Various Orientations", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, No. 4, pp. 04DH02-1-4, 2011. (DOI:10.1143/JJAP.50.04DH02)
- [3] T. Otsuji, T. Watanabe, A. El Moutaouakil, H. Karasawa, T. Komori, A. Satou, T. Suemitsu, M. Suemitsu, E. Sano, W. Knap, and V. Ryzhii, "Emission of terahertz radiation from two-dimensional electron systems in semiconductor nano- and hetero-structures," *J. Infrared Milli. Terahrz. Waves*, Vol. 32, No. 5, pp. 629-645, 2011. (DOI: 10.1007/s10762-010-9714-0)
- [4] H. Karasawa, T. Komori, T. Watanabe, A. Satou, H. Fukidome, M. Suemitsu, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Observation of amplified stimulated terahertz emission from optically pumped heteroepitaxial graphene-on-silicon materials," *J. Infrared Milli. Terahrz. Waves*, Vol. 32, No. 5, pp. 655-665, 2011. (DOI:10.1007/s10762-010-9677-1)
- [5] S. Abe, H. Handa, R. Takahashi, K. Imaizumi, H. Fukidome, and M. Suemitsu, "Temperature-Programmed Desorption Observation of Graphene-on-silicon Process", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, No.7, pp. 070102-1-5, 2011. (DOI:10.1143/JJAP.50.070102)
- [6] R. Takahashi, H. Handa, S. Abe, K. Imaizumi, H. Fukidome, A. Yoshigoe, Y. Teraoka, and M. Suemitsu", *Low-Energy-Electron-Diffraction and X-ray-Phototelectron-Spectroscopy Studies of Graphitization of 3C-SiC(111) Thin Film on Si(111) Substrate*", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, No. 7, pp. 070103-1-6, 2011. (DOI:10.1143/JJAP.50.070103)
- [7] K. Imaizumi, H. Handa, R. Takahashi, E. Saito, H. Fukidome, Y. Enta, Y. Teraoka, A. Yoshigoe, and M. Suemitsu, "Oxygen-Induced Reduction of the Graphitization Temperature of SiC Surface", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, No. 7, pp. 070105-1-6, 2011. (DOI:10.1143/JJAP.50.070105)
- [8] M.-H. Jung, H. Handa, R. Takahashi, H. Fukidome, T. Suemitsu, T. Otsuji, and M. Suemitsu, "Polymer Material as a Gate Dielectric for Graphene Field-Effect-Transistor Applications", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, No.7, pp. 070107-1-5, 2011. (DOI:10.1143/JJAP.50.070107).
- [9] M.-H. Jung, H. Handa, R. Takahashi, H. Fukidome, T. Suemitsu, T. Otsuji, and M. Suemitsu, "Investigation of Graphene Field Effect Transistors with Al₂O₃ Gate Dielectrics Formed by Metal Oxidation", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, No. 7, pp. 070111-1-5, 2011 (DOI:10.1143/JJAP.50.07010111).
- [10] A. El Moutaouakil, H.-C. Kang, H. Handa, H. Fukidome, T. Suemitsu, E. Sano, M. Suemitsu, T. Otsuji, "Room temperature logic inverter on epitaxial graphene-on-silicon device." *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, No. 7, pp. 070113-1-4, 2011. (DOI: 10.1143/JJAP.50.070113)

- [11] Y. Takatsuka, E. Sano, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Terahertz amplifiers with gain medium and field-enhancement effect," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, No. 7, pp. 070118-1-4, 2011. (DOI: 10.1143/JJAP.50.070118)
- [12] M. Ryzhii, T. Otsuji, V. Mitin, and V. Ryzhii, "Characteristics of p-i-n terahertz and infrared photodiodes based on multiple graphene layer structures," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 50, No. 7, pp. 070117-1-6, July 2011. (DOI: 10.1143/JJAP.50.070117)
- [13] D. Svintsov, V. Vyurkov, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Effect of "Mexican hat" on graphene bilayer field-effect transistor characteristics," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, No. 7, pp. 070112-1-6, July 2011. (DOI: 10.1143/JJAP.50.070112)
- [14] A. Satou, T. Otsuji, and V. Ryzhii, "Theoretical study of population inversion in graphene under pulse excitation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, No. 7, pp. 070116-1-4, July 2011. (DOI: 10.1143/JJAP.50.070116)
- [15] A. Stebunov, V. Leiman, A. Arsenin, A. Gladun, V. Semenenko, and V. Ryzhii, "Detection of modulated terahertz radiation using combined plasma and mechanical resonances in double-carbon-nanotube device," *Appl. Phys. Express* Vol. 4, No. 7, pp. 075101-1-3, July 2011. (DOI: 10.1143/APEX.4.075101)
- [16] E. Sano, "Monte Carlo simulation of ultrafast electron relaxation in graphene," *Appl. Phys. Express*, Vol. 4, No. 8, pp. 085101-1-3, 2011. (DOI: 10.1143/APEX.4.085101)
- [17] E. Sano, "Impact of site-potential asymmetry on electron transport in graphene," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, No. 9, pp. 090205-1-3, 2011. (DOI: 10.1143/JJAP.50.090205)
- [18] V. Ryzhii, M. Ryzhii, V. Mitin, A. Satou, and T. Otsuji, "Effect of heating and cooling of photogenerated electron-hole plasma in optically pumped graphene on population inversion," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 50, 094001 -1-9, Sept. 2011. (DOI: 10.1143/JJAP.50.094001)
- [19] V. Ryzhii, M. Ryzhii, and T. Otsuji, "Tunneling recombination in optically pumped graphene with electron-hole puddles," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 99, 173504 -1 -3, Oct. 2011. (DOI:10.1063/1.3656712)
- [20] T. Suemitsu, M. Kubo, H. Handa, R. Takahashi, H. Fukidome, M. Suemitsu, T. Otsuji, "Graphene/SiC/Si FETs with SiCN gate stack." *ECS Trans.*, Vol. 41, pp. 249-254, Oct. 2011. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1149/1.3629973>)
- [21] V. Ryzhii, M. Ryzhii, V. Mitin, and T. Otsuji, "Toward the creation of terahertz graphene injection laser," *J. Appl. Phys.* Vol. 110, pp. 094503-1-9, Nov. 2011. (DOI:10.1063/1.3657853)
- [22] H. Fukidome, R. Takahashi, S. Abe, K. Imaizumi, H. Handa, H.-C. Kang, H. Karasawa, T. Suemitsu, T. Otsuji, Y. Enta, A. Yoshigoe, Y. Teraoka, M. Kotsugi, T. Ohkouchi, T. Kinoshita and M. Suemitsu, "Control of epitaxy of graphene by crystallographic orientation of a Si substrate toward device applications", *J. Mater. Chem.*, Vol. 21, pp. 17242-17248, 2011 (DOI: 10.1039).
- [23] H. Fukidome, S. Abe, R. Takahashi, K. Imaizumi, S. Inomata, H. Handa, E. Saito, Y. Enta, A. Yoshigoe, Y. Teraoka, M. Kotsugi, T. Ohkouchi, T. Kinoshita, S. Ito, and M. Suemitsu, "Controls over Structural and Electronic Properties of Epitaxial Graphene on Silicon using Surface Termination of 3C-SiC(111)/Si", *Appl. Phys. Express*, Vol. 4, pp.115104-1-3, 2011 (DOI: 10.1143/APEX.4.115104).
- [24] E. Sano and T. Otsuji, "Performance prediction of complementary field-effect transistor circuits using graphene with band gap induced by site-potential asymmetry," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, No. 11, pp. 115101-1-6, 2011. (DOI: 10.1143/JJAP.50.115101)
- [25] V. Ryzhii, N.Ryabova, M.Ryzhii, N. V. Baryshnikov, V. E. Karasik, V. Mitin, and T.

- Otsuji, "Terahertz and infrared photodetectors based on multiple graphene layer and nanoribbon structures," *Optoelectronics Review*, Vol. 20, No. 1, pp. 15-25, 2012. (DOI: 10.2478/s11772-012-0009-y) (invited)
- [26] S. Takabayashi, S. Ogawa, Y. Takakuwa, H.-C. Kang, R. Takahashi, H. Fukidome, T. Suemitsu, M. Suemitsu, T. Otsuji, "Carbonaceous field effect transistor with graphene and diamondlike carbon." *Diamond and Related Materials*, Vol. 22, pp. 118-123, Feb. 2012. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2011.12.037>)
- [27] S. Boubanga-Tombet, S. Chan, T. Watanabe, A. Satou, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Ultrafast carrier dynamics and terahertz emission in optically pumped graphene at room temperature," *Physical Review B*, Vol. 85, Iss. 3, pp. 035443-1-6, 2012. (DOI: 10.1103/PhysRevB.85.035443)
- [28] Hiroyuki Handa, Shun Ito, Hirokazu Fukidome and Maki Suemitsu, "Transmission-electron-microscopy observations on the growth of epitaxial graphene on 3C-SiC(110) and 3C-SiC(100) virtual substrates", *Materials Science Forum*, Vol. 711, pp 242-245, 2012. (DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.711.242)

(以下は 2012 年 3 月末時点では未出版 (全て採択決定済みでオンライン公開を含む))

- [29] D. Svintsov, V. Vyurkov, S. Yurchenko, T. Otsuji, and V. Ryzhii, "Hydrodynamic model for electron-hole plasma in graphene," *J. Appl. Phys.* Vol. 111, 2012. (in press)

(3-2) 知財出願

- ① 平成 23 年度特許出願件数(国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 5 件)