戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「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」
研究課題「グラフェン・オン・シリコン
材料・デバイス技術の開発」

研究終了報告書

研究期間 平成19年10月～平成26年3月

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）

§1 研究実施の概要

（1）実施概要

グラフェンは、電荷キャリアが静止質量ゼロの相対論的粒子に似ており、質量消失効果に伴う巨大キャリア移動度が高キャリア濃度でも得られ、かつ、極限的なチャネル厚の薄層化による短チャネル効果フリーという優れた特異性を有している。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、グラフェンが有する上記の特長を Si 基板上で実現させるグラフェン・オン・シリコン（GOS）材料・デバイス技術の開発を目的として推進された。具体的には、(1)独自の製膜プロセスから成る GOS 技術、(2) GOS による新しい相補的スイッチングデバイス CGOS(Complementary GOS)、及び CGOS を用いた超高速論理回路技術、(3)電子輸送限界を越えたプラズモン共鳴型テラヘルツ(THz)GOS デバイス PRGOS（Plasmon Resonant GOS）技術の開発を行った。

研究チームは、東北大学電気通信研究所（研究代表者尾辻泰一グループ、末光眞希グループ）を中心に、会津大学（RYZHII Victor グループ）および北海道大学（佐野栄一グループ）との協力によって編成した。研究代表者グループが CGOS および PRGOS のデバイスプロセス技術、末光グループが GOS 製膜・評価技術、Ryzhii グループが CGOS ならびに PRGOS のデバイスモデリング技術、佐野グループが CGOS 論理回路技術を主として担当し、互いの有機的連携のもとに研究を推進し以下の成果を得た。

第一に、Si-CMOS プロセスと完全整合する GOS 成長技術を他に先駆けて開発した。シリコン基板上にモノメチルシランを原料ガスとする分子線エピタキシー法でまず 3C-SiC をエピタキシャル成長し、高真空・高温下での熱分解によって Si を離脱させ、残る C 原子の再配列によってグラフェン化するという技術であり、もう一つの工業的合成法として知られる化学気相成長法と比較して、グラフェンを別基板に転写する必要がなく、大口径の Si 基板上に成長したグラフェンをそのまま半導体集積加工プロセスに利用できる大きなメリットがある。本研究での最大の成果は、用いる Si 基板の面方位の選択と 3C-SiC 成膜条件の制御によって、グラフェンシートの積層様式が制御できることを発見したことである。Si（111）基板上に 3C-SiC（111）を成長させた場合はグラファイト様の積層となり、バンドギャップの発現が可能である。これは、GOSFET をはじめとするスイッチング素子や論理ゲート素子としての応用に適する。一方、Si（110）もしくは Si(100)基板上に成長させた場合には、グラファイト様とは異なる乱層積層となり、単層グラフェン特有のバンドギャップレス、電子・正孔有効質量ゼロといった特異性を担持した状態の積層化が可能であることをはじめて見出した。これは、極限的な電子輸送特性とギャップレスな微弱テラヘルツフォトンの直接遷移を活用する PRGOS への応用に適している。最初のグラフェン生成成功から 4 年半の間にグレインサイズは 100 nm 弱までに拡大し、トランジスタチャネルを単一グレインで実現するレベルにまで至った。また、Si 基板と SiC エピ層の格子不整合に起因した SiC バッファリークが開発当初は大きな課題であったが、SiC ならびにグラフェンの製膜条件と SiC 膜厚の最適化、ならびにメサエッチングによるグラフェン成長領域の局所限定化によって、グラフェン/SiC ヘテロエピ結晶品質の向上とそれに伴うリーク電流の低減が可能であることを見出し、最も格子不整合が少ない 3C-SiC(111)/Si(110)回転エピ成長グラフェンにおいて許容レベル以下へのリーク電流低減の見通しを得た。継続延長となった 2013 年度には、独自に考案した回転成長の高速化を可能とする二段階成長法を用いることにより、3C-SiC エピ層の厚膜化を実現し、非回転エピ 3C-SiC 上と比べグラフェンのドメインサイズを 1.6 倍まで拡大することに成功した。

第二に、GOS デバイス技術に関して、まず、成長した GOS を用いてバックゲート型 GOSFET ならびにトップゲート型 GOSFET を試作しいずれもグラフェン特有のアンバイポーラ特性を有するトランジスタ動作の確認に成功した。バックゲート型 GOSFET においては世界トップレベルの電界効果電子移動度： 2000～6000$cm^2/V\cdot s$が同定された。さらに、グラフ

ェンFETの高性能モデリングを進め、GOSFET DC・AC特性のユニバーサルな定式化に成功した。本モデルに基づいて FET 高性能化を左右する要因が、(1) 高性能ゲートスタック技術、(2) チャネルドーピングによるコンタクト抵抗・アクセス抵抗の低減化技術であることを明らかにし、各々に有効な新技術を開発した。具体的には、光電子制御プラズマ化学気相成長法(PA-CVD)という独自の技術（東北大・多元研・高桑雄二教授提供）を用いてカーボン系材料：ダイアモンドライクカーボン（DLC）をゲート絶縁膜として導入することに成功し、トップゲート FET としては最高レベルの電界効果移動度：3000 $cm^2/V \cdot s$ を達成した。特に、成長条件によって DLC の導電性（絶縁体から導体まで）と誘電率を（～1から7以上まで）広く制御できることを発見した。微細化では必須の自己整合技術導入の際のサイドウォール形成（Low-K）とゲートスタック（High-K）とを同一材料で実現できる大きなメリットを有している。さらに、DLC は酸素や窒素等の不純物ドーピングが可能であることを活用し、DLC-グラフェン界面からナノメートルオーダ離れた DLC 膜内にこれら不純物を δ ドープすることによって、グラフェン中へのキャリアのリモートドーピングに他に先駆けて成功した。界面や欠陥・不純物によって電子輸送特性が大きく阻害されるグラフェンに対して、HEMT（高電子移動度トランジスタ）と類似の技術によって広い濃度に亘るキャリアドーピング制御を可能とするもので、真性領域の電流駆動力向上のみならず、オーミック抵抗やアクセス抵抗の大幅低減とそれによる GOSFET 高周波化の見通しが得られた。

第三に、CGOS 技術に関して、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を考案するとともに、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。さらに、試作したトップゲート型 GOSFET の 2 段縦積構成で CGOS インバータを構成し、初めてインバータ論理動作を確認した。それらと並行して、CGOS 動作における On/Off 比劣化の本質的要因であるグラフェン固有のアンバイポーラ特性を回避するための素子構造を検討し、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するとともに、二次元デバイスシミュレーションにより効果を確認した。一方、実用的なバンドギャップ開口による On/Off 比向上においては、Si-CMOS と同等の On/Off 比 10^6 以上の実現にはバンドギャップエネルギー0.5V 以上が必要であるが、Bernal 積層 2 層グラフェンの垂直電界印加では 0.4V 付近で飽和し、On/Off 比 10^5 程度が限界であり、その場合の FET 単体の真性電流遮断周波数は 820 GHz、フリップフロップ回路の最高トグル周波数は fT の 1/3 でほぼ 280 GHz であることを解析的に明らかにした。

第四に、グラフェン内二次元電子系の集団素励起による分極振動量子：プラズモンの分散特性を明らかにし、そのテラヘルツ帯能動デバイスへの応用の可能性を他に先駆けて明らかにした。具体的には、グラフェンのバンドギャップレスかつ完全対称な線形分散特性に起因する電子・正孔の相対論的量子性を半古典的 Boltzmann 輸送方程式で定式化し、ゲート制御型デバイスでのプラズモン分散特性には電子濃度の 1/4 乗にプラズモンモード周波数が比例するという特異な性質（従来の半導体では 1/2 乗に比例）を明らかにした。さらには、ドープ量が低い場合や光学励起によって光電子正孔対が生成されるような電子・正孔が同程度の濃度で存在するバイポーラ状態では、プラズモンは強く減衰され、従って、散乱因子としては寄与が低いこと、またそれに反してドープ量が高く n 型もしくは p 型となるユニポーラ状態では、少数キャリヤに伴うプラズモンは減衰し、多数キャリアに伴うプラズモンが選択的に優勢になることを明らかにした。さらに、これらプラズモン物性を含むグラフェン内非平衡キャリアのエネルギー緩和過程を考察した結果、光学励起もしくは電流注入励起したグラフェンにおいてテラヘルツ帯で反転分布・負性導電率が得られることを他に先駆けて理論的に発見し、実験的検証にも世界で初めて成功した。これは、励起された電子・正孔対が光学フォノンを放出しながらエネルギー緩和を果たし、わずかに残るエネルギーをバンド間の直接遷移でフォトン放射できることを表わしており、テラヘルツ帯共振器を用いればレーザー発振が実現できることを意味するものである。第一の成果で述べた多層化グラフェン積層構造の導入によって、室温レーザー発振ならびにポンピング閾値の低下が期待できる。また、その際、グラフェン内

プラズモンが巨大利得増強作用をもたらすことも、理論的に発見し、他に先駆けて実験検証に成功した。GOSFET を基本構造とするデュアルゲート型の FET を試作・評価し、グラフェンプラズモンの巨大不安定性発現とそれに伴うテラヘルツ帯コヒーレント単色室温発振実現の見通しを得た。PRGOS としてのテラヘルツ帯信号処理機能としては、レーザー発振、誘導放出によるテラヘルツ波増幅およびレーザー発振の他にも、(i) 不安定性に起因したコヒーレントテラヘルツ波発生、(ii) テラヘルツ波検出、(iii) 2光波混合によるテラヘルツ波帯への差周波下方変換(フォトミキシング)、(iv) テラヘルツ波混合によるマイクロ波帯への差周波下方変換(テラヘルツミキシング)、(v) テラヘルツ波の高速変調等について、デュアルゲートFET構造ならびにグラフェン二重層キャパシタ構造におけるプラズモン励起に伴う機能・性能を理論的に明らかにした。継続延長となった 2013 年度には、特に(ii)、(iii)、(iv)については試作素子による機能検証に成功した。なお、グラフェンによるテラヘルツレーザーの創出については 2010 年度より科研費:特別推進研究として本研究とは分離して推進することとなった。

第五に、本 CREST における GOS 研究開発の総括として、GOS 技術が必須となる適用領域は極限高周波集積回路技術であることを明らかにした。GOS 技術は、テラヘルツ帯で動作する PRGOS を CGOS ならびに Si-CMOS と完全モノリシック集積化を可能とするものであり、将来の超高速テラヘルツ無線システムや安心・安全のためのテラヘルツセンシング・イメージングシステムなど、超ブロードバンドな信号処理システムにおけるフロントエンドハードウェアの中核を実現し得る技術である。テラヘルツ帯における信号処理を司る光源・検出・信号処理デバイスとしての PRGOS、サブテラヘルツ級クロック周波数でテラヘルツ帯データを中間処理する CGOS、さらにベースバンドを含む低速信号処理・データ記憶を司る Si-CMOS を、GOS 技術は完全モノリシック集積化を可能にするものである。PRGOS-CGOS に至る素子間信号配線接続にはサブミクロンオーダの寸法・位置精度が要求され、SiP(システムインパッケージ)等の既存マルチチップモジュール技術は適用が困難であることから、GOS 技術は唯一これらの解決策を提供できる位置付けにある。継続延長となった 2013 年度には、この新規な GOS-CMOS モノリシック集積化のフィージビリティスタディに着手し、CMOS 工程の熱履歴をトレースし、GOS 劣化の課題を抽出するとともに、検証工程を具体化した。

以上の研究成果は、査読付き学術論文 109 編、国際会議招待講演 89 件、国際会議一般講演 180 件(うちオーラル 114 件)、外国出願特許 5 件、国内出願特許 5 件、として公表、権利化された。海外出願特許 5 件のうち 1 件は、米国および中国で特許登録済みである。

(2)顕著な成果

＜優れた基礎研究としての成果＞

1. GOSFET および PRGOS のデバイスモデリングとそのテラヘルツ帯デバイス応用実験技術

概要: Dirac Fermion としての特異な光電子物性を有するグラフェン内二次元キャリアの輸送特性ならびに電荷粗密波動(プラズマ波動)の分散特性を半古典的量子論により定式化し、GOSFET ・フォトトランジスタ特性、CGOS 特性、PRGOS によるテラヘルツ波発生・検出・増幅等の多様なデバイス特性のユニバーサルかつ高精度なモデル化を実現するとともに、グラフェンによるテラヘルツレーザーをはじめとする新原理デバイスを考案し・実験実証を進めた。

2. GOS 成長技術

概要: Si 基板上 3C-SiC エピ成長と高温熱分解による表面グラフェン化から成る、Si-CMOS プロセスに完全整合する Si 基板上へのヘテロエピタキシャルグラフェン成長技術を他に先駆けて創出した。さらに、Si 基板面方位と SiC 成長条件によるグラフェンの積層様式の選択的制御が可能であることを発見し、バンドギャップ発現による CGOS スイッチング動作を可能にする Bernal 積層多層化 GOS、ならびに PRGOS で量子効率の桁違いの向上を可能にする単層グラフェンの性質を保った多層化 GOS の成長を実現した。

3. GOSFET ゲートスタック・チャネルリモートドーピング技術
概要: GOS による FET の試作検討を進め、グラフェンと界面反応性が極めて低く安定でかつ広範な誘電率制御が可能なダイアモンドライクカーボン（DLC）および炭化窒化ケイ素（SiCN）による新たな高性能ゲート絶縁膜形成技術を開発した。さらに、DLC 絶縁膜内に酸素、窒素等不純物をδドープし、グラフェンチャネル内キャリア濃度をリモートドープ制御する技術を創出した。イオン注入等の熱的機械的化学的に安定な不純物ドーピング技術のないグラフェンにおいて画期的なドーピング技術であり、グラフェンチャネル FET の速度性能律速要因の一掃（オーミック抵抗・アクセス抵抗の低減、キャリア散乱抑止による移動度向上）ならびに擬似相補型論理 CGOS の超高速低消費電力動作が期待できる。

＜科学技術イノベーションに大きく寄与する成果＞
1. GOS-Si-CMOS 完全モノリシック集積化によるカーボンフォトニクス VLSI 技術
極めて高い移動度をもつグラフェンを用いて、超高速集積回路を目指した研究は盛んになっているが、世界的にも不完全なレベルに留まっている。その中で、本チームによって集積化課題が明らかになり、それを克服する新しい FET 構造（グラフェン HEMT）の提案に結び付けた。また、シリコン CMOS・グラフェン FET・グラフェン THz デバイスをシリコン基板上にモノリシック集積する THz 領域の集積化システムの具体像を示したことは新しい分野の開拓として意義がある。

2. Beyond CMOS, More than Moore, More Moore の一体集積化による産業イノベーション
電子走行に立脚しない Beyond CMOS、ならびに Si-CMOS が実現できないコヒーレント光源・変調器等の新機能を実現する More than Moore としてのプラズモンデバイス:PRGOS の原理実証をベースにした THz 領域で動作する超高速無線システムや、安心・安全のためのセンシングシステムなどをシリコン基板上に搭載したモノリシック集積化デバイスを提案することにより、それを戦略目標である集積化デバイスを開拓する方針に整合させたところに意義がある。

・ISGD 国際会議主催を含むグラフェン研究コミュニティでのプレゼンス向上
グラフェン研究の中心が物性や成長技術にあってデバイス応用が希少であった本 CREST 研究開始直後よりグラフェンデバイスに特化した国際会議 : ISGD (International Symposium on Graphene Devices) を企画・主催し、後のノーベル賞受賞者(K. Novoselov 博士)を含む最先端研究者を世界中から招へいし、研究交流・情報交換とプレゼンスの向上に努めてきた。その結果、グラフェンデバイスのコミュニティで当チームのアクティビティが広く認知され、ISGD が日本・欧州・米国を巡回開催する会議として成長発展している。また、国内学会誌（JJAP 24編、APEX (Impact Factor 2.731) 8編等、計32編）はもとより、世界的にサーキュレーションの高い AIP (Appl. Phys. Lett. (Impact Factor 3.794), J. Appl. Phys. 計22編)、APS (Phys. Rev. B(Impact Factor 3.767) 9編)、IOP (J. Phys. D, J. Phys. Cond. Matt. 計8編) をはじめとする国際的に認知度の高い海外学術論文誌へも積極的に成果を公表(計 63 編)した。これらの積極的な国際研究・交流活動によって米国材料科学学会（MRS）の年次総会（Sprinng Meeting, Fall Meeting）では、ナノカーボンセッションにおける招待講演ならびにグラフェンチュートリアルの講師を務める他、MRS Bulletin (Impact Factor 5.021) 、Proc. IEEE (Impact Factor 6.81、計3編) 、ならびに Journal of Physics D: Applied Physics (Impact Factor 2.54) 各誌のグラフェン特集号への招待論文、IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (Impact Factor 4.078) のテラヘルツ特集号への招待論文など、グラフェンデバイス分野において世界的に認知されるに至っている。

§2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

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)技術の開発を目的として策定した。当初の研究構想は以下のとおりである。すなわち、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従来の Si-CMOS 技術を凌駕する高速・高周波トランジスタ動作ならびに相補型論理回路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 桁以上超えう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。そして最終的には、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。

この当初掲げた GOS 研究開発戦略を図示したものが図 2.1 である。

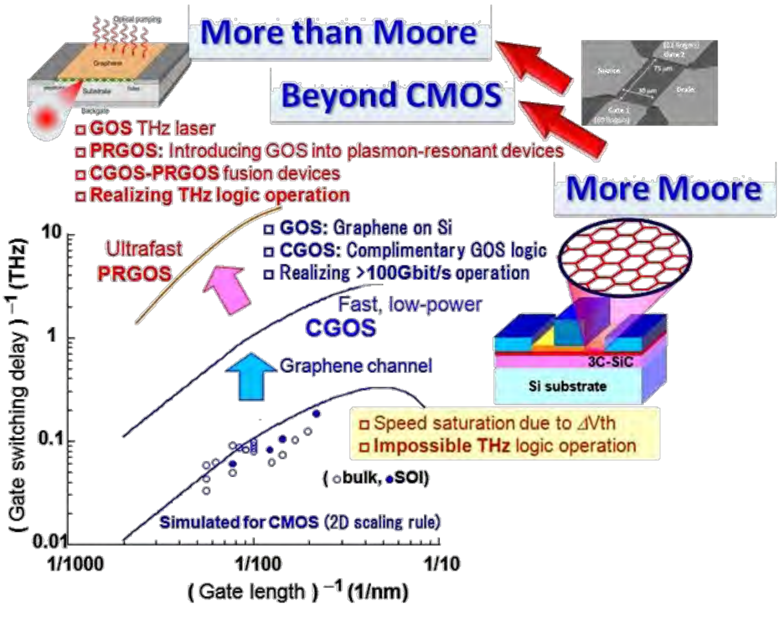


図 2.1 CREST-GOS プロジェクト計画当初の研究開発戦略。

(2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

・GOSFET 速度性能の当初目標との乖離

グラフェンのエピ成長成功の見通しを得た段階で本 CREST プロジェクトをスタートし、グラフェンをチャネル材料とする FET の試作に挑んだ。グラフェンという新材料に初めて接し、これまで Si や化合物で培ってきた技術蓄積の及ばない多くの困難に直面することとなった。真性領域の電子輸送特性は SiC エピ層が基板表面となる本 GOS 技術では、本質的にグラフェンへの干渉が低く SiC がゲート絶縁膜として機能するバックゲート動作では電界効果移動度：6000 cm^2/Vs という優れた特性を当初から確認できた[29]。しかし、アクセス領域やオーミックコンタクトを含むトランジスタとしての高周波性能は極めて乏しく、また、新たな絶縁膜を堆積するトップゲート動作

では大きく特性が劣った[32,33]。グラフェン FET の高周波化は残念ながら米国 IBM 社に先導を許しているが、彼らのトランジスタ特性も Si-MOSFET のスケーリング性能に留まっており、グラフェン本来の巨大キャリア移動度特性が反映できていない。これらの経験と高精度モデリングによるシミュレーションとの比較検討を通して、特に、チャネルドーピングとゲートスタック技術の2つが本質的な律速要因であることを明らかにし、その根本的な解決策の検討に腐心した。その結果、DLC を絶縁膜とし、DLC 内への不純物δドープによるキャリアリモートドーピングという独自のゲートスタックならびにチャネルドーピング技術の開発につながった[65]。今後、世界記録更新のみでなく、Si-MOSFET に留まる現状のグラフェン FET の性能を格段に向上させる道筋を明らかにできた。

<<関連する中間評価コメント―1>>
結晶成長とデバイス適用、モデリング解析が同時並行的に進められ、現状グラフェン膜の基本的な特性と技術課題が明らかになった。材料基礎技術やプラズモン共鳴の THz 高周波デバイス、モデル・理論予測による新デバイスの創出などの点で新しい展開も生まれつつある。**当初の構想と比べるとトランジスタ特性などにおいて不十分な点もある**が、原著論文 39 件や招待講演 52 件などの学術的成果も多数挙げられ、特許出願においても国内 4 件、海外 3 件と健闘している。材料、デバイス、モデル、回路と研究者間で明確に分担され、有機的に機能している。

・GOS のリーク、品質　とその μ-GOS の発見による解決と Si-CMOS と CGOS・PRGOS の完全モノリシック集積化への方向性

　Si、SiC の格子不整合によって、高温アニールによるグラフェン化の際に SiC エピ層に欠陥が生じることが基板リークの要因である。SiC エピ成長条件およびグラフェン化アニール条件の最適化[75]、ならびに SIC エピ層の厚膜化によるリーク低減化と並行して、SiC エピ層の選択的メサエッチングによるグラフェン成長領域の限定[72,73]とそれによる SiC エピ層へのダメージ低減化の検討に新たに取り組んだ。その結果、リーク低減化と結晶品質向上に関しては所望の改善を得るに至った。それと同時に、メサエッチングで生じる複数の面方位には、Bernal 積層によるバンドギャップ発現が可能な CGOS 用途のグラフェンと非 Bernal 乱層積層による単層グラフェンの多層化が可能な PRGOS 用途のグラフェンとが選択的に成長できることを発見した。これによって、バックエンド（配線層）の設計・プロセスのみで簡単に PRGOS, CGOS のモノリシック集積化が可能となるばかりでなく、Si-CMOS との完全モノリシック集積をも可能となった。これらの検討で GOS 技術のの適用領域が明確となり、当初策定した研究戦略より、図 2.2 のように軌道修正を行った。

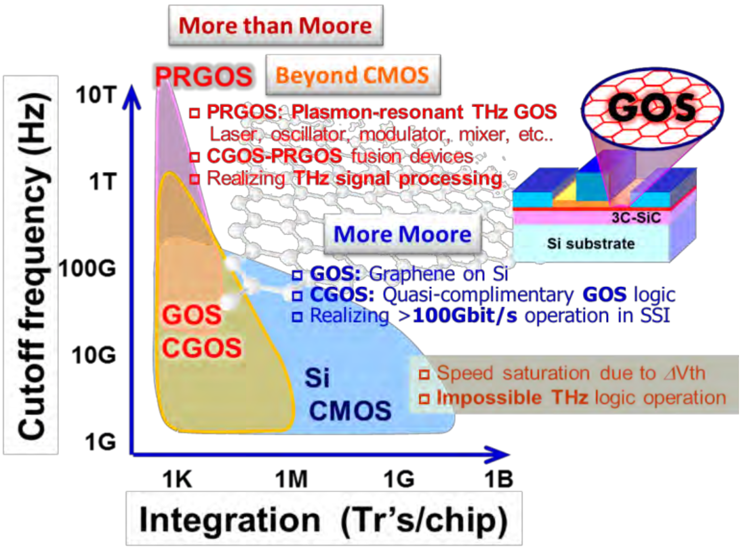


図 2.2 CREST-GOS プロジェクトで明らかにした GOS 技術の適用領域。

<<関連する中間評価コメント―2>>
当初構想した GOS 技術、CGOS 技術および PRGOS をシリコンテクノロジーと整合する形で実現するという目標は説得力に富むが、現状は材料およびプロセスにおいて基礎データの集積にとどまっている。グラフェンが CMOS として応用できるかのシナリオを検討する必要があるが、特に DLC を用いるゲートスタックについて面白い展望が感じられる。グラフェンを利用するデバイス開発の試みが世界中で精力的に行われ、極めて競争の激しい状況となっており、本研究課題で取り組む CGOS 技術の優位性の検証を急ぐ必要がある。
<<関連する中間評価コメント―3>>
グラフェン製膜の制御性の難しさを、オリジナルなエピ技術の様々な工夫で乗り越えようとしている。しかしながら、高速動作の可能性は十分あるとしてもリーク問題（基板、SD、ゲート）の課題解決への取り組みには、さらなる注力が必要である。モデリンググループの貢献は高く、さらなる発展を期待したい。THz 帯デバイス、光デバイスへの応用もインパクトが高いと思われるが、基本となる高品質グラフェン膜の確保や最適デバイス構造の明確化を望みたい。

・当初計画にはない新たな展開：グラフェンテラヘルツレーザーの発案と実験実証
　PRGOS の研究を進める中で、プラズモン物性を含むグラフェン内非平衡キャリアのエネルギー緩和過程を考察した結果、光学励起もしくは電流注入励起したグラフェンにおいてテラヘルツ帯で反転分布・負性導電率が得られることを他に先駆けて理論的に発見し[2]、実験的検証にも世界で初めて成功した[43,66]。これは、励起された電子・正孔対が光学フォノンを放出しながらエネルギー緩和を果たし、わずかに残るエネルギーをバンド間の直接遷移でフォトン放射できることを表わしており、テラヘルツ帯共振器を用いればレーザー発振が実現できることを意味するものである。第一の成果で述べた多層化グラフェン積層構造の導入によって、室温レーザー発振ならびにポンピング閾値の低下が期待できる[19-21,27]。また、その際、グラフェン内プラズモンが巨大利得増強作用をもたらすことも、理論的に発見し、他に先駆けて実験検証に成功した。GOSFET を基本構造とするデュアルゲート型の FET を試作・評価し、グラフェンプラズモンの巨大不安定性発現とそれに伴うテラヘルツ帯コヒーレント単色室温発振実現の見通しを得た。PRGOS による FET 型デバイス構想によって電流注入型のテラヘルツレーザーが実現できることを意味しており、当初の PRGOS の構想にはない深さと広がりを持つ新概念デバイスの実現が期待できる。グラフェンによるテラヘルツレーザーの創出については科研費：特別推進研究として本研究とは分離して推進することとなった。

§３ 研究実施体制

（1）「GOS／PRGOSデバイス」（東北大学・電気通信研究所、尾辻泰一研究代表者グループ）
①研究者名

氏名	所属	役職	参加時期
尾辻　泰一	東北大学	教授	H19.10～H26.3
末光　哲也	東北大学	准教授	H19.10～H26.3
MEZIANI Yahya M.	東北大学	助教	H19.10～H20.9
佐藤　昭	東北大学	助教	H22.4～H26.3
鷹林　将	東北大学	CREST 研究員	H22.1～H26.3
西村拓也	東北大学	D3	H19.10～H22.3
姜　顯澈	東北大学	D3	H19.10～H22.11
EL MOUTAOUKIL Amine	東北大学	D3	H20.10～H23.11

唐澤　宏美	東北大学	M2	H21.4～H22.3
OLAC-BAW Roman	東北大学	D1	H21.4～H21.12
渡辺　隆之	東北大学	D3	H22.4～H26.3
赤川　啓介	東北大学	M2	H22.4～H23.3
久保　真人	東北大学	M2	H22.4～H23.3
吉田　智洋	東北大学	D2	H22.4～H26.3
谷本　雄大	東北大学	M2	H22.4～H24.3
福嶋　哲也	東北大学	M2	H24.4～H25.3
栗田　裕記	東北大学	M2	H24.4～H26.3
小林　健悟	東北大学	M2	H24.4～H26.3
江藤　隆紀	東北大学	M2	H24.4～H26.3
小嶋　一輝	東北大学	M1	H25.4～H26.3
矢部　裕平	東北大学	M1	H25.4～H26.3
川﨑　鉄哉	東北大学	M1	H25.4～H26.3
杉山　弘樹	東北大学	M1	H25.4～H26.3
畠山　信也	東北大学	M1	H25.4～H26.3
上野　佳代	東北大学	事務補佐員	H23.8～H23.12

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」（東北大学・電気通信研究所、末光眞希グループ）

①研究者名

氏名	所属	役職	参加時期
末光　眞希	東北大学	教授	H19.10～H26.3
吹留　博一	東北大学	助教	H20.12～H26.3
今野　篤史	東北大学	D3	H19.10～H20.3
半田　浩之	東北大学	D3	H20.4～H23.3
齋藤　英司	東北大学	D4	H20.4～H24.3
鄭　明鎬	東北大学	D3	H21.4～H24.3
遠田　義晴	弘前大学	准教授	H20.4～H26.3
今野　篤史	東北大学	D3	H19.10～H20.3
三浦　明美	東北大学	技術補佐員	H21.4～H25.3
稲吉　陽平	東北大学	D4	H24.4～H25.3
朴　君昊	東北大学	D1	H24.4～H26.3
ラクシャ・ダウキヤ	東北大学	特別研究学生	H24.8～H25.3
長澤　弘幸	東北大学	産学連携研究員	H25.5～H26.3

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」(会津大学、リズィーヴィクトールグループ⇒リズィーマキシムグループ)

①研究者名

氏名	所属	役職	参加時期
RYZHII Victor	会津大学	教授	H19.10～H24.3
	東北大学	客員教授	H24.4～H25.3
KHMYROVA Irina	会津大学	准教授 上級准教授	H19.10～H20.9 H20.10～H22.3
RYZHII Maxim	会津大学	准教授	H19.10～H24.3 H24.4～H26.3
佐藤　昭	会津大学	D3 助教	H19.10～H20.3 H20.4～H22.3
NADEZHDA Ryabova	会津大学	特別研究支援者	H20.1～H20.7 H21.4～H22.1 H22.4～H23.1 H23.4～H24.1 H24.4～H24.8
		共同研究員	H21.8～H21.12
VASKO Fedir	会津大学	共同研究員	H19.10～H24.3

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」(北海道大学、佐野栄一グループ)

①研究者名

氏名	所属	役職	参加時期
佐野　栄一	北海道大学	教授	H19.10～H26.3
池辺　将之	北海道大学	准教授	H19.10～H26.3
飯田　智貴	北海道大学	D3	H21.4～H25.3
田中　朋	北海道大学	D3	H21.4～H26.3
高塚　裕也	北海道大学	M2	H23.4～H24.3
田中　遥	北海道大学	M2	H23.4～H25.3

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

§4 研究実施内容及び成果

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。以下、各研究グループの研究実施内容を記す。

4．1 「GOSプロセス」(東北大学・電気通信研究所、末光眞希グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

①研究のねらい

グラフェン・オン・シリコン(GOS)プロセス技術の開発

②研究実施方法

研究分担者・末光眞希が有する有機シランガスソース分子線エピタキシ(Organo-silane Gas-Source Molecular Beam Epitaxy: OS-GSMBE)法という独自の技術を用いて、Si(110)基板上に 3C-SiC(111)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斬新なアイデアで、その実現を図る。

③当初の研究計画(全体研究計画書)に対する研究達成状況

おおむね当初計画を達成しており、新たな展開の成果も得られている。

④研究成果

<u>1．GOS成長技術の開発</u>

<1> 研究分担者・末光眞希が有する有機シランガスソース分子線エピタキシ(Organo-silane Gas-Source Molecular Beam Epitaxy: OS-GSMBE)法という独自技術を用い、本 CREST 予算で導入した GOS 薄膜形成・評価装置を稼動して、Si 基板上に 3C-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斬新なアイデアで挑んだ(図 4.1.1)。その際、Si 結晶と SiC 結晶の間に存在する約 20%もの大きい格子不整合を解消する必要があった。そこで従来とは異なる面方位の Si(110)基板上に、3C-SiC をエピ成長させるという新しい方法を考案した結果、格子歪を大幅に抑制でき、世界初の GOS 形成に成功した[10,11] (図 4.1.2)。

<2> 3C-SiC のエピタキシャル成長条件は成長温度と真空度によって制御でき、900～1200℃の比較的低温条件下で良質な製膜ができることを実験的に明らかにした(図 4.1.2)。また、その後のアニールによるグラフェン化工程においては、グラフェン化反応中の酸素分圧の制御によるグラフェン化温度の低温化(<1000℃、従来は 1250℃)にも成功している[46]。

<3> Raman 分光及び TEM(透過型電子顕微鏡)による結晶性評価の結果、単層または多層のグラフェンが 1 cm□以上の広大な領域に形成できていることを確認した(図 4.1.2, 4.1.3) [10,11,23,24,31,41,44]。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 [45]。さらに、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。

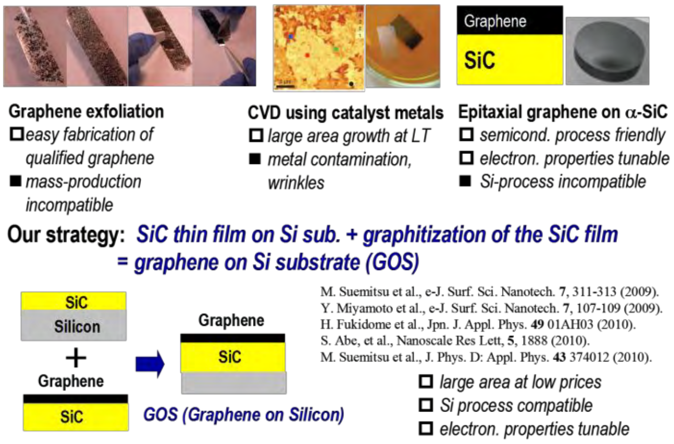


図 4.1.1 GOS（Graphene On Silicon）の特徴と意義。

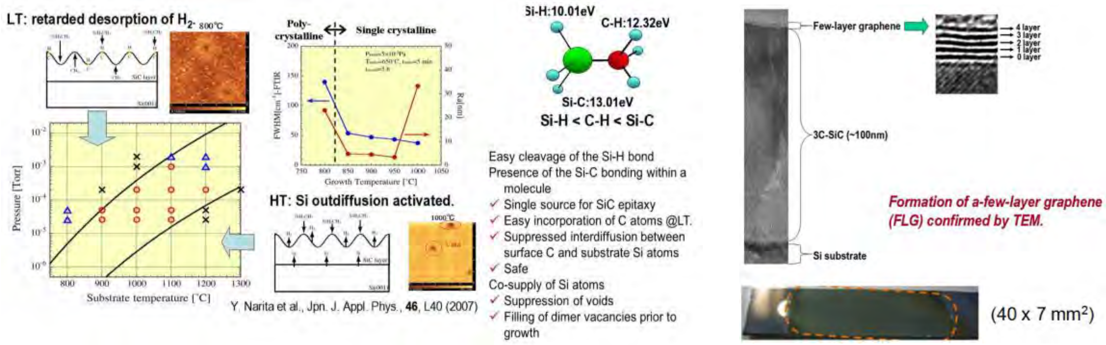


図 4.1.2 MMS ガスソース MBE 法による３C-SiC/Si 形成(左)と高温アニールによるグラフェン形成(右)。

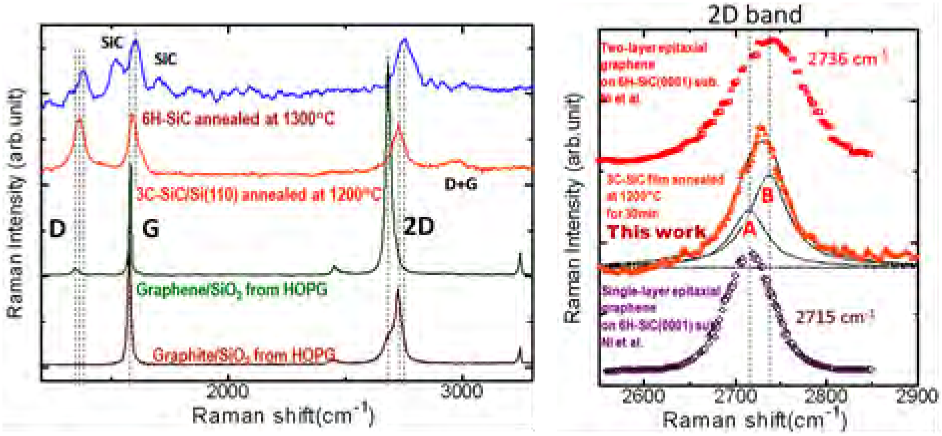


図 4.1.3 GOS の 3C-SiC/Si(110)の表面改質で作成した GOS サンプル（上）とその Raman 分光スペクトル。左下：6H-SiC 表面改質グラフェン、および SiO2 表面へ転写したピーリンググラファイト&グラフェンとの比較．右下：2D バンドの 6H-SiC グラフェンとの詳細比較．試作 GOS は単層グラフェンと 2 層グラフェンからなることがわかる。

<4> SiH_4 前処理による SiC 表面の欠陥密度の低減及びグラフェン膜の高品質化(欠陥密度30%減少、結晶性:50%増加)に成功した（図 4.1.4）[75]。さらに、グラフェン化条件の改善により、グラフェンの高品質化に成功した(欠陥密度 90%減少)。Raman 分光より推定されるグレインサイズは開発当初、15 nm 前後と小さかったが、その後の 4 年半の間にグレインサイズは 100nm 弱までに拡大し、トランジスタチャネルを単一グレインで実現するレベルにまで至った（図 4.1.4）。

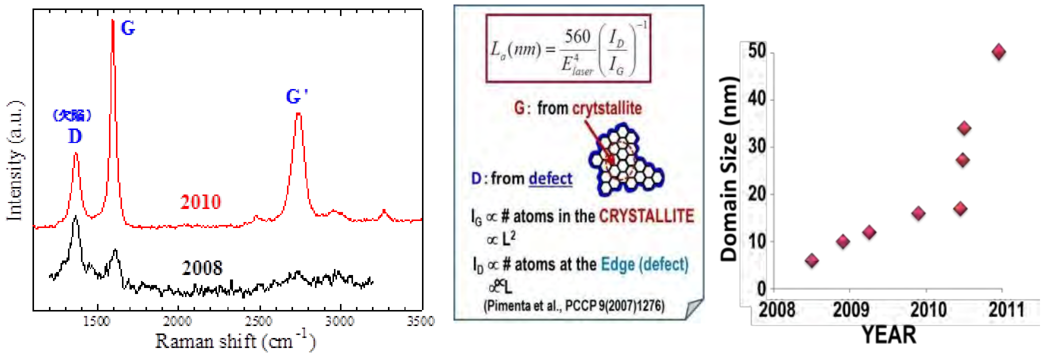


図 4.1.4 研究当初(2008 年)と現在(2010 年)のグラフェンの Raman スペクトルの比較。欠陥密度が90%低減されたことが、D バンドとG バンドの強度比から明らかとなった。G'バンドの強度が強くなったことは、グラフェンの二次元結晶性が飛躍的に向上したことを示唆する。

2. GOS成長技術の進化

<1> GOS 製膜では、六方晶 SiC 表面と対称性の等しい 3C-SiC(111)面を Si との格子不整合を最小限に抑えて実現するために、当初、Si(110)基板上への 3C-SiC(111)の回転エピ成長が唯一可能な面方位と見通して、GOS 成長技術の開発を進めた。しかしその後、他の面方位や種々の SiC 成長条件に拡張して実験的検討を重ねた結果、当初予測の 3C-SiC(111)/Si(110)のみならず、SiC の成長条件とグラフェン化アニール条件の制御によって 3C-SiC(111)/Si(111)、ならびに全く対称性の異なる 3C-SiC(100)/Si(100)や 3C-SiC(110)/ Si(110)面上にもグラフェン製膜可能であることを発見した [24,31,41,61,62]。

<2> Si と 3C-SiC 間の 20%の格子不整合を解消する Si(110)基板上 3C-SiC(111)回転エピ成長が、低速成長を伴う熱平衡に近い成長条件で生じることを明らかにした[84]。一方、GOS 技術の高品質化には、グラフェン化処理に伴う Si 外方拡散抑制のために SiC 膜厚の厚膜化が必須である。そこで独自に考案した二段階成長法を用いることにより、低速成長領域でのみ可能だった回転成長の高速化を可能とする技術を開発した。二段階成長法を用いて成長させた厚膜 3C-SiC を用いることで、非回転エピ 3C-SiC 上と比べグラフェンのドメインサイズを 1.6 倍まで拡大することに成功した[85]。

<3> 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、同法ならびに低速電子線回折装置(LEED)及び X 線光電子分光(XPS)を用いて、GOS 製膜法においては、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)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、Gr/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[45] (図 4.1.5, 4.1.6)。さらには、3C-SiC(111)/Si(111)及び 3C-SiC(100)/Si(100)表面では Si 終端表面が[44]、3C-SiC(110)/Si(110)表面は Si と C 終端が共存する両極性表面が[44]、そして、3C-SiC(111)/Si(110)回転エピ表面では C 終端表面が[62]、それぞれ選択的に形成されることを明らかにした(図 4.1.7)。

<4> グラフェン積層構造が、Si 基板面方位により制御可能であることを LEED, Raman, TEM, XPS 測定により明らかにした[24]。すなわち、上記の各種グラフェンは互いに異なる界面構造、積層構造、エッジの化学構造、電子物性を示し、グラフェンを多層に形成した場合、3C-SiC(111)/Si(111)上のグラフェンのみが Bernal 積層となってバンドギャップ発現を伴う半導体的性質を示し、他の面方位で形成したグラフェンはすべて非 Bernal な乱層積層となり、単層グラフェンの性質を保ったままで多層化することを見出した(図 4.1.8) [61,62]。

<5> Si 基板面方位によるグラフェン/SiC 界面構造の制御が可能となったことは、エッジの化学構造(armchair vs zigzag edge)についても可制御性を担保するものである[61]。例えば、後述する Si(111)微傾斜基板上に off-axis SiC(111)薄膜の形成が可能な μGOS においては、armchair 型のグラフェン・ナノリボンの形成が可能なことを示唆する結果である（図 4.1.9)。

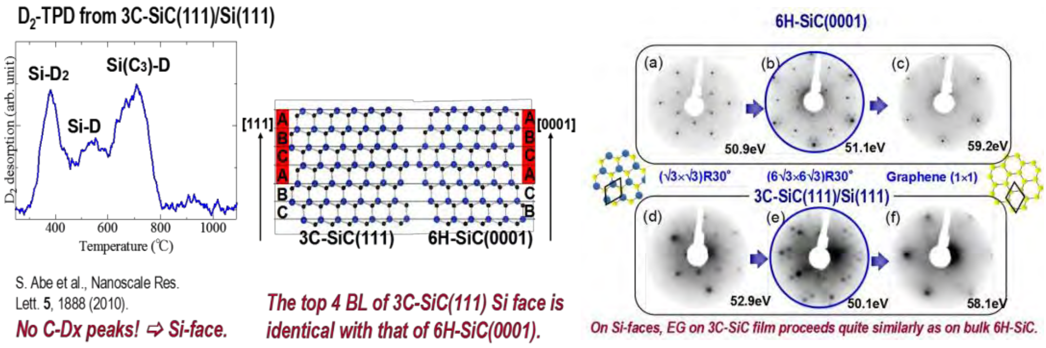


図 4.1.5 3C-SiC(111)/Si(111)表面からの D2-TPD スペクトル(左)。C-D ピークが弱く Si 終端面であることがわかる。Gr/3C-SiC(111)の Si 面では、6H-SiC(0001)面と最上層 4 層分は同一の構造を有する(中)。LEED 観察像の比較（右）。グラフェン形成後(右端)においては極めて類似の構造を有する。

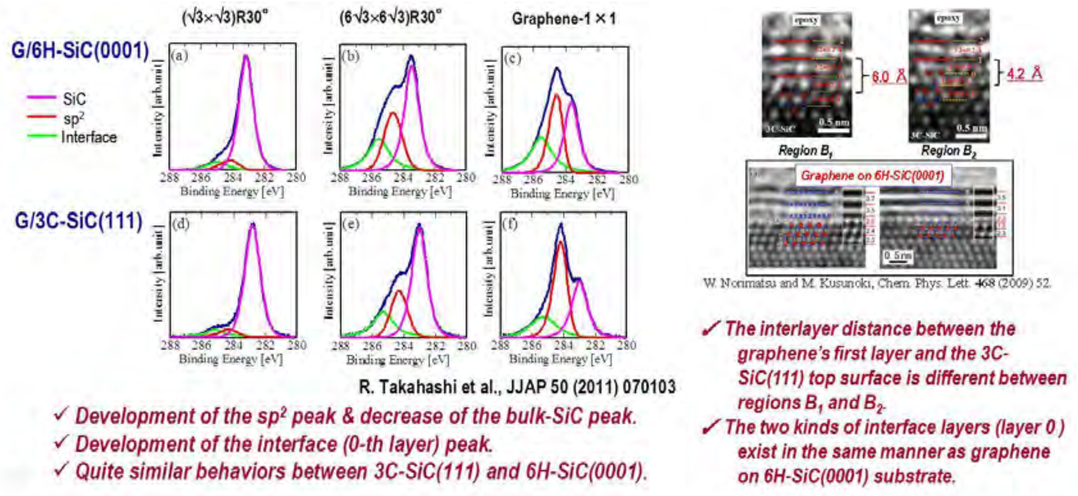


図 4.1.6 6H-SiC(0001)上のエピタキシャルグラフェンと MMS-GSMBE による 3C-SiC(111)/Si(111)上のエピタキシャルグラフェンとの XPS 像(左)ならびに TEM 像(右)の比較。3C-SiC(111)上のグラフェン形成過程は 6H-SiC(0001)上と同一。

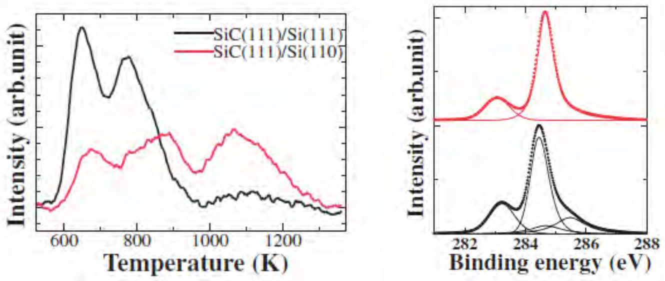


図 4.1.7 左：3C-SiC/Si 表面からの D2-TPD スペクトル．SiC(111)/Si(111)表面からのスペクトル（黒）は C-D ピークが弱く Si 終端であることを示すのに対し、SiC(111)/Si(110)表面からの TPD スペクトル（黒）は C 終端 3×3 構造特有の強い C-D ピークを示し、表面が C 終端になっていることを示す。右：C1s－XPS スペクトル。SiC(111)/Si(111)表面からのスペクトル（下）は界面層の存在を示すピーク（285.5 eV）を示すが、SiC(111)/Si(110)表面はこれを示さない。

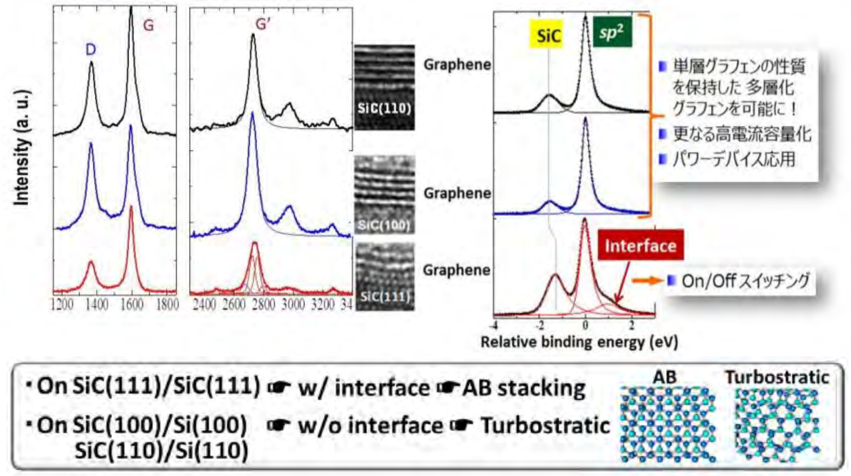


図 4.1.8 Raman スペクトル, TEM, XPS による GOS の基板面方位に対する積層様式の依存性。

図 4.1.9 GOS の基板面方位に対するエッジ終端の依存性。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[61]。

3. µGOS による GOS 結晶品質の向上と CGOS&PRGOS のモノリシック集積化技術

<1> SiO_2 パターニングによる 3C-SiC の選択成長もしくは 3C-SiC を選択的にメサエッチングして、必要な能動素子領域のみにグラフェンを選択的に成長する技術（以下、µGOS と称する）を開発し、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(図 4.1.10, 4.1.11) [72,73,93]。 これによって、グラフェン化アニールに伴う格子不整合に起因する SiC エピ層の結晶ダメージを抑制することが可能となり、従来問題となっていた基板リークの大幅な低減と、グラフェン結晶品質の向上を同時に実現することが可能となった。

<2> µGOS のメサエッチングで得られる複数の面方位が SiC(110), SiC(100)および SiC(111)に対応することから、単一の Si 基板を用いて Bernal 積層で半導体的性質を有し CGOS 応用に適する半導体的多層グラフェンと非 Bernal・乱層積層で金属的性質を有し PRGOS 応用に適する多層化単層グラフェンとを選択的にデバイス応用することができ、文字通り、CGOS と PRGOS の完全モノリシック集積化が可能となった(図 4.1.10, 4.1.13)。

<3> グラフェン化高温アニールに伴う3C-SiC のダメージに起因する基板リークが当初より問題であったが、3C-SiC エピ層の厚膜化（図 4.1.12）ならびに µGOS による領域限定により、実用上問題のないレベルまでの低減が可能であることを明らかにした（図 4.1.11）。

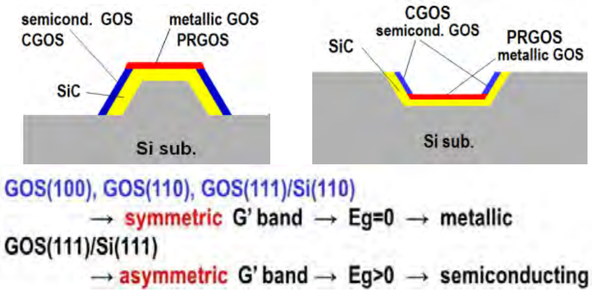


図 4.1.10 μGOS 技術。メサエッチングによる微小領域への選択的 GOS 形成。エッチングで現れる複数の面方位により、多層化グラフェンの積層様式・電気的特性が異なり、バンドギャップ発現による On/Off 比向上が必要な CGOS と単層グラフェンのギャップレス・線形分散特性が必要な PRGOS の作り分けが可能。

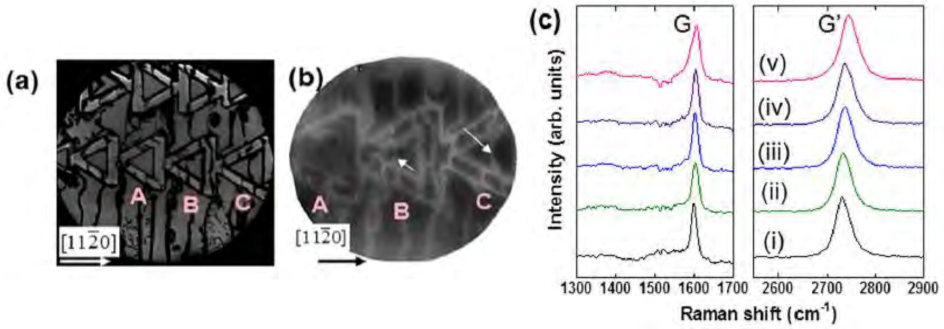


図 4.1.11 μGOS における三角形状に形成したエピタキシャルグラフェン：EG の形成領域サイズに対する結晶品質の依存性[72]。(a) LEEM 像。一辺 5μm のパターン A では表面平坦性が高い。一辺 6μm, 7 μm のパターン B, C では平坦性が劣化している。(b) PEEM（光電子顕微鏡）像。多層グラフェンは白く見える。一辺 5μm のパターン A は単層グラフェンのみ。一辺 6μm, 7μm のパターン B, C では多層グラフェンが領域内に含まれる。(c) Raman スペクトルの EG 形成領域サイズ依存性。(i)から(v)の順にそれぞれ、限定なし、一辺 7, 6, 5, 4 μm。いずれのスペクトルも欠陥に起因する D バンドピーク(~1360 cm^{-1})が皆無であり、結晶品質が高いことを表わしている。G'ピークのシフトより、形成領域サイズの縮小化とともにグラフェンと SiC の格子定数差に起因した圧縮歪が増大していることがわかる。

<4> グラフェン化高温アニールに伴う3C-SiC のダメージに起因する基板リークが当初より問題であったが、回転エピ成長による格子不整合の緩和と 3C-SiC エピ層の厚膜化により、実用上問題のないレベルまでの低減が可能であることを明らかにした。3C-SiC 薄膜の電流リークの原因としては SiC 結晶薄膜中に存在する逆位相欠陥（APBD）（図 4.1.12 左）や積層欠陥といった面欠陥、あるいは SiC/Si 界面に形成されるピットが 2 次元電子ガスを形成し、これが電流リークパスになっている可能性が考えられる[W.R.L. Lambrecht and B. Segall, Phys.Rev. B, 41, 2948 (1990).]。こうした面欠陥の主因は Si と 3C-SiC の間に存在する約 20%の格子不整合であるため、この観点から、解決策の第一として、本 CREST で当初より着目している Si(110)基板上 3C-SiC(111)回転エピ成長薄膜の優位性を検討した。これは格子定数の小さな 3C-SiC 結晶における{111}面の[112]方向が、その大きな Si 結晶における Si{100}面の[001]方向に揃うよう[1-10]軸まわりに回転することで格子不整合を緩和する成長モードである。本検討の結果、回転エピ成長が生ずる成長条件を明らかにし[84,85]、これを GOS 成長に適用した結果、3C-SiC 基板電流の ON/OFF 比を 1.5 桁改善することに成功した（図 4.1.12 中）。基板微細加工による局所成長の導入による結晶性向上も、リーク電流低減に大いに貢献するものと期待される。図 4.1.12 右は、Si 基板上 3C-SiC 局所成長時の APBD 密度をパターンサイズをパラメータとして動力学的数値解析[H. Nagasawa and K. Yagi, ECSCRM-1998, (1998).]したものである。パターンサイズの縮小と共に結晶性が速やかに向上している。こうした局所成長は、酸化膜を用いた選択エピや凸・凹型の基板微細加工によって実現可能であり、これを GOS 成長に適用することにより、GOS によるグラフェンおよび SiC 薄膜の大幅な高品質化が期待される。

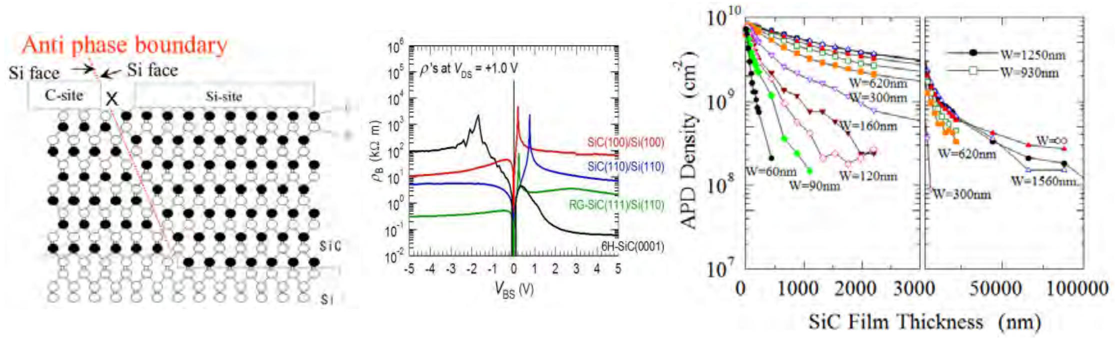


図 4.1.12 グラフェン/3C-SiC/Si の基板リークパス。左：逆位相境界欠陥（APBD）の断面図。中：各種面方位のGOSと6H-SiC(0001)上にエピ成長したグラフェン試料の比抵抗を厚みで規格化して比較(3C-SiC エピ層厚は 200nm 固定)。膜厚で規格したバルク比抵抗ρ_B で比較すると、GOS 基板の3C-SiC 抵抗率は 6H-SIC 基板の最低値（<10^{-1} kΩm）よりはむしろ高い。右：逆位相境界欠陥（APBD）の 3C-SiC 膜厚ならびにパターンサイズの依存性数値解析結果。μm オーダーに 3C-SiC を厚膜化することで、基板電流リークの 2 桁程度の低減が推定される。

<5> GOS 技術において述べた Si-CMOS と完全整合する CGOS･PRGOS プロセス技術実現の見通しを得た(図 4.1.13)。基本プロセスフローは、Si 基板上への μGOS 形成⇒CMOS プロセス⇒CGOS/PRGOS プロセス⇒バックエンドプロセスによって構成される。この新規な GOS-CMOS モノリシック集積化のフィージビリティスタディに着手し、CMOS 工程の熱履歴をトレースし、GOS 劣化の課題を抽出するとともに、検証工程を具体化した(図 4.1.14)。

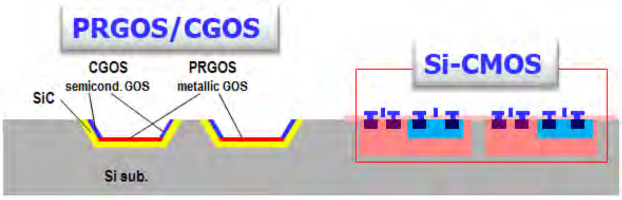


図 4.1.13 Si-CMOS と完全整合する CGOS/PRGOS-CMOS プロセス技術の実現。

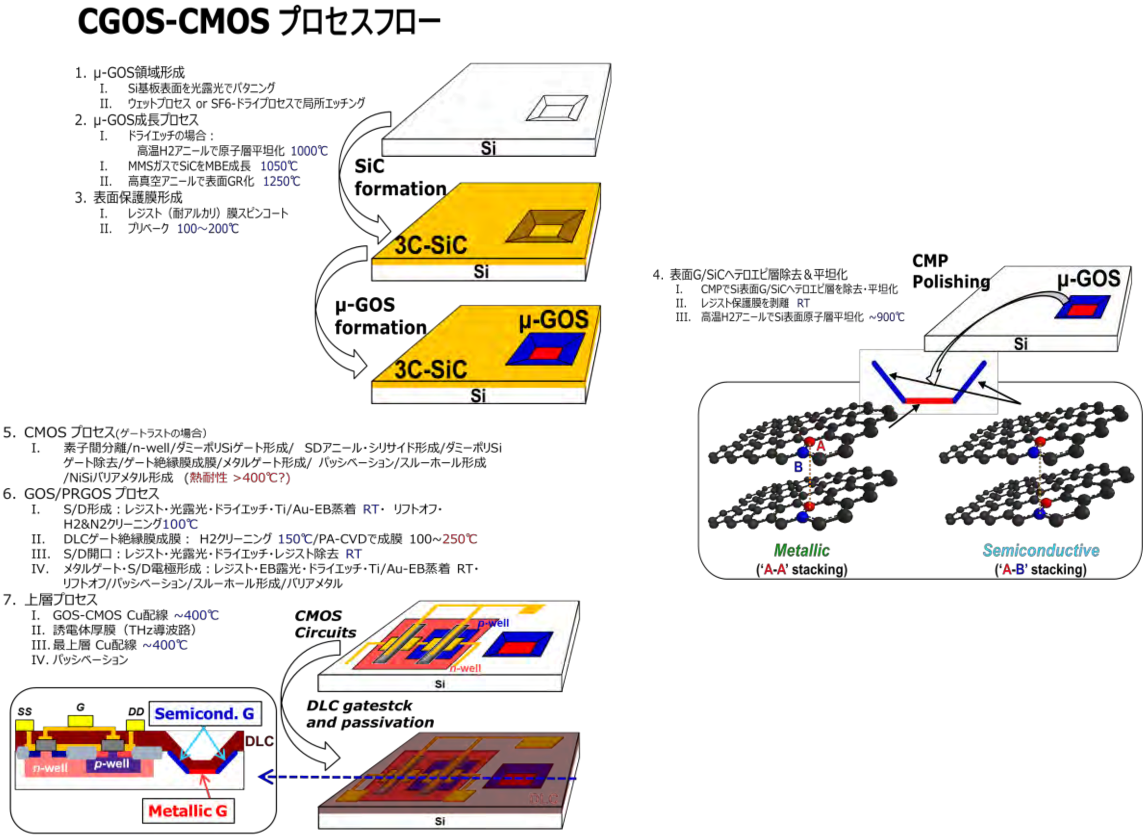


図 4.1.14 CGOS/PRGOS-CMOS 完全モノリシック集積化プロセス。

(2)研究成果の今後期待される展開

1. μGOS による GOS 結晶品質の向上と CGOS&PRGOS のモノリシック集積化技術

Si-CMOS と完全整合する GOS プロセス技術(図 4.1.13)を開発したことは、Si-CMOS が及ばないテラヘルツ周波数帯の信号処理を可能とするマイクロチップの製作が可能となることを意味する。テラヘルツ帯の信号配線には表面プラズモンによるミクロンオーダの導波路構造が有効であり、その接続にはサブミクロン以下の位置合わせ精度が要求されるが、現行のマルチチップ実装技術では実現が不可能である。本技術はこれを初めて可能にするものであり、超高速テラヘルツ無線や安心・安全のためのテラヘルツイメージング等、将来の ICT 社会を実現する新産業の創出が期待される(図 4.1.15)。

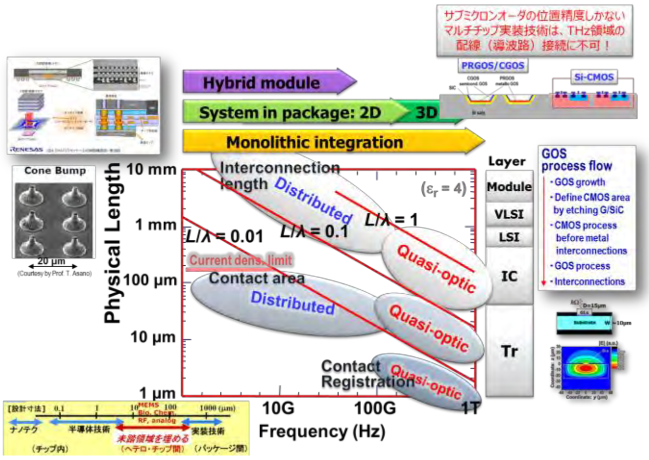


図 4.1.15 周波数と信号配線に要する物理寸法との関係にみる GOS 技術の優位性。

4．2 「GOS／PRGOSデバイス」(東北大学・電気通信研究所、尾辻泰一研究代表者グループ)

(1)研究実施内容及び成果

①研究のねらい

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）THz デバイス技術の開発

②研究実施方法

GOSFET に関しては、研究分担者・末光哲也が有する電子線露光による 30nm 級の微細ゲート加工技術と PCVD を中心とする薄層ゲートスタック技術を基本とし 100 nm 級の短ゲート FET を作成し、グラフェンの速度性能優位性を実証する。また、論理応用としては必然のバンドギャップ生成にはグラフェンシートのナノリボン加工、もしくは２層あるいは多層グラフェンによって実現する。

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。

③　当初の研究計画（全体研究計画書）に対する研究達成状況

当初計画とは異なる展開を成し、計画外の新しい成果が得られている。

④研究成果

<u>1．GOSFET デバイス技術の開発</u>

<1> バックゲート型 GOSFET を試作し、グラフェンの優れた電子輸送特性を確認した。（図 4.2.1）[32]。グラフェン化アニール工程で SiC エピ層に欠陥由来の伝導パスが形成され、SiC エピ層を介したチャネルから基板への著しいリーク電流成分が生じた。そこで、ゲート漏れ電流成分を等価回路モデル化しグラフェン真性チャネル領域の正味の電流・電圧特性を抽出した結果、真性チャネル領域におけるアンバイポーラ特性を確認するとともに，SiC エピ層をチャネルとする比較用デバイスとの特性比較から、n 型導電性のグラフェン極薄層が形成されていることを確認した（図 4.2.1）[29, 32]。 さらに、詳細な電流・電圧特性の解析ならびに Hall 効果測定を通して、電子移動度（電界効果移動度）が最大で 1000～6000cm²/V.s と同定された（図 4.2.1）[29]。同時に、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。SiC ゲート絶縁膜：80 nm、ゲート長：10 ミクロンの試作 GOSFET から、寄生成分を除去した真性 FET における相互コンダクタンスを抽出したところ、2.7 S/mm もの極めて高い数値を得た（図 4.2.2）[29]。

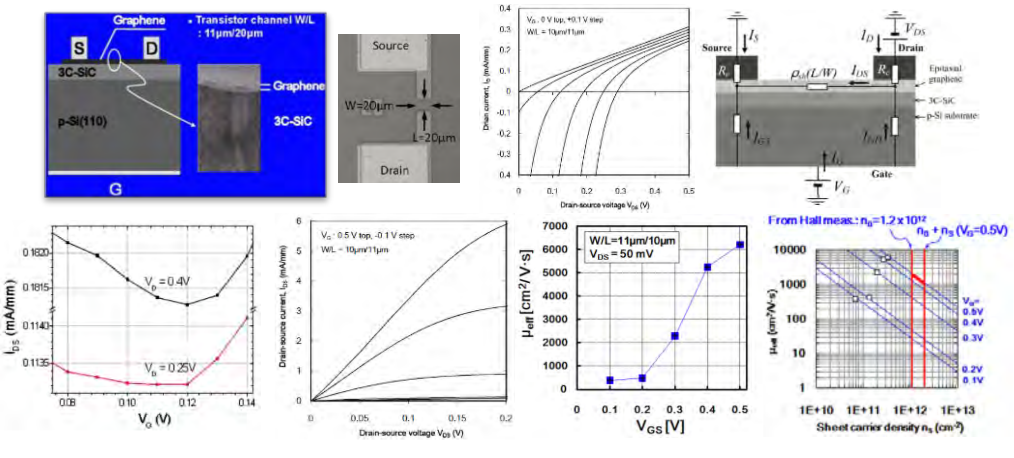


図 4.2.1　バックゲート型 GOSFET。上左:GOSFET 断面・上面写真、上中：基板リークを含むドレイン電流・電圧特性[29]。上右:基板リークパスを含む GOSFET 等価回路モデル。左下:アンバイポーラ特性[30]、左中下:GOS ドレイン電流・電圧特性[32]、右中下:電界効果移動度[32]、右下:Hall 移動度[32]。

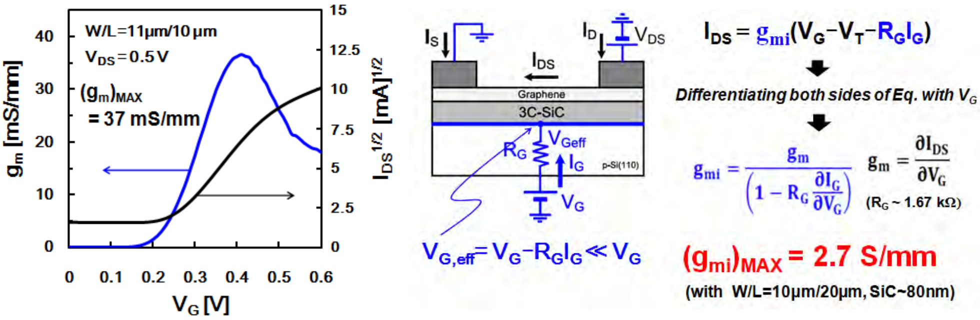


図 4.2.2 バックゲート型 GOSFET の相互コンダクタンス:gm。左：実測値、右：等価回路モデルによる真性 FET 領域の相互コンダクタンス:gmi の抽出[32]。

<2> GOS 上に PECVD 法で SiN 膜を形成することによってトップゲート型 GOSFET を試作し，トップゲート電圧によるドレイン電流変調を確認した[34]。同一ウェハー内の素子特性ばらつきは小さく、均一性が確認できた。しかし、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い結果に留まった（図 4.2.3）。寄生抵抗，オーミック電極のコンタクト抵抗に加え、ゲートスタック工程におけるグラフェンへのダメージやグラフェン SiN 絶縁膜界面の散乱機構等が大きく影響していることが推察され、その後の GOSFET ゲートスタック技術開発の契機となった。

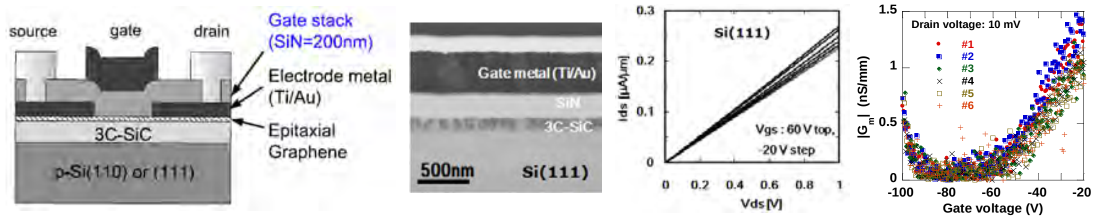


図 4.2.3 SiN ゲート絶縁膜によるトップゲート型 GOSFET。左上：断面構造、中上：断面 TEM 写真、右上：上面写真、左下：ドレイン電流・電圧特性、右下：相互コンダクタンス（Gm）のゲート電圧依存性。特性は 6 つの素子について評価し，ほぼ同じ特性が得られている[34]。

2. GOSFET 高性能・高機能ゲートスタック技術の開発

<1> GOSFET 高性能化の鍵は、酸化物 high-k 膜を直接適用できないゲートスタック技術と、安定なチャネルドーピング技術の実現にある。本研究において、グラフェンと同じ炭素材料であるダイヤモンド ライクカーボン(DLC)ならびに HMDS-SiCN をグラフェン上に「直接」ゲート絶縁膜加工することに成功した（図 4.2.4）。

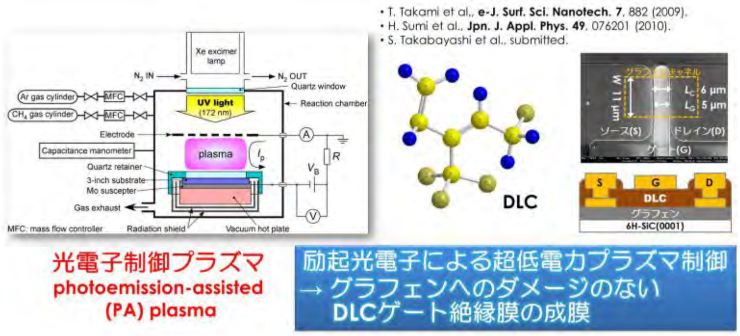


図 4.2.4 光電子制御プラズマ CVD (PA-CVD)法による DLC の 直接成膜 (東北大・高桑教授との共同)と、DLC ゲート絶縁膜によるグラフェン FET の試作例[65]。

<2> 光電子制御 CVD により製膜したダイヤモンドライクカーボン（DLC）を GOSFET のゲート絶縁膜に応用するプロセスを確立し，試作したグラフェンチャネル FET: GFET においてアンバイポーラ特性を確認した[65]（図 4.2.5）。また，チャネル長 2.5 μm、ゲート長 50 nm の GFET を試作し，電流利得遮断周波数として 4.5GHz を得た（未公表）。

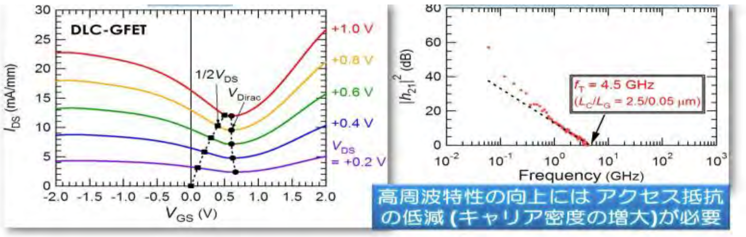


図 4.2.5 DLC をゲート絶縁膜に導入したグラフェンチャネル FET の伝達特性（チャネル長 6 μm、ゲート長 5 μm）[65]と電流遮断周波数特性（チャネル長 2.5 μm、ゲート長 50 nm）。

<3> 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立し，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[59]（図 4.2.6）。

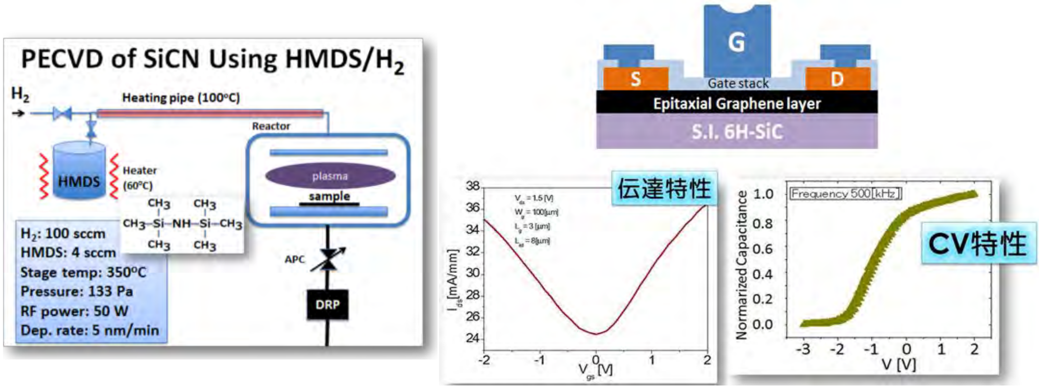
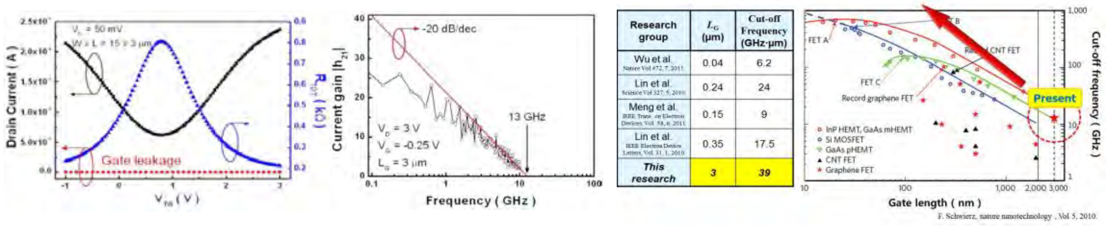


図 4.2.6 HMDS 気化導入プラズマ CVD による SiCN 絶縁膜の堆積(左)と SiCN ゲート絶縁膜を用いたグラフェン FET の断面構造と伝達特性と CV 特性（右）[59]。

<4> 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[47, 48]（図 4.2.7）。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 3μm で電流利得遮断周波数 f_T = 13 GHz（真性領域では f_T = 35 GHz）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（国際会議招待講演リスト番号[59]）。



Research group	L_G (μm)	Cut-off Frequency (GHz·μm)
Wu et al. Nature Vol 472, 7, 2011	0.04	6.2
Lin et al. Science Vol 327, 5, 2010	0.24	24
Meng et al. IEEE Trans. on Electron Devices Vol. 58, 6, 2011	0.15	9
Lin et al. IEEE Electron Device Letters, Vol. 31, 1, 2010	0.35	17.5
This research	3	39

図 4.2.7 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(中、右)。

3. 機能性 DLC 絶縁膜形成技術によるグラフェンリモートドーピングならびにグラフェン HEMT の提案

<1> 独自の光電子制御プラズマ CVD(PA-CVD)法を用いて DLC の誘電率および不純物濃度の厚み方向制御に成功した(図 4.2.8, 4.2.9)。high-k DLC ゲートスタック、low-k DLC サイドウォール・パッシベーション、さらには δ-ドープ DLC を駆使することによって、微細化 GOSFET による超高周波特性実現の見通しを得た。(国内特許出願リスト番号[5], 国際(PCT)特許出願リスト番号[5])

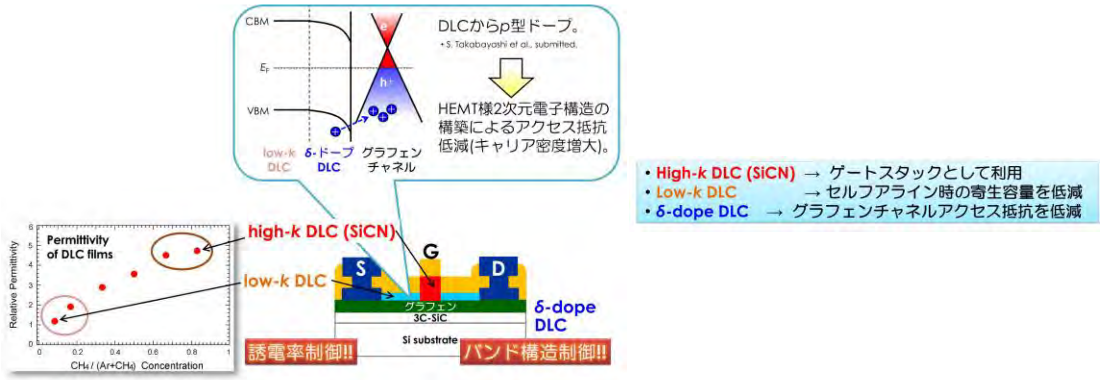


図 4.2.8 DLC による機能性絶縁膜。DLC 内不純物δドープによるグラフェンへのキャリアリモートドーピングのイメージ(上)。成長雰囲気内 CH_4 濃度による DLC 誘電率の制御(左下)。ゲートスタックへの High-k DLC、パッシベーションへの Low-k DLC の適用とδドープ DLC とによる高性能 GOSFET 開発戦略(右下)。

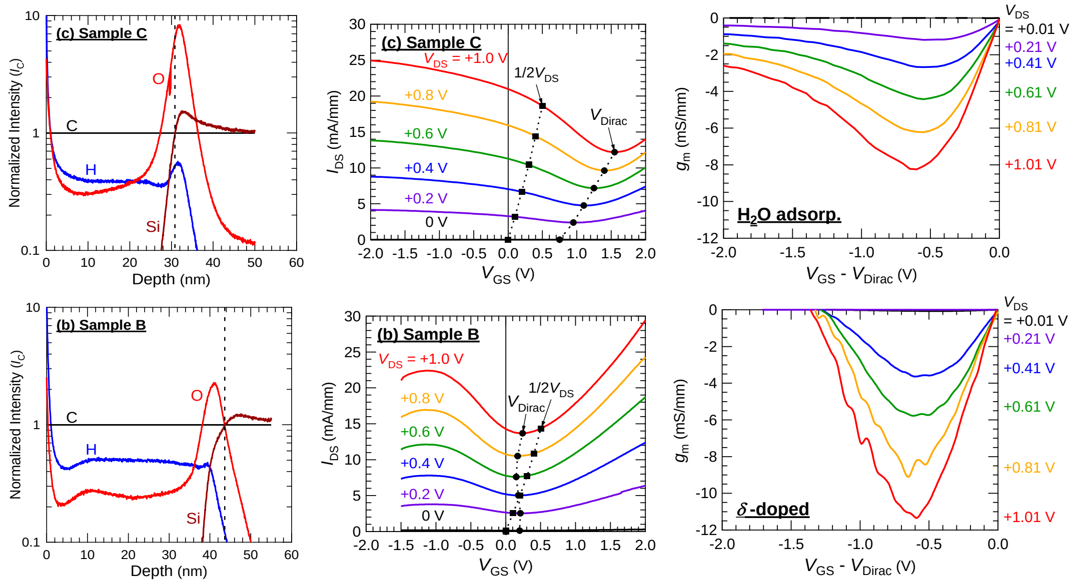


図 4.2.9 DLC 堆積前の水素アニール条件と DLC 堆積中の酸素濃度変調による酸素不純物の DLC 中へのδドーピングとそのチャネルリモートドーピング効果。上:DLC/グラフェン(SiC)界面に酸素不純物が偏析した結果、酸素不純物からの正孔リモートドーピングによってグラフェンチャネルが p 型(Dirac 電位が正にシフト)特性を示す。下:酸素不純物が DLC/グラフェン界面から DLC 内に 3 nm 入った位置にδドープされている。その分、上図に比してキャリアリモートドーピング効果が低減され、Dirac 電位は 0 V に接近。同一キャリア濃度での電界効果移動度は、酸素が DLC/グラフェン界面に偏析した上図に比して高く。HEMT の効果が得られている。ドレイン電流変調能力を表わす相互コンダクタンス:g_m は, ゲート絶縁膜厚が 1.5 倍厚いにもかかわらず, δドーピング効果によって 1.4 倍以上に向上している。ゲート絶縁膜厚で規格化するとδドーピングによる増大は 200%以上になる。

4. PRGOS デバイス技術の開発

<1> 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的な検証のための試料設計・作成を行った。グラフェンの高い移動度を考慮して、室温でも共鳴特性が観測可能なミクロンオーダの共振器サイズとしてグラフェンリボンをパターニング加工した。フェムト秒レーザーで励起した非線形光学材料：CdTe からの THz 電磁波放射パルスを本 GOS リボンに照射し、GOS リボン表面からの反射 THz 電磁波を時間分解計測し、そのフーリエスペクトルを観察したところ、グラフェンリボン内のプラズモンモードに対応した明瞭な吸収スペクトルの観測に成功した（図 4.2.10）。Hall 測定で同定した二次元電子濃度とリボン幅から推定されるプラズモン共鳴周波数と良い一致を示し、理論の妥当性を実証できた（国際会議ポスター発表文献リスト番号[34,41]）。また、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 4.2.10）。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る。

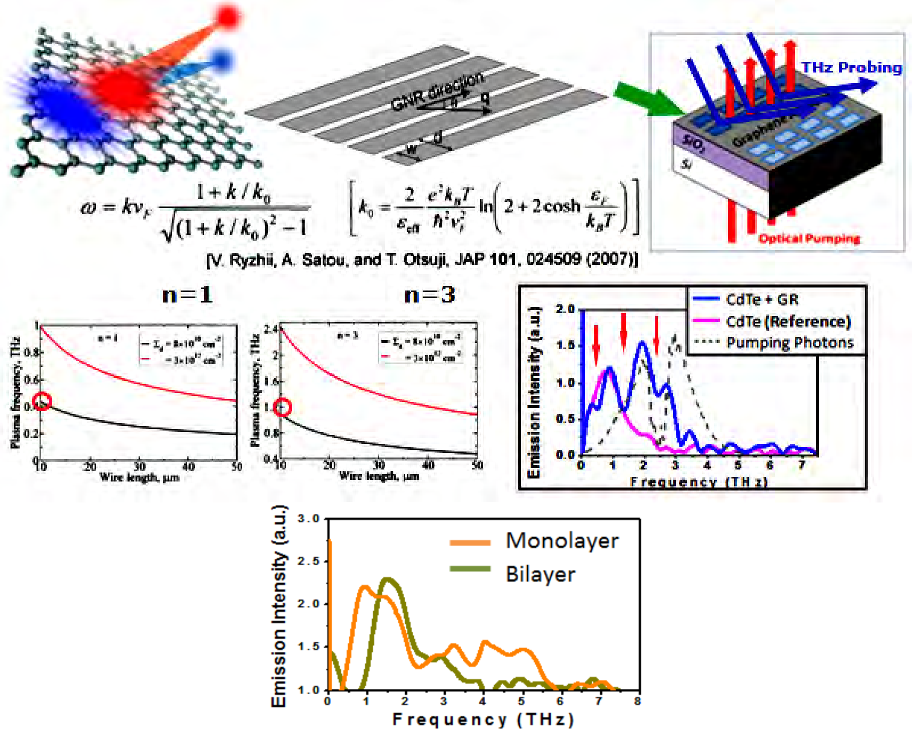


図 4.2.10　PRGOS リボンのプラズモン共鳴。理論計算による基本モード周波数（中段左）と３字モード（中段中央）のリボン幅依存性。中段右：フェムト秒 THz パルス励起により、サンプル表面から反射された THz 電場の時間分解測定で得られた Fourier スペクトル。理論計算（赤丸印）とよく一致する。下段：単層グラフェンと２層グラフェンのスペクトルの違い。２層グラフェンは低周波側のカットオフが 0.7 THz 上昇している。

<2> 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 帯利得の実験検証に成功した。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を室温下で観測した（図 4.2.11）[66]。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[53]。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（図 4.2.11）。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[66, 69, 70, 76-78]。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こととなった。

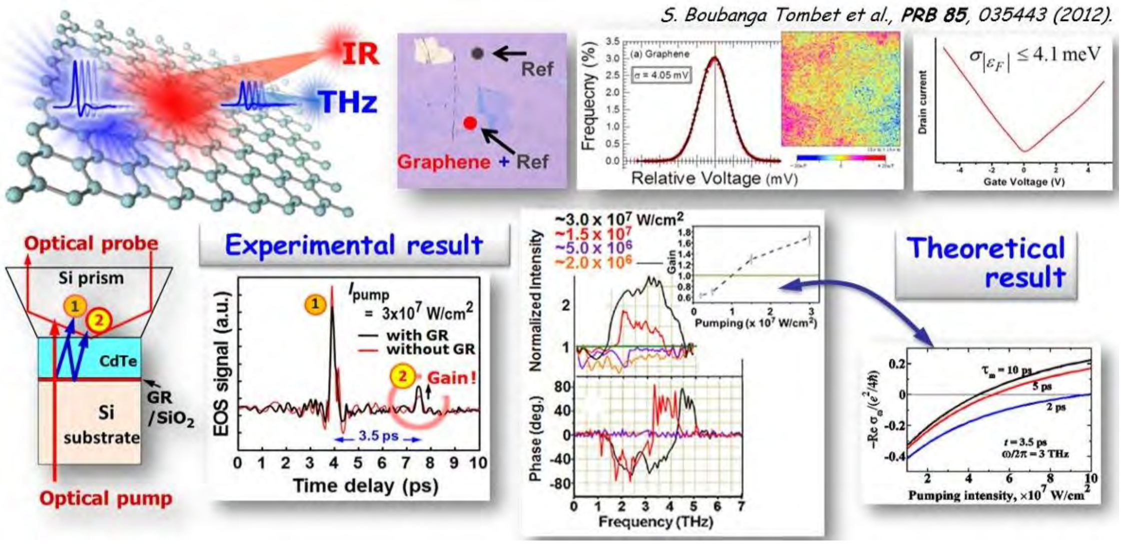


図 4.2.11 フェムト秒 IR レーザーによる光学励起グラフェンからの THz 誘導放出．実験のイメージ（左上）、被測定剥離グラフェンの光学顕微鏡像、ケルビンプローブによる表面ポテンシャル分布像、Dirac 電位がほぼ 0V のアンバイポーラ特性（以上は右上）、実験系、時間応答波形、利得スペクトルのポンピング閾値特性、ポンピング閾値特性の数値解析結果（以上は左下から右下の順）[66]。

＜3＞グラフェンチャネル FET(G-FET)を基本構造とするプラズモニックテラヘルツフォトミキサーの試作・検証を行った。電流遮断周波数 f_T = 4.5 GHz の試作 G-FET 素子を用いて、光通信用波長 1.5 μ m 帯連続波発振赤外線レーザー2光波混合光の照射による差周波 112.5GHz サブテラヘルツ波の発生を、当該サブテラヘルツ波と 12.5GHz 離調した 125GHz ローカル信号のゲート入力による中間周波数信号 12.5GHz の出力生成によって観測することに成功した(図 4.2.16)。f_T = 4.5 GHz の G-FET であっても、真性領域は 100 GHz 超の高周波応答性能を有することが明らかになった(図 4.2.12) [国際会議口頭発表文献番号[109]]。

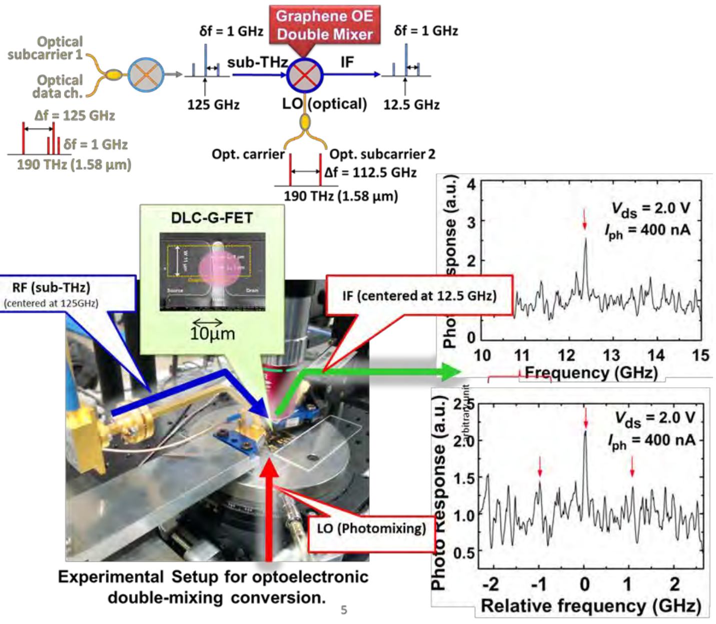


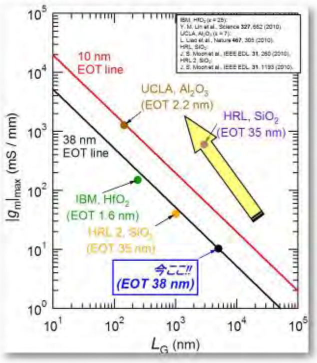
図 4.2.12 グラフェンチャネル FET（G-FET)構造によるプラズモニックサブテラヘルツフォトミキサーならびに、フォトミキサーとサブテラヘルツ RF 信号のミキシングによる光電子融合ダブルミキシング動作の実験検証結果。

電流遮断周波数 f_T=4.5 GHz の高周波性能に乏しい G-FET にもかかわらず、f_Tより１桁以上高いサブテラヘルツ帯光差周波信号によって真性グラフェンチャネル領域ではサブテラヘルツ光電流が生成され、ドレイン端子からは光起電力成分としてスペクトル成分検出することに成功している。

(2)研究成果の今後期待される展開

1. GOSFET, CGOS デバイス技術

<1> 開発した高性能・高機能 DLC ゲートスタック技術とセルフアラインメントプロセス技術の導入により、ゲート長 100 nm クラスの GOSFET によってトランスコンダクタンス 3 mS/mm、電流遮断周波数 1 THz 前後の超高周波トランジスタ実現の見通しが得られた（図 4.2.13）。



Research group	L_G (μm)	Cut-off Frequency (GHz·μm)
Wu et al. Nature Vol 472, 7, 2011	0.04	6.2
Lin et al. Science Vol 327, 5, 2010	0.24	24
Meng et al. IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 58, 6, 2011	0.15	9
Lin et al. IEEE Electron Device Letters, Vol. 31, 1, 2010	0.35	17.5
This research	3	39

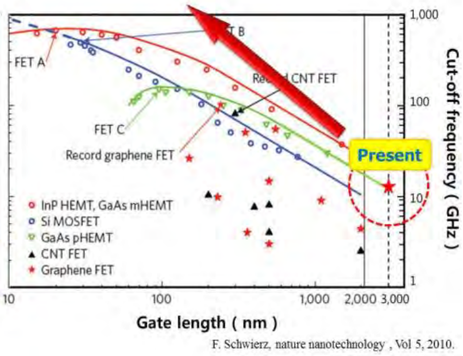


図 4.2.13 左上：Gm のスケーリング予測。右上：fT のスケーリング予測。

<2> Si-CMOS と CGOS・PRGOS の完全モノリシック集積化とそのテラヘルツ ICT システムへの応用

1. PRGOS デバイス技術

<1> GOSFET を基本構造とする巨大プラズモン不安定性の発現に有効なデバイス構造提案に基づくプラズモン共鳴型 THz エミッターの試作・実証・評価を進めることにより、世界初の室温動作半導体コヒーレントテラヘルツ発振デバイスの実現が大きく期待される(図 4.2.14, 4.2.15)。

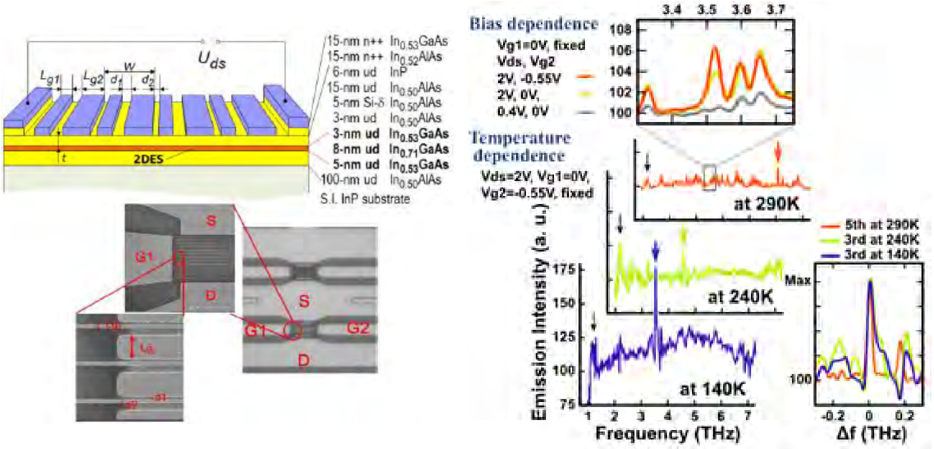


図 4.2.14 InP 系ヘテロ接合材料システムによる非対称二重回折格子ゲート(A-DGG)プラズモン共鳴型 THz エミッター素子からの THz 電磁波放射スペクトル特性。A-DGG 構造の導入により、ホットプラズモン励起に伴うインコヒーレントな広帯域放射が抑止され、コヒーレント単色放射に今一歩のところまで迫っている[78]。グラフェンの導入により、プラズモン共鳴による世界初の室温コヒーレント単色 THz 光放射が期待できる。

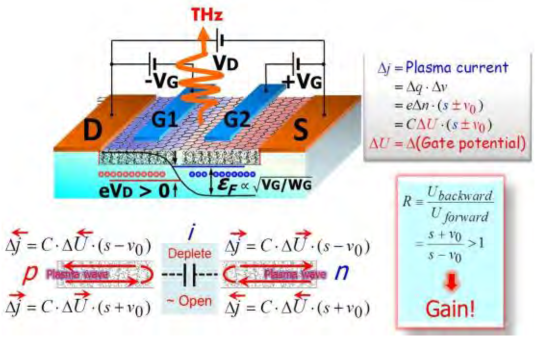


図 4.2.15 デュアルゲートGOSFET構造によるグラフェンプラズモン巨大不安定性を利用した、コヒーレント単色テラヘルツ発振デバイス。レーザー発振動作時とは異なり、ドレインバイアスを強く印加し、プラズモン不安定性を誘発させる。

2. GOS 技術において述べた Si-CMOS と完全整合する CGOS・PRGOS プロセス技術実現の見通しを得た（図 4.1.14）。本技術は、Si-CMOS が及ばないテラヘルツ周波数帯の信号処理を可能とするマイクロチップの製作が可能となることを意味するものであり、超高速テラヘルツ無線や安心・安全のためのテラヘルツイメージング等、将来の ICT 社会を実現する新産業の創出が期待される。PRGOS によるテラヘルツ搬送信号発生器、超高速テラヘルツ波コーディング用変調器、超高速テラヘルツ波検出・ミキサー、CGOS による最終段のデータ信号多重・分離回路、そして CMOS による信号並列化処理以降の低速大規模集積回路が Si 基板上にモノリシック集積化される（図 4.2.16）。同時に、プラズモンモードを電子走行モードに切り替えることによって、同一ハードウェアチップでありながら、搬送周波数をテラヘルツ帯からミリ波・マイクロ波帯に切り替えるマルチモード、マルチバンド動作の可能性が示唆される。

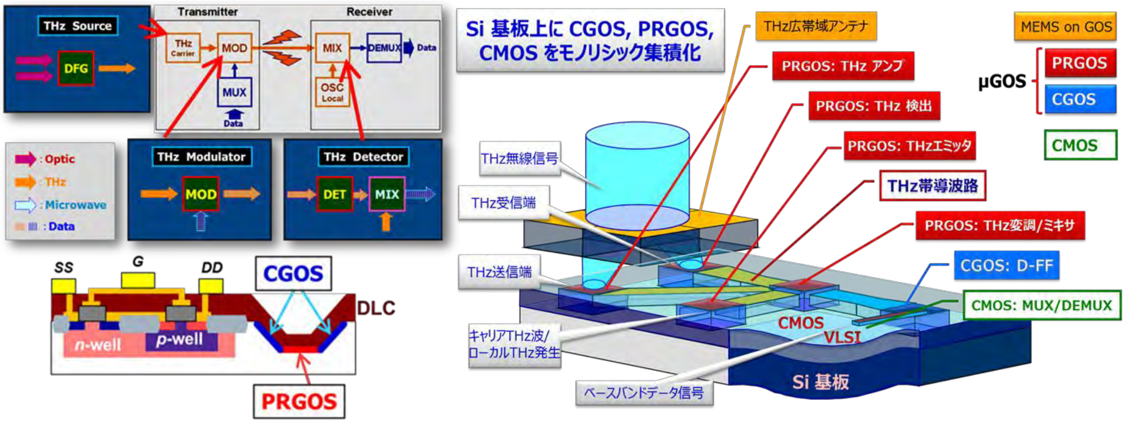


図 4.2.16 PRGOS-CGOS-CMOS によるテラヘルツ超高速無線通信フロントエンドの実現イメージ。

4. 3 「GOS・PRGOSモデリング」（会津大学、RYZHII Maxim グループ）

(1)研究実施内容及び成果

①研究のねらい

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

②研究実施方法

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。

③当初の研究計画（全体研究計画書）に対する研究達成状況
当初計画以上の成果を達成している。

④研究成果

<u>1. GOS デバイスモデリング技術の開発</u>

<1> ディラックフェルミオン・キャリア輸送型デバイスを対象として、電子正孔散乱の主要因となる音響フォノン散乱、長距離不均一性と点欠陥による電子散乱をモデル化した[1,6,14]。これを基に、単層グラフェンナノリボンチャネル FET、ならびに 2 層グラフェンチャネル FET の直流ならびに高周波 AC 解析用モデルの構築を行い、動作特性の解析のための定式化を行なった（図 4.3.1）[3-5, 7, 14, 15]。

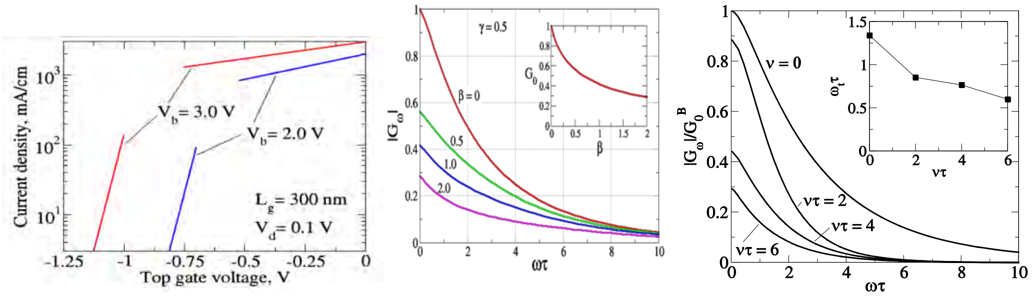


図 4.3.1. グラフェンナノリボンチャネル FET（左、中）における動作特性。左：DC ドレイン電流のゲートバイアス依存性[4]、中：AC トランスコンダクタンスの周波数依存性（挿入図は DC トランスコンダクタンスの電子衝突パラメータ依存性）[7]、右：二層グラフェンチャネル FET における AC トランスコンダクタンスの周波数依存性[15]。

<2> 二層グラフェンFETの理論解析モデルを、弱非局所近似ポアッソン方程式を加えることによって大幅に拡張し、FETの電流－電圧特性ならびにトランスコンダクタンスの構造パラメータ・電圧依存性の理論式を導き出し、解析を行なった（図 4.3.2）[36]。このモデルにおいては、短ゲート効果およびドレイン誘起バリアの効果が明示的に取り入れられている。解析の結果、トランスコンダクタンス－トップゲート電圧特性が著しいピークを持つことを示した。そして、短ゲート効果と電子散乱の相互作用によって、トランスコンダクタンスのトップゲート長依存性が非単調であることを示した。

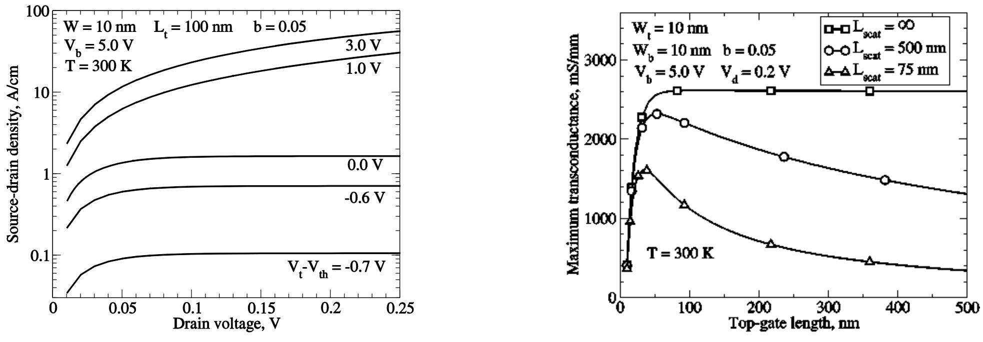


図 4.3.2 左：二層グラフェンＦＥＴにおける電流－電圧特性[36]、右：最大トランスコンダクタンスのトップゲート長依存性 [36]。

<3> 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ッ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[36]。

<4> 多層グラフェンにおける電子・ホール密度のトップゲート電圧による制御性の理論解析を行なった[34]。その結果、グラフェンの層数が 10 程度以下であればゲートによる制御が十分可能であることを明らかにした(図 4.3.3)。

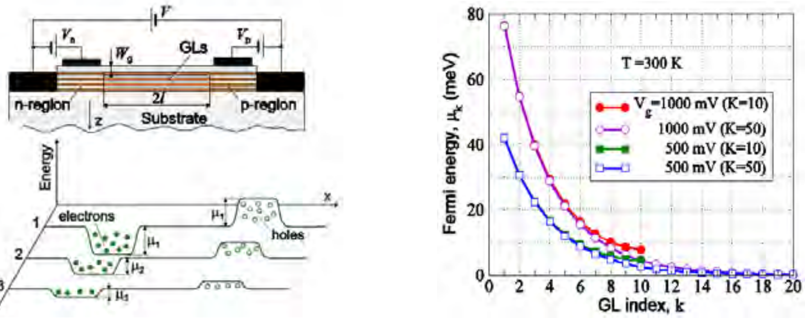


図 4.3.3 左：多層グラフェンＦＥＴにおけるトップゲート制御性の模式図[34]、右：トップゲート電圧印加時におけるフェルミ準位の層依存性[34]。

2. PRGOSデバイスモデリング技術の開発

<1> PRGOS 応用の基本要素構造となるゲーテッドグラフェンおよびグラフェン・ナノリボンにおけるプラズモンの理論解析を行ない、グラフェン固有のキャリア分散特性を反映したプラズモン分散関係を定式化した。従来の二次元電子系と比較して、Dirac Fermion 特有の分散特性（波数ベクトルに比例するが電子濃度（ゲートバイアス）の 1/4 乗に比例する）を明らかにした。優れたキャリア輸送特性に加え、エネルギーに比例する高い状態密度と相まって、波数ベクトルの大きさと方向に依存して、プラズモンモード（共鳴）が広範囲のTHz帯域で高い Q 値で制御できることを明らかにした（図 4.3.4)[26]。

<2> グラフェン中の電子－ホールプラズマを記述するユニバーサルな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 4.3.5）[68]。その結果、以下の重要な知見を得た。すなわち、モノポーラ（n 型または p　型　）

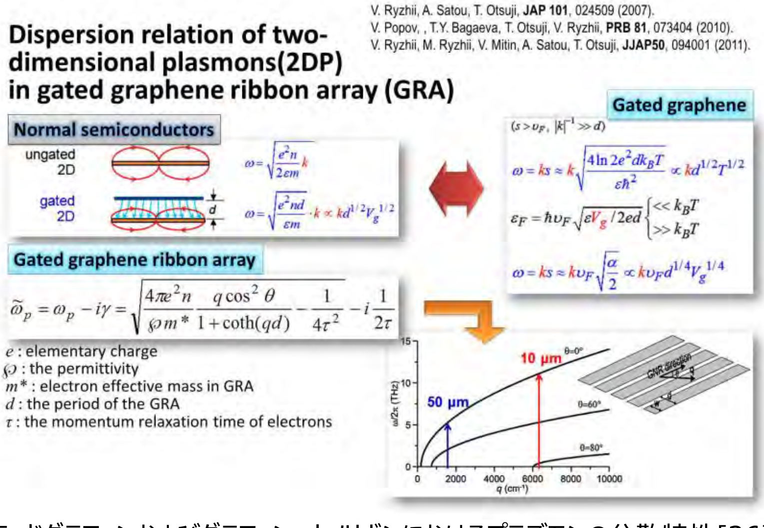


図 4.3.4 ゲーテッドグラフェンおよびグラフェン・ナノリボンにおけるプラズモンの分散特性[26]。

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、多数キャリアのプラズマ波が優勢となり少数キャリアのプラズマ波は強い減衰を受けることを明らかにした。また、対称バイポーラプラズマ（n=p）の場合、電子

-正孔間散乱によりバイポーラプラズマ波（電子と正孔が逆位相で変位するモード）は強い減衰を受けること、電子と正孔が同位相で変位する無極性の音響波的な波が優勢に励起されることを明らかにした[68]。 この結果は、バイポーラモードの電子・正孔間散乱が抑制されることを意味し、以下に示すグラフェンレーザー実現のための反転分布の形成を助ける重要な機構の解明としても意義が高い。

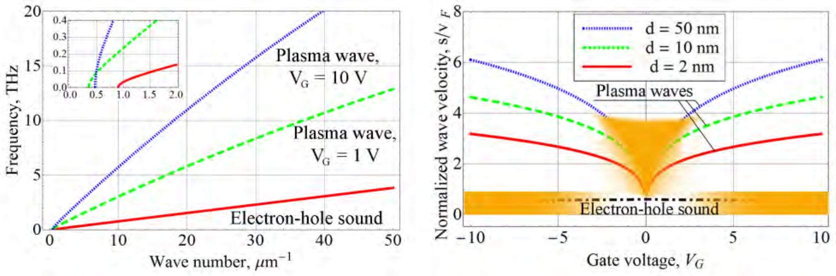


図 4.3.5 異なるゲート電圧下におけるプラズマ分散関係（左）． プラズマ速度のゲート電圧およびゲート・チャネル間距離 d に対する依存性(右)[68].

<3> 光学励起グラフェンの光励起キャリア緩和・再結合過程をモデル化し導電率を解析した結果、THz 帯において負性導電率・反転分布形成が可能なことを明らかにし、THz 帯における新種のレーザー光源の実現可能性を見出した（図 4.3.6）[2, 20, 53, 57, 58, 87]。

<4> さらに、縦型共振器構造ならびにスロットライン導波路型共振器構造による多層グラフェン THz レーザーのモデリングを行い、各々の構造・物性パラメータに対する利得スペクトル特性を明らかにした(図 4.3.7) [19-21, 27]。

<5> ポンピングフォトンエネルギーの低下がキャリア温度上昇の抑制したがってポンピングしきい値の低下に有効であることから、その極限として電流注入型レーザーの発想に至り、デュアルゲート型 GOSFET による PRGOS レーザーデバイス構造を発案した[25, 60]。提案した素子構造のモデリングを行い、物性・構造パラメータに対する利得スペクトル特性を解析に、光学励起レーザーに対する優位性を定量的に明らかにした(図 4.3.8)[60,77, 87]。

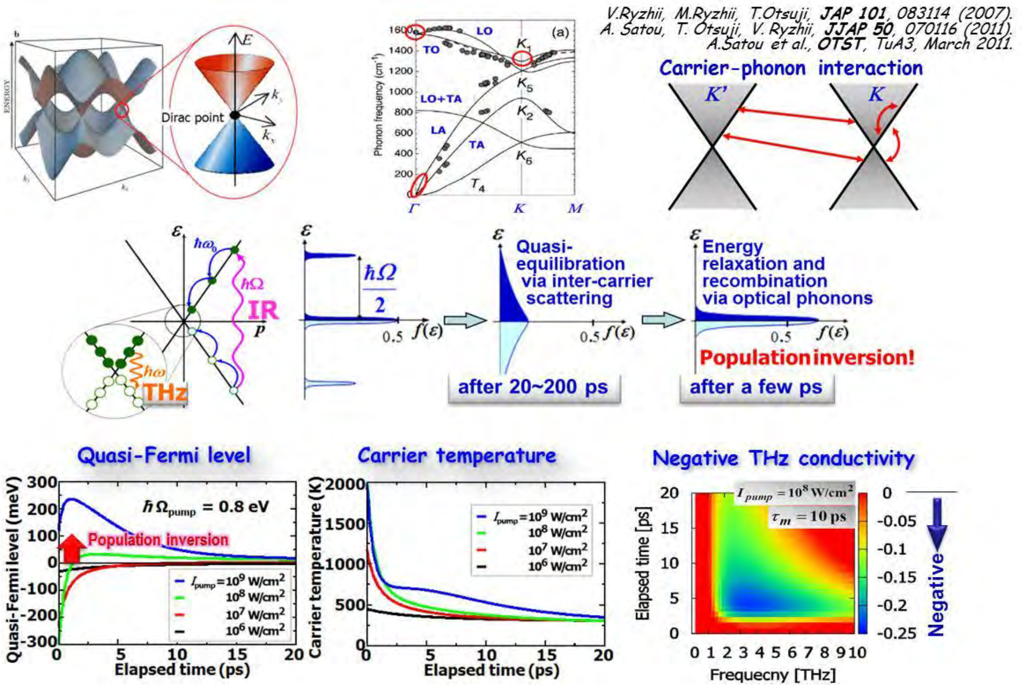


図 4.3.6 グラフェンのバンド分散特性、フォノンバンド図、光学フォノン散乱（以上は左上から右上の順）、光学励起グラフェンのキャリアエネルギー緩和の様子（中段）、赤外線レーザーによるインパルスポンピング後の電子疑似フェルミ準位（左下）、キャリア温度(中下)、および導電率(右下)の時間発展解。ポンピングによってキャリア温度が一気に上昇するが光学フォノンの放出によるエネルギー緩和によってキャリア温度は急速に低下し、それにともなって、疑似フェルミ準位が上昇し一定のポンピング強度以上では 10ps 以上の時間にわたって正値（反転分布）を保つ。その結果、ポンピングから2ps程度の内に、導電率は広いテラヘルツ帯で負値になり、10ｐｓオーダの時間スケールで平衡状態へと推移する。[53, 69, 70, 76-78]

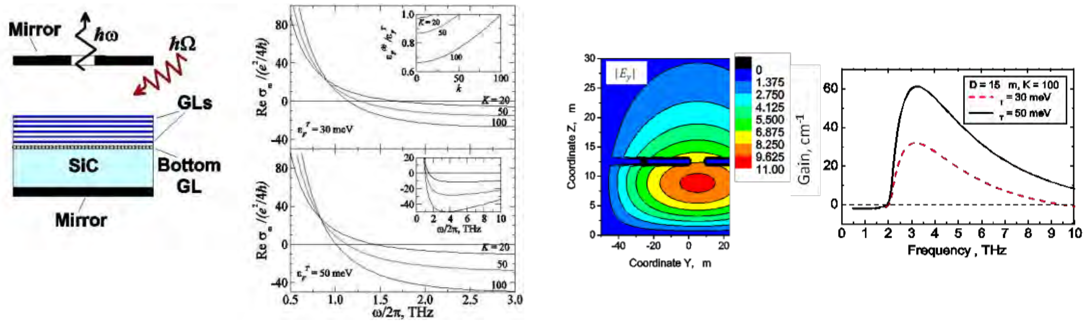


図 4.3.7 左：多層グラフェンを用いた縦型共振器レーザーの光ポンプ時における伝導率の周波数依存性（K はグラフェン層数、εFT は最上層における擬フェルミエネルギー）[20]。右：スロットライン絶縁体導波路組み込み型の多層グラフェンＴＨｚレーザーにおける、放射 THz 波強度分布と光ポンプ時における出力周波数－利得係数特性 [27]。

<6> 光学励起によって反転分布状態にあるグラフェン表面に励起される表面プラズモン・ポラリトンのテラヘルツ帯利得増強特性を解析的に発見し、他に先駆けて実験検証に成功した[39, 97]（図 4.3.9, 4.3.10）。通常の光学励起・電流注入励起で得られる負性導電率に比して、実に 4 桁以上の利得である。これは、テラヘルツ電磁波の増幅作用を有するアクティブ導波路の形成が可能なことを意味する極めて顕著な成果である。

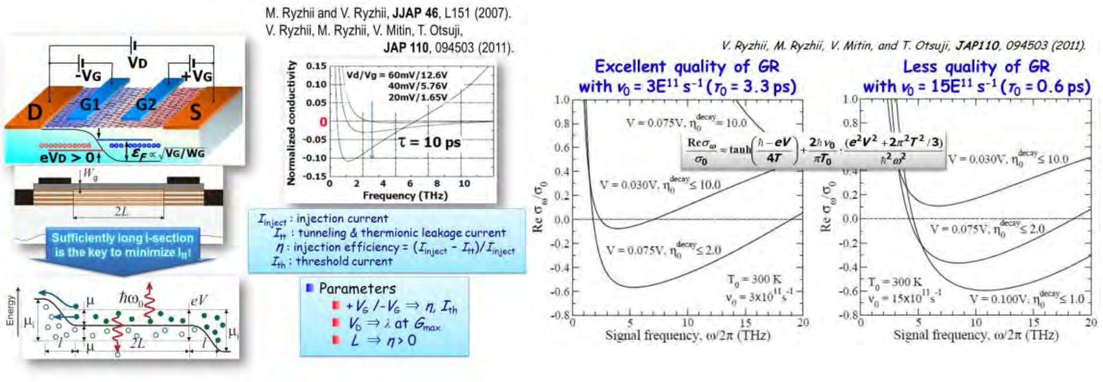


図 4.3.8 デュアルゲートGOSFET構造による電流注入型グラフェンテラヘルツレーザー。素子構造断面図およびバンド図（左）[25, 60]、ドレインバイアス Vd, ゲートバイアス Vg をパラメータとして導電率特性第一近似解析結果（左中）[25]、右：デュアルゲート GOSFET 構造による電流注入型グラフェンテラヘルツレーザーの高精度モデルに基づく導電率特性解析結果。光学フォノンのエネルギー緩和速度因子(熱伝導度因子)： η_0^{decay} を導入し、熱伝導（放熱）特性に対する依存性も明らかにしている。キャリアの運動量緩和時間を高品質、中品質グラフェンを想定し、各々3.3ps（左）、0.6ps(右)を仮定している[60]。

<7> <6>の単一導波路構造に対する理論を発展させ、グラフェン上に金属回折格子を設置したメタルグレーティンググラフェンの負性導電率特性をモデリングし、プラズモンモードに対応した利得スペクトルの狭帯域化ならびにそれに伴う巨大利得増強効果および超放射現象が得られることを発見した（図 4.3.11）。室温テラヘルツレーザー発振実現に極めて有効な素子構造である[80, 99]。

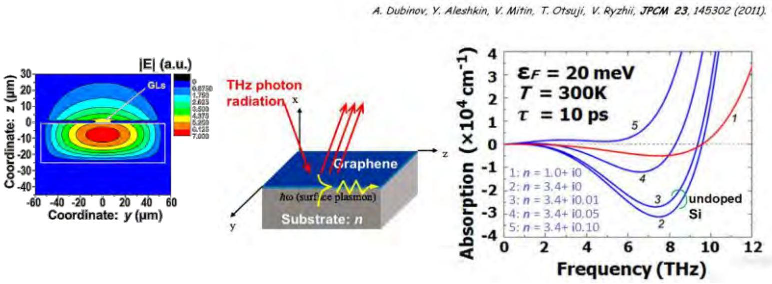


図 4.3.9 光学励起によって反転分布状態におかれたグラフェンに励起された表面プラズモンのテラヘルツ帯利得増強効果。テラヘルツ帯導波路は放射損と自由キャリア吸収が大きく低損失化が困難であり、量子カスケードレーザーでも高温動作化の障壁となっている。本成果はその導波路自体に巨大な利得増強効果が得られることを示したもの。[39]

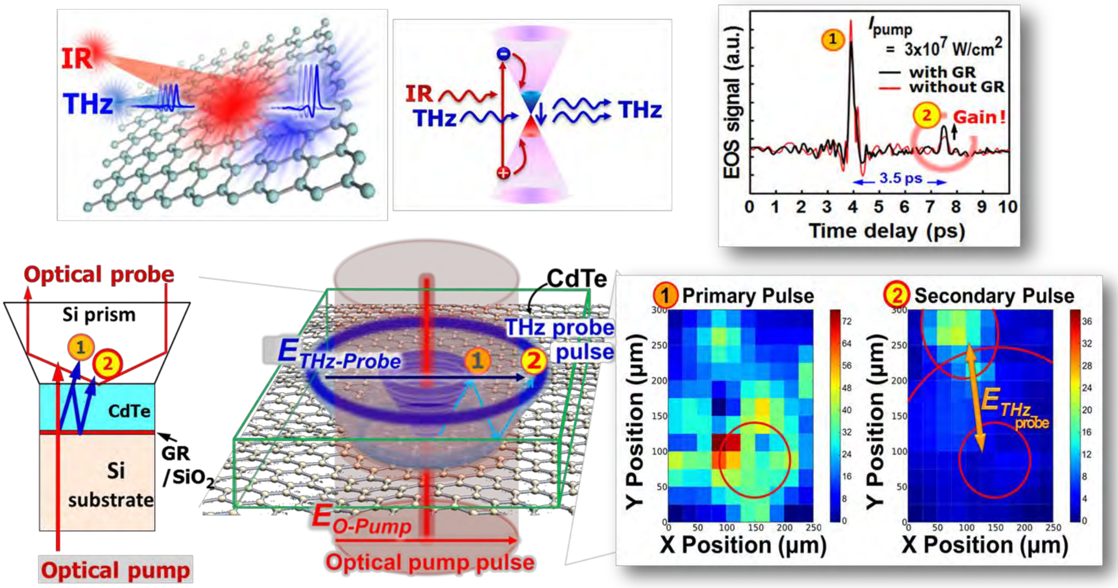


図 4.3.10 フェムト秒赤外レーザーでポンピングした反転分布状態にある単層剥離グラフェンへのテラヘルツパルス照射に伴う誘導放出ならびに表面プラズモンポラリトン(SPP)励起による巨大テラヘルツ利得の実証実験結果。直線偏光の赤外フェムト秒パルスレーザー照射によって、グラフェン直上に設置した非線形光学 CdTe 結晶内ではその光整流効果によって直線偏光のテラヘルツパルスが同心円状に Cherenkov 角に沿って成長する。CdTe 上面で反射したテラヘルツパルス(図中①で表示)が図のようにさらに同心円状に広がって下降し、グラフェンを照射しグラフェン内キャリアの再結合・テラヘルツフォトン放出を誘導する。その際、TM モードで入射する領域ではグラフェン内 SPP が励起され、SPP が 10μm 程度伝搬する間に巨大利得作用で増幅され、再度テラヘルツフォトンに変換されて、反射テラヘルツ光として CdTe 上面にエコー信号として戻ってくる(図中②で表示)。SPP の巨大利得作用が得られる限られた領域のみ、反射テラヘルツ光の強度が桁違いに増強されていることが観測結果に現れている。[97]

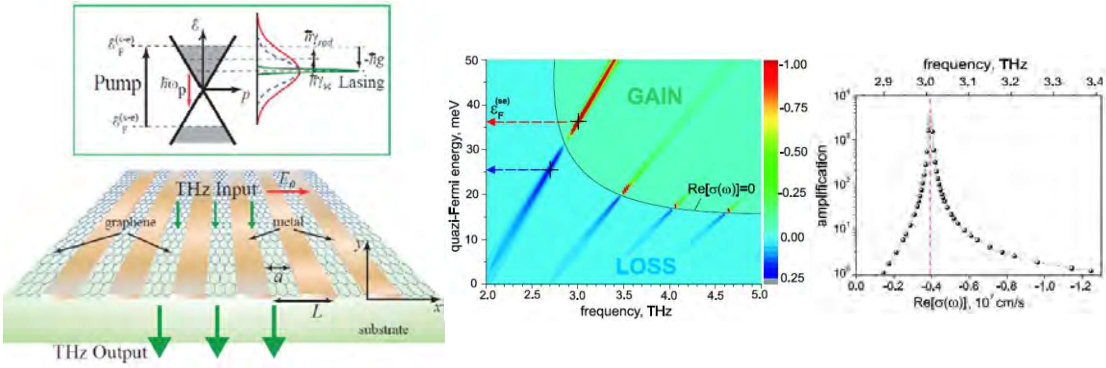


図 4.3.11 金属回折格子を設置したグラフェンの表面プラズモンポラリトンによるテラヘルツ帯巨大利得増強作用 [80, 99]。

<8> グラフェンの THz 波増幅と金属周期開口のプラズモンによる電場増強効果を利用したTHz 増幅器を考案し、電磁界解析によって電場増強効果による利得増強作用の存在を理論・実験両面から明らかにした(図 4.3.12)[50, 74]、(図 4.3.13)[投稿済み・査読中]。PRGOS の新しい素子構造への導入が期待できる。(佐野グループが主体となり、Ryzhii グループ、尾辻グループとの連携により得られた成果)

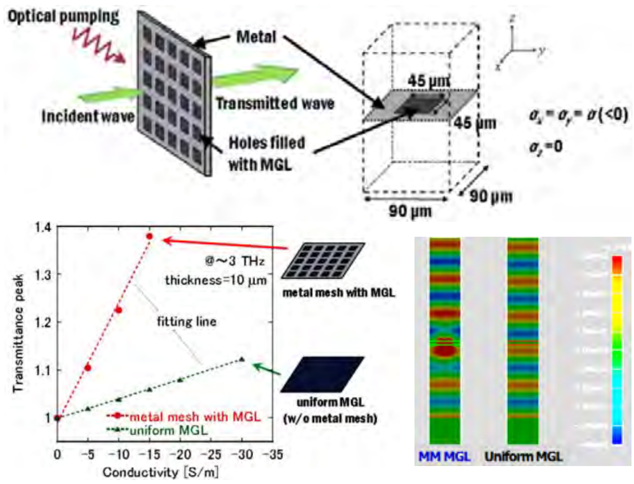


図 4.3.12 光学励起によって反転分布状態におかれたグラフェンに金属メッシュ構造を施した場合に得られるテラヘルツ波透過励における利得増強効果。単純平面グラフェンに比して高い増幅効果が得られる。[50, 74]

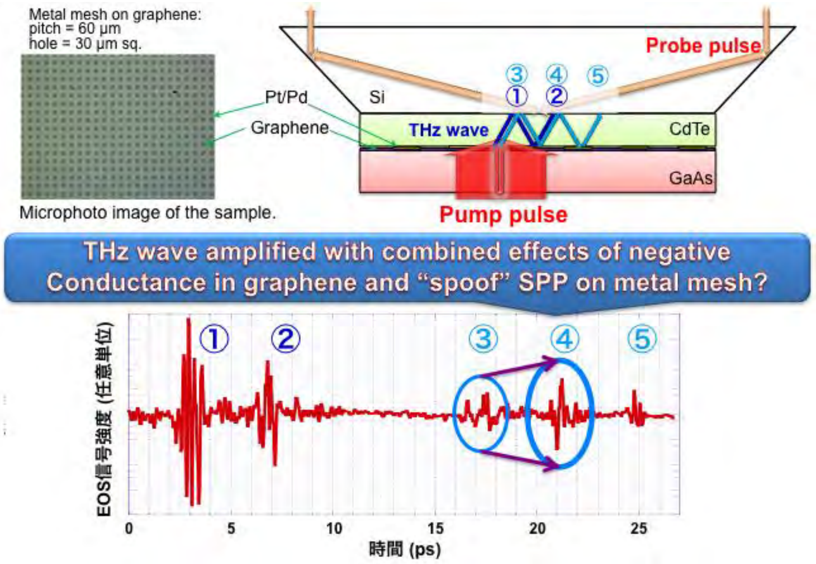


図 4.3.13 半絶縁性 GaAs 基板上グラフェン&金属メッシュ構造に対する光ポンプ・テラヘルツプローブ・光プローブ法による利得増強作用の観測実験。赤外フェムト秒パルスレーザー（Pump pulse）照射によって、グラフェン直上に設置した非線形光学 CdTe 結晶内ではその光整流効果によってテラヘルツパルスがCherenkov 角に沿って成長する。CdTe 上面で反射したテラヘルツパルス(図中①で表示)が図のようにさらに同心円状に広がって下降し、グラフェンを照射しグラフェン内キャリアの再結合・テラヘルツフォトン放出を誘導する。その際、金属メッシュによって特徴付けられた SPP が励起され、SPP の巨大利得作用で増幅されて、再度テラヘルツフォトンに変換されて、反射テラヘルツ光として CdTe 上面にエコー信号として戻ってくる(図中②で表示)。光ポンプパルスは GaAs 基板内で反射往復し、遅れて再度グラフェン、CdTe 結晶に入射され、上記と同様のテラヘルツプローブ・エコー信号が遅れて観測される（図中③～⑤で表示）。特に、③から④に至る間のグラフェン・金属メッシュ構造による利得増強作用が明瞭かつ顕著に観測されている。

<9> グラフェン中における光励起電子・正孔のエネルギー緩和モデル、およびグラフェンの光伝導度に関する理論を構築した。多層グラフェンならびにグラフェンナノリボンを用いたTHz波・遠赤外光領域における p-i-n 接合型光検出器の提唱と光応答性および検出度の評価を行ない、従来の CdHgTe 量子井戸・量子ドット検出器を超えるポテンシャルを有することを明らかにした[12, 28, 51, 64, 71]。

<10> 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・ナノリボンを用いた THz 波－中赤外線におけるフォトトランジスタ、ならびにテラヘルツ変調器のモデリングを行い、実現可能性を明らかにした[3, 12, 17, 18, 28, 51, 54, 64, 71, 79, 83, 86]。

(2)研究成果の今後期待される展開

CGOS、PRGOS のデバイス試作検証を通してデバイスモデリングの高精度化が一層進むことが期待される。このことは、CGOS、PRGOS 各々の単体素子としての性能向上のみならず、CGOS、PRGOS を CMOS と完全モノリシック集積化するプロセスの見通しを得たことにより、SSI あるいはMSI クラスの PRGOS/CGOS/CMOS 複合回路シミュレーターとしての発展が期待される。

4. 4 「CGOSロジック」（北海道大学、佐野栄一グループ）

(1)研究実施内容及び成果

①研究のねらい

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

②研究実施方法
バックゲートGOSFET 試作品による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。
③当初の研究計画(全体研究計画書)に対する研究達成状況
当初計画した速度性能の検証は、GOSFET 試作からの数値解析予測に留まっているが、本 CREST 研究を通して新たに判明したスイッチングデバイスとしての多くの困難を克服する手段(素子構造、プロセス技術)を明らかにした。その結果、CGOS の On/Off 比と速度性能との相関を明らかにし、CGOS の適用領域を明確化した。
④研究成果
<u>1. 理論・数値解析による GOSFET, CGOS 速度性能優位性の検証</u>
<1> アンバイポーラ特性を有するバックゲート型 GOS のデバイス構造を検討し、デバイスシミュレーションによる静特性評価をもとに、バルク CMOS 及び極薄膜 SOI に対する高速動作及び短チャネル効果に関する優位性を理論的に明らかにした[8] 。

<2> 強束縛(TB: Tight binding)法を用いてグラフェン・ナノリボンのエネルギーバンド構造を計算し、FET チャネルに適した構造はナノリボン(ナノメートルオーダの極狭窄リボン)ではなく、幅広(数十 nm 以上)のアームチェア型二層グラフェンであることを明らかにした(図 4.4.1)[22] 。

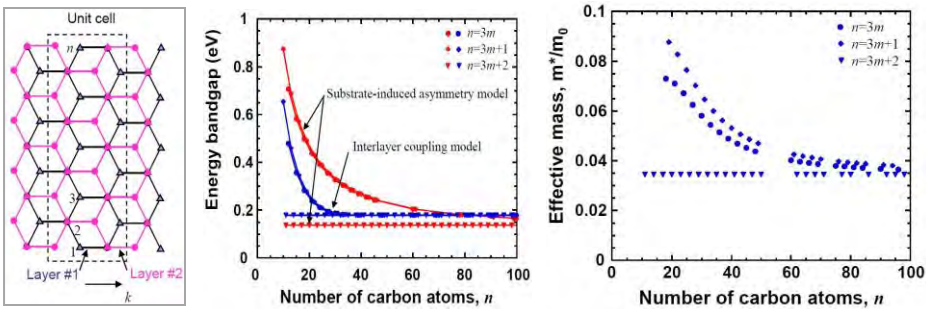


図 4.4.1 強束縛法によるバイレイヤーグラフェンのエネルギーバンド、有効質量計算結果[22]。

<3> ドリフト・拡散近似の2次元デバイスシミュレータを開発し、GOSFET の短チャネル効果と動作速度を解析した結果、Si-SOI MOSFET および Si-DG (double gate) MOSFET の ITRS 値より一桁高い速度性能を達成できる見通しを得た [13] 。

<4> CGOS の CMOS に対する速度優位性の予測を立てるために、180 nm CMOS の移動度と飽和速度を変えてインバータの回路シミュレーションを行った。その結果、CGOS は CMOS の約 15 倍高速動作が期待できること、ソース・ドレイン抵抗の低減が重要であることを示した(図 4.4.2) [56, 63]。また、弾道輸送が期待されるゲート長領域について、化合物半導体のモンテカルロ解析結果を参考に CGOS インバータの遅延時間を見積もった結果、17 nm ゲートにおいて 0.3 ps 弱の可能性があることを示した(図 4.4.2) [63]。

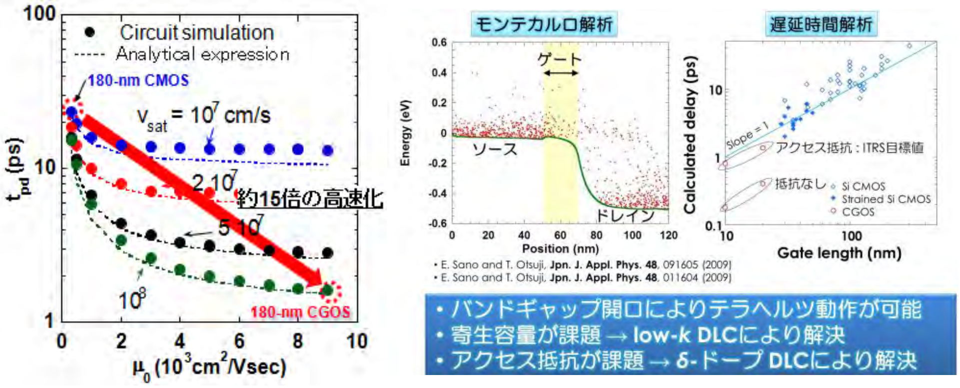


図 4.4.2 CGOS 動作速度の予測。

2. CGOS 論理ゲートの設計・試作・検証

<1> チャネルドーピングが困難な現状では n-GOS, p-GOS による相補型論理ゲートの構成が見込めない問題の解決策として、アンバイポーラ特性を利用した真性半導体のみで構成する新しい CGOS 論理ゲート構成法、すなわち、電子・ホール伝導の遷移電圧(Vth)が異なる二種類の FET を縦型接続した擬似相補型論理回路を考案した(国内・国際(PCT)出願リスト番号[2])(図 4.4.3)。数値解析の結果、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、ならびに 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。

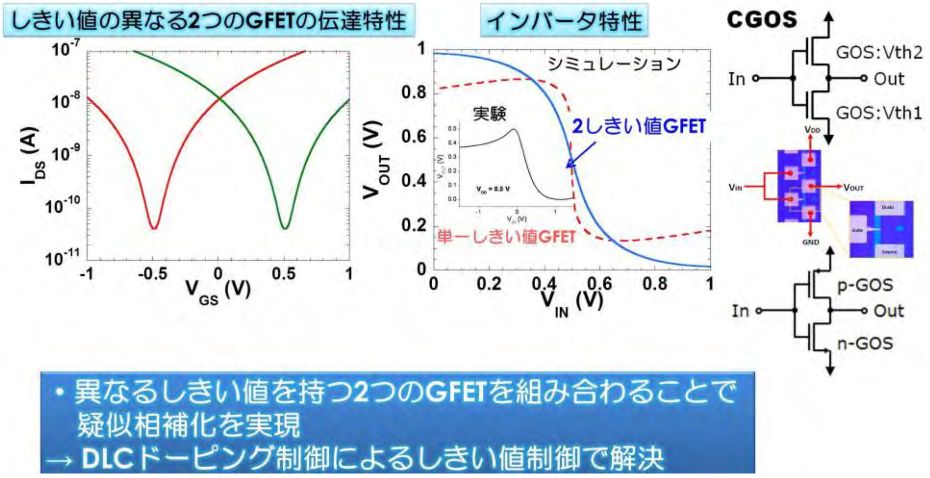


図 4.4.3 2しきい値 GOSFET による擬似相補型論理ゲート。

<2> バックゲート型ならびにトップゲート型の GOSFET2 段縦積構成において共通バックゲートを入力端子、共通ソース・ドレインを出力端子とする CGOS インバータを試作し、初めて、擬似 CMOS 的なインバータ論理動作を確認した(図 4.4.4)[49, 国際会議ポスター文献リスト番号[30]]。現在、外部機関より報告されているグラフェン FET によるインバータ論理動作では、(1)入出力インターフェイスが整合しておらず、論理振幅が 10 V 以上と不完全かつ 3K での極低温動作(F. Traversi, et al., Appl. Phys. Lett. 94, 223312 (2009); R. Sordan, et al., Appl. Phys. Lett. 94, 073305 (2009))、(2)入出力レベル整合は取れているものの大きな貫通電流と 77K での極低温動作(S.-L. Li et al., Nano Lett. 10, 2357(2010))なのに対し、入出力レベルが完全整合する 0.1～0.5 V の微小論理振幅動作を室温下で得ることができた(図 4.4.5)。しかしながら、速度性能評価に耐えうる微細化 GOSFET による CGOS の試作には至っておらず、μGOS プロセスによる GOSFET ならびに CGOS の試作は進行途上である。

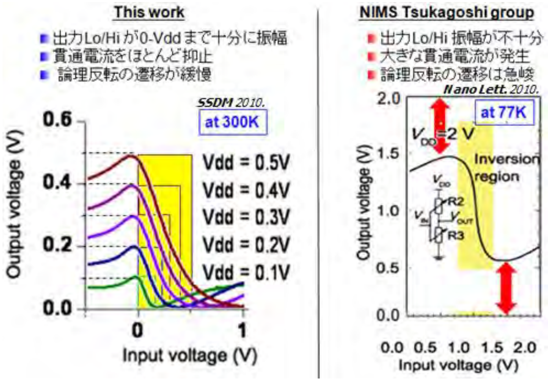


図 4.4.4 左：GOSFET による CGOS インバータ動作(A. Moutaouakil et al, SSDM J3-4, 2010.)。トップゲートによるしきい値制御は施していない。Vdd を-0.5 V から+0.5 V までの範囲内で論理反転動作が実現できている。右：外部機関で唯一入出力整合が取れているインバータ動作（NIMS 塚越グループ, S.-L. Li et al., Nano Lett. 10, 2357(2010)）。

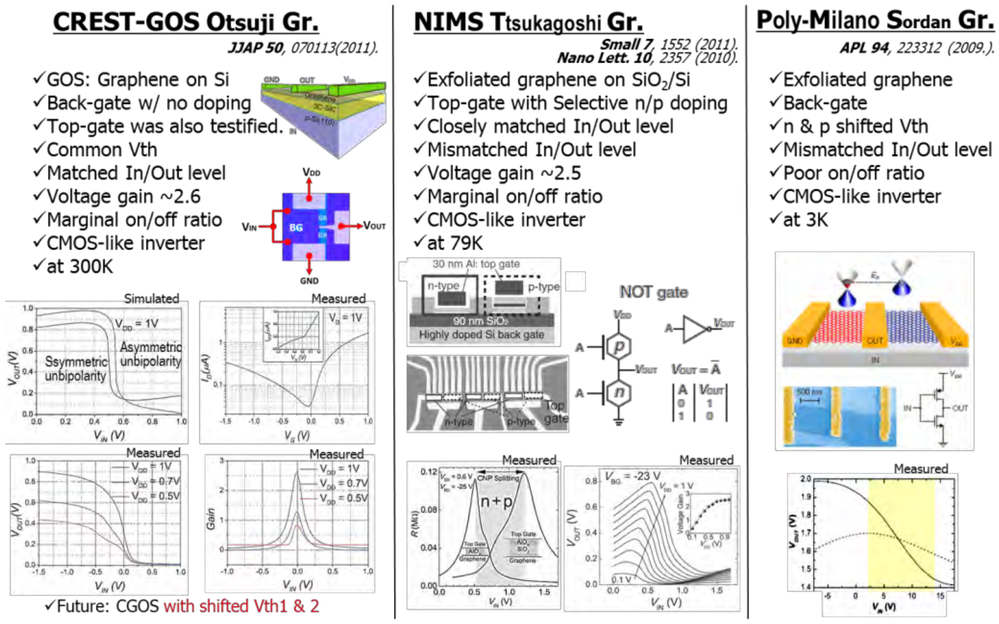


図 4.4.5 当該 CREST 成果[49]を含む代表 3 機関におけるグラフェンインバータ論理回路のベンチマーク。

<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(国内特許出願リスト番号[4]，国際（PCT）特許出願リスト番号[3])（図 4.4.6）[16]。

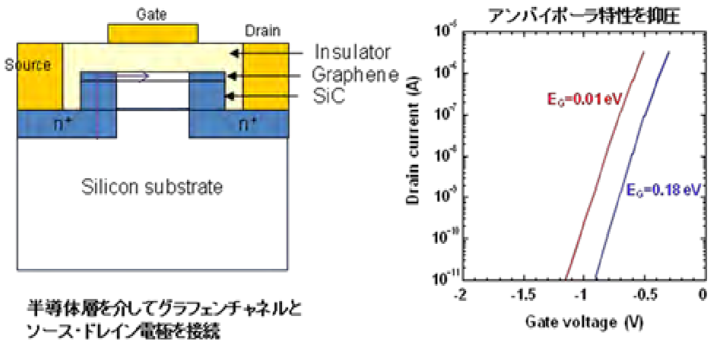
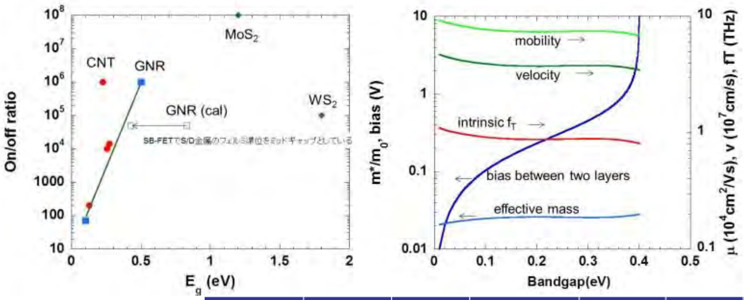


図 4.4.6 グラフェン層から SiC と Si 基板を介してソース･ドレインコンタクトを取る構造によりアンバイポーラ特性を回避できるソース･ドレイン構造の構造図（左）と電流-電圧特性のシミュレーション結果（右）。アンバイポーラ特性が抑制されていることが確認できる[16]。

(2)研究成果の今後期待される展開

<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 以上にする必要があることがわかった[22]（図 4.4.7)。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 Eg を発現させる可能性がある。そこで、オンオフ比と Eg、移動度の関係を数値解析により推定し、さらに GOSFET の電流遮断周波数ならびに CGOS による D-FF（D-フリップフロップ）の最高トグル周波数を推定した。実用的なバンドギャップ開口による On/Off 比向上においては、Si-CMOS と同等の On/Off 比 10^6 以上の実現にはバンドギャップエネルギー0.5V 以上が必要であるが、Bernal 積層 2 層グラフェンの垂直電界印加では 0.4V 付近で飽和し、On/Off 比 10^5 程度が限界であり、On/Off = 10^5 (10^4)の場合の FET 単体の真性電流遮断周波数は 830 GHz （890GHz)、フリップフロップ回路の最高トグル周波数は fT の 1/3 でほぼ 280 GHz (300 GHz)であることを解析的に明らかにした(図 4.4.7) [55, 56, 63]。



Bilayer grapheneのK点付近でのエネルギー

$$E^2 = \frac{\gamma_1^2}{2} + \frac{\Delta^2}{4} + \hbar^2 v_F^2 k^2 - \sqrt{\frac{\gamma_1^4}{4} + \hbar^2 v_F^2 k^2 (\gamma_1^2 + \Delta^2)}$$

Δ: bias between two layers

$\Delta\gamma_1$: inter-plane coupling, 0.4 eV

$E_g \sim \gamma_1$ for $\Delta >> \gamma_1$ となり

$E_g \sim 0.4$ eV で飽和する。

Required on/off ratio	E_g (eV)	Bias voltage (V)	Mobility (10^4 cm^2/Vs)*	Velocity (10^7cm/s)	f_T (THz)	Toggle (GHz)
100	0.1	0.1	7.7	3.93	0.92	310
10^4	0.3	0.45	7.5	3.8	0.89	300
10^5	0.4	1.80	6.5	3.5	0.83	280
10^6	0.5	-	-	-	-	

*： 真性の値（基板とゲート絶縁膜の効果を除く、クーロン散乱による低下防止が必要）

- Velocityにはクーロン散乱はそれほど効かない。
- f_Tも真性の値で、ソース抵抗低減は必要。
- 高f_{max}化は課題山積で、推定困難。
- FF toggleは$f_T \sim f_{max}$になるとすれば、これらの1/3程度の速度。
- biased bilayerのエネルギー分散はMexican hatで有効質量が負の部分があり、その詳細な影響の理解には、モンテカルロ解析が必要。

図 4.4.7 グラフェンのバンドギャップ開口にともなう CGOS On/Off 比と速度性能の予測。

§5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 3 件、国際（欧文）誌 106件)

[1] F.T. Vasko and V. Ryzhii, ”Voltage and temperature dependencies of conductivity in gated graphene,” Phys. Rev. B, Vol. 76, pp. 233404-1-233404-4, Dec. 2007.

[2] V. Ryzhii, M. Ryzhii, and T. Otsuji, "Population inversion of photoexcited electrons and holes in graphene and its negative terahertz conductivity," Physica Status Solidi (c), Vol. 5, No. 1, pp. 261-264, Jan. 2008.

[3] V. Ryzhii, M. Ryzhii, and T. Otsuji, "Tunneling current–voltage characteristics of graphene field-effect transistor," Appl. Phys. Express, Vol. 1, No. 1, pp. 01301-1-01301-3, Jan. 2008.

[4] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, and T. Otsuji, "Current-Voltage Characteristics of a Graphene Nanoribbon Field-Effect Transistor," J. Appl. Phys., Vol. 103, pp. 094510-1-8, May 2008.

[5] V. Ryzhii, M. Ryzhii, and T. Otsuji, "Thermionic and tunneling transport mechanisms in graphene field-effect transistors," Physica. Status Solidi (a), Vol. 205, No. 7, pp. 1527-1533, May 2008.

[6] V. Vyurkov and V. Ryzhii, “Effect of Coulomb scattering on graphene conductivity,” JETP Lett., Vol. 88, No. 5, pp. 370-373, September 2008.

[7] M. Ryzhii, A. Satou, V. Ryzhii, and T. Otsuji, “High-frequency properties of a graphene nanoribbon field-effect transistor,” J. Appl. Phys., Vol. 104, No. 11, pp. 114505-1-6, December 2008.

[8] E. Sano and T. Otsuji, “Performance prediction of graphene-channel field-effect transistors,” Jpn J. Appl. Phys., Vol. 48, pp. 011604-1-4, 2009.

[9] Y. Yamamoto, K. Asaoka, M. Suemitsu, “Initial oxidation of Si(110) as studied by real-time synchrotron-radiation x-ray photoemission spectroscopy,” J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 27 pp.547-550, Feb. 2009.

[10] Y. Miyamoto, H. Handa, E. Saito, A. Konno, Y. Narita, M. Suemitsu, H. Fukidome, T. Ito, K. Yasui, H. Nakazawa and T. Endoh, “Raman-Scattering Spectroscopy of Epitaxial Graphene Formed on SiC Film on Si Substrate,” e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, Vol. 7 pp. 107-109, Feb. 2009.

[11] M. Suemitsu, Y. Miyamoto, H. Handa, and A. Konno, “Graphene formation on a 3C-SiC(111) thin film grown on Si(110) substrate,” e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, vol. 7, pp. 311-317, 2009.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.
[18] 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.
[19] 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.
[20] 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.
[21] 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.
[22] 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.
[23] 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, iss. 1, pp. 01AH03-1-4, 2010.
[24] M. Suemitsu and H. Fukidome, "Epitaxial Graphene on Si Subsrates," J. Phys. D, vol.43, iss. 1, pp. 374012-1-11, 2010.
[25] 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.
[26] 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.
[27] 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.
[28] 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.
[29] H.-C. Kang, R. Olac-vaw, H. Karasawa, Y. Miyamoto, H. Handa, T. Suemitsu, H. Fukidome, M. Suemitsu, and T. Otsuji, "Extraction of drain current and effective mobility in epitaxial graphene channel FETs on silicon substrate," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 49, iss. 4, 04DF17 (5 pages), 2010.
[30] R. Olac-vaw, H.-C. Kang, H. Karasawa, Y. Miyamoto, H. Handa, H. Fukidome, T. Suemitsu, M. Suemitsu and T. Otsuji. "Ambipolar behavior in epitaxial graphene based field-effect transistors on Si substrate," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 49, iss. 6, 06GG01 (5pages), 2010.
[31] 半田浩之、宮本優、斎藤英司、吹留博一、末光眞希、「Si(111), Si(110), Si(100) 基板上 3C-SiC 薄膜の熱改質によるグラフェン・オン・シリコン形成」、表面科学、vol. 31, pp. 352-358, 2010.
[32] H.-C. Kang, H. Karasawa, Y. Miyamoto, H. Handa, T. Suemitsu, M. Suemitsu, and T. Otsuji, "Epitaxial graphene field effect transistors on silicon substrates," Solid State Electron., Vol. 54, issue 9, pp. 1010-1014, 2010. DOI:10.1016/j.sse.2010.04.018
[33] H.-C. Kang, H. Karasawa, Y. Miyamoto, H. Handa, H. Fukidome, T. Suemitsu, M.Suemitsu, and T. Otsuji, "Epitaxial graphene top-gate FETs on silicon

substrates," Solid State Electron., Vol. 54, issue 10, pp. 1071-1075, 2010. DOI:10.1016/j.sse.2010.05.030
[34] M. Ryzhii, V. Ryzhii, T. Otsuji, V. Mitin, and M.S. Shur, "Electrically-induced n-i-p junctions in multiple graphene layer structures," Phys. Rev. B, Vol. 82, pp. 075419-1-6, 2010.
[35] T. Otsuji, H. Karasawa, T. Watanabe, T. Suemitsu, M. Suemitsu, E. Sano, W. Knap, and V. Ryzhii, "Emission of terahertz radiation from two-dimensional electron systems in semiconductor nano-heterostructures," Comptes Rendus Physique, Vol. 11, Iss. 7-8, pp. 421-432, 2010. (DOI: 10.1016/j.crhy.2010.04.002)
[36] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, and V. Mitin, "Analytical Device Model for Graphene Bilayer Field-Effect Transistors Using Weak Nonlocality Approximation," J. Appl. Phys. Vol. 109, Iss. 6, pp. 064508-1-10, 2011.
[37] E. Saito, S.N. Filimonov, and M. Suemitsu、” Growth Rate Anomaly in Ultralow-Pressure Chemical Vapor Deposition of 3C-SiC on Si(001) Using Monomethylsilane,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol.50, No.1, pp.10203-1-3, 2011.
[38] Arnold Alguno, Sergey N. Filimonov, Maki Suemitsu, ” Step bunching and step “Rotation” in homoepitaxial growth of Si on Si(110)-16×2 ,“Surface Science, Vol.605, No.7-8, pp.838-843, 2011.
[39] A.A. Dubinov, Y.V. Aleshkin, V. Mitin, T. Otsuji, and V. Ryzhii, "Terahertz surface plasmons in optically pumped graphene structures," J. Phys.: Condens. Matter, Vol. 23, pp. 145302-1-8, 2011. (DOI: 10.1088/0953-8984/23/14/145302)
[40] 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)
[41] 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)
[42] 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)
[43] 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)
[44] 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)
[45] 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)
[46] 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)

[47] 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).

[48] M.-H. Jung, H. Handa, R. Takahashi, H. Fukidome, T. Suemitsu, T. Otsuji, and M. Suemitsu, "Investigation of Graphene Field Effect Transistors with Al_2O_3 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).

[49] 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)

[50] 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)

[51] 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)

[52] 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)

[53] 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)

[54] 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)

[55] 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)

[56] 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)

[57] 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)

[58] 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)

[59] 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)

[60] 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)

[61] 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).

[62] 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).

[63] 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)

[64] 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)

[65] 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)

[66] 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)

[67] 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)

[68] D. Svintsov, V. Vyurkov, S. Yurchenko, T. Otsuji, and V. Ryzhii, "Hydrodynamic model for electron-hole plasma in graphene," J. Appl. Phys. Vol. 111, pp. 083715-1-10, April 2012. (DOI: 10.1063/1.4705382)

[69] T. Otsuji, S. Boubanga-Tombet, A. Satou, M. Suemitsu, and V. Ryzii, "Spectroscopic study on ultrafast carrier dynamics and terahertz amplified stimulated emission in optically pumped graphene," J. Infrared Milli. Terhertz Waves, Vol. 33, pp. 825-838, June 2012. (DOI: 10.1007/s10762-012-9908-8)

[70] T. Otsuji, S. A. Boubanga Tombet, A. Satou, H. Fukidome, M. Suemitsu, E. Sano, V. Popov, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Graphene-based devices in terahertz science and technology," J. Phys. D: Applied Physics, Vol. 45, No. 30, pp. 303001-1-10, 2012. (invited) (DOI:10.1088/0022-3727/45/30/303001)

[71] V Ryzhii, T Otsuji, M Ryzhii, and M S Shur, "Double graphene-layer plasma resonances terahertz detector," J. Phys. D: Applied Physics, Vol. 45, No. 30, pp. 302001-1-6, 2012. (invited) (DOI:10.1088/0022-3727/45/30/302001)

[72] T. Ide, Y. Kawai, H. Handa, H. Fukidome, M. Kotsugi, T Ohkochi, Y. Enta, T. Kinoshita, A. Yoshigoe, Y. Teraoka, and M. Suemitsu, "Epitaxy of graphene on 3C-SiC(111) thin films on microfabricated Si(111) substrates," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 51, pp. 06FD02-1-4, 2012.

[73] H. Fukidome, Y. Kawai, F. Fromm, M. Kotsugi, H. Handa, T. Ide, T. Ohkouchi, H. Miyashita, Y. Enta, T. Kinoshita, Th. Seyller, and M. Suemitsu, "Precise control of epitaxy of graphene by microfabricating SiC substrate," Appl. Phys.

Lett., Vol. 101, pp. 041605-1-4, 2012.
[74] Y. Takatsuka, K. Takahagi, E. Sano, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Gain enhancement in graphene terahertz amplifiers with resonant structures," J. Appl. Phys. Vol. 112, pp. 033103-1-4, Aug. 2012. (DOI: 10.1063/1.4742998)
[75] S. Sanbonsuge, S. Abe, H. Handa, R. Takahashi, K. Imaizumi, H. Fukidome, and M. Suemitsu, "Improvement in Film Quality of Epitaxial Graphene on SiC(111)/Si(111) by SiH4 Pretreatment, "Jpn. J. Appl. Phys. 51 (6), pp 06FD10-1-06FD10-4, 2012. (DOI: 10.1143/JJAP.51.06FD10)
[76] T. Otsuji, S. A. Boubanga Tombet, A. Satou, H. Fukidome, M. Suemitsu, E. Sano, V. Popov, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Graphene materials and devices in terahertz science and technology," MRS Bulletin, Vol. 37, No. 12, pp. 1235-1243, Dec. 2012. (invited) (DOI: 10.1557/mrs.2012.241)
[77] T. Otsuji, S. Boubanga Tombet, A. Satou, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Terahertz-wave generation using graphene -toward new types of terahertz lasers," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., Vol. 19, Iss. 1, pp. 8400209-1-9, Jan.-Feb. 2013. (invited) (DOI: 10.1109/JSTQE.2012.2208734)
[78] T. Otsuji, T. Watanabe, S. Boubanga Tombet, A. Satou, W. Knap, V. Popov, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Emission and detection of terahertz radiation using two-dimensional electrons in III-V semiconductors and graphene," IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., Vol. 3, No. 1, pp. 63-72, Jan. 2013. (DOI: 10.1109/TTHZ.2012.2235911)
[79] V. Ryzhii, T. Otsuji, M. Ryzhii, V. G. Leiman, S. O. Yurchenko, V. Mitin, and M. S. Shur, "Effect of plasma resonances on dynamic characteristics of double graphene-layer optical modulator," J. Appl. Phys., Vol. 102, Issue 10, pp. 104507-1-7, Nov. 2012. (DOI: 10.1063/1.4766814)
[80] V.V. Popov, O.V. Polischuk, A.R. Davoyan, V. Ryzhii, T. Otsuji, and M.S. Shur, "Plasmonic terahertz lasing in an array of graphene nanocavities," Phys. Rev. B, Vol. 86, iss. 19, pp. 195437-1-6, Nov. 2012. (DOI: 10.1103/PhysRevB.86.195437)
[81] F.T. Vasko, V.V. Mitin, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Interplay of intra- and interband absorption in a disordered graphene," Phys. Rev. B, Vol. 86, iss. 23, pp. 235424-1-7, Dec. 2012. (DOI: 10.1103/PhysRevB.86.235424)
[82] V. L. Semenenko, V. G. Leiman, A. V. Arsenin, V. Mitin, M. Ryzhii, T. Otsuji, and V Ryzhii, "Effect of self-consistent electric field on characteristics of graphene p-i-n tunneling transit-time diodes," J. Appl. Phys., Vol. 113, pp. 024503-1-7, Jan. 2013. (DOI: 10.1063/1.4773836)
[83] V Ryzhii, T Otsuji, M Ryzhii, N Ryabova, S O Yurchenko, V Mitin, and M S Shur, "Graphene terahertz uncooled bolometers," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 46, pp. 065102-1-5, Jan. 2013. (DOI:10.1088/0022-3727/46/6/065102)
[84] S. Sambonsuge, E. Saito, M-H Jung, H. Fukidome, S. Filimonov, and M. Suemitsu, "Rotated epitaxy of 3C-SiC(111) on Si(110) substrate using monomethylsilane-based gas-source molecular-beam epitaxy," Materials Science Forum Vols. 740-742, pp 339-343, Jan. 25, 2013, (DOI:10.4028/www. scientific.net/MSF.740-742.339)
[85] M. Suemitsu, S. Sambonsuge, E. Saito, M-H Jung, H. Fukidome, S. Filimonov, "High-rate rotated epitaxy of 3C-SiC(111) on Si(110) substrate for qualified epitaxial graphene on silicon," Materials Science Forum Vols. 740-742, pp 327-330, Jan. 25, 2013, (DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.740-742.327)
[86] D. Svintsov, V. Vyurkov, V. Ryzhii, and T. Otsuji, ""Voltage-controlled surface plasmon-polaritons in double graphene layer structures," J. Appl. Phys., Vol. 113, pp. 053701-1-5, Feb. 2013. (DOI: 10.1063/1.4789818)
[87] A. Satou, V. Ryzhii, Y. Kurita, and T. Otsuji, “Threshold of terahertz population inversion and negative dynamic conductivity in graphene under

pulse photoexcitation," J. Appl. Phys., Vol. 113, pp. 143108-1-7, April 2013. (DOI: 10.1063/1.4801916)
[88] 吹留博一, "基板相互作用を援用したグラフェンのナノ構造・物性制御," 表面科学, Vol. 33, No. 10, pp 546-551, 2012.
[89] Yohei Inayoshi, Hirokazu Fukidome, Setsuo Nakajima, Tsuyoshi Uehara, Yasutake Toyoshima, Maki Suemitsu, "Discharge Instability at Patterned Conductive Layers on Insulating Substrates during Pulsed-Plasma Chemical Vapor Deposition under Near Atmospheric Pressures," e-J. Surf. Sci., Vol. 11, pp. 47-52, 2013. (DOI: 10.1380/ejssnt.2013.47)
[90] Naoka Nagamura, Koji Horiba, Satoshi Toyoda, Shodai Kurosumi, Toshihiro Shinohara, Masaharu Oshima, Hirokazu Fukidome, Maki Suemitsu, Kosuke Nagashio, and Akira Toriumi, "Direct observation of charge transfer region at interfaces in grapheme devices," Applied Physics Letters, Vol. 102, pp. 241604-1-241604-5, 2013. (DOI: 10.1063/1.4808083)
[91] 吹留博一、小嗣真人、川合祐輔、井出隆之、大河内拓雄、木下豊彦、末光眞希, "微細加工基板へのグラフェンのエピ成長による擬電磁場の創出," 表面科学, Vol. 34, pp. 380-384, 2013.
[92] H. Fukidome, Y. Kawai, H. Handa, H. Hibino, H. Miyashita, M. Kotsugi, T. Ohkouchi, M.-H. Jung, T. Suemitsu, T. Kinoshita, T. Otsuji, and M. Suemitsu, "Site Selective Epitaxy of Graphene on Si Wafers," Proceeding of the IEEE, Vol. 101, pp. 1557-1566, 2013. (invited) (DOI: DOI: 10.1109/JPROC.2013.2259131)
[93] M.-H. Jung, G.-H. Park, T. Yoshida, H. Fukidome, T. Suemitsu, T. Otsuji, and M. Suemitsu, "High-Performance Graphene Field-Effect Transistors with Extremely Small Access Length Using Self-Aligned Source and Drain Techniques," Proceeding of the IEEE, Vol. 101, pp. 1603-1608, 2013. (invited) (DOI: 10.1109/JPROC.2013.2258651)
[94] E. Towe, T. Palacios, M. Suemitsu, "Emerging graphene-based electronic & photonic devices, circuits, and systems -Scanning the Issue-,"Proceeding of the IEEE, Vol. 101, pp. 1518-1521, 2013. (invited) (DOI: 10.1109/JPROC.2013.2263615)
[95] Yu Sun, Satoshi Izumi, Shinsuke Sakai, Kuniaki Yagi, Yu Sun, Satoshi Izumi, Shinsuke Sakai, Kuniaki Yagi, "Core element effects on dislocation nucleation in 3C-SiC: Reaction pathway analysis," Computational Material Science, Vol. 79, pp. 216-222, 2013. (DOI: 10.1016/j.commatsci.2013.05.055)
[96] Masashi Kato, Atsushi Yoshida, Masaya Ichimura, Masashi Kato, Atsushi Yoshida, Masaya Ichimura, "Excess carrier lifetime and strain distributions in a 3C-SiC wafer grown on an undulant Si substrate," Physica Status Solidi A, Vol. 210, pp. 1719-1725, 2013. (DOI:10.1002/pssa.201329015)
[97] V. Ryzhii, M. Ryzhii, V. Mitin, M.S. Shur, A. Satou, and T. Otsuji, "Terahertz photomixing using plasma resonances in double-graphene layer structures," J. Appl. Phys., Vol. 113, Iss. 17, pp. 174506-1-7, May 2013. (DOI: 10.1063/1.4804063)
[98] V. Ryzhii, I. Semenikhin, M. Ryzhii, D. Svintsov, V. Vyurkov, A. Satou, and T. Otsuji, "Double injection in graphene p-i-n structures," J. Appl. Phys., Vol. 113, Iss. 24, pp. 244505-1-9, June 2013. (DOI: 10.1063/1.4812494)
[99] V. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, M. Ryzhii, V. Mitin and M.S. Shur, "Dynamic effects in double graphene-layer structures with inter-layer resonant-tunneling negative conductivity," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 46, Iss. 31, pp. 315107-1-6, July 2013. (DOI: JPhysD/46/315107)
[100] T. Watanabe, T. Fukushima, Y. Yabe, S.A. Boubanga Tombet, A. Satou, A.A. Dubinov, V. Ya Aleshkin, V. Mitin, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Gain enhancement effect of surface plasmon polaritons on terahertz stimulated emission in optically pumped monolayer graphene," New Journal of Physics, Vol. 15, Iss. 7, pp. 075003-1-11, July 2013. (DOI: 10.1088/1367-2630/15/7/075003)
[101] V. Ryzhii, A.A. Dubinov, V.Ya. Aleshkin, M.Ryzhii, "Injection terahertz laser using the resonant inter-layer radiative transitions in double-graphene-layer structure," Appl. Phys. Lett., Vol. 103, pp. 163507-1-4, Oct. 2013. (DOI: 10.1063/1.4826113)
[102] V.V. Popov, O.V. Polischuk, S.A. Nikitov, V. Ryzhii, T. Otsuji and M.S. Shur,

"Amplification and lasing of terahertz radiation by plasmons in graphene with a planar distrimuted Bragg resonator," Journal of Optics, Vol. 15, pp. 114009-1-8, Oct. 2013. (DOI: 10.1088/2040-8978/15/11/114009)

[103] D. Svintsov, V. Vyurkov, V. Ryzhii, T. Otsuji, and S. Yurchenko, "Electron hydrodynamics and nonlinear wave propagation in graphene," Phys. Rev. B, Vol. 88, Iss. 24, pp. 245444-1-8, Dec. 2013. (DOI: 10.1103/PhysRevB.88.245444)

[104] S. Beljakowa, M. Hauck, M. Bockstedte, F. Fromm, M. Hundhausen, H. Nagasawa, H.B. Weber, G. Pensl, M. Krieger, S. Beljakowa, M. Hauck, M. Bockstedte, F. Fromm, M. Hundhausen, H. Nagasawa, H.B. Weber, G. Pensl, M. Krieger "Persistent Conductivity in n-type 3C-SiC Observed at Low Temperatures," Materials Science Forum, Materials Science Forum, Vol. 778-780, pp. 265-268, 2014. (DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.265)

[105] A.A. Dubinov, V. Ya. Aleshkin, V. Ryzhii, M.S. Shur, and T. Otsuji, "Surface- plasmons lasing in double-graphene-layer structures," J. Appl. Phys., Vol. 115, Iss. 04, pp. 044511-1-6, 2014. (DOI: 10.1063/1.4863797)

[106] D. Svintsov, V. Vyurkov, A. Orlikovsky, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "All-graphene gield-effect transistor based on lateral tunnelling," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 47, Iss. 09, pp. 094002-1-8, 2014. (DOI: 10.1088/0022-3727/47/9/094002)

[107] T. Otsuji, V. Popov, and V. Ryzhii, "Active graphene plasmonics for terahertz device applications," J. Phys. D., Vol. 47, Iss. 09, pp. 094006-1-10, 2014. (DOI: 10.1088/0022-3727/47/9/094006)

[108] Maki Suemitsu, Sai Jial, Hirokazu Fukidome, Yasunori Tateno, Isao Makabe, Takashi Nakabayashi, "Epitaxial graphene formation on 3C-SiC/Si thin films,"Journal of Physics D, Vol. 47, pp. 094016-1-094016-11, 2014. (DOI: 10.1088/0022-3727/47/9/ 094016)

[109] A. Satou, Y. Koseki, V. Ryzhii, V. Vyurkov, and T. Otsuji, "Damping of terahertz plasmons in graphene coupled with surface plasmons in heavily-doped substrate," J. Appl. Phys., Vol. 115, Iss. 10, pp. 104501-1-7, 2014. (DOI: 10.1063/1.4867971)

(2)その他の著作物（総説、書籍など）

[1] 尾辻,"グラフェンを用いた新原理テラヘルツレーザー,"微小光学研究会 テーマ：「みらい微小光学」 Microoptics News, Vol. 27, No. 2, pp. 31-36, May 19, 2009.

[2] 尾辻, "グラフェンチャネルトランジスタ,"応用物理, Vol. 79, No. 11, pp. -, Nov. 2010.

[3] 吹留博一,"SiC グラフェンのデバイス応用と微細加工,"MNC2010 技術セミナー「グラフェン」, pp. 21-30, Nov. 2010.

[4] 尾辻泰一, "グラフェンの超高周波光・電子デバイス応用," 日経エレクトロニクス編、グラフェン・イノベーション ‐ 電子デバイスを変えるナノカーボン材料革命, pp. 34-51, 日経 BP 社, 東京, Feb. 25, 2011.

[5] Hirokazu Fukidome and Maki Suemitsu, "Epitaxial graphene on silicon substrates", Spring-8 Research Frontiers, August 2011,

[6] Wonbong Choi and Jo-won Lee edited, Graphene: synthesis and applications (Nanomaterials and Their Applications; 3), CRC Press, Taylor &Francis group, New York, USA, October 6th, 2011, ISBN 978-1-4398-6187-5. (T. Otsuji, T. Suemitsu, A. Satou, M. Suemitsu, E. Sano, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, Chapt. 4, "Electronic and photonic applications for ultrahigh-frequency graphene-based devices," pp. 85-115.)

[7] 尾辻泰一, "新しい電磁波領域を切り拓く　グラフェンの世界 -ポストシリコンおよび未踏周波数領域テラヘルツ帯利用デバイス開発に向けて," ULVAC, No. 62, pp. 20-23, March 2012 (in Japanese); T. Otsuji, "The World of Graphene: Cutting the Way into a New Electromagnetic Domain Towards Post-Silicon and the Development of Devices Utilizing the Unexplored Frequency Domain of the Terahertz Band," ULVAC, No. 62, pp. 20-23, March 2012.

[8] "グラフェンが拓く材料の新領域," エヌ・ティー・エス, 東京, March 2012. ((佐野栄一, "RF 回路と論理回路への適用,"pp. 156-165.)
[9] "グラフェンが拓く材料の新領域," エヌ・ティー・エス, 東京, June 12, 2012. (末光眞希, "エピタキシャルグラフェン法," 第一章第 4 節.)
[10] "グラフェンが拓く材料の新領域," エヌ・ティー・エス, 東京, June 12, 2012. (佐藤昭, "プラズモニクス, レーザ応用," 第 5 編第 4 章.)
[11] 尾辻泰一監修, "グラフェンの最先端技術と拡がる応用," フロンティア出版, 東京, 2012 年 7 月. (尾辻泰一, "総論 － グラフェンの特異な光電子物性と拡がる応用研究," 第 1 章)
[12] 尾辻泰一監修, "グラフェンの最先端技術と拡がる応用," フロンティア出版, 東京, 2012 年 7 月. (末光眞希, "SiC 基板上のエピタキシャルグラフェン成長," 第 3 章 6 節.)
[13] 尾辻泰一監修, "グラフェンの最先端技術と拡がる応用," フロンティア出版, 東京, 2012 年 7 月. (末光哲也, "グラフェンチャネルトランジスタ," 第 4 章 1 節)
[14] 尾辻泰一監修, "グラフェンの最先端技術と拡がる応用," フロンティア出版, 東京, 2012年7月. (佐野栄一, "グラフェントランジスタの論理回路応用," 第4章4節, pp. 144-153.)
[15] 尾辻泰一監修, "グラフェンの最先端技術と拡がる応用," フロンティア出版, 東京, 2012 年 7 月. (V. Ryzhii, N. Ryabova, M. Ryzhii, V. Mitin, T. Otsuji, "Concepts of Terahertz and Infrared Photodiodes and Phototransistors Based on Graphene Structures," 第 6 章 2 節.)
[16] 尾辻泰一監修, "グラフェンの最先端技術と拡がる応用," フロンティア出版, 東京, 2012 年 7 月. (尾辻泰一, "グラフェンのプラズモン特性とテラヘルツデバイス応用," 第 6 章 3 節.)
[17] 尾辻泰一監修, "グラフェンの最先端技術と拡がる応用," フロンティア出版, 東京, 2012 年 7 月. (佐藤昭, "グラフェンの非平衡キャリアダイナミクスとテラヘルツレーザー応用," 第 6 章 4 節.)
[18] "ナノエレクトロニクスにおける絶縁超薄膜技術 ～製膜技術と膜・界面の物性科学～," エヌ・ティー・エス, 東京, 2012.7.20. (尾辻泰一, "グラフェンチャネル FET のゲートスタック技術," 第 3 編第 2 章.)
[19] "グラフェンを用いた半導体素子の開発と将来展望 ～次世代高性能半導体の実用化に向けて徹底解説～," 電子ジャーナル,2012.7.25.
[20] 電子ジャーナル別冊　2013ナノカーボン技術大全,電子ジャーナル 2012.11.1. (吹留博一,"グラフェン・オン・シリコン・技術によるトランジスタの形成," 第五編四章)
[21] 吹留博一, "基板微細加工の援用による超高品質グラフェンの作製," 月刊マテリアルステージ 13 巻 3 号, March 2013.
[22] 末光眞希、中林隆志, "窒化物材料上グラフェンを活用したテラヘルツ帯デバイスの開発研究," 工業材料 61 巻 7 号, 2013 年.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演　　　　(国内会議 64 件、国際会議 89 件)

[1] M. Suemitsu, "Photoemission and STM Studies on Initial Oxidations of Si Surfaces," Changwon International Symposium on Advanced Science and Technology (CISAS) International Symposium on Nano and Advanced Materials (ISNAM), Changwon, Nov.22-23, 2007.
[2] V. Ryzhii, A. Satou, M. Ryzhii, F. Vasko, and T. Otsuji, "Plasma Waves in Graphene-Based Heterostructures and their Terahertz Device Applications," Proc. International Semiconductor Device Research Symposium, paper No. FA6-02, Maryland, USA, Dec. 12-14, 2007.

[3] M. Suemitsu (Tohoku Univ.), “MoO2 nanotube with rectangular cross section”, CNU-UTA Joint Physics Research Symposium, Korea, 2008.5.15.
[4] M. Suemistu (Tohoku Univ.), “Graphene formation on Si substrates”, Japan-Korea Symposium on Surface Nanostructures, Sendai, 2008.9.18.
[5] A. Alguno, M. Suemitsu (Tohoku Univ.), “Step bunching formation during homoepitaxy of Si(110) surface”, Japan-Korea Symposium on Surface Nanostructures, Sendai, 2008.9.18.
[6] M. Suemitsu (Tohoku Univ.), “Epitaxial graphene on Si substrate mediated by an ultra-thin SiC layer”, Carbon-based Nanoelectronics Workshop, ITRS, Tsukuba, 2008.9.22.
[7] T. Otsuji, T. Suemitsu, H.–C. Kang, H. Karasawa, Y. Miyamoto, H. Handa and M. Suemitsu, "Transistor operation of epitaxial graphene channel on silicon substrate with SiC backgate barrier layer," 13th Advanced Heterostructures and Nanostructures Workshop, Hawaii, USA, Dec. 7-12, 2008.
[8] M. Suemitsu, “Graphene-on-Silicon (GOS) as an emerging research material” 5th Int. Conf. On Molecular Electronics & Bioelectronics, March 15-18, 2009, Miyazaki.
[9] T. Otsuji, Y. Tsuda, H. Karasawa, T. Suemitsu, M. Suemitsu, E. Sano and V. Ryzhii “Emission of terahertz radiation from two-dimensional electron systems in semiconductor nanoheterostructures” 19th Int. Symp. on Nanostructures: Physics and Technology, pp. 66-68, Minsk, Belarus, June 22, 2009.
[10] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, N. Ryabova, T. Otsuji, V. Mitin, F. T. Vasko, A. A. Dubinov, V. Ya. Aleshkin, and M. S. Shur, “Graphene-based infrared and terahertz devices: concepts and characteristics,” 2009 Advanced Research Workshop “Future Trends in Microelectronics: Unmapped Roads,” Sardinia, Italy, June 14-19, 2009.
[11] E. Sano and T. Otsuji, “Theoretical study on graphene field-effect transistors”, 2009 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD) (Busan, Korea), June 24-26, 2009, paper 1B.2.
[12] T. Otsuji “Heteroepitaxial Graphene on Silicon: Process & Device Technology for Ultra-high Frequency Devices” Int. Conf. on Graphene Tokyo, Tokyo, July 25-26, 2009.
[13] M. Suemitsu, H. Fukidome, R. Takahashi, Y. Miyamoto, H. Handa, ”Interface Engineering in Epitaxial Graphene on Silicon”, IWTPD2009, Aizu-Wakamatsu, 2009.11.2.
[14] T. Otsuji “Heteroepitaxial Graphene on Silicon: Process&Device Technology for Ultra-high Frequency Devices” 22nd International Microprocesses and Nanotechnology Conf., 17B-3-2, Sapporo, Japan, Nov. 17, 2009.
[15] V. Ryzhii, A. Satou, A. A. Dubinov, M. Ryzhii, N. Ryabova, V. Ya. Aleshkin, and T. Otsuji, “Possibility of terahertz lasing in optically excited multiple graphene layer structures,” International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics, Tokyo, Nov. 18-20, 2009..
[16] T. Otsuji, "Emission of terahertz radiation from two-dimensional electron systems in semiconductor nanoheterostructures," TeraTech'09: The Int. Workshop on Terahertz Technology 2009 Extended Abstract, pp. 147-150, Osaka, Japan, Nov. 30-Dec. 3, 2009.
[17] M. Suemitsu, “Formation of Epitaxial Graphene on Silicon Substrates via a SiC Ultrathin Film”, SICC-6, Singpore, 2009.12.15-18.
[18] M. Suemitsu, “Formation of graphene on 3C-SiC ultrathin film on Si”, 5th International Workshop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics, Sendai, 2010.1.29.

[19] M. Suemitsu, "Formation of graphene on Si substrates via SiC thin film", 2nd International Workshop on Nanostructure & Nanoelectronics, Sendai, 2010.3.10.
[20] T. Otsuji, H. Karasawa, T. Komori, T. Watanabe, M. Suemitsu, A. Satou, and V. Ryzhii, "Stimulated terahertz emission from optically pumped epitaxial graphene-on-Si heterostructures," PIERS: Progress in Electromagnetics Research Symposium Proc., pp. 697-670, Xian'g, China, March 23-25, 2010.
[21] V. Ryzhii, M. Ryzhii, N. Ryabova, T. Otsuji, V. Ya. Aleshkin, A. A. Dubinov, V. Mitin, and M. S. Shur, "Concepts of novel terahertz and mid-infrared photodetectors and lasers based on multiple-graphene layer structures," XXI Int. Conf. on Phoroelectronics and Night Vision Devices, Moscow, Russia, May 25-28, 2010.
[22] T. Otsuji, "Trends and future for graphene-based terahertz nano-photonics," ISTESNE: Int. Symp. on Technology Evolution for Silicon Nano-Electronics Extended Abstracts, p. 16, Tokyo, Japan, June 3-5, 2010.
[23] H. Fukidome, "Viability of Graphene-on-Silicon Technology toward fusion of Graphene with Advanced Si-CMOS Technologies", 8th International Workshop on Epitaxial Semiconductor on Patterned Substrates and Novel Index Surfaces, Como, Italy, June 14-18, 2010.
[24] T. Otsuji, M. Suemitsu, E. Sano, and V. Ryzhii, "Emission of Terahertz Radiation from Two-Dimensional Electron Systems in Semiconductor Nano-Heterostructures," VCIAN: Villa Conference on Interactions Among Nanostructures Abstracts, p. 22, Santorini, Greece, June 21-25, 2010.
[25] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. A. Dubinov, T. Otsuji, M. S. Shur, and V. Mitin, "Novel terahertz and infrared devices on multiple graphene structures: concepts and characteristics," VCIAN: Villa Conference on Interactions Among Nanostructures Abstracts, p. 31, Santorini, Greece, June 21-25, 2010.
[26] M. Suemitsu and H. Fukidome, "Growth of Graphene on Silicon Substrates and Its Control over Interface Properties", VCIAN: Villa Conference on Interactions Among Nanostructures Abstracts, p.29, Santorini, Greece, June 21-25, 2010.
[27] T. Suemitsu, "Graphene channel FET: A new candidate for high-speed devices," AWAD 2010: Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices, 2B2, Tokyo, Japan, June 30-July 2, 2010.
[28] T. Otsuji, "Observation of amplified stimulated terahertz emission from optically pumped graphene," ICOOPMA: Int. Conf. on Optical, Optoelectronic Photonic Materials and Applications Abstracts, p. 60, Budapest, Hungary, Aug. 15-20, 2010.
[29] T. Otsuji, "Emission of terahertz radiation from two-eimensional electron systems in semiconductor nano-heterostructures," 35th International Conference on Infrared, Millimeter and THz Waves," Th-D1.1, Rome, Italy, Sept. 6-11, 2010.
[30] M. Suemitsu, "Orientation-mediated control of interfacial structure in epitaxial graphene on silicon substrates", Second International Symposium on Science and Technology of Epitaxial Graphene, USA, Sept. 14-17, 2010.
[31] M. Suemitsu, "Epitaxial graphene on 3C-SiC/Si", Korean Physical Society 2010 spring meeting, Korea, Sept. 21-23, 2010.
[32] V. Ryzhii, M. Ryzhii, T. Otsuji, A. Satou, A. A. Dubinov, V. Mitin, and M. S. Shur, "Graphene terahertz lasers and photodetectors," Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'10), DC3-3, Toyama, Japan, Sept. 22-26, 2010.
[33] M. Suemitsu, "Formation of Epitaxial Graphene on Low-index Si Substrates", RJSSS-9, Russia, Sept. 26-30, 2010.

[34] M. Suemitsu, "Epitaxial formation of graphene on Si substrates: from heteroepitaxy of 3C-SiC to Si sublimation," 218th ECS Meeting, Las Vegas, Oct. 10-15, 2010.
[35] T. Otsuji, S. Chan, S.-A. Boubanga-Tombet, H. Karasawa, T. Watanabe, A. Satou, H. Fukidome, M. Suemitsu, and V. Ryzhii, "Observation of amplified stimulated terahertz emission from heteroepitaxial graphene-on-silicon materials," WINDS: Workshop on Innovative Devices and Systems, Hawaii, Dec. 5-10, 2010.
[36] M. Ryzhii, V. Ryzhii, T.Otsuji, and V.Mitin, "Terahertz and infrared detectors based on multiple-graphene layers with p-i-n junctions: device model and characteristics," PIERS: 29th Progress in Electromagnetics Research Symp. Marrakesh, Morocco, March 20-23, 2011.
[37] T. Otsuji, S.A. Boubanga Tombet, S. Chan, T. Watanabe, A. Satou, and V. Ryzhii, "Amplified stimulated terahertz emission from optically pumped graphene," PIERS: Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2A3-1, Marrakesh, Morocco, March 20-23, 2011.
[38] T. Otsuji, "Terahertz light amplification by stimulated emission of radiation in optically pumped graphene," VCIAN: Villa Conference on Interactions Among Nanostructures, Las Vegas, Nevada, USA, April 21-25, 2011.
[39] T. Otsuji, S. A. Boubanga Tombet, A. Satou, and V. Ryzhii, "Terahertz light amplification by stimulated emission of radiation from optically pumped graphene," SPIE Difense, Security & Sensing, Proc. SPIE, Vol. 8023, iss. 802304 (7 pages), Orlando, FL, USA, April 24-27, 2011. [Proc. SPIE, Vol. 8023, iss. 802304 (7 pages), 2011.]
[40] T. Otsuji; S. Boubanga Tombet; A. Satou; V. Ryzhii, "Amplified stimulated terahertz emission from optically pumped graphene," CLEO: Conference on Lasers and Electro-Optics, CMM3, Baltimore, ML, USA, May 2, 2011.
[41] V. Ryzhii, N. Ryabova, T. Otsuji, V.Aleshkin, and A.Dubinov, "Novel concepts of optoelectronic devices based on multiple-graphene structures," Collaborative Conf. on 3d and Material research (3DMR), Jeju, Korea, June 28, 2011.
[42] V. Ryzhii, M Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, and V. Mitin, "Optical excitation of graphene, population inversion, and terahertzlasing," Proceeding of 15th International Conference on Narrow Gap Systems (NGS15), Virginia Polytechnic Inst. Tech., VA, USA, August 2, 2011.
[43] T. Otsuji, "Trends and future of ultrafast transistors and terahertz light amplification by stimulated emission of radiation using graphene," SSDM: Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, WINC AICHI, Nagoya, Japan, Sept. 30, 2011.
[44] A. Satou, S. Boubanga-Tombet, T. Otsuji, and V. Ryzhii, "Threshold of terahertz wave amplification from optically pumped graphene," ACSIN 11: 11th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, St. Petersburg, Russia, Oct. 2-7, 2011.
[45] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. A.Dubinov, V. Ya. Aleshkin, V. Mitin, M. S. Shur, A. Satou, and T. Otsuji, "Concepts of terahertz and infrared devices based on graphene structures," IRMMW-THz: International Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Tu3C.1, Houston, TX, USA, Oct. 4, 2011.
[46] M. Suemitsu, H. Fukidome, "Tunable electronic structure of epitaxial graphene formed on silicon substrates", 3rd Symposium on the Science and Technology of Epitaxial Graphene (STEG3), Florida, Oct. 25, 2011.
[47] T. Otsuji, T. Watanabe, K. Akagawa, Y. Tanimoto,T. Suemitsu, V. Ryzhii, D. Coquillat, W. Knap, "New semiconductor materials and devices for terahertz imaging and sensing," IEEE SENSORS Conference, A1L-C-1196, Limerick, Ireland, Oct. 29, 2011.

[48] V. Ryzhii, M. Ryzhii, and T. Otsuji, “Mechanisms of recombination in optically pumped graphene” International TeraNano &GDRI Workshop, Osaka, Nov. 24, 2011.
[49] T. Otsuji, "Emission and detection of terahertz dadiation using two-dimensional electrons in III-V semiconductors and graphene," International TeraNano &GDRI Workshop, Osaka, Nov. 28, 2011.
[50] V. Ryzhii, “Overview of possible applications of graphene structures in THz and IR devices,” Seminar” Nano Carbon THz Science,” Osaka, Nov. 2011.
[51] M. Suemitsu, "Graphene in electronics: current status and future outlook", The 18th International Display Workshops (IDW'11), Nagoya, Dec.7, 2011. (Plenary)
[52] M. Suemitsu, H. Fukidome, "Epitaxial growth of graphene on 3C-SiC thin film formed on Si substrates", International Symposium on Surface Science (ISSS-6), Tokyo, Dec. 15, 2011.
[53] A. Satou, T. Otsuji, V. Ryzhii, and F.T. Vasko, "Terahertz negative dynamic conductivity in optically pumped graphene," The 31st PIERS in Kuala Lumpur, Malaysia, 27-30 March, 2012.
[54] T. Otsuji, "Emission and detection of terahertz radiation using two-dimensional electrons in III-V semiconductors and graphene," ISST: the 23rd International Symposium on Space Terahertz Technology, Tokyo, April 2-4, 2012.
[55] T. Otsuji, S. Boubanga Tombet, A. Satou, and V. Ryzhii, "Terahertz light amplification by stimulated emission of radiation in optically pumped graphene," 2012 MRS Spring Meeting, EE4.5, Moscone West Convention Center - San Francisco, CA, USA, April 11, 2012.
[56] T. Otsuji, S. Boubanga Tombet, A. Satou, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Terahertz wave generation using graphene," 2012 MRS Spring Meeting, L6.1, Moscone West Convention Center - San Francisco, CA, USA, April 12, 2012.
[57] V. V. Mitin, V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, and T. Otsuji, "Population inversion and terahertz lasing in graphene," SPIE Defense Security and Sensing, Conference 8373: Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications IV, Paper 8373-81, April 23-27, 2012.
[58] T. Otsuji, "Spectroscopic study on ultrafast carrier dynamics and terahertz amplified stimulated emission in optically pumped graphene," US-Japan TeraNano Workshop on Nanophotonics & Nanoelectronics, Buffalo, NY, USA, May 11, 2012.
[59] M.H. Jung, GH. Park, T. Yoshida, H. Fukidome, T. Suemitsu, T. Otsuji , M. Suemitsu, "High performance graphene field-effect transistors with extremely small access length using selfaligned source and drain technique," 2012APEMC(2012 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility), Sentosa, Singapore, May 22-24, 2012.
[60] M. Suemitsu, M. H. Jung and H. Fukidome, I. Katayama, J. Takeda, M. Kitajima, "THz Coherent Phonons in Graphene on Silicon," 2nd International Symposium on Terahertz Nanoscience, July 4-5, 2012.
[61] T. Otsuji, A. Satou, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Toward the creation of terahertz graphene lasers: injection vs. optical pumping,"TeraNano 2012: 2nd Int. Symp on Terahertz Nanoscience, Okinawa, Japan, July 4, 2012.
[62] T. Otsuji, S. Boubanga Tombet, A. Satou, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Terahertz wave generation using graphene -toward the creation of terahertz graphene injection lasers," Lester Eastman Conf. on High Performance Devices, Brown Univ. LI, USA, Aug. 7-9, 2012.
[63] T. Otsuji, A. Satou, M. Ryzhii, V. Mitin, and V. Ryzhii, "Terahertz-wave generation using graphene -towards new types of terahertz lasers," NanoSmat Conf., Special Session on "Graphene and other novel two-dimensional

nanostructures", Prague, Czech Republic, Sept. 18-21, 2012.
[64] V. Ryzhii and T. Otsuji, "Concepts of graphene terahertz and infrared devices," New MARE: International School on New Materials and Renewable Energy, Tbilisi, Georgia, Sept. 19-23, 2012.
[65] V. Ryzhii, T. Otsuji, M. Ryzhii, V. Mitin, M.S. Shur, "Graphene-based infrared and terahertz detectors: Concepts, features, and comparison," ICMNE: Int. Conf. on Micro and Nanoelectronics, L2-01, Lipki, Zvenigorod in Moscow, Russia, Oct. 1-5, 2012.
[66] T. Otsuji, A. Satou, S.A. Boubanga Tombet, M. Ryzhii, V. Ryzhii, "Terahertz-wave generation using graphene -towards the creation of graphene injection lasers," ICMNE: Int. Conf. on Micro and Nanoelectronics, L2-02, Lipki, Zvenigorod in Moscow, Russia, Oct. 1-5, 2012.
[67] M. Suemitsu, H. Fukidome, "Epitaxial graphene on silicon," ANM2012(4th International Conference on Advanced Nano Materials), Chennai, India, Oct. 17-19, 2012.
[68] T. Otsuji, "Terahertz-wave generation using graphene -toward new types of terahertz lasers," Technical University of Dresden and Tohoku University Symposium 2012 on "Ultra High Speed Wireless Communications Technologies", Sakura Hall, Tohoku University, Sendai, Nov. 2, 2012.
[69] V. Ryzhii, T. Otsuji, M. Ryzhii, V. Mitin, and M. S. Shur, "Plasmonic effects in double graphene-layer optical modulators and terahertz detectors," ISGD: International Symposium on Graphene Devices, IT-09, Soleil, France, Nov. 5, 2012.
[70] T. Otsuji, A. Satou, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Terahertz-wave generation using graphene towards new types of terahertz lasers," ISGD: International Symposium on Graphene Devices, IT-08, Soleil, France, Nov. 5, 2012.
[71] M. Suemitsu, H. Fukidome, "Epitaxial Graphene Formation on 3C-SiC/Si Thin Films," ISGD: International Symposium on Graphene Devices, Soleil, France, Nov. 5-9, 2012.
[72] T. Otsuji, A. Satou, M. Ryzhii, V. Mitin, and V. Ryzhii, "Graphene terahertz lasers -current injection versus optical pumping," MRS Fall Meeting, W9.03, Boston, Nov. 28, 2012. (invited)
[73] T. Otsuji, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Challenges to create graphene-based terahertz and infrared lasers," Graphene Nanophotonics, Benasque, Spain, March 3-8, 2013.
[74] T. Otsuji, "Stimulated terahertz photons and plasmons emission from compound semiconductors and graphene," 7th THz Days and GDRI Workshop, Cargese, Corsica, France, March 25, 2013.
[75] Hirokazu Fukidome, "Epitaxy of Graphene on Si(100) and Si(111) Faces Simultaneously Formed on Si(100) Substrate," Symposium on Surface and Nano Science 2013, ZAO, Jan. 15-18, 2013.
[76] M. Suemitsu, "Graphene FETs: Issues and Prospects," 20 anniv. AMFPD13 (The twentieth International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices), Kyoto, Jul. 2-5, 2013.
[77] Maki Suemitsu, "Epitaxial graphene formation on Si substrates: its history and current status," Physical Sciences Symposium-2013, Boston, Sep. 4-5, 2013.
[78] T. Otsuji, A. Satou, S.A. Boubanga Tombet, M. Ryzhii, V. Ryzhii, "Terahertz-wave generation using graphene -toward the creation of graphene injection lasers," OTST: International Conference on Optical Terahertz Science and Technology, F1B-1, Kyoto, Japan, April 1-5, 2013.
[79] T. Otsuji, T. Watanabe, S. Satou, V. Popov, and V. Ryzhii, "Graphene active plasmonic metamaterials for new types of terahertz lasers," SPIE-DSS: SPIE

Conf. on Defense, Security+Sensing, DS203 Conf. on "Terahertz Physics, Devices, and Systems VII: Advance Application in Industry and Defense," 8716-24, Baltimore, MD, USA, April 29 - May 3, 2013.

[80] T. Otsuji, "Active plasmons in grapheme: toward the new types of terahertz lasers," WOCSDICE: 37th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits held in Europe, Warnemünde, Germany, May 26-29, 2013.

[81] V. Ryzhii, "Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies," RJUS-2013: the 2nd Russia-Japan-USA Symposium on the Fundamental and Applied Problems of Terahertz Devices and Technologies, Moscow, Russia, June 3-7, 2013. (plenary)

[82] V. Ryzhii, "Infrared and terahertz devices based on double-graphene-layer structures: Concepts, features, and comparison," Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials Vladivostok, Russia, 20-27 August 2013.

[83] T. Otsuji, T. Watanabe, S. Boubanga Tombet, A. Satou, A.A. Dubinov, V. Popov, and V. Ryzhii, "Graphene Active Plasmonics for Superradiant Terahertz Lasing," IRMMW-THz: International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Mainz, Germany, Sept. 1-6, 2013. (plenary)

[84] Sai JIAO, Maki Suemitsu, "Epitaxial Graphene on Silicon Substrates: Current Status and Perspective," Energy Materials Nanotechnology (EMN) East Workshop, Beijing, Chaina, Sept. 7-10, 2013.

[85] T. Otsuji, "Graphene active plasmons toward the new types of terahertz lasers," ICECom: 21st International Conference on Applied Electromagnetics and Communications, Dubrovnik, Croatia, Oct. 14-16, 2013.

[86] Maki Suemitsu, "Heteroepitaxy of 3C-SiC on Si and Formation of Epitaxial Graphene", Japan-Russia joint symposium on semiconductors, Nov. 7, 2013,

[87] T. Otsuji, M. Suemitsu, and V. Ryzhii, "Graphene materials and devices for terahertz science and technology," APMC: Asia-Pacific Microwave Conference, F2A-3, Seoul, Korea, Nov. 5-8, 2013.

[88] T. Otsuji, A. Satou, S. Boubanga Tombet, A.A. Dubinov, V.V. Popov, V. Ryzhii, and M.S. Shur, "Graphene active plasmonics for new types of terahertz lasers," WOFE: Workshop On Frontiers in Electronics, San Juan, Puerto Rico, Dec. 17 - 20 2013.

[89] T. Otsuji, A. Satou, T. Watanabe, A. Dubinov, V. Popov, V. Mitin, and V. Ryzhii, "Terahertz-wave Generation Using Graphene and Compound Semiconductor Nanoheterostructures," NGC: Int. Symp. on Nano and Giga Challenges in Electronics, Photonics and Renewable Energy, Phoenix, AZ, USA, 10-14 March, 2014.

[1] 尾辻, 末光, 末光, リズィー, 佐野, "(グラフェンの応用物性)シリコン上のグラフェンによる超高速・高周波デバイス," 2008 年春季 第 55 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 船橋,千葉, March 28, 2008.

[2] 尾辻泰一, "シリコン上のグラフェンによる高性能集積化デバイス," 電気学会「超集積化・環境 CMOS デバイス調査専門委員会」・「化合物半導体電子デバイス調査専門委員会」合同委員会, 東京, July 25, 2008.

[3] 末光眞希, "シリコン基板上のエピタキシャルグラフェン薄膜作製" 日本学術振興会アモルファス・ナノ材料第 147 委員会 第 102 回研究会「ヘテロ界面における科学と応用」, 東京, 2008.9.26

[4] 末光眞希, "Emerging research device 材料としてのグラフェンとグラフェン・オン・シリコン(GOS)技術" ナノプローブテクノロジー第 167 委員会第 53 回研究会「最新 CMOS 半導体評価技術と Beyond-CMOS の有力素子:グラフェン」, 京都, 2009.1.8-9.

[5] 尾辻泰一, “ヘテロエピタキシャルグラフェン・オン・シリコンとその FET 応用,” 科学研究費補助金 特定領域研究シリコンナノエレクトロニクスの新展開—ポストスケーリングテクノロジー—第三回 成果報告会, 東京、2009.1. 28-29.

[6] 末光哲也, “グラフェンを用いた超高速デバイス,” 日本学術振興会学振 研究開発専門委員会「ナノ物質量子相の科学」・第 181 委員会「分子系の複合電子機能」合同研究会「ナノカーボンの現状と応用への可能性」, 京都, 2009.3.13-14.

[7] 末光眞希、“シリコン基板上でのグラフェンの生成”、第 77 回 有機デバイス研究会、浜松、2009.4.24

[8] 末光眞希、“3C-SiC 上エピタキシャルグラフェン形成と Si 上デバイス応用”、応用物理学会・応用電子物性分科会研究会「グラフェンの形成・基礎物性とデバイス展開」、東京、2009.7.17.

[9] 尾辻 “グラフェンデバイスの開発と今後の展望” 信学技報, Vol. 109, No. SDM-133, pp. 101-106, 東工大大岡山, July 17, 2009.

[10] 末光眞希、“シリコン基板上でのグラフェンの生成”、電子情報通信学会-東北支部講演会、弘前、2009.8.10.

[11] 末光眞希、“グラフェンの形成と機能”、第 12 回薄膜基礎講座、東京、2009.9.29

[12] 末光眞希、“Si 系薄膜の成膜機構の原子・分子レベルでの解明と低温・高品質化”、第 50 回真空に関する連合講演会、東京、2009.11.4.

[13] 尾辻 “グラフェン・オン・シリコン材料・デバイス技術” 第 38 回薄膜・表面物理基礎講座「カーボン系材料の新展開 基礎と応用」, pp. 31-40, 早稲田, Nov. 5, 2009.

[14] 末光眞希、“グラフェン・オン・シリコン技術の構築を目指して”電気・情報東京フォーラム、東京、2009.11.18

[15] 吹留博一、“グラフェンデバイスの現状と期待”、セミコン JAPAN2009、幕張、2009.12.4.

[16] 尾辻, "テラヘルツ ICT の未来とそのデバイス技術," テラヘルツ電磁波産業利用研究会, 大阪科学技術センター, 2010.3.26.

[17] 尾辻泰一, "グラフェンの光・電子デバイス応用－現状と展望," 2010 年秋季 第 71 回 応用物理学会学術講演会 特定領域研究企画「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」, 14a-B-7, 長崎, Sept. 14-17, 2010.

[18] 佐藤昭, 尾辻泰一, リズィーヴィクトール, "グラフェンによる THz 波源," 信学会ソサエティ大会, CI-2-5, 大阪, Spet. 14-17, 2010.

[19] 吹留博一, “SiC グラフェンのデバイス応用と微細加工,” MNC2010 技術セミナー・グラフェン, Kokura, Japan, Nov. 8, 2010.

[20] 尾辻泰一, "THz アクティブプラズモニックメタマテリアル," 国際高等研プロジェクト「メタマテリアルの開発と応用」2010 年度第 2 回研究会, けいはんなプラザ, 京都, Nov. 5th, 2010.

[21] 吹留博一, 小嗣真人, 大河内拓雄, 半田浩之, 渡辺義夫, 木下豊彦, 遠田義晴、末光眞希、Thomas Seyller, Karsten Horn, “基板微細加工援用エピ成長によるグラフェンの高品質化,” 第 6 回放射光表面化学部会顕微ナノ材料科学研究会合同シンポジウム, 東京, Dec 10-12, 2010.

[22] 尾辻泰一, "グラフェンの光・電子デバイス応用 —現状と展望," 日経エレクトロニクス主催 Tech-One セミナー「グラフェンの応用はどこまで可能か」, 東京, Jan. 28, 2011.

[23] 尾辻泰一, "グラフェンテラヘルツレーザー," 2011 年電子情報通信学会電子デバイス研究会特別ワークショップ「ナノチューブ／グラフェンエレクトロニクス：成長からデバイス応用まで」講演予稿集, pp. 123-135, 東京, March 7, 2011.

[24] 尾辻泰一, "グラフェンの性質と応用," 未踏科学技術協会第 59 回特別講演会材料イノベーションシリーズ第 11 回講演予稿, pp. 1-35, 東京, March 9, 2011.

[25] 尾辻泰一, 佐藤 昭, 末光哲也, Maxim Ryzhii, Victor Ryzhii, "二次元プラズモンおよびグラフェンによるテラヘルツ波発生," 春季 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 26p-BX - 3, 厚木, March 26, 2011.

[26] 末光眞希, “グラフェンデバイスの現状と課題,” 平成 22 年度文部科学省ナノテクノロジー・ネットワーク重点ナノテクノロジー支援 放射光利用研究成果報告会「ナノテクノロジー放射光利用研究の最前線 2010」, 名古屋, March 30, 2011.
[27] 末光眞希, "Si 基板上 SiC 成長とエピタキシャルグラフェンの形成", 第17回結晶工学スクール, 大阪, Aug. 2, 2011.
[28] 佐野栄一, "グラフェンによる相補型論理回路", 第49回応用物理学会スクール（2011年秋季）, 山形, Aug.30, 2011.
[29] 末光眞希, "グラフェンのエピタキシャル成長法", 第 49 回応用物理学会スクール（2011年秋季）, 山形, Aug.30, 2011.
[30] 吹留博一, "グラフェンの結晶評価技術", 第49回応用物理学会スクール（2011年秋季）, 山形, Aug.30, 2011.
[31] 尾辻泰一, "グラフェンチャネルトランジスタ", 第49回応用物理学会スクール（2011年秋季）, 山形, Aug.30, 2011.
[32] 佐藤昭, "グラフェンのテラヘルツプラズモニクス＆レーザ応用", 第 49 回応用物理学会スクール（2011 年秋季）, 山形, Aug.30, 2011.
[33] 尾辻泰一, "グラフェンの電子デバイス応用," ファインセラミックスシンポジウム 2011 資料集, pp. 21-28, Winc Aichi, 名古屋, Oct. 26th, 2011.
[34] 佐野栄一, “グラフェンの超高速エレクトロニクス”, 早稲田大学各務記念材料研究所オープンセミナへ, 東京, Oct. 28, 2011.
[35] 尾辻泰一, "グラフェン超高周波光電子デバイス技術の展望," SEMICON Japan 2011, SEMI テクノロジーシンポジウム, STS Session2 先端デバイス, 幕張メッセ, Dec. 8, 2011.
[36] 尾辻泰一, "グラフェンの光電子デバイス応用 -研究動向と将来展望," 第25回ダイヤモンドシンポジウム, 産業技術総合研究所, つくば, Dec. 8, 2011.
[37] 末光 眞希, 宮本 優, 半田 浩之, 齋藤 英司, 今野 篤史, 成田 克, 吹留 博一, 伊藤 隆, 安井 寛治, 中澤 日出樹, 遠藤 哲郎, "SiC 薄膜を介した Si 基板上エピタキシャルグラフェンの形成", 第 31 回表面科学学術講演会, 東京, Dec.16, 2011.
[38] 尾辻 泰一, "二次元プラズモンおよびグラフェンによるテラヘルツ波発生・検出 ," IEEE MTT-S Kansai Chapter 主催 テラヘルツワークショップ "テラヘルツ技術の最新動向と今後の展望," 大阪, Feb. 4, 2012.
[39] 尾辻 泰一, 佐藤 昭, 末光 哲也, 佐野 栄一, マキシム リズィー, ヴィクトール リズィー, "グラフェンのテラヘルツ電子デバイス応用," 電子情報通信学会 テラヘルツ応用システム研究会 「テラヘルツ技術の産業応用 ~THz 波通信の可能性を探る~」, 東京, Feb. 20, 2012.
[40] 末光眞希, "グラフェンエレクトロニクスの可能性, "2012 年春季 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田, 東京, March 15-18, 2012.
[41] 吹留博一, "グラフェンを用いた半導体素子の開発と将来展望," Electronic Journal 第1200 回 Technical Seminar, July 3, 2012.
[42] 尾辻泰一, "グラフェンを用いたテヘルツ光源とその応用," 日本学術振興会・光電相互変換第125委員会／光エレクトロニクス第130委員会／テラヘルツ波科学技術と産業開拓第 182 委員会合同研究会, テーマ:「光と電波の境界領域における最近の話題」, 明治大学駿河台キャンパス, 東京, July 20, 2012.
[43] 尾辻泰一, "グラフェンの光・電子デバイスへの応用," 炭素材料学会セミナー, 連合会館, 東京, Sept. 4, 2012.
[44] 末光眞希, "SiC 薄膜を介した Si 基板上エピタキシャルグラフェン製膜とグラフェンデバイス," 光ナノサイエンス特別講演会, 奈良, Sept. 19, 2012.
[45] T. Otsuji, "Toward the creation of graphene terahertz lasers," FNTG: Fullerenes-Nanotubes- Graphene General Symposium Abstracts, p. 3, Sendai, Japan, Sept. 5-7, 2012.

[46] 尾辻泰一, “グラフェンを用いたテラヘルツ波の発生とその応用,” 第126回微小光学研究会「微小光学の周期表 -元素を見直す-」, 早稲田, 東京, Dec. 7, 2013.
[47] 尾辻泰一, 佐藤 昭, マキシム リズィー, 佐野栄一, 末光眞希, ヴィクトール リズィー, "グラフェンテラヘルツレーザーとフォトニックデバイス応用の可能性," 電子情報通信学会2013 年総合大会, CI-1-3, 岐阜, March 19, 2013.
[48] 吹留博一, "三次元 nanoESCA によるグラフェン・デバイスのその場観察に向けて," ISSP-Workshop（物性研）柏, Feb. 15, 2013.
[49] 末光眞希, "Si 基板上エピタキシャルグラフェンの放射光 PES 評価," 平成 24 年度文部科学省ナノテクノロジプラットフォーム事業 微細構造解析プラットフォーム 「放射光実験設備利用講習会・放射光利用研究セミナー」大阪, Mar. 22, 2013.
[50] 末光眞希, "グラフェンデバイスの現状と課題," 日本学術振興会 産学協力研究委員会ナノプローブテクノロジー第 167 委員会主催の第 70 回研究会「グラフェン・シリセン・CNT」東京, Apr. 18, 2013.
[51] 佐藤昭, "グラフェンを用いた THz 波素子応用," 日本表面科学会 第 77 回表面科学研究会 日本真空学会 2013 年 5 月研究例会「グラフェン応用実用デバイス研究の現状と課題」, 機械振興会館, 東京, May 9, 2013.
[52] 尾辻泰一, "グラフェンの光・電子デバイス応用－技術動向と将来展望－," エレクトロニクスシミュレーション・テラヘルツ応用システムワークショップ, 厚木, May 9, 2013.
[53] 吹留博一, "グラフェンデバイスのオペランド顕微分光," 物性研究所短期研究会「真空紫外・軟X線放射光物性研究の将来」柏, May 28-29, 2013.
[54] H. Fukidome, "In-Operando Nanoscale Characterization of Graphene Device Interfaces by Using Soft X-ray Spectromicroscopy," NIMS conference2013(機能性原子/分子薄膜の構造制御とその応用)つくば, Jul. 1-3, 2013.
[55] 尾辻泰一, "二次元プラズモンによるテラヘルツ波の発生と検出," 電気学会クラウド時代のユビキタス電子デバイス調査専門委員会, 法政大学, 小金井市, July 6, 2013.
[56] T. Otsuji, "Graphene plasmons and their applications to terahertz lasers," 32nd Electronic Materials Symposium, Th1-1, Biwa-ko, Shiga, Japan, July 11th, 2013.
[57] 佐野栄一, “グラフェンテラヘルツデバイス研究のためのシミュレーション技術,” 信学技報, vol. 113, no. 141, pp. 77-82, 稚内, July 18, 2013.
[58] 尾辻, "グラフェン材料・デバイス技術の最前線と将来展望," TEL Advanced Technology Forum 2013 (東京エレクトロンフォーラム), 東京, Aug. 20, 2013.
[59] 尾辻泰一,"グラフェンエレクトロニクス," 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会チュートリアル, 同志社大・京田辺キャンパス, Sept. 16, 2013.
[60] 末光眞希、“SiC 上エピタキシャルグラフェンの成長過程とグラフェン・オン・シリコン技術”、日本物理学会、領域 9 シンポジウム 「二次元物質の成長過程」, Sept. 25-28, 2013.
[61] 尾辻泰一, "グラフェンの超高周波光電子デバイスへの応用," 2013 年真空・表面科学合同講演会シンポジウム, 28Ca04, つくば, Nov. 27-28, 2013.
[62] V. Ryzhii, A. Satou, M. Ryzhii, and T. Otsuji, "Novel concepts and technology for terahertz device applications using graphene," 信学会電子デバイス研究会, 信学技報, vol. 113, no. 357, pp. 91-96,仙台, Dec. 16-17, 2013.
[63] 尾辻, "グラフェンテラヘルツレーザーの創出に向けて," 第9回 放射光表面科学研究部会 顕微ナノ材料科学研究会 合同シンポジウム, 仙台, Dec. 26-27, 2013.
[64] 尾辻, "光・無線融合ネットワークを実現する超高速光電子デバイス技術," 電子情報通信学会マイクロ波フォトニクス研究会, 信学技報, Vol. 113, No. 393, pp. 221-226, 京都, Jan. 24, 2014.

② 口頭発表　　　　　（国内会議 86 件、国際会議 114 件）

[1] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, and T. Otsuji, "Plasma effect and new concept of terahertz devices based on graphene heterostructures," Proc. Advanced Workshop on Frontiers in Electronics, paper No. S1-2, Cozumel, Mexico, Dec. 15-19, 2008.

[2] Y. Yamamoto (Tohoku Univ.), H. Togashi(Tohoku Univ.), Y. Enta (Hirosaki Univ.), A. Yoshigoe (Tohoku Univ.), M. Suemitsu (Tohoku Univ.) and Y. Teraoka (JASRI), "Initial Oxidation of Si(110) as Studied by Real-Time SR-XPS", 15th Workshop on Dielectrics in Microelectronics, Berlin, 2008.6.23.

[3] M.Suemitsu, Y.Miyamoto, H.Handa, and A. Konno, "Graphene formation on a 3C-SiC(111) thin film grown on Si(110) substrate," International Conference on Surface Science, Dublin, UK, June 30 – July 4, 2008.

[4] V. Ryzhii, M. Ryzhii, N. Ryabova, V. Mitin, and T. Otsuji, "Graphene nanoribbon phototransistor: proposal and analysis," Ext. Abst. of the 2008 Int. Conf. on Solid State Device and Materials (SSDM2008), p. 190, Tsukuba, Japan, Sep. 24-26, 2008.

[5] V. Ryzhii, M. Ryzhii, N. Ryabova, V. Mitin and T. Otsuji, "Far infrared and terahertz devices based on graphene heterostructures," Int. Symp. on Nanostructures: Physics and Technology, pp. 1-4, Vladivostok, Russia, July 14-18, 2008.

[6] M. Suemitsu, Y. Miyamoto, H. Handa, and A. Konno, (Tohoku Univ.)「Growth of 3C-SiC(111) on Si(110) substrate for graphene formation」, 4th International WorkShop on New Group Ⅳ Semiconductor Nanoelectronics, Tohoku University, Sendai, Japan (September 2008)

[7] T. Suemitsu, H.-C. Kang, H. Karasawa, Y. Miyamoto, H. Handa, M. Suemitsu, and T. Otsuji, "Graphene/SiC/Si Group-IV Heterostructure Transistors," 17th European Heterostructure Technology Workshop, Venice, Italy, pp. 135-136, Nov. 3-5, 2008.

[8] Y. Miyamoto, H. Handa, A. Konno, and M. Suemitsu, "Growth of 3C-SiC(111) on Si(110) substrate for epitaxial graphene," Int. Symp. on Graphene Devices: Technlogy, Physics and Modeling Tech. Dig., pp. 14-15, Aizu-Wakamatsu, Nov. 17-19, 2008.

[9] V. Mitin, M. Ryzhii, T. Otsuji, N. Kirova, and V. Ryzhii, "Device models for graphene nanoribbon and graphene bilayer phototransistors," Int. Symp. Graphene Devices: Technology, Physics, and Modeling Tech. Dig.", pp. 46-47, Aizu-Wakamatsu, Japan, Nov. 17-19, 2008.

[10] H. Handa, Y. Miyamoto, and M. Suemitsu, "Raman-scattering of graphene formed on 3C-SiC(111) thin film," Int. Symp. on Graphene Devices: Technlogy, Physics and Modeling Tech. Dig., pp. 16-17, Aizu-Wakamatsu, Nov. 17-19, 2008.

[11] C.H. Kang, H. Karasawa, T. Suemitsu, Y. Miyamoto, M. Suemitsu, T. Otsuji, "Transistor operation of graphene channel on silicon substrated with SiC backgate barrier layer," Int. Symp. on Graphene Devices: Technlogy, Physics and Modeling Tech. Dig., pp. 30-31, Aizu-Wakamatsu, Nov. 17-19, 2008.

[12] V. Vyurkov, I. Semenikhin, M. Ryzhii, T. Otsuji, and V. Ryzhii, "Hydrodynamic model of a graphene field-effect transistor," Int. Symp. on Graphene Devices: Technlogy, Physics and Modeling Tech. Dig., pp. 32-33, Aizu-Wakamatsu, Nov. 17-19, 2008.

[13] W. Matsuoka, E. Sano, and T. Otsuji, "Graphene-channel FET characteristics disired for constructing logic circuits," Int. Symp. on Graphene Devices: Technlogy, Physics and Modeling Tech. Dig., pp. 34-35, Aizu-Wakamatsu, Nov. 17-19, 2008.

[14] F.T. Vasko, P.N. Romanets, M.V. Strikha, O. G. Balev, A. Satou, and V. Ryzhii,

"Non-wquilibrium carriers in an intrinsic graphene," Int. Symp. on Graphene Devices: Technlogy, Physics and Modeling Tech. Dig., pp. 48-49, Aizu-Wakamatsu, Nov. 17-19, 2008.
[15] M. Ryzhii, A. Satou, V. Ryzhii, V. Mitin, F.T. Vasko, V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov, and T. Otsuji, “Graphene-based terahertz lasers and detectors: Physics and feasibility of realization,” ESF-FWF Conf. Graphene Week 2009, Obergurgl, Austria, March 2-7, 2009.
[16] V. Ryzhii, M. Ryzhii, M. S. Shur, and V. Mitin, “Graphene tunneling transit-time diode for terahertz generation: proposal, model, and analysis,” International Meeting for Future of Electron Devices Kansai, Osaka, Japan, May 14-15, 2009.
[17] H. Karasawa, T. Komori, T. Watanabe, M. Suemitsu, V. Ryzhii, and T. Otsuji “Observation of Carrier Relaxation and Recombination Dynamics in Optically Pumped Epitaxial Graphene Heterostructures Using Terahertz Emission Spectroscopy” CLEO-Europe: European Conference on Lasers and Electrooptics, CF8.3, Munich, Germany, June 19, 2009.
[18] V. Ya. Aleshkin, A. A. Dubinov, and V. Ryzhii, “Graphene terahertz laser,” 17th International Symposium “Nanostructures: Physics and Modeling,” Minsk, Belarus, June 23-27, 2009.
[19] V. Ryzhii, M. Ryzhii, V. Mitin, and M. S. Shur, “Negative dynamic conductivity in graphene tunneling transit-time device,” 14th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Systems, Sendai, Japan, July 13-17, 2009.
[20] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, El. -M. Amine, and T. Otsuji, "self-excitation of terahertz plasma oscillations in optically pumped graphene-based heterostructures," 8th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM) Abstracts, Fr-B6, Nagano, Japan, Aug. 28, 2009."
[21] H.-C. Kang, H. Karasawa, Y. Miyamoto, H. Handa, T. Suemitsu, M. Suemitsu, and T. Otsuji “Epitaxial graphene field-effect transistors on silicon substrate” 39th European Solid-State Device Research Conf., Paper ID 3422, Athens, Greece, Sept. 15, 2009.
[22] V. Ryzhii, M. Ryzhii, M. S. Shur, and V. Mitin, “Graphene tunneling transit-time device with electrically induced p-i-n junction,” The 34th International Conference on Infrared Millimeter, and Terahertz Waves, Pusan, Korea, Sep. 20-27, 2009.
[23] A. Satou, V. Ryzhii, M. Ryzhii, F. T. Vasko, and T. Otsuji, "Graphene under optical pumping: nonequilibrium distributions, population inversion, and terahertz lasing," SPIE Photonics West 2009, San Jose, CA, USA, Sep. 24-29, 2009; Proc. SPIE, Vol. 7211, pp. 721119, 2009.
[24] H. Fukidome, “Epitaxy of Graphene on Si Substrates toward Three-Dimensional Graphene Devices”, SSDM2009, Sendai, 2009.10.7-10.9
[25] H.-C. Kang, R. Olac-vaw, H. Karasawa, Y. Miyamoto, H. Handa, T. Suemitsu, H. Fukidome, M. Suemitsu, and T. Otsuji “Extraction of drain current and effective mobility in epitaxial graphene channel FETs on silicon substrate” Int. Conf. Solid-State Devices and Materials, J-5-1, Sendai, Japan, Oct. 7-9, 2009.
[26] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, E. M. Amine, and T. Otsuji, “Self-excitation of terahertz plasma oscillations in optically pumped graphene,” International Conference on Solid State Devices and Materials, Sendai, Japan, October 7-9, 2009.
[27] A. Dubinov, V. Aleshkin, M. Ryzhii, T. Otsuji, and V. Ryzhii, “Terahertz laser on optically pumped graphene: concepts and its substantiation,” International Conference on Solid State Devices and Materials, Sendai, Japan, October 7-9, 2009.
[28] Maki Suemitsu,Graphene on silicon (GOS), an emerging material for

post-CMOS devices, Tohoku University and Russian Academy of Sciences Collaborative Research Promotion Workshop Jointly International Science and Technology Center Japan Workshop, Sendai, 2009.10.19.

[29] R. Olac-vaw, H.-C. Kang, H. Karasawa, Y. Miyamoto, H. Handa, H. Fukidome, T. Suemitsu, M. Suemitsu, and T. Otsuji “Ambipolar behavior in epitaxial graphene based FETs on Si substrate” 22nd Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf., 19A-8-3, Sapporo, Japan, Nov. 19, 2009.

[30] H. Karasawa, T. Komori, T. Watanabe, M. Suemitsu, V. Ryzhii, T. Otsuji, "Observation of THz Stimulated Emission in Optically Pumped Epitaxial Graphene Heterostructures," TeraTech'09: The Int. Workshop on Terahertz Technology 2009 Extended Abstract, pp. 339-340, Osaka, Japan, Nov. 30-Dec. 3, 2009.

[31] H.-C. Kang, H. Karasawa, Y. Miyamoto, H. Handa, H. Fukidome, T. Suemitsu, M. Suemitsu, and T. Otsuji “Epitaxial graphene top-gate FETs on silicon substrates” Int. Semiconductor Device Research Symp., College Park, MD, USA, Dec. 9-11, 2009.

[32] R. Olac-vaw, H.-C. Kang, T. Komori, T. Watanabe, H. Karasawa, Y. Miyamoto, H. Handa, H. Fukidome, T. Suemitsu, M. Suemitsu and T. Otsuji “Optoelectronic Application of Multi-layer Epitaxial Graphene on a Si Substrate” Int. NanoElectron. Conf., Hong Kong, Jan. 3-8, 2010.

[33] V. Ryzhii, M. Ryzhii, T. Otsuji, and V. Mitin, "Detectors of terahertz and infrared radiation based on p-i-n single and multiple-graphene layer structures," IEICE Technical Committee Meeting on Electron Devices, Okinawa, Japan, Feb. 22-23, 2010.

[34] R. Olac-vaw , H. C. Kang , T. Komori , T. Watanabe , H. Karasawa , Y. Miyamoto , H. Handa , H. Fukidome , T. Suemitsu , M. Suemitsu , V. Mitin , T. Otsuji, "Heteroepitaxial Graphene on a Si Substrate Field-Effect Transistor," APS March Meeting, Y21.00011, Portland, Oregon, March 15-19, 2010

[35] T. Otsuji, H. Karasawa, T. Komori, T. Watanabe, M. Suemitsu, A. Satou, and V. Ryzhii, "Stimulated terahertz emission from optically pumped epitaxial graphene-on-Si heterostructures," PIERS: Progress in Electromagnetics Research Symposium Dig., 3A3-2, Xian'g, China, March 23-25, 2010.

[36] H. Karasawa, T. Watanabe, T. Otsuji, M. Ryzhii, A. Satou, V. Ryzhii, "Observation of amplified stimulated terahertz emission in optically pumped epitaxial graphene heterostructures," CLEO: Conf. on Lasers and Electrooptics Dig., CMP3, San Jose, CA, USA, May 17-21, 2010.

[37] V. Ryzhii, M. Ryzhii, N. Ryabova, V. Mitin, and T. Otsuji, “Terahertz and infrared detectors based on graphene structures,” Quantum Structure Infrared Photodetector Conference (QSIP2010), Istanbul, Turkey, Aug. 15-20, 2010.

[38] A. El Moutaouakil, H.-C. Kang, H.i Handa, H. Fukidome, T. Suemitsu, E. Sano, M. Suemitsu and T. Otsuji, "Epitaxial graphene-on-silicon logic inverter," SSDM: International Conference on Solide State Devices and Materials, J3-4, Tokyo, Japan, Sept. 22-24, 2010.

[39] M. Ryzhii, T. Otsuji, V. Mitin, M.S. Shur, and V. Ryzhii, "Field-effect in multiple graphene layer structures," SSDM: International Conference on Solide State Devices and Materials, F1-3, Tokyo, Japan, Sept. 22-24, 2010.

[40] A. Satou, T. Otsuji, and . Ryzhii, "Study of hot carriers in optically pumped graphene," SSDM: International Conference on Solide State Devices and Materials, J3-5, Tokyo, Japan, Sept. 22-24, 2010.

[41] H. Fukidome, R. Takahashi, K. Imaizumi, H. Handa, M. Suemitsu, A. Yoshigoe, Y. Teraoka, M. Kotsugi, T. Ohkouchi, T. Kinoshita, and T. Watanabe, "Control of structural and electronic properties of epitaxial graphene by crystallographic orientation of Si substrate," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, W3-04,

Sendai, Japan, Oct. 27, 2010.
[42] H.-C. Kang, S. Takabayashi, K. Akagawa, T. Yoshida, S. Abe, R. Takahashi, F. Fukidome, T. Suemitsu, M. Suemitsu, and T. Otsuji, "DC and RF characteristics of graphene FETs formed by thermal decomposition of SiC grown on silicon substrates," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, W4-04, Sendai, Japan, Oct. 27, 2010.
[43] D. Svintsov, V. Vyurkov, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Effect of "mexican hat" on graphene bilayer field-effect transistor characteristics," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, W4-05, Sendai, Japan, Oct. 27, 2010.
[44] H. Handa, R. Takahashi, S. Abe, K. Imaizumi, E. Saito, M.-H. Jung, S. Ito, H. Fukidome, and M. Suemitsu, "Surface orientation dependence of the structural properties of graphene grown on Si substrate," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, T1-03, Sendai, Japan, Oct. 28, 2010.
[45] M. Ryzhii, T. Otsuji, V. Mitin, and V. Ryzhii, "Characteristics of p-i-n terahertz and infrared photodiodes based on multiple graphene layer structures," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, T3-04, Sendai, Japan, Oct. 28, 2010.
[46] S. Boubanga-Tombet, S. Chan, A. Satou, T. Watanabe, and T. Otsuji, "Terahertz stimulated emission from optically pumped graphene," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, T3-05, Sendai, Japan, Oct. 28, 2010.
[47] A. El Moutaouakil, H.-C. Kang, H. Handa, F. Fukidome, T. Suemitsu, E. Sano, M. Suemitsu, and T. Otsuji, "Room temperature complimentary logic inverter on epitaxial graphene-on-silicon device," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, F2-03, Sendai, Japan, Oct. 29, 2010.
[48] Y. Takatsuka, E. Sano, V.I. Ryzhii, and T. Otsuji, "THz amplifiers based on multilayer graphene and field-enhancement structures," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, F3-02, Sendai, Japan, Oct. 29, 2010.
[49] H.Handa, R.Takahashi, K.Imaizumi, Y.Kawai, H.Fukidome, Y.Enta, M.Suemitsu, M.Kotsugi, T.Ohkochi, Y.Watanabe,, T.Kinoshita, "Formation of Epitaxial Graphene on Mesa-patterned SiC Substrate," 12B-10-12, 23rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Fukuoka, Japan, Nov.9-12, 2011.
[50] M.-H. Jung, H. Handa, R. Takahashi, H. Fukidome and M. Suemitsu, "Formation of High-k Dielectric Films on Graphene by Metal Oxidation for Top-Gated Graphene Device Application," 11D-8-131L, 23rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Fukuoka, Japan, Nov.9-12, 2011.
[51] Hirokazu Fukidome, Masato Kotsugi, Takuo Ohkouchi, Toyohiko Kinoshita, Thomas Seyller, Karsten Horn, Yusuke Kawai, Maki Suemitsu, Yoshio Watanabe, "Novel epitaxy of graphene using substrate microfabrication," APS March Meeting 2011, Dallas, March 21-25, 2011.
[52] A. Satou, S. A. Boubanga Tombet, T. Otsuji, and V. Ryzhii, "Study of threshold behavior of stimulated terahertz emission from optically pumped graphene," OTST: Int. Conf. on Optical Terahertz Science and Technology, TuA3, Santa Barbara, CA, USA, March 13-17, 2011.
[53] S. Boubanga Tombet, T. Watanabe, S. Chan, A. Satou, and T. Otsuji, "Amplified stimulated terahertz emission at room temperature from optically pumped graphene," GDR-I Workshop, Tignes, France, March 29-April 1, 2011.
[54] S.A. Boubanga Tombet, T. Otsuji, and W. Knap, "Coherent and tunable terahertz emission from nano-metric field effect transistor at room temperature," CLEO: Conference on Lasers and Electro-Optics, CMW4, Baltimore, ML, USA, May 2, 2011.
[55] M Suemitsu, H Handa, F Hirokazu "XTEM characterization of epitaxial graphene formed on non-basal SiC surfaces", International Conference on New

Diamond and Nano Carbons2011, Matsue, May 16, 2011.
[56] T. Suemitsu, M. Kubo, R. Takahashi, H. Fukidome, M. Suemitsu, T. Otsuji, "Graphene FETs with SiCN gate stack deposited by PECVD using HMDS vapor," 35th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits (WOCSDICE), Catania, Italy, May 30, 2011, 85-86.
[57] A. Satou, S. Boubanga-Tombet, V. Ryzhii, T. Otsuji, "Threshold Behavior of Stimulated Terahertz Emission from Optically Pumped Graphene," 12th Int. Conf. Science & Application of Nanotubes, Sattelite Symp. on Graphene Technology: Production, Assembly and Applications Abstract, #173, Babbage Lecture Theatre, New Museum site, Cambridge UK, 15-16, July 16, 2011.
[58] M. Suemitsu, "Formation of epitaxial graphene on silicon substrates and control of their stacking properties", Graphene Week 2011: Fundamental Science of Graphene and Applications of Graphene-Based Devices, Obergurgle, Apr. 24, 2011.
[59] M. Suemitsu, H. Fukidome, "Growth of epitaxial graphene on 3C-SiC/Si heterostructure", HeteroSiC-WASMPE2011, Tours, June 30, 2011.
[60] S. Boubanga-Tombet, S. Chan, A. Satou, T. Watanabe, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Amplified stimulated terahertz emission at room temperature from optically pumped graphene," EDISON17: 17th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures, Th2.3, Santa Barbara, Aug. 11, 2011.
[61] V. Ryzhii, "Concepts and characteristics of graphene infrared and terahertz devices," Russian Conf. on Semicond. Physics, Nizhny Novgorod, Russia, Sept. 2011.
[62] H. Fukidome,H. Handa,M. Kotsugi,Th. Seyller,Y. Kawai,T. Ohkouchi,K. Horn,R. Takahashi,K. Imaizumi,Y. Enta,M. Suemitsu,T. Kinoshita", Tuning of Structural and Electronic properties of Epitaxial Graphene by Substrate Microfabrication", 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2011), Nagoya, Sept.30, 2011.
[63] T. Suemitsu, M. Kubo, H. Handa, R. Takahashi, H. Fukidome, M. Suemitsu, T. Otsuji, "Graphene/SiC/Si FETs with SiCN gate stack," ECS Fall Meeting, Boston, MA, Oct. 9-14, 2011.
[64] V. Ryzhii, M. Ryzhii, and T. Otsuji, "Mechanisms of recombination in optically pumped graphene with electron-hole puddles," Conf. on Quantum Nanostructures and Nanoelectronics (QNN2011), Tokyo, Oct. 3, 2011.
[65] S.A. Boubanga Tombet, A. Satou, T. Otsuji, V. Ryzhii, "Stimulated terahertz emission from optically pumped graphene," IRMMW-THz: International Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, W4B.3, Oct. 5, Houston, TX, USA, 2011.
[66] T. Suemitsu, "Epitaxial graphene on silicon substrates," BIT's 1st Annual World Congress of Nano-S&T, Dalian, China, Oct. 23-26, 2011, 399.
[67] H. Fukidome, H. Handa, M. Kotsugi, T.Seyller, Y. Kawai, T. Ohkouchi, K. Horn, R.Takahashi, K. Imaizumi, Y. Enta, M. Suemitsu and T. Kinoshita, "Tuning of Electronic Properties of Epitaxial Graphene on Microfabrication", 24th Int'l Microprocesses and Nanotechnology Conf. (MNC 2011), Kyoto, Oct. 25, 2011.
[68] M. Ryzhii, V. Ryzhii, N. V. Baryshnikov, V. E. Karasik, and T. Otsuji, "Interband detectors of terahertz and infrared radiation based on graphene p-i-n structures," The 31st PIERS in Kuala Lumpur, Malaysia, 27-30 March, 2012.
[69] S. Takabayashi, M. Yang, S. Ogawa, Y. Takakuwa, T. Suemitsu, and T. Otsuji, "Dielectric-tuned Diamondlike Carbon Materials for a High-performance Self-aligned Graphene-channel Field Effect Transistor," MRS Spring Meeting Proc., EE9.4., San Francisco, CA, USA, April 13, 2012.
[70] Y. Meng, S. Ogawa, S. Takabayashi, T. Otsuji, and Y. Takakuwa, "Development

of the Photoemission-assisted Plasma Enhanced CVD Process for Diamond-like Carbon Insulator Films of Graphene FET Gate Stack," MRS Spring Meeting Proc., EE9.10., San Francisco, CA, April 13, 2012.
[71] V. Ryzhii, M. Ryzhii, N. Ryabova, S. O. Yurchenko, M. S. Shur, A. Satou, and T. Otsuji, "Graphene-based electro-optical modulator: concept and analysis," Int. Meeting for Future of Electron Devices, Osaka, May 9-11, 2012.
[72] M.-H. Jung, G.-H. Park, Y. Tomohiro, H. Fukidome, T. Suemitsu, T. Otsuji and M. Suemitsu, "High performance graphene field-effect transistors with extremely small access length using self-aligned source and drain technique," APEMC: Asia-Pacific Symposium on Electro-Magneic Compatibility, Singapore, May 21-24, 2012.
[73] T. Otsuji, S. Boubanga Tombet, A. Satou, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Toward the creation of terahertz graphene injection lasers," ICOOPMA12: Inc. Conf. on Optical, Optoelectronic, and Photonic Materials and Applications Abstracts, 4C2-3, p. 111, Nara, Japan, June 7, 2012.
[74] S. Takabayashi, M. Yang, S. Ogawa, Y. Takakuwa, T. Suemitsu, and T. Otsuji, "Dielectric-tuned diamondlike carbon materials for an ultrahigh-speed self-aligned graphene channel field effect transistor," 4th Int. Conf. on Smart Materials, Structures, and Systems, CIMTEC, A-13.3:L13, Montecatini Terme, Italy, June 14, 2012.
[75] V. Ryzhii, N. Ryabova, M. Ryzhii, T. Otsuji, V. Mitin, and V.E. Karasik, "Concepts of Terahertz and Infrared Detectors Based on Graphene Structures," Quantum Structure Infrared Photodetectors (QSIP2012) Abstract, p. 33, Corsica, June 17-22, 2012.
[76] V. Ryzhii and T. Otsuji, "Graphene terahertz injection lasers: concepts and feasibility of realization," 2012 Advanced Research Workshop on Future Trends in Microelectronics (FTM-7) Digest, p. 22, Corsica, June 25-29, 2012.
[77] T. Otsuji, S. Boubanga Tombet, A. Satou, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Toward the creation of terahertz graphene injection lasers," ICSFS: Int. Conf. on Solid Films and Surfaces, GRA2-2, Genoa, Italy, July 2, 2012.
[78] A. Satou, H. Shida, T. Otsuji, and V. Ryzhii, "Simulation of terahertz plasmons in graphene and heterostructure two-dimensional electron gas," TeraNano 2012: 2nd Int. Symp on Terahertz Nanoscience, Okinawa, Japan, July 4, 2012.
[79] V. Ryzhii, T. Otsuji, M. Ryzhii, and V. Mitin, "Terahertz graphene lasers: injection versus optical pumping," ICPS: 31st Int. Conf. on Physics of Semiconductors, Zurich, Swiss, July 29th-Aug. 3rd, 2012.
[80] M. Ryzhii, T. Otsuji, S. Yurchenko, N. Ryabova, V. Ryzhii, and M. S. Shur, "Plasma effects in graphene-based electro-optical modulators," The 32nd PIERS: Progress in Electromagnetics Research Symp., Moscow, Russia, August 19-23, 2012.
[81] M. Suemitsu, S. Sambonsuge, E. Saito, MH. Jung, H. Fukidome, S. Filimonov, "High-rate rotated epitaxy of 3C-SiC(111) on Si(110) substrate for qualified epitaxial graphene on silicon," ECSCRM2012 (9 European Conference on Silicon Carbide & Related Materials), St. Petersburg, Russia, Sept.2-6, 2012.
[82] S. Sambonsuge, E. Saito, MH. Jung, H. Fukidome, S. Filimonov, and M. Suemitsu, "Rotated epitaxy of 3C-SiC(111) on Si(110) using monomethylsilane-based gas-source molecular-beam epitaxy" ECSCRM2012 (9 European Conference on Silicon Carbide & Related Materials), St. Petersburg, Russia, Sept.2-6, 2012.
[83] H. Fukidome, N. Nagamura, K. Horiba, S. Toyoda, S. Kurosumi, T. Shinohara, T. Ide, M. Oshima, M. Suemitsu, K. Nagashio, A. Toriumi, and M. Oshima, "Definite Observation of Interfacial Charge Transfer in Graphene Transistor by Using Soft X-ray 3D Scanning Photoelectron Microscopy," SSDM (2012

International Conference on Solid State Devices and Materials), Kyoto, Sept. 27, 2012.
[84] D. Svintsov, I. Semenikhin, V. Vyurkov, V. Ryzhii, T. Otsuji, "Voltage-controlled surface plasmon-polaritons in double-graphene structures," ICMNE: Int. Conf. on Micro and Nanoelectronics, O1-06, Moscow, Russia, Oct. 3, 2012.
[85] A. Satou, H. Shida, T. Otsuji, and V.V. Popov, "Theoretical study of terahertz plasma instability in asymmetric double-grating gate transistor structures," ICMNE: Int. Conf. on Micro and Nanoelectronics, O1-05, Moscow, Russia, Oct. 3, 2012.
[86] M. Suemitsu, "High Speed Graphene Field-effect Transistors Using Self-aligned Source and Drain Formation Technique," Nano-S&T (Nano Sciences & Technologies2012), Qingdao, Section2-12, China, Oct. 26-28, 2012.
[87] R. Sato, H. Fukdome, and M. Suemitsu, "In situ Observation of Graphene during Gate Oxide Formation," MNC2012 (25th International Microprocesses and Nanoetechnology Conference), 1D-4-4, Kobe, Japan, Oct. 30-Nov.2, 2012.
[88] V. Vyurkov, D. Svintsov, A. Orlikovsky, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Tunnel graphene field-effect transistor," ISGD: International Symposium on Graphene Devices, Soleil, France, Nov. 5-9,2012.
[89] V. Mitin, F. T. Vasko, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Interplay of intraband and interband absorption in a disordered graphene," ISGD: International Symposium on Graphene Devices, OC-05, Soleil, France, Nov. 5, 2012.
[90] S. Takabayashi, M. Yang, T. Eto, H. Hayashi, S. Ogawa, Y. Takakuwa, T. Suemitsu, and T. Otsuji, "Carrier remote doping effect in graphene-channel FET's with diamondlike carbon gate dielectrics," ISGD: International Symposium on Graphene Devices, OC-14, Soleil, France, Nov. 5, 2012.
[91] V. Mitin, F. T. Vasko, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Distinctiveness of nonequilibrium carriers in disordered graphene," TeraNano III: 3rd Int'l Symp. on Terahertz Nanoscience, Honolulu, Hawaii, Dec. 10-12, 2012.
[92] A. Satou, T. Otsuji, F.T. Vasko, V.V. Mitin, and V. Ryzhii, "Numerical study of plasmons in gated graphene structures,"TeraNano III: 3rd Int'l Symp. on Terahertz Nanoscience, Honolulu, Hawaii, Dec. 10-12, 2012.
[93] A. Satou, V. Ryzhii, F.T. Vasko, V.V. Mitin, T. Otsuji, "Numerical simulation of terahertz plasmons in gated graphene structures," SPIE Photonics West, 8624-37, San Francisco, CA, Feb. 6, 2013.
[94] T. Eto, S. Takabayashi, Y. Kurita, M. Yang, H. Hayashi, R. Jesko, S. Ogawa, Y. Takakuwa, T. Suemitsu, and T. Otsuji, "Graphene-channel FET with -doped diamondlike carbon top-gate dielectrics," The 9th International Thin-Film Transistor Conference, 1pAO06, March 1-2, 2013.
[95] H. Fukidome, T. Ide, H. Handa, Y.Kawai, F. Fromm, M. Kotsugi, T. Ohkouchi, H. Miyashita, Y. Enta, T. Kinoshita, Th. Seyller, M.Suemitsu, "Spatial Confinement of Epitaxy of Graphene on Microfabricated SiC to Suppress Thickness Variation," AVS 59th International Symposium & Exhibition, Florida, Oct. 28-Nov. 2, 2012.
[96] Hirokazu Fukidome, Naoka Nagamura, Koji Horiba, Shodai Kurosumi, Toshihiro Shinohara, Takayuki Ide, Maki Suemitsu, Kousuke Nagashio, Akira Toriumi and Masaharu Oshima, "Operando Analysis of Graphene Transistor by Soft X-ray 3D Scanning Photoelectron Microscopy," 3rd Internatinal Symposium on Graphene Devices (ISGD-3), Saint-Aubin, Nov. 5-9, 2012.
[97] Akira Satou, Yuuki Kurita, Taiichi Otsuji and Victor Ryzhii, "Terahertz population inversion and negative dynamic conductivity in optically pumped graphene: dependence on pumping photon energy," OTST: International Conference on Optical Terahertz Science and Technology, W3B-6, Kyoto, Japan, April 2, 2013.

[98] H. Fukidome, "Microscopic Control of structural and electronic properties of graphene," Graphene Week 2013, Chemnitz, Jun. 2-7, 2013.
[99] M. Ryzhii, T. Otsuji, M.S. Shur, V. Mitin, and V. Ryzhii, "Plasma Resonant Terahertz Photomixers Based on Double Graphene Layer Structures," RJUS-2013: the 2nd Russia-Japan-USA Symposium on the Fundamental and Applied Problems of Terahertz Devices and Technologies, Moscow, Russia, June 3-7, 2013.
[100] A. Satou, "Frequency Dispersion and Damping Mechanisms of Terahertz Plasmons in Graphene Transistor Structures," RJUS-2013: the 2nd Russia-Japan-USA Symposium on the Fundamental and Applied Problems of Terahertz Devices and Technologies, Moscow, Russia, June 3-7, 2013.
[101] S. Jiao, Y. Murakami, Y. Tateno, T. Nakabayashi, H. Fukidome, and M. Suemitsu, "High quality graphene formation on 3C-SiC/4H-AlN/Si heterostructure・Session 2.1: Graphene," HeteroSic-WASMPE2013, Nice, Jun. 17-19, 2013.
[102] T. Watanabe, T. Fukushima, P.A. Russel, A. Satou, D.M. Mittleman, J. Kono, and T. Otsuji, "Observation of Terahertz Resonant Absorption in Graphene Micro-Ribbon Arrays," CLEO-PR: 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, WC4-2, Kyoto, Japan, June 26, 2013.
[103] V. Ryzhii, T. Otsuji, A. Satou, M. Ryzhii, V. Mitin, and M.S. Shur, "Resonant plasmonic terahertz photomixing in double-graphene layer structures", EDISON: The 18th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures, Mo1-4, Matsue, Japan, July 22-26, 2013.
[104] A. Satou, V. Ryzhii, V.V. Mitin, F.T. Vasko, and T. Otsuji, "Frequency dispersion and damping mechanisms of terahertz plasmons in graphene transistor structures," EDISON: The 18th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures, Mo1-5, Matsue, Japan, July 22-26, 2013.
[105] V. Ryzhii, A. Satou T. Otsuji, M. Ryzhii, V. Mitin, M. S. Shur, "Concepts of plasmonic terahertz devices based on double-graphene layer structures,"RPGR2013: Recent Progress on Graphene Research, 10p-A3-O1, Tokyo Tech Front, Tokyo, Japan, Sept. 9-13, 2013.
[106] Sai Jiao, Hirokazu Fukidome, Yasunori Tateno, Takashi Nakabayashi and Maki Suemitsu, "From 3C-SiC growth to graphene formation using 4H-AlN(0001)/Si(111) heterostructure・Symposium C 18p-M8-13," 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, Kyoto, Sep. 16-20, 2013.
[107] K. Kojima, T. Fukushima, P. Russel, T. Watanabe, A. Satou, J. Kono, and T. Otsuji, "Terahertz resonant absorption in graphene micro-ribbon array," 2013 JSAP-MRS Joint Symposia Symposium C: dvanced Nano Carbon Devices and Materials, 19p-M8-10, Doushisha-Univ., Kyoto, Japan, Sept 19, 2013.
[108] A. Satou, Y. Kurita, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Terahertz population inversion in optically pumped graphene: dependence on pumping photon energy," 2013 JSAP-MRS Joint Symposia Symposium C: dvanced Nano Carbon Devices and Materials, 19p-M8-9, Doushisha-Univ., Kyoto, Japan, Sept 19, 2013.
[109] T. Kawasaki, A. Dobroiu, T. Eto, Y. Kurita, K. Kojima, Y. Yabe, H. Sugiyama, T. Watanabe, S. Takabayashi, T. Suemitsu, V. Ryzhii, K. Iwatsuki, T. Otsuji, Y. Fukada, J. Kani, J. Terada, and N. Yoshimoto, "Graphene-channel FETs for photonic frequency double-mixing conversion over the sub-THz band," ESSDERC: European Symposium on Solid-state Devices and Circuits, Dobrobnik, Croatia, Sept. 16-20, 2013.
[110] Sai Jiao, Hirokazu Fukidome, Yasunori Tateno, Takashi Nakabayashi and Maki Suemitsu, "From 3C-SiC growth to graphene formation using

4H-AlN(0001)/Si(111) heterostructure," JSAP-MRS Joing Symposium, Sept. 16-20, 2013.
[111] S. Jiao, H. Fukidome, H. Nagasawa, S. Filimonov, M. Tateno, I. Makabe, T. Nakabayashi, and M. Suemitsu, "Epitaxial Graphene Formation on 3C-SiC(111)/4H-AlN(0001) Double Layer Stacking on Si(111) Substrates," The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2013), Sept. 29-Oct. 4, 2013.
[112] H. Fukidome, T. Ide, M. Suemitsu, Y. Kawai, T. Ohkouchi, M. Kotsugi, T. Kinoshita, T. Shinohara, N. Nagamura, S. Toyoda, K. Horiba, M. Oshima, "Microscopic Control of Epitaxial Graphene on SiC(111) and SiC(100) Thin Films on a Microfabricated Si(100) Substrate," AVS 60th International Symposium & ExhibitionLosAngels, Oct. 26-Nov. 2, 2013.
[113] G.-H. Park, H. Fukidome, T. Suemitsu, T. Otsuji and M. Suemitsu, "Solution-processed Al2O3 for gate dielectrics in Top-Gated Graphene Field Effect Transistors," MNC2013, 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Nov.5-8, 2013.
[114] T. Otsuji, A. Satou, T. Watanabe, S.A. Boubanga Tombet, A. Dubinov, V. Popov, V. Mitin, and V. Ryzhii, "Graphene active plasmonics and their applications to terahertz lasers and sensors," SPIE OPTO, Conference on "Quantum Sensing and Nanophotonic Devices XI," 8993-80, San Francisco, CA, USA, 1 - 6 Feb., 2014.

[1] 宮本優, 末光眞希, 半田浩之, 今野篤史, (東北大学)「Si 基板上 3C-SiC 薄膜の熱改質によるグラフェン・グラファイト形成」, 第 69 回応用物理学会学術講演会, 中部大学, 2008 年 9 月
[2] 宮本優, 半田浩之, 齋藤英司, 末光真希 , 吹留博一 , 伊藤隆 "Si 基板上 SiC 薄膜を用いたエピタキシャルグラフェン成長,"「ゲートスタック研究会 ―材料・プロセス・評価の物理―」(第14回研究会), 三島, 2009, Jan., 23-24
[3] Eiji Saito, "Real-time monitoring of SiC growth on Si substrates using pyrometric interferometry," Changwon National University(Korea)-Tohoku University(Japan) Joint Symposium, Changwon, 2009, Feb. 24.
[4] 齋藤英司, 伊藤隆, 遠藤哲郎, 安井寛治, 中澤日出樹, 成田克, 末光眞希, "Si 基板上多結晶 3C-SiC の超高速製膜",「平成 20 年度日本表面科学会東北・北海道支部講演会」, 仙台, 2009, March 12-13.
[5] 松岡渉、佐野栄一、尾辻泰一、" グラフェン-チャネル FET を用いた論理回路の解析," 電子情報通信学会全国大会、松山、2009.3.17-20.
[6] 齋藤 英司, 伊藤 隆, 遠藤 哲郎, 安井 寛治, 中澤 日出樹, 成田 克, 末光 眞希 "有機シラン ULP-CVD による多結晶 3C-SiC の低温・超高速製膜"「第 56 回応用物理学関係連合講演会」, つくば, 2009, March 30.
[7] 宮本優,, 末光眞希, 半田浩之, 吹留博一, 伊藤隆, 末光眞希 "Si 基板上に成長させたグラフェンの共鳴 Raman 分光" 「第56回応用物理学関係連合講演会」, つくば 2009, March 31.
[8] 姜, 唐澤, 宮本, 半田, 末光, 末光, 尾辻 "Si 基板上に形成したエピタキシャルグラフェンとそのトランジスタへの応用" 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 筑波, Apr. 1, 2009.
[9] 吹留博一、"Epitaxial Growth of Graphene on Silicon Substrates", 蔵王 09 研究会、山形蔵王、2009.8.2-8.3
[10] 半田浩之、宮本優、斎藤英司、吹留博一、末光眞希、"グラフェン化高温アニール処理における Si 基板上 3C-SiC 薄膜の結晶性変化"、第 70 回応用物理学会学術講演会、富山、2009.9.8-9.11
[11] 吹留博一、半田浩之、宮本優、斎藤英司、末光眞希、"Si(111), Si(100), Si(110)基板

表面上へのグラフェン・オン・シリコンの形成"、第 70 回応用物理学会学術講演会、富山、2009.9.8-9.11
[12] 姜顯澈，唐澤宏美，宮本優，半田浩之，末光哲也，吹留博一，末光眞希，尾辻泰一 "エピタキシャルグラフェン電界効果トランジスター" 第 70 回応用物理学会学術講演会, 8a-TC-4,富山, Sept. 8, 2009.
[13] 唐澤宏美，小森常義，渡辺隆之，末光眞希，リズィー ヴィクトール，尾辻泰一 "光励起グラフェンにおけるキャリア緩和・放射再結合過程の観測" 第 70 回応用物理学会学術講演会, 10a-M-7,富山, Sept. 10, 2009.
[14] 松岡渉、佐野栄一、尾辻泰一、両極性電界効果トランジスタを用いた論理回路の解析、2009 信学会ソサイエティ大会、C-10-10、2009 年 9 月 18 日。
[15] 高橋良太、半田浩之、宮本優、吹留博一、末光眞希、"グラフェン・オン・シリコン表面構造の LEED 観察"、第 29 回表面科学学術講演会、東京、2009.10.27-29.
[16] 半田浩之、高橋良太、宮本優、斎藤英司、吹留博一、末光眞希、"熱改質グラフェン形成における 3C-SiC 薄膜の表面モフォロジー"、第 29 回表面科学学術講演会、東京、2009.10.27-29.
[17] 唐澤, 渡辺, 小森, 末光, Ryzhi, 尾辻, "光学励起グラフェンによるコヒーレントテラヘルツ放射の観測," 信学技報, Vol. 109, No. 313, (ED2009-167), pp. 53-58, Nov. 2009.
[18] 阿部峻佑、半田浩之、高橋良太、宮本優、吹留博一、末光眞希、"Si 基板上グラフェン形成過程の昇温脱離法による研究"、第64回応用物理学会東北支部学術講演会、福島郡山、2009.12.3.
[19] 松岡 渉、佐野栄一、尾辻泰一、グラフェン FET を用いたディジタル回路の性能予測、2010 信学会総合大会、C-10-13、2010 年 3 月 17 日。
[20] 唐澤宏美，小森常義，渡辺隆之，末光眞希，リズィー ヴィクール，尾辻泰一，"光学励起グラフェンによるコヒーレントテラヘルツ放射の観測," 第 57 回応物関係連合講演会予稿集, 19a-L9, p. , 東海大, 神奈川, March 17-19, 2010.
[21] 久保真人，Hyun-Chul Kang，唐澤宏美，宮本 優，半田浩之，吹留博一，末光哲也，末光眞希，尾辻泰一，"シリコン基板上におけるトップゲート型エピタキシャルグラフェン FET," 第 57 回応物関係連合講演会予稿集, 20p-TD3, p. , 東海大, 神奈川, March 17-19, 2010.
[22] ヒョンチュル カン，唐澤宏美，宮本 優，半田浩之，末光哲也，末光眞希，尾辻泰一，"Si 基板上グラフェンに形成したオーミック電極のコンタクト抵抗の評価," 第57回応物関係連合講演会予稿集, 20p-TD6, p. , 東海大, 神奈川, March 17-19, 2010.
[23] 鷹林 将，高橋良太，末光哲也，吹留博一，末光眞希，尾辻泰一，"グラフェン/白金コンタクト界面の化学結合," 2010 年秋季 第 71 回 応用物理学会学術講演会, 15p-ZK-9, 長崎, Sept. 14-17, 2010.
[24] 久保真人，Hyun-Chul Kang，高橋良太，半田浩之，鷹林 将，吹留博一，末光哲也，尾辻泰一，"H2 アニールによるエピタキシャルグラフェンの電気特性への影響," 2010 年秋季 第 71 回 応用物理学会学術講演会, 15p-ZK-8, 長崎, Sept. 14-17, 2010.
[25] 高塚 裕也，佐野 栄一，リズィー ヴィクトール，尾辻 泰一，"利得媒質と電場増強効果を用いたテラヘルツ増幅器," 信学会ソサエティ大会，C-10-7，大阪，Sept. 14-17, 2010.
[26] 半田浩之，高橋良太，今泉 京，川合祐輔，吹留博一，遠田義晴，末光眞 1，小嗣真人，大河内拓雄，渡辺義夫，木下豊彦，"6H-SiC 基板上微細メサ構造へのエピタキシャルグラフェン形成，" 第 71 回応用物理学会学術講演会，16a-ZM-8，長崎，Sept. 14-17, 2010.
[27] 高橋良太，半田浩之，宮本 優，阿部峻佑，斎藤英司，今泉 京，吹留博一，末光眞希，寺岡有殿，吉越章隆，"3C-SiC(111)極薄膜上エピタキシャルグラフェン形成過程の LEED 観察，" 第 71 回応用物理学会学術講演会，16a-ZM-12，長崎，Sept. 14-17, 2010.

[28] 阿部峻佑, 半田浩之, 齋藤英司, 高橋良太, 今泉　京, 吹留博一, 末光眞希, “モノシランプレアニールによるグラフェン・オン・シリコンの高品質化,” 第 71 回応用物理学会学術講演会, 16a-ZM-13, 長崎, Sept. 14-17, 2010.
[29] 今泉　京, 高橋良太, 半田浩之, 斉藤英司, 吹留博一, 末光眞希, 寺岡有殿, 吉越章隆, “超低圧酸素雰囲気下での Si 基板上低温グラフェン形成過程のリアルタイム放射光光電子分光,” 第 71 回応用物理学会学術講演会, 16a-ZM-14, 長崎, Sept. 14-17, 2010.
[30] 鄭　明鎬, 半田浩之, 高橋良太, 吹留博一, 末光眞希, “ポリマーゲート絶縁膜を用いたグラフェントランジスタの電気特性,” 第 71 回応用物理学会学術講演会, 15p-ZK-10, 長崎, Sept. 14-17, 2010.
[31] 齋藤英司, 末光眞希, “モノメチルシラン ULPCVD による Si 基板上 3C-SiC 低温・超高速製膜,” 第 71 回応用物理学会学術講演会, 14a-ZS-8, 長崎, Sept. 14-17, 2010.
[32] 猪俣州哉、半田浩之、阿部峻佑、高橋良太、今泉　京、吹留博一、寺岡有殿、吉越章隆、小嗣真人、大河内拓雄、木下豊彦、末光眞希, “3C-SiC(100)/Si(100)薄膜上グラフェン形成過程の LEED,SR-XPS 観察,” O-09, 平成 22 年度日本表面科学会東北・北海道支部講演会, 仙台, Nov. 9-10, 2010.
[33] 高塚裕也、佐野栄一、リズィーヴィクトール、尾辻泰一、利得媒質と電場増強効果を用いたテラヘルツ増幅器、電子情報通信学会電子デバイス研究会，ED2010-162, pp. 25-29, Dec. 16, 2010.
[34] 佐藤昭, ヴィクトール リズィー, ステファン ボウバンガ-トムベット, 尾辻泰一, "光学励起グラフェンの非平衡キャリア緩和過程とテラヘルツ帯における反転分布 ," 電子情報通信学会電子デバイス研究会, 仙台, Dec. 16, 2010.
[35] 久保真人, 半田浩之, 姜顯澈, 福嶋哲也, 高橋良太, 鷹林将, 吹留博一, 末光哲也, 末光眞希, 尾辻泰一, "Si(001)基板上におけるグラフェン FET," 電子情報通信学会総合大会, C-10-2, 東京, March 14-17, 2011.
[36] 鷹林　将, 久保真人, 高橋良太, 吹留博一, 末光眞希, 末光哲也, 尾辻泰一, "グラフェン/ 金属界面の化学," 春季 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 24a-KV - 3, 厚木, March 24, 2011.
[37] 久保真人, 福嶋哲也, 姜　顯澈, 赤川啓介, 吉田智洋, 高橋良太, 半田浩之, 鄭　明鎬, 鷹林　将, 吹留博一, 末光哲也, 末光眞希, 尾辻泰一, "HMDS-SiN をゲート絶縁膜として用いたグラフェン FET," 春季 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 27a-KQ - 4, 厚木, March 27, 2011.
[38] 鷹林　将, 小川修一, 高桑雄二, 姜　顯澈, 高橋良太, 吹留博一, 末光眞希, 末光哲也, 尾辻泰一, "ダイヤモンドライクカーボンをゲート絶縁膜としたグラフェン FET," 春季 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 27a-KQ - 6, 厚木, March 27, 2011.
[39] 今泉　京, 高橋良太, 阿部峻佑, 半田浩之, 齋藤英司, 吹留博一, 末光眞希, “モノメチルシランを用いた 6H-SiC(0001)上ホモエピタキシャル成長とグラフェン化”, 第58回応用物理学関係連合講演会, 26p-BM-3,, 厚木, March 26, 2011.
[40] 高橋良太, 半田浩之, 阿部峻佑, 猪俣州哉, 今泉　京, 吹留博一, 寺岡有殿, 吉越章隆, 小嗣真人, 末光眞希, 大河内拓雄, 木下豊彦, “面方位回転エピタキシャル成長 3C-SiC(111)/Si(110)薄膜上グラフェン成長過程の LEED、SR-XPS 観察,” 第58回応用物理学関係連合講演会, 26p-BM-4, 厚木, March 26, 2011.
[41] 福嶋哲也, 渡辺隆之, 谷本雄大, Boubanga Tombet Stephene, 佐藤　昭, 尾辻泰一, "Observation of Stimulated Emission from Optically Pumped Graphene by Using Terahertz Photon Echoes," 平成 23 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2A10, 多賀城, Aug. 25-26, 2011.
[42] S. Boubanga Tombet, Y. Tanimoto, and T. Otsuji, "Room Temperature Terahertz Emission from coherent excitation of 2D plasmon," 電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス研究会, 信学技報, Vol. 111, No. 186, LQE2011-53, pp. 117-121, 北大, 北海道, Aug. 26, 2011.

[43] 鄭　明鎬, 全　春日, 吹留博一, 末光哲也, 尾辻泰一, 末光眞希, "Dual-gate 動作による graphene channel 変調と超高速デバイスへの応用", 2011 年秋季第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形, Aug. 31, 2011.
[44] 猪俣州哉, 半田浩之, 阿部峻佑, 高橋良太, 今泉　京, 吹留博一, 末光眞希, 寺岡有殿, 吉越章隆, 小嗣真人, 大河内拓雄, 木下豊彦, "Si(100)基板上 3C-SiC(100)エピタキシャル薄膜のグラフェン形成過程の LEED 及び SR-XPS 観察", 2011 年秋季第 72 回応用物理学会学術講演会　　山形, Sept.1, 2011.
[45] 井出隆之, 吹留博一, 半田浩之, 小嗣真人, トーマス ザイラー, 川合祐輔, 大河内拓雄, カーステン ホルン, 高橋良太, 遠田義晴, 今泉　京, 末光眞希, 木下豊彦, "SiC 微細メサ構造上に形成したエピタキシャルグラフェンの電子状態の観察", 2011 年秋季第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形, Sept.1, 2011.
[46] 今泉　京, 齋藤英司, 伊藤　俊, 吹留博一, 末光眞希, "モノメチルシランを用いた 6H-SiC(0001)上 3C-SiC 成長とグラフェン化", 2011 年秋季第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形, Sept.1, 2011.
[47] 田中　遥、佐野栄一、アンビポーラ FET を用いた発振回路、2011 信学会ソサイエティ大会、C-10-2、Sept. 13, 2011.
[48] 楊　猛, 小川　修一, 鷹林　将、尾辻　泰一, 高桑　雄二, "DLC 膜成長の光電子制御プラズマ放電条件依存," 第52回真空に関する連合講演会, 日本真空協会, 東京, Nov. 17, 2011.
[49] 楊　猛, 小川　修一, 鷹林　将、尾辻　泰一, 高桑　雄二, "トップゲート・グラフェン FET のダイヤモンドライクカーボン絶縁膜形成プロセスの開発," 応用物理学会東北支部第66回学術講演会,いわき市, Dec. 1, 2011.
[50] 福嶋哲也, シルビア　チャン, ステファン　ボウバンガ　トンベット, ビクトール　リズィー, ヴィチェスラブ　ポポフ, 尾辻泰一, "グラフェンリボン格子における二次元プラズモンモードの観測," 電子情報通信学会電子デバイス研究会, 信学技報　Vol. 111, No. 338, pp. 69-73, Dec. 15, 2011.
[51] 渡辺隆之, ステファン　ボウバンガ　トムベット, 福嶋哲也, 佐藤昭, 尾辻泰一, ヴィクトール　リズィー, "光学励起グラフェンのテラヘルツ誘導増幅放出," 電子情報通信学会電子デバイス研究会, 信学技報　Vol. 111, No. 338, pp. 79-83, Dec. 15, 2011.
[52] 姉崎　豊, 大谷　孝, 浅野　翔, 加藤　有行,末光　眞希, 成田　克, 中澤　日出樹, 加藤孝弘, 安井　寛治, "SiC 層に埋め込まれた Ge ナノドットの発光特性", 第 31 回表面科学学術講演会, 東京, Dec.17, 2011.
[53] 鷹林　将, 楊　猛, 小川　修一, 高桑　雄二, 末光　哲也, 尾辻　泰一, "ダイヤモンドライクカーボン薄膜をトップゲート絶縁膜としたグラフェン　FET," 応用物理学会　薄膜・表面物理分科会、シリコンテクノロジー分科会　共催特別研究会「ゲートスタック研究会　—材料・プロセス・評価の物理—」第 17 回研究会予稿集, pp. 21-24, 三島, Jan. 21, 2012.
[54] 高塚裕也, 高萩　和宏, 佐野　栄一, Victor RYZHII, 尾辻　泰一, "共振構造導入によるグラフェンテラヘルツ増幅器の高利得化," 信学技報　vol. 111, no. 425, ED2011-148, pp. 35-40, 北大, 札幌, Feb. 7, 2012.
[55] 渡辺　隆之, ステファン　ボウバンガ　トムベット, シルビア　チャン, 福嶋　哲也, 佐藤　昭, ヴィクトール　リズィー　, 尾辻　泰一, "光学励起グラフェンのテラヘルツ誘導増幅放出," 応用物理学会春季学術講演会, 早稲田, 東京, March 15-18, 2012.
[56] 朴　君昊, 鄭　明鎬, 全　春日, 吹留　博一, 吉田　智弘, 末光　哲也, 尾辻　泰一, 末光眞希, "Graphene field effect transistor using a novel self-aligned technique for high speed applications,"応用物理学会春季学術講演会, 早稲田, 東京, March 15-18, 2012.
[57] 鷹林将, 楊猛, 小川修一, 高桑雄二, 末光眞希, 末光哲也, 尾辻泰一, "ダイヤモンドライクカーボントップゲート絶縁膜によるグラフェンチャネル　FET　のチャネルドーピング制御,"　応用物理学会春季学術講演会, 17p-B2-3, 早稲田, 東京, March 15-18, 2012.

[58] 福嶋哲也, Silvia Chan, Stephene Boubanga Tombet, Victor Ryzhii, Vyacheslav Popov, 尾辻泰一, "グラフェンリボンアレイにおける二次元プラズモン共鳴の観測," 応用物理学会春季学術講演会, 早稲田, 東京, March 15-18, 2012.
[59] 鷹林将, 楊猛, 小川修一, 高桑雄二, 吹留博一, 末光眞希, 末光哲也, 尾辻泰一, "ダイヤモンドライクカーボン薄膜をトップゲート絶縁膜としたグラフェン FET," 信学総全大, C-10-15, 岡山, March 23, 2012.
[60] 高塚 裕也, 高萩 和宏, 佐野 栄一, リズィー ヴィクトール, 尾辻 泰一, "共振構造導入によるグラフェンテラヘルツ増幅器の高利得化," 信学総全大, C-10-14, 岡山, March 23, 2012.
[61] 吹留博一、川合祐輔、末光真希, "基板相互作用によるグラフェンの電子状態制御," 平成 24 年度電子情報通信学会・電子デバイス研究会 (ED), 山形, Apr. 18, 2012.
[62] 鷹林 将・楊 猛・小川修一・林 広幸・栗田裕記・高桑雄二・末光哲也・尾辻泰一, "ダイヤモンドライクカーボン絶縁膜を用いたグラフェン FET," 信学会電子デバイス研究会, 信学技報, Vol. 112, pp. 67-72, 福井, July 26-27, 2012.
[63] 佐藤昭, 志田広海, Viacheslav V. Popov, 尾辻泰一, "二重格子ゲートHEMT 内二次元電子ガスにおけるプラズマ不安定性," 信学会レーザー量子エレクトロニクス研究会, 信学技報, Vol. 112, pp. 1-4, 仙台, Aug. 23-24, 2012.
[64] S. Sambonsuge, S. Abe, H. Handa, E. Saito, H. Fukidome, M. Suemitsu, "回転エピ成長 3C-SiC(111)/Si(110)の厚膜化による高品質グラフェン形成," 2012 年秋季第 73 回応用物理学会学術講演会, 松山, Sept.11-14, 2012.
[65] 田中遥, 佐野栄一, "多層グラフェンの導電率の温度依存性," 2012 信学会ソサイエティ大会, C-10-8, 富山, Sept. 11, 2012.
[66] 小嶋一輝, Maxim Ryzhii, Mitin Vladimir, 佐藤昭, Victor Ryzhii, 尾辻泰一, "光学励起グラフェンにおけるテラヘルツ帯負性導電率特性の考察," 第 73 回応用物理学会学術講演会, 11p-B1-7, 松山, 愛媛, Sept. 11, 2012.
[67] 矢部裕平, 渡辺隆之, Svintsov Dmitry, Vyurkov Vladimir, Yurchenko Stanislav, Ryzhii Victor, 尾辻泰一, "ゲート制御グラフェン内プラズマ波の分散・減衰特性に関する考察," 第 73 回応用物理学会学術講演会, 11p-B1-9, 松山, 愛媛, Sept. 11, 2012.
[68] 福嶋哲也, 渡辺隆之, 佐藤 昭, 尾辻泰一, "電気光学結晶内テラヘルツパルスの空間電界分布の測定," 第 73 回応用物理学会学術講演会, 12a-B1-8, 松山, 愛媛, Sept. 12, 2012.
[69] 栗田裕記, 渡辺隆之, 福嶋哲也, Stephane Boubanga-Tombet, Silvia Chan, 佐藤昭, Victor Ryzhii, 尾辻泰一, "光学励起グラフェンにおける負性導電率の運動量緩和時間依存性," 第 73 回応用物理学会学術講演会, 12a-B1-9, 松山, 愛媛, Sept. 12, 2012.
[70] 江藤隆紀, 鷹林将, 三本菅正太, 猪俣州哉, 吹留博一, 末光眞希, 末光哲也, 尾辻泰一, "グラフェン/SiC/Si バックゲート FET 特性と SiC 層厚の関係," 第 73 回応用物理学会学術講演会, 13p-C2-8, 松山, 愛媛, Sept. 13, 2012.
[71] 江藤 隆紀, 鷹林 将, 栗田 裕記, 楊 猛, 林 広幸, イェシコ ラディック, 小川 修一, 高桑 雄二, 末光 哲也, 尾辻 泰一, "テラヘルツ通信を志向したダイヤモンドライクカーボンゲート絶縁膜を有するグラフェン FET," ゲートスタック研究会 第 18 回研究会研究報告, pp. 47-50, 湯河原, 静岡, Jan. 25, 2013.
[72] 田中遥, 佐野栄一, "CVD 成長単層グラフェン FET の伝導機構, " 2013 信学会総合大会, 岐阜, C-10-1, March 21, 2013.
[73] 佐藤昭, ヴィクトール リズィー, ウラジミール ミチン, フェデール バスコ, 尾辻泰一, "グラフェンにおけるテラヘルツ二次元プラズモンの周波数分散および減衰機構," 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 29p-D1-6, 厚木, 神奈川, March 29, 2013.
[74] 福嶋哲也, Paul Russel, 渡辺隆之, 佐藤昭, 河野淳一郎, 尾辻泰一, "グラフェンリボン格子におけるテラヘルツ波共鳴吸収の観測," 第60回応用物理学会春季学術講演会,

29p-D1-11, 厚木, 神奈川, March 29, 2013.

[75] H. Fukidome, "Tunable Many-Body Effects on Molecular Orbitals in Graphene," 第11回顕微ナノ材料科学研究会 「第8回日本表面科学会放射光表面科学研究部会・SPring-8 ユーザー協同体顕微ナノ材料科学研究会合同シンポジウム」日吉, Nov. 16-17, 2012.

[76] 佐藤昭, V. Ryzhii, V. Mitin, F. Vasko, 尾辻泰一, "グラフェンにおけるテラヘルツ二次元プラズモンのシミュレーションによる解析," 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会(EST), 信学技報, vol. 113, no. 26, EST2013-4, pp. 15-20, May 10, 2013.

[77] 鷹林, 楊, 林, ラデク, 小川, 尾辻, 高桑, "光電子制御プラズマ CVD 法によるδドープダイヤモンドライクカーボン薄膜の作製," 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会予稿集, 18a-B2-8, 同志社大・京田辺キャンパス, Sept. 18, 2013.

[78] 佐藤 昭、ヴィクトール リズィー、尾辻 泰一, "二次元プラズモンの THz 波デバイス応用," 応用電子物性分科会研究例会, 首都大東京, Oct. 1, 2013.

[79] 井出隆之, 川合祐輔, 吹留博一, 宮下英俊、小嗣正人、大河内拓雄、遠田義晴、木下豊彦、堀場弘司、永村直佳、篠原稔宏、尾嶋正治、末光眞希, "微細加工 Si(100)基板上エピタキシャルグラフェンの形成と物性評価," 第 32 回表面科学学術講演会仙台, Nov. 20-22, 2012.

[80] 吹留博一、川合祐輔、フロムフェリックス、小嗣真人、半田浩之、井出隆之、大河内拓雄、宮下英俊、遠田義晴、木下豊彦、トーマスザイラー、末光眞希, "界面応力制御によるグラフェンの擬スカラーポテンシャルの創出," 第 32 回表面科学学術講演会仙台, Nov. 20-22, 2012.

[81] 永村直佳、堀場弘司、豊田智史、黒角翔大、篠原稔宏、井出隆之、吹留博一、末光眞希、長汐晃輔、鳥海明、尾嶋正治, "3次元nanoESCAを用いたグラフェンデバイス構造の実空間分解界面電子状態分析," 第 32 回表面科学学術講演会仙台, Nov. 20-22, 2012.

[82] 三本菅 正太, 長澤 弘幸, Sergey Filimonov, 伊藤 駿, 吹留 博一, 末光 眞希, "Si(110)基板上 3C-SiC(111)回転エピ膜上に形成したエピタキシャルグラフェンの断面 TEM 評価," 2013年 第74回応用物理学会秋季学術講演会京都, Sep. 16-20, 2013.

[83] 林広幸, 楊猛, 鷹林将, 小川修一, 尾辻泰一, 高桑雄二, "光電子制御プラズマ CVD による DLC 膜合成機構:タウンゼント放電とグロー放電の比較," 2013 年真空・表面科学合同講演会シンポジウム, 27Ep08, つくば, Nov. 27-28, 2013.

[84] 小関勇気, 佐藤 昭, Victor Ryzhii, Vladimir Vyurkov, 尾辻泰一, "グラフェンテラヘルツプラズモンのドープ基板表面プラズモンとの結合による減衰の解析," 第 61 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, 17p-E17-19, 神奈川, March 17-20, 2014.

[85] 林 広幸, 鷹林 将, 楊 猛, 小川修一, 尾辻泰一, 高桑雄二, "光電子制御プラズマ CVD によるゲートスタック用 DLC の誘電率制御," 第 61 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, 18a-D8-1, 神奈川, March 17-20, 2014.

[86] 板津太郎, 佐野栄一, 矢部裕平, 尾辻泰一, "テラヘルツ領域における金属メッシュ構造の反射特性," 信学会 2014 総合大会講演論文集, C-10-5, 新潟, March 18-21, 2014.

③ ポスター発表　　（国内会議 18件、国際会議 66 件）

[1] Y. Yamamoto, H. Togashi, A. Kato, S. Hasegawa, T. Nakano, S. Goto, Y. Teraoka, A. Yoshigoe, M. Suemitsu "Metastable Chemisorption State of Oxygen on Si(110)-16×2 Surface Observed by SR-PES," 3rd International WorkShop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics, Sendai, Nov. 2007.

[2] Y. Yamamoto, H. Togashi, A. Kato, S. Hasegawa, T. Nakano, S. Goto, Y. Teraoka, A. Yoshigoe, M. Suemitsu, "SR-PES Observation of Metastable

Chemisorption State of Oxygen on Si(110)-16×2 Surface,” 5th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-V), Hachioji, Nov.12, 2007.
[3] E. Saito, A. Konno, T. Ito, K. Yasui, H. Nakazawa, T. Endoh, Y. Narita, and M. Suemitsu, ”Temperature Oscillation” as a Real-Time Monitoring of the Growth of 3C-SiC on Si Substrate, 5th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-V), Hachioji, Nov.12, 2007.
[4] Yoshihisa Yamamoto, Hideaki Togashi, Atsushi Kato, Maki Suemitsu, Yuzuru Narita, Yuden Teraoka, Akitaka Yoshigoe, “Bonding Structure of Ultrathin Oxides on Si(110) Surface,” MRS Symposium, San Francisco, March, 2008.
[5] F. T. Vasko, P. N. Romanets, O. G. Balev, and V. Ryzhii, "Nonequilibrium carriers in an intrinsics graphene," 29th Int. Conf. on Physics of Semiconductors (ICPS-29), p.131, Rio de Janeiro, Brazil, Jul.27 - Aug.1, 2008.
[6] M. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, and V. Ryzhii. "Dynamic characteristics of graphene nanoribbon field-effect transistors," Ext. Abst. of the 2008 Int. Conf. on Solid State Device and Materials, p.598, Tsukuba, Sept.24-26, 2008.
[7] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, and T. Otsuji, “Graphene nanoribbon field-effect transistor: device model and characteristics,” Abst. Of the 2nd IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference, p. 62, Kyoto, Oct. 20-22, 2008.
[8] Y. Miyamoto, H. Handa, A. Konno, M. Suemitsu, H. Fukidome, and T. Ito, ”Raman-scattering spectroscopy of epitaxial graphene formed on SiC film on Si substrate,” 5th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, International Conference Center, Waseda University, Tokyo, Japan (November 2008).
[9] M. Ryzhii, V. Ryzhii, T. Otsuji, and V. Mitin, “Graphene nanoribbon and graphene bilayer photodetectors: models and characteristics,” 14th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Systems, Sendai, Japan July 13-17, 2009.
[10] T. Watanabe, H. Karasawa, T. Komori, M. Suemitsu, V. Ryzhii, T. Otsuji “Observation of carrier relaxation and recombination dynamics in optically pumped epitaxial graphene heterostructures” The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), Tu-eP112, p. 264, Kobe, July 19-23, 2009.
[11] V. Ryzhii, M. Ryzhii, M. S. Shur, and V. Mitin, “Negative terahertz dynamic conductivity in electrically induced lateral p-i-n junction in graphene,” 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems,KoKobe, Japan, July 19-24, 2009.be, Japan, July 19-24, 2009.
[12] A. Satou, V. Ryzhii, E.T. Vasko, T. Otsuji, V.Yu. Aleshkin, and A.A. Dubinov, "Terahertz/far-infrared lasing by utilization of population inversion in graphene under optical pumping," The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18) Abstract, Mo-eP116, p. 123, Kobe, July 19-23, 2009.
[13] H. Fukidome, Y. Miyamoto, H. Handa, E. Saito, R. Takahashi, K. Imaizumi, M. Suemitsu、“Nanoscale Characterization of graphene epitaxially grown on silicon substrates for device applications”, Grapehene Tokyo, 2009.7.25-26.
[14] R. Olac-vaw, H.-C. Kang, T. Komori, T. Watanabe, H. Karasawa, Y. Miyamoto, H. Handa, H. Fukidome, T. Suemitsu, M. Suemitsu, and T. Otsuji “Epitaxial graphene on Si substrate for infrared photodetection” Int. Conf. on Graphene Tokyo, Tokyo, July 25-26, 2009.
[15] H. Karasawa, T. Komori, T. Watanabe, M. Suemitsu, V. Ryzhii, T. Otsuji “Observation of THz Stimulated Emission in Optically Pumped Epitaxial Graphene Heterostructures” Int. Workshop on Terahertz Technology 2009,

Osaka, Japan, Nov. 30-Dec. 3, 2009.
[16] A. Satou, M. Ryzhii, N. Ryabova, V. Ryzhii, T. Otsuji, A. Dubinov, and V. Ya Aleshkin, “Terahertz lasing in optically pumped epitaxial multiple graphene structures: Concept and feasibility of realization,” TeraTech’09: International Workshop on Terahertz Technology, Osaka, Japan, Nov. 30-Dec. 3, 2009.
[17] A. El Moutaouakil, H.-C. Kang, H. Handa, H. Fukidome, T. Suemitsu, E. Sano, M. Suemitsu, and T. Otsuji, ""Epitaxial graphene-on-silicon logic inverter," Int. Conf. on Recent Advances in Graphene and Related Materials, Singapore, Aug. 1-6, 2010.
[18] M. H. Jung, H. Handa, R. Takahashi, H. Fukidome and M. Suemits, “Epitaxial Graphene Field Effect Transistors on SiC substrate with Polymer Gate Dielectric,” Extended Abstracts of the 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp589-890, Sept. 23, 2010.
[19] R. Takahashi, Y. Miyamoto, H. Handa, E. Saito, K. Imaizumi, H. Fukidome, and M. Suemitsu, "LEED observation of the formation of epitaxial graphene on 3D-SiC(111) ultrathin film on SiC(111)," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, T4-02, Sendai, Japan, Oct. 28, 2010.
[20] 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," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, T4-03, Sendai, Japan, Oct. 28, 2010.
[21] S. Abe, H. Handa, R. Takahashi, K. Imaizumi, H. Fukidome, and M. Suemitsu, "Graphene formation on 3C-SiC(111) thin film grown on Si(110) substrate," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, T4-04, Sendai, Japan, Oct. 28, 2010.
[22] S. Abe, H. Handa, R. Takahashi, K. Imaizumi, H. Fukidome, and M. Suemitsu, "Temperature- programmed-desorption study on graphene-on-silicon process," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, T4-05, Sendai, Japan, Oct. 28, 2010.
[23] H. Fukidome, M. Kotsugi, Y. Kawai, T. Ohkouchi, T. Seyller, K. Horn, H. Handa, R. Takahashi, K. Imaizumi, Y. Enta, M. Suemitsu, T. Kinoshita, and T. Watanabe, "Nanoscale control of structure of epitaxial graphene by using substrate microfabrication" ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, T4-08, Sendai, Japan, Oct. 28, 2010.
[24] M. Kubo, S. Takabayashi, R. Takahashi, S. Abe, T. Suemitsu, F. Fukidome, M. Suemitsu, and T. Otsuji, "Chemical bonds at interfaces between graphene and group-10 metals," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, T4-10, Sendai, Japan, Oct. 28, 2010.
[25] H.-H. Jung, H. Handa, R. Takahashi, H. Fukidome, and M. Suemitsu, "Investigation of graphene field effect transistors with Al2O3 gate dielectrics formed by metal oxidation," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, T4-12, Sendai, Japan, Oct. 28, 2010.
[26] A. Satou, T. Otsuji, and V. Ryzhii, "Theoretical study of population inversion in graphene under pulse excitation," ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, T4-14, Sendai, Japan, Oct. 28, 2010.
[27] V. Ryzhii, M. Ryzhii, N. Ryabova, A.A. Dubinov, V.Ya. Aleshkin, V. Mitin, A. Satou, and T. Otsuji, "Concepts of graphene-based terahertz and infrared devices," FNST: in Nanoscale Science and Technology Workshop, P-14, RIKEN Wako Campus, Saitama, Japan, Jan. 5-7, 2011.
[28] S. Takabayashi, S. Ogawa, Y. Takakuwa, H.-C. Kang, R. Takahashi, H. Fukidome, M. Suemitsu, T. Suemitsu, T. Otsuji, “Carbonaceous field effect transistor with graphene and diamondlike carbon,” Graphene 2011, Bilbao, Spain, Apr. 12, 2011.

[29] A. Satou, S. Boubanga-Tombet, T. Otsuji, and V. Ryzhii, "Stimulated terahertz emission from optically pumped graphene and its threshold behavior," Graphene 2011Conference, Bilbao, Spain, April 12, 2011.
[30] A. El Moutaouakil, S. Takabayashi, S. Ogawa, Y. Takakuwa, H.-C. Kang, R. Takahashi, H. Fukidome, M. Suemitsu, E. Sano, T. Suemitsu, T. Otsuji, Complimentary Logic Inverter on Epitaxial Graphene/6H-SiC Field Effect Transistor with Diamond-like Carbon Film as Gate Dielectrics at Room Temperature, Int. Conf. on Graphene: The Road to Applications, Cambridge, MA, USA, May 11-13, 2011.
[31] A. Satou, T. Otsuji, V. Ryzhii, F.T. Vasko, "The effect of carrier-carrier scattering on population inversion in optically pumped graphene," EP2DS-19: the 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Electron Systems, We-P-3, Florida, USA, July 27, 2011.
[32] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, and V. Mitin, "Nonequilibrium carriers and phonons in optically excited graphene: heating and cooling," EDISON17: 17th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures, P2.8, Santa Barbara, Aug. 11, 2011.
[33] M.Ryzhii, V.Mitin, A.Satou, T.Otsuji, and V.Ryzhii, "Modeling of short-gate and drain-induced barrier lowering effects in graphene bilayer field-effect transistors: weak nonlocality approximation," SISPAD: 2011 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, P22, Tokyo, September 9, 2011.
[34] T. Fukushima, S. Chan, S. Boubanga Tombet, V. Ryzhii, V. Popov, T. Otsuji, "Observation of terahertz 2D-plasmon modes in a graphene ribbon array," QNN: International Workshop on Quantum Nanostructure&Nanoelectronics, P-24, Tokyo, Oct. 3, 2011.
[35] H. Fukidome, S. Abe, H. Handa, R.Takahashi, K. Imaizumi, S. Sanbonsuge and M. Suemitsu, "Effect of SiH4 Pre-annealing on Graphitization of 3C-SiC/Si", 24th Int'l Microprocesses and Nanotechnology Conf. (MNC 2011), Kyoto, Oct. 26, 2011.
[36] M.-H. Jung, C. Quan, H. Fukidome, T.Suemitsu, T. Otsuji and M. Suemitsu, "Impacts of the Access Resistance on the Channel Conduction Characteristics in Graphene FETs", 25th Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf. (MNC 2011), Kyoto, Oct. 27, 2011.
[37] A. Satou, T. Otsuji, V. Ryzhii, and F. T. Vasko, "Population Inversion in Optically Pumped Graphene: Effect of Carrier-Carrier Scattering," International TeraNano &GDRI Workshop Extended Abstract, 24P-18, Osaka, Nov. 24, 2011.
[38] T. Watanabe, T. Fukushima, S. Boubanga Tombet, A. Satou, T. Otsuji, S. Chan, V. Ryzhii, V. Popov, "Observation of Terahertz 2D-Plasmon Modes in a Graphene Ribbon Array," International TeraNano &GDRI Workshop Extended Abstract, 28P-04, Osaka, Nov. 28, 2011.
[39] T. Fukushima, T. Watanabe, S. B. Tombet, A. Satou and T. Otsuji, "Observation of Stimulated Emission from Optically Pumped Graphene by UsingTerahertz Photon Echoes," International TeraNano &GDRI Workshop Extended Abstract, 28P-03, Osaka, Nov. 28, 2011.
[40] T. Otsuji, S. Boubanga-Tombet, S. Chan, T. Watanabe, A. Satou, V. Ryzhii, "Ultrafast carrier dynamics and terahertz amplified stimulated emission in optically pumped graphene at room temperature," Gordon Research Conference, Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems, Hotel Galvez, Galveston, TX, Feb. 19-24, 2012.
[41] T. Watanabe, T. Fukushima, S. Chan, S. Boubanga-Tombet, A. Satou, V.V. Popov, V. Ryzhii, T. Otsuji, "Observation of Terahertz 2D-Plasmon Modes in a

Graphen Ribbon Array,"Gordon Research Conference, Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems, Hotel Galvez, Galveston, TX, Feb. 19-24, 2012.
[42] H. Fukidome, M. Kotsugi, T. Ohkouchi, A. Yoshigoe, Y. Teraoka, Y. Enta, T. Kinoshita, T. Suemitsu, T. Otsuji, M. Suemitsu, "Control of Electronic and Structural Properties of Epitaxial Graphene on 3C-SiC/Si and Its Device Applications," 2012 MRS Spring Meeting, Apr. 12, 2012.
[43] A. Satou, H. Shida, T. Otsuji, and V. V. Popov, "Plasma instability of two-dimensional electron gas in double-grating-gate transistor structure," IWCE 15: 15th International Workshop on Computational Electronics, Madison, USA, May 22-25, 2012.
[44] Y. Kurita, T. Watanabe, T. Fukushima, S. B. Tombet, A. Satou, V. Ryzhii, T. Otsuji, S. Chan, "Relationship between momentum relaxation time and negative dynamic conductivity in optically pumped graphene," TeraNano 2012: 2nd Int. Symp on Terahertz Nanoscience, Okinawa, Japan, July 4, 2012.
[45] G.H. Park, M.H. Jung, H. Fukidome, T. Suemitsu, T.Otsuji, M. Suemitsu, "Oxygen-plasma formation of alumina for a gate dielectric in graphene field effect transistors," ISGD: International Symposium on Graphene Devices, PO-18, Soleil, France, Nov. 5, 2012.
[46] S. Inomata, R. Takahashi, H. Handa, K. Imaizumi, H. Fukidome, and M. Suemitsu, " Electronic structure observations of graphene on 3C-SiC(111)/Si(111)," ISGD: International Symposium on Graphene Devices, PO-9, Soleil, France, Nov. 5, 2012.
[47] S. Sambonsuge, E. Saito, S. Fimimonov, H. Fukidome, and M. Suemitsu, "Qualified Graphene-On-Silicon Formation Using 3C-SiC(111)/Si(110) Thick Film By Two-Step Growth," ISGD: International Symposium on Graphene Devices, PO-19, Soleil, France, Nov. 5, 2012.
[48] N. Haramoto, S. Inomata, R. Takahashi, A. Yoshigoe, Y. Teraoka, H. Fukidome, and M. Suemitsu, " Improvement Of Epitaxial Graphene On Silicon By Use Of Vicinal Si (111) Substrates," ISGD: International Symposium on Graphene Devices, PO-07, Soleil, France, Nov. 5, 2012.
[49] D. Svintsov, I. Semenikhin, V. Vyurkov, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Voltage-controlled surface plasmon-polaritons in double graphene structures," ISGD: International Symposium on Graphene Devices, PO-22, Soleil, France, Nov. 5, 2012.
[50] K. Kojima, M. Ryzhii, V. Mitin, A. Satou, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Study on THz negative dynamic conductivity in optically pumped graphene," TeraNano III: 3rd Int'l Symp. on Terahertz Nanoscience, P.9, Honolulu, Hawaii, Dec. 10-12, 2012.
[51] Y. Kurita, A. Satou, T. Watanabe, T. Fukushima, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "THz population inversion in graphene under pulse excitation: dependence on pumping photon energy," TeraNano III: 3rd Int'l Symp. on Terahertz Nanoscience, P.12, Honolulu, Hawaii, Dec. 10-12, 2012.
[52] V. Ryzhii, T. Otsuji, M. Ryzhii, and M.S. Shur, "Terahertz detector utilizing plasma resonances in double graphene layer tunneling heterostructure," FTT: Frontiers in Terahertz Technology, P1.28, Nara, Dec. 26-30, 2012.
[53] Y. Kurita, A. Satou, T. Watanabe, T. Fukushima, S. Boubanga Tombet, S. Chan, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Dependency of negative dynamic conductivity on momentum relaxation time in optically pumped graphene," FTT: Frontiers in Terahertz Technology, P1.15, Nara, Dec. 26-30, 2012.
[54] Shota Sanbonsuge, Eiji Saito, Myung-Ho Jung, Hirokazu Fukidome, Sergey Filimonov, and Maki Suemitsu, "Rotated epitaxy of 3C-SiC(111) on Si(110) using monomethylsilane-based gas-source molecular-beam epitaxy,"

ECSCRM2012 (9 European Conference on Silicon Carbide & Related Materials)St. Petersburg, Sep. 2-6, 2012.
[55] H. Fukidome, Y. Kawai, F. Fromm, M. Kosugi, T. Ide, T. Ohkouchi, H. Miyashita, Y. Enta, T. Kinoshita, T. Seyller, M. Suemitsu, "Modulation of Electronic and Vibrational Properties of Epitaxial Graphene by Spatially Confining Eptaxy," VAS14(14th International Conference on Vibrations at Surfaces), Kobe, Sep. 24-28, 2012.
[56] G.-H. Park, M.-H. Jung, S. Inomata, H. Fukidome, T. Suemitsu, T. Otsuji and M. Suemitsu, "Plasma-oxidized Al2O3 for Gate Dielectrics in Graphene Field Effect Transistors," MNC2012 (25th International Microprocesses and Nanotechnology Conference), Kobe, Oct. 30-Nov. 2, 2012.
[57] Hirokazu Fukidome, Yusuke Kawai, Masato Kotsugi, Felix Fromm, Takayuki Ide, Takuo Ohkouchi, Hidetoshi Miyashita, Toyohiko Kinoshita, Maki Suemitsu1, Thomas Seyller, "Controls of Structural, Electronic, and Pseudofield Properties of Epitaxial Graphene by Microfabrication," 3rd Internatinal Symposium on Graphene Devices (ISGD-3), Saint-Aubin, Nov. 5-9, 2012.
[58] Goon-Ho Park, Myung-Ho Jung, Hirokazu Fukidome, Tetsuya Suemitsu, Taiichi Otsuji, Maki Suemitsu, "Oxygen-Plasma Formation of Alumina for a Gate Dielectric in Graphene Field Effect Transistors," 3rd Internatinal Symposium on Graphene Devices (ISGD-3) , Saint-Aubin, Nov. 5-9, 2012.
[59] Takayuki Ide, Yusuke Kawai, Hirokazu Fukidome, Hidetoshi Miyashita,Masato Kotsugi, Takuo Ohkochi, Yoshiharu Enta,Toyohiko Kinoshita, Koji Horiba, Naoka Nagamura, Satoshi Toyoda,Toshihiro Shinohara, Masaharu Oshima, Maki Suemitsu , "Epitaxy Of Graphene On Si(100) And Si(111) Faces Simultaneously Formed On Si(100) Substrate," 3rd Internatinal Symposium on Graphene Devices (ISGD-3) , Saint-Aubin, Nov. 5-9, 2012.
[60] Ryo Sato, Hirokazu fukidome, Maki Suemitsu, "In-situ Raman Observation of Graphene during Formation of Al-oxide Gate Dielectrics," 3rd Internatinal Symposium on Graphene Devices (ISGD-3), Saint-Aubin, Nov. 5-9, 2012.
[61] Yohei Inayoshi, Hirokazu Fukidome, Setsuo Nakajima, Tsuyoshi Uehara, Yasutake Toyoshima and Maki Suemitsu, "Onset of discharge instability at patterned conductive regions in pulsed-plasmas under near atmospheric pressures," 5th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2013), Nagoya, 2013. Jan. 28-Feb. 1, 2013.
[62] V. Ryzhii, T. Otsuji, M. Ryzhii, V. Mitin and M.S. Shur, "Terahertz detectors and photomixers based on double-graphene-layer structures utilizing plasma resonances," OTST: International Conference on Optical Terahertz Science and Technology, Th3-04, Kyoto, Japan, April 4, 2013.
[63] A. Satou, V. Ryzhii, E.T. Vasko, V.V. Mitin, and T. Otsuji, "Frequency dispersion and damping mechanisms of terahertz plasmons in graphene transistor structure," CLEO: Conference on Lasers and Electrooptics Dig., JTh2A.33 San Jose, CA, USA, June 13, 2013.
[64] A. Satou, V. Ryzhii, F.T. Vasko, V.V. Mitin, and T. Otsuji, "Simulation of terahertz plasmons in graphene with grating-gate structures," SISPAD: The International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, P17, Glasgow, Scotland, UK, Sept. 3-5, 2013.
[65] T. Kawasaki, T. Eto, K. Kojima,Y. Kurita, Y. Yabe, H. Sugiyama, T. Watanabe, A. Dobroiu, S. Takabayashi, Y. Fukada, J. Kani, J. Terada, N. Yoshimoto, T. Suemitsu, V. Ryzhii, K. Iwatsuki, T. Otsuji, "Graphene-Channel FETs with DLC gate insulator for Photonic Frequency Double-Mixing Conversion over the

Sub-THz Band," RPGR2013: Recent Progress on Graphene Research, 12a-P3-47, Tokyo Tech Front, Tokyo, Japan, Sept. 9-13, 2013.
[66] H. Sugiyama, Takayuki Watanabe, Yuki Kurita, Akira Satou, Kenji Kawahara, Hiroki Ago, Victor Ryzhii, Taiichi Otsuji, "Observation of Spontaneous Terahertz Emission from Optically Pumped Graphene," RPGR2013: Recent Progress on Graphene Research, 12p-P4-35, Tokyo Tech Front, Tokyo, Japan, Sept. 9-13, 2013.

[1] 永村直佳、豊田智史、黒角翔大、篠原稔宏、堀場弘司、尾嶋正治、井出隆之、吹留博一、末光眞希、長汐晃輔、鳥海明, "3 次元 nano ESCA によるグラフェンの電子状態解析," 第 25 回日本放射光学会年会, Jan. 8, 2011.
[2] 吹留博一、小嗣真人、大河内拓雄、川合祐輔、Thomas Seyller、半田浩之、井出隆之、遠田義晴、木下豊彦、Karsten Horn、末光眞希, " 基板微細加工によるエピグラフェンの構造・電子状態の制御, "第 25 回日本放射光学会年会, Tosu, Jan. 8, 2011.
[3] 楊 猛, 小川 修一, 鷹林 将, 尾辻 泰一, 高桑 雄二, "トップゲート型グラフェン・チャネル FET のゲートスタック用炭素系絶縁膜の合成プロセスの開発," 応用物理学会 薄膜・表面物理分科会、シリコンテクノロジー分科会 共催特別研究会「ゲートスタック研究会 ―材料・プロセス・評価の物理―」第 17 回研究会予稿集, pp. 205 - 208, 三島, Jan. 21, 2012.
[4] 佐藤 昭, 志田 広美, Viacheslav V. Popov, 尾辻 泰一, "二重格子ゲートトランジスタ構造における二次元プラズマ不安定性," 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 早稲田, 東京, March 15-18, 2012.
[5] 三本菅正太, 阿部峻佑, 高橋良太, 今泉京, 半田浩之, 吉越章隆, 寺岡有殿, 小嗣真人, 大河内拓雄, 木下豊彦, 伊藤峻, 吹留博一, 末光眞希, "回転エピ成長 3C-SiC(111)/Si(110)の表面化学結合状態, "2012 年春季 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田, 東京, March 15-18, 2012.
[6] 猪俣州哉, 高橋良太, 半田浩之, 今泉 京, 吹留博一, 末光眞希, 寺岡有殿, 吉越章隆, "3C-SiC(111)/Si(111)薄膜上グラフェンの電子構造の評価, " 2012 年春季 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田, 東京, March 15-18, 2012.
[7] 井出隆之, 川合祐輔, 宮下英俊, 吹留博一, 末光眞希, "微細加工 Si(100)基板上 3C-SiC 薄膜へのエピタキシャルグラフェン形成," 2012 年秋季第 73 回応用物理学会学術講演会, 松山, Sept. 11-14, 2012.
[8] N. Haramoto, S. Inomata, S. Sambonsuge, A. Yoshigoe, Y. Teraoka, H. Fukidome, M. Suemitsu, "微傾斜 Si(111)基板を用いたグラフェン・オン・シリコン," 2012 年秋季第 73 回応用物理学会学術講演会, 松山, Sept. 11-14, 2012.
[9] 猪俣州哉、半田浩之、高橋良太、今泉京、原本直樹、吹留博一、末光眞希, " 3C-SiC(111)/Si(111)薄膜上グラフェンの電子構造の評価," 第 32 回表面科学学術講演会, 21P70, 仙台, Nov. 20-27, 2012.
[10] 原本直樹、猪俣州哉、高橋良太、吉越章隆、寺岡有殿、吹留博一、末光眞希, "微傾斜 Si(111)基板上エピタキシャルグラフェン成長," 第 32 回表面科学学術講演会, 21P71, 仙台, Nov. 20-27, 2012.
[11] 原本直樹, 猪俣州哉, 三本菅正太, 吹留博一, 末光眞希, "微傾斜 Si(111)基板使用による Si 基板上エピタキシャルグラフェンの高品質化," 2013 年 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会京都, Sep. 16-20, 2013.
[12] 須藤亮太, 佐藤 良, 吹留博一, 末光眞希, "グラフェン上 Al2O3 ゲート絶縁膜中の「その場」ラマン分光観察," 2013 年 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会京都, Sep. 16-20, 2013.
[13] 長谷川美佳, 菅原健太, 三本菅正太, 原本直樹, 須藤亮太, 吹留博一, 長澤弘幸, 末光眞希, "Ni シリサイドを用いた Si 基板上エピタキシャルグラフェンの低温形成," 2013 年 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会京都, Sep. 16-20, 2013.

[14] 田島圭一郎、末光眞希、吹留博一,川合祐輔、尾嶋正治、堀場弘司、永村直佳、井出隆之, "微細加工 Si(100), Si(111)基板上エピタキシャルグラフェンの物性評価," 第 33 回表面科学学術講演会 2013 年真空・表面科学合同講演会, Nov. 26-27, 2013.

[15] 三本菅 正太、長澤 弘幸、伊藤 駿、吹留 博一、末光 眞希, "Si(110)基板上3C-SiC(111)結晶方位回転エピ膜の断面TEM評価," SiC及び関連半導体研究 第22回講演会, Dec. 9-10, 2013.

[16] 原本 直樹、長澤 弘幸、伊藤 俊、吹留 博一、末光 眞希, "微傾斜 Si(111)基板上3C-SiC(111)薄膜の断面TEM評価," SiC及び関連半導体研究 第22回講演会, Dec. 9-10, 2013.

[17] 細谷友崇、三本菅正 2、長澤弘幸、伊藤俊、吹留博一、末光眞希, "3C-SiC/Si(111)ヘテロエピタキシャル界面から発生する積層欠陥の抑制," SiC 及び関連半導体研究 第22 回講演会, Dec. 9-10, 2013.

[18] 菅原健太, 江藤隆紀, 川崎鉄哉, Mastura Hussin, 若生洋由希, 末光哲也, 尾辻泰一, 吾郷浩樹, 河原憲治, 深田陽一, 可児淳一, 寺田 純, 吉本直人, "グラフェンチャグラフェンチャネルネルFFETETを用いたミリ波帯フォトミキを用いたミリ波帯フォトミキサー," 第 61 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, 17a-E2-53, 神奈川, March 17-20, 2014.

(4)知財出願

①国内出願（ 5件）

[1] 末光眞希, 今野篤史, 宮本 優,「グラファイト薄膜および電子デバイス」, 東北大, 特願2008-060997, 2008/3/10.

[2] 尾辻泰一, 佐野栄一,「相補型論理ゲート装置」, 東北大, 北大, 特願 2008-192162, 2008/7/25. （特許第 5424274 号, 2013/12/6）

[3] 末光眞希, 今野篤史, 宮本 優,「グラファイト薄膜および電子デバイス」, 東北大, 特願2008-060097, 2008/3/10.

[4] 佐野栄一, 尾辻泰一,「電界効果トランジスタ」, 東北大, 北大, 特願 2009-089353, 2009/4/1.

[5] 鷹林将, 尾辻泰一, 高桑雄二, 小川修一, 楊猛,「グラフェン電界効果トランジスタおよびグラフェン半導体部材」東北大, 特願 2012-031899, 2012/2/16.

②海外出願（ 5件）

[1] 末光眞希, 今野篤史, 宮本 優,「グラファイト薄膜および電子デバイス」, 東北大, 特願2008-060097 に基くＰＣＴ国際出願「（仮）グラファイト作製法」, 国際出願番号: PCT/JP2009/054384, 2009/3/9.

[2] 尾辻泰一, 佐野栄一,「相補型論理ゲート装置」, 東北大, 北大, 特願 2008-192162 に基く PCT 国際出願「相補型論理ゲート装置」, PCT/JP2009/63264, 2009/7/24, US Patent 8,227,794 B2 (Jul. 24, 2012), 中国特許 100080 (June 6, 2013.)

[3] 佐野栄一, 尾辻泰一,「電界効果トランジスタ」, 東北大, 北大, 特願 2009-089353 に基く PCT 国際出願「電界効果トランジスタ」, PCT/JP2010/002412, 2010/4/1.

[4] 尾辻泰一, Popov Viacheslav, Knap Wojciech, MEZIANI YAHYA MOUBARAK, Diakonova Nina, Coquillat Dominique, Teppe Frederic, Fateev Denis, Velazquez Perez, Jesus Enrique,「テラヘルツ電磁波変換装置」, 東北大, Universite Montpellier 2, France, Universidad de Salamanca, Spain, PCT/JP2010/007074, 2010/12/3.

[5] 鷹林将, 尾辻泰一, 高桑雄二, 小川修一, 楊猛,「グラフェン電界効果トランジスタおよびグラフェン半導体部材」東北大, PCT/JP2013/52766, 2013/2/6.

④ その他の知的財産権

なし

(5)受賞・報道等

①受賞

[1] Hiroyuki Handa, "The Best of bests Presentation Award", Global COE Program International Conference 2009 in conjunction with Japan-Korea Asian Core Program General Meeting 2009.

[2] Hiromi Karasawa, "Excellent Paper Award ", Tera-Tech'09 : International Workshop on Terahertz Technology 2009.

[3] Y. Miyamoto, H. Handa, E. Saito, A. Konno, Y. Narita, M. Suemitsu, H. Fukidome, T. Ito, K. Yasui, H. Nakazawa and T. Endoh, eJSSNT Paper of The Year 2009, 日本表面科学会 (2010).

[4] Amine El Moutaouakil, Excellent Student Paper Award, ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, Sendai, Japan, Oct. 29, 2010.

[5] Myung-Ho Jung, Excellent Student Paper Award, ISGD: Int. Symp. Graphene Devices, Sendai, Japan, Oct. 29, 2010.

[6] 表面科学会平成 23 年度論文賞、Yu Miyamoto, Hiroyuki Handa, Eiji Saito, Atsushi Konno, Yuzuru Narita, Maki Suemitsu, Hirokazu Fukidome, Takashi Ito, Kanji Yasui, Hideki Nakazawa and Tetsuo Endoh, 2011 年 12 月 15 日.

[7] 1st International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 2011) Young Researcher Award, Akira Satou, Nov. 24, 2011.

[8] 1st International Symposium on Terahertz Nanoscience (GDR-I THz 2011) Young Researcher Award, Tetsuya Fukushima, Nov. 28, 2011.

[9] IEEE Sendai Section, Student Award 2011 The Best Paper Prize, Tetsuya Fukushima, Nov. 29, 2011.

[10] 2nd International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 2012) Young Researcher Award, Tetsuya Fukushima, July 4, 2012.

[11] IEEE Electron Device Society Distinguished Lecturer Award, Taiichi Otsuji, Jan. 22, 2013.

[12] (財)宮城産業科学振興基金 平成 25 年度研究奨励賞, 佐藤昭, 受賞題目「グラフェンの非平衡キャリアダイナミックスの高精度モデル化とそのテラヘルツレーザーへの応用」, June 8, 2013.

[13] Fellow, IEEE, Taiichi Otsuji, Jan. 1, 2014.

②マスコミ(新聞・TV等)報道

[1] プレス発表:「シリコン基板上のグラフェン薄膜作製に初めて成功 (未来の超高速大規模集積デバイスに道)」 東北大学 電気通信研究所の末光 眞希 教授らは、シリコン(Si)基板の表面を工夫することで、Si 基板の上にグラフェン薄膜注1)を作製することに世界で初めて成功した。 2009.6.24.

[1] 「基板上に炭素薄膜」日経産業新聞、2008.6.24.

[2] 「グラフェン薄膜、シリコン基板上に作製」日刊工業新聞、2008.6.24.

[3] 「超高速大規模集積デバイスに道、東北大学」科学新聞、2008.7.4.

[4] 「シリコン基板上にグラフェン薄膜」、河北新報、2008.7.24.

[5] 「次世代半導体材料グラフェン、東北大、基板上に生成」日経産業新聞、2008.7.22.

[6] 「炭素材料グラフェンに脚光」、日刊工業新聞、2008.12.1.

[2] プレス発表:「新材料グラフェンからのテラヘルツ誘導放出に成功 (新原理テラヘルツレーザーの実現へ大きく前進)」 東北大学電気通信研究所の尾辻泰一研究グループは, 会津大学コンピュータ理工学部の Victor Ryzhii 研究グループとの共同で, 新材料として注目されている炭素原子の単層シート:グラフェンを用いて、テラヘルツ電磁波の誘導放出に世界で初めて成功した。 2010.6.19.

[7] 「テラヘルツ波新レーザー時実現へ―東北大グループ―シリコン基板にグラフェン」河北新報, June 22, 2009.

[8] 「炭素材でテラヘルツ光―東北大と会津大―レーザー光源目指す」日経産業新聞, July 8, 2009.

[3] プレス発表:「Si 基板上へのグラフェン多機能デバイスの開発に道」 東北大学電気通信研究所の吹留博一助教らは、シリコン(Si)基板の面方位による、Si 基板上に成長させた次世代電子材料グラフェン(GOS)の多機能化(金属性・半導体性の切り分け)に成功し、GOS を用いたトランジスタの集積化も可能であることを示した。 2011.11.08.

[9] 「グラフェンで電子素子」日経産業新聞, 2011.11.16.

[10]「グラフェン作り分け」日刊工業新聞, 2011.11.16.

[11]「グラフェンの層数制御_電子物性 自由自在に」日刊工業新聞, 2012.08.07. (東北大・通研・吹留博一准教授ほか)

[12]「グラフェン高品質成長_SiC 基板平坦化で」化学工業新聞, 2012.08.07. (東北大・通研・吹留博一准教授ほか)

[13]「平らなグラフェン成膜_原子レベルで形成」日経産業新聞, 2012.08.07. (東北大・通研・吹留博一准教授ほか)

[14]「グラフェンがレーザ素子に 東北大学が誘導放出を確認 テラヘルツ波源の有力な選択肢に」NE レポート, 日経エレクトロニクス Digital Online, 2012.4.2; 日経エレクトロニクス 2012/04/02 号 pp. 12-13.

[15]「グラフェンの層数制御_電子物性 自由自在に」日刊工業新聞, 2012.08.07. (東北大・通研・吹留博一准教授ほか)

[16]「グラフェンの精密成長技術」科学新聞, 2012.08.25. (東北大・通研・吹留博一准教授ほか)

[17]「ナノテク素材 平たんに成膜」日本経済新聞, 2012.08.07. (東北大・通研・吹留博一准教授ほか)

[18] "Superradiant terahertz lasing with graphene metamaterials," SPIE Newsroom (T. Otsuji, V. Popov, and V. Ryzhii), http://spie.org/x94087.xml, May 28, 2013.

[19] "Lateral thinking yields semiconductor success; Graphene research moves towards devices," IN DEPTH of LATEST NEWS ARTICLES, nanotechweb.org, Feb. 25, 2014. (査読付論文[106] "All-graphene tunnel FETs.."の研究内容をハイライト紹介) http://nanotechweb.org/cws/article/indepth/56353

③その他

[1] Myung-Ho Jung, Hiroyuki Handa, Ryota Takahashi, Hirokazu Fukidome, Tetsuya Suemitsu, Taiichi Otsuji, and Maki Suemitsu, Jpn. J. Appl. Phys. 50 (2011) 070107, <u>JJAP Top 20 Most Downloaded Articles</u> in August 2011.

[2] Shunsuke Abe, Hiroyuki Handa, Ryota Takahashi, Kei Imaizumi, Hirokazu Fukidome, and Maki Suemitsu, Jpn. J. Appl. Phys. 50 (2011) 070102, <u>JJAP Top 20 Most Downloaded Articles</u> in August 2011.

[3] N. Horiuchi, Nature Photon., Vol. 6, pp. 82-83, Feb. 2012. News and views, "View from TeraNano 2011: Terahertz nano-exploration," 国際会議における成果発表の紹介記事(光学励起グラフェンからのテラヘルツ誘導増幅放出).

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

- 日本学術振興会科学研究費補助金:特別推進研究に採択され、現在実施中。課題名「グラフェンテラヘルツレーザーの創出」(H23～27) 当初計画になかった「グラフェンによる新テラヘルツレーザー」に関する成果が得られ、具体的デバイス開発への展開が見込める段階

に達し、新規課題として採択されたため、本CRESTと分離して研究を推進中。

§6 研究期間中の活動

6．1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2008.11.17-19	International Symposium on Graphene Devices: Technology, Physics and Modeling	会津大学, 福島県会津若松市	81 名	国際シンポジウム 招待講演:12 件 一般講演:24 件
2008.12.19	グラフェン合同シンポジウム	東北大学電気通信研究所, 宮城県仙台市	20 名	グランフェン理論研究の権威である斎藤教授(東北大理)らの講演、及び我々のGOS 研究に関する討論を行った。
2010.10.27-29	2nd International Symposium on Graphene Devices: Technology, Physics and Modeling	東北大学 電気通信研究所, 宮城県仙台市	90 名	国際シンポジウム 招待講演:19 件 一般講演:34 件
2012.11.5-9	3rd International Symposium on Graphene Devices: Technology, Physics, and Modeling	SOLEIL, France	120 名	国際シンポジウム 招待講演:21 件 一般講演:33 件 ポスター発表:27 件
2013.9.9-13	5th International Conference on Recent Progress in Graphene Research	東京工業大学 東京都目黒区大岡山	380 名	国際シンポジウム プレナリ講演:4 件 招待講演:31 件 一般講演:57 件 ポスター発表:178 件

§7 最後に

1．研究の目標等から見た達成度：

以上述べた通り、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、グラフェンが有する上記の特長を Si 基板上で実現させるグラフェン・オン・シリコン(GOS)材料・デバイス技術の開発を目的として、平成 19 年度より 25 年度にかけて本プロジェクトを推進してきた。具体的には、(1)独自の製膜プロセスから成る GOS 技術、(2) GOS による新しい相補的スイッチングデバイス CGOS(Complementary GOS)、及び CGOS を用いた超高速論理回路技術、(3)電子輸送限界を越えたプラズモン共鳴型テラヘルツ(THz)GOS デバイス PRGOS(Plasmon Resonant GOS)技術の開発を推進した。その結果、(1) GOS 技術については、結晶品質の課題は残るものの、Si 基板面方位の選択とSiC 製膜条件の制御によってCGOS, PRGOS それぞれに適した積層様式の多層化グラフェンを単一の Si 基板上に同時に形成可能

なことを発見するとともに、グラフェン化領域をFET素子サイズに限定したμGOS技術の開発によってGOS高品質化の見通しも得たことから、当初の期待どおりもしくはそれ以上の成果であったと評価する。(2) CGOSデバイス技術については、グラフェン独自のアンバイポーラ特性に起因するスイッチング動作の困難性(低いOn/Off比)をバンドギャップエンジニアリング技術で解決を図る方向で計画したが、その後の詳細な理論解析の結果、二層化AB積層グラフェンの垂直電界印加によるバンドギャップ開口ではSi-CMOSと同程度のOn/Off比 10^6 の実現が困難であることが判明した。GOSFETの試作評価を進め、GOSのバックゲート動作では、当初より6000 $cm^2/(Vs)$ の比較的高い移動度が得られ、グラフェン・SiCヘテロエピ界面の優秀性を確認できた。一方、トップゲートGOSFETでは従来の絶縁膜がグラフェンと良好な界面を形成できないことから、独自の製膜技術で、誘電率制御と不純物のδドープが可能な高機能DLCゲートスタック技術を開発した。この技術によって、チャネルドーピング技術のないグラフェンに対して、高周波化の律速要因であったオーミック抵抗ならびにアクセス抵抗の低減とキャリア移動度の向上を同時に解決しうる見通しを得た。並行して、On/Off比 10^4 程度のMSIクラスの集積では問題にならない擬似CMOS動作のCGOSでは、ゲート長10nmクラスのGOSFETで電流利得遮断周波数900 GHz, D-FF回路のトグル周波数300GHz以上の実現が可能である見通しも理論解析によって得られた。デバイスモデリングとデバイスプロセスの相乗効果によって、GOSFETならびにCGOSの適用領域を明確にできた。以上のことから、当初期待する成果には至らなかったものの想定外の新たな成果が得られたと評価する。(3) PRGOSデバイス技術については、まず他に先駆けてグラフェンプラズモンのモデリングとその基本物性の解明を行った。その中で、光学励起もしくは電流励起によって反転分布状態にあるグラフェンでは表面プラズモン・ポラリトン(SPP)がテラヘルツ帯で巨大な利得増強作用を有することを理論的に発見し、他に先駆けて実験実証に成功したことは、顕著な成果と認められる。また、当初の計画にはない、グラフェンテラヘルツレーザーの可能性を理論的に発見し、室温下でのテラヘルツ帯負性導電率の存在とテラヘルツ帯誘導放出を理論実験両面から実証したことは、想定外の顕著な成果と認められる。グラフェンに特異なプラズモン物性自体のの実験実証に関する成果は国際会議発表にとどまっているが、前述のテラヘルツ帯誘導放出の実験検証で観測された量子効率限界を上回る利得増強が得られたことにSPPの巨大利得増強作用が関わっていることが推察され、引き続き実証実験を進めている。具体的なPRGOSデバイスの試作評価は、デュアルゲートGOSFET構造のPRGOSテラヘルツエミッター、ディテクター、変調器の試作を終え、評価を進めている段階で、東日本大震災の影響による遅延は否めない。H25年度継続延長が認められたことによって、μGOSの品質向上、GOS-CMOSモノリシック集積化の見通し向上、ならびにPRGOSのテラヘルツ・サブテラヘルツ領域での巨大利得、フォトミキシング機能の実験検証という、重要な進展を得ることができた。以上のことから、当初の期待どおりもしくはそれ以上の成果であったと評価する。

以上、総合的に判断して、本CRESTプロジェクトは期待通りもしくはそれ以上の成果であったと自己評価する。

２．得られた成果の意義等の自己評価：

グラフェンの光電子デバイス応用は世界中の主要機関研究者が研究を進め、極めて競争の激しい研究領域に発展している。その中で、グラフェンFETの微細化・高周波化の競争では米国IBM社をはじめ他機関に先導を許しているが、いずれもSi－MOSFETのスケーリング性能を凌駕できていない。その根本的な課題解決はゲートスタック技術ならびにチャネルドーピング技術にあり、その解決法を本CRESTプロジェクトで明らかにできたことは、将来の高周波競争に先んじる可能性を与えたことで、意義が高いと評価する。

また、グラフェンプラズモンのデバイス応用では豊富な独創的アイデアで、新しいデバイス応用の可能性を発見し、実証を進めており、当該分野では、先導的成果を上げている。同時に、Si-CMOSと完全モノリシック集積化が可能なGOS技術を開発できたことは将来

の超高周波集積デバイス技術として大きな産業応用の可能性を示せた点で意義が高いと評価する。

グラフェン研究の中心が物性や成長技術にあってデバイス応用が希少であった本 CREST 研究開始直後よりグラフェンデバイスに特化した国際会議：ISGD (International Symposium on Graphene Devices) を企画・主催し、後のノーベル賞受賞者(K. Novoselov 博士)を含む最先端研究者を世界中から招へいし、研究交流・情報交換とプレゼンスの向上に努めてきた。その結果、グラフェンデバイスのコミュニティで当チームのアクティビティが広く認知され、ISGD が日本・欧州・米国を巡回開催する会議として成長発展している。また、国内学会誌（JJAP 24編、APEX (Impact Factor 2.731) 8編等、計32編）はもとより、世界的にサーキュレーションの高い AIP (Appl. Phys. Lett. (Impact Factor 3.794), J. Appl. Phys. 計22編)、APS (Phys. Rev. B(Impact Factor 3.767) 9編)、IOP (J. Phys. D, J. Phys. Cond. Matt. 計8編) をはじめとする国際的に認知度の高い海外学術論文誌へも積極的に成果を公表(計 63 編)した。これらの積極的な国際研究・交流活動によって米国材料科学学会（MRS）の年次総会（Sprinng Meeting, Fall Meeting）では、ナノカーボンセッションにおける招待講演ならびにグラフェンチュートリアルの講師を務める他、MRS Bulletin (Impact Factor 5.021) 、 Proc. IEEE (Impact Factor 6.81、計3編) 、ならびに Journal of Physics D: Applied Physics (Impact Factor 2.54) 各誌のグラフェン特集号への招待論文、IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (Impact Factor 4.078) のテラヘルツ特集号への招待論文など、グラフェンデバイス分野において世界的に認知されるに至っている。

国際的なグラフェン研究の競争下において、当該 GOS チームの学術的貢献度を論文被引用件数によってベンチマークした結果を図 8.1、8.2 に示す。図 8.1 は、2012 年 4 月末現在での論文数、被引用総数、平均引用数、h-index を他の代表的な研究者・グループと比較して示したものである。図 8.2 は、2007 年 10 月にプロジェクトが発足して以来、2010 年 8 月、2012 年 4 月 （図 8.1 掲載）、2012 年 9 月末、および 2012 年 9 月末時点での論文数、被引用総数、平均引用数、h-index の推移を示したものである。被引用件数は CREST 開始 3 年後の 185 件から 6 年後には 1523 件（自己引用除外で 985 件）に増加し、h-index も 8 から 22 へと急激に上昇している。厳しい競争下にあって、健闘し、世界的認知度が急速に向上している様子が伺える。

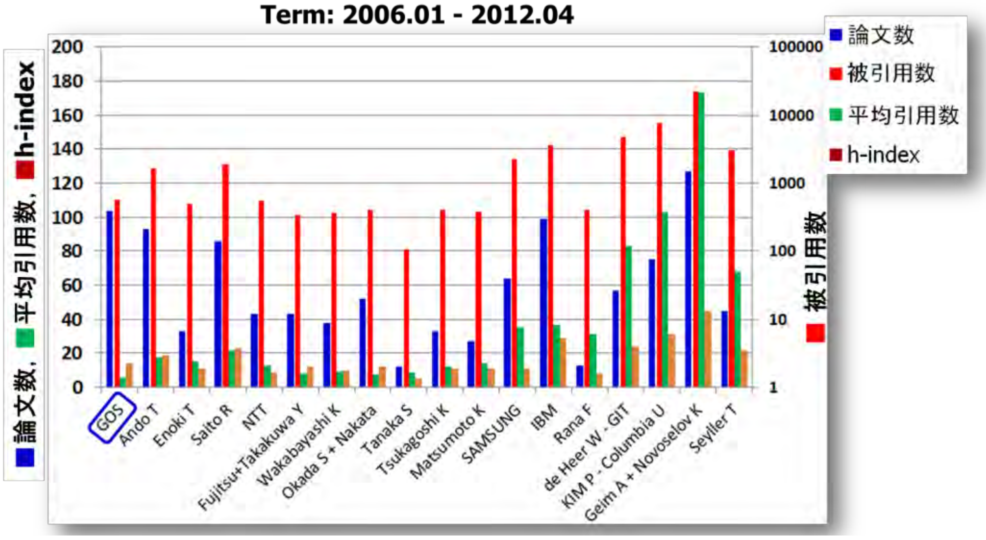


図 8.1 ISI データベースによる論文引用数等の研究機関別比較（2006.4～2012.4）

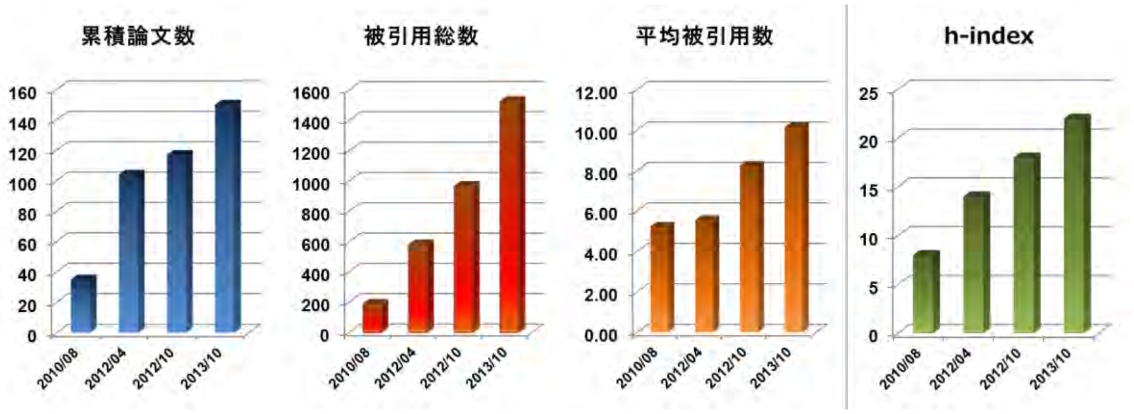


図 8.2 CREST-GOS グループの論文被引用数等の年次推移（2010.8～2013.10).
(ISI データベースによる)

3. 今後の研究の展開:

新たな展開へ向けて以下のような革新的取り組みを引き続き推進してゆく所存である。

(1) μ GOS の高品質化

(2) GOSFET, CGOS の極限高速化追求と PRGOS テラヘルツデバイス試作・機能実証

(3) CGOS-PRGOS-CMOS 完全モノリシック LSI の試作と有効性実証、さらにはその超高速テラヘルツ無線通信フロントエンド LSI への応用検証

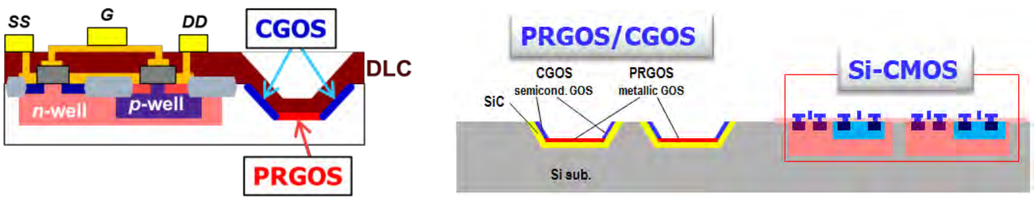
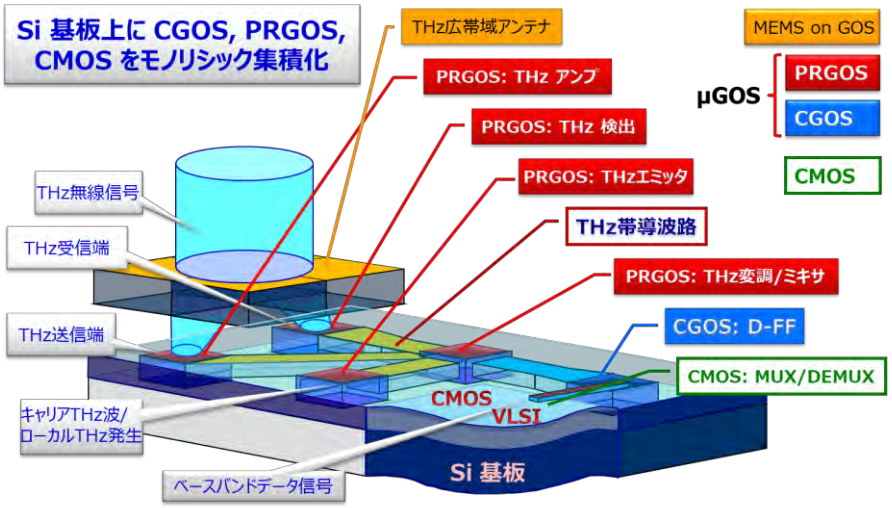


図 8.2 CGOS-PRGOS-CMOS 完全モノリシック LSI 断面図（バックエンドプロセス前）。



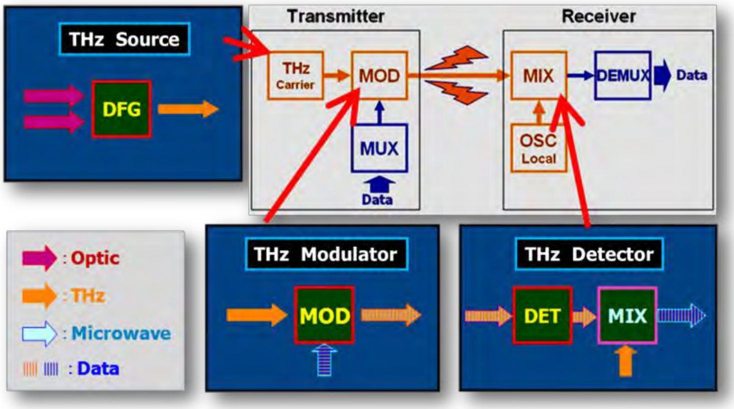


図 8.3 超高周波テラヘルツ無線通信トランシーバフロントエンドの GOS による 1 チップ化イメージ。 (図 4.2.16 の再掲)

４．研究代表者としてのプロジェクト運営について：

研究代表者としてプロジェクト運営に留意した点は以下の 3 点。

(1) プロセス・実験に関わる学生・スタッフの安全教育・管理を徹底した。
(2) グループ内・グループ間の情報・知識共有と議論促進の機会確保に努めた。
(3) CREST 予算のメリハリのある配分。プロセス製造・評価装置の新規導入および測定機器類の早期確保に予算を重点配分し、国際共同研究による研究促進も考慮に入れた人件費の確保とその有効利用に努めた。

研究代表者としてプロジェクト運営で努力したことは他には少なく、共同研究者・スタッフ・学生諸君がよく自ら考えお互いの連携を取り切磋琢磨して進んでくれた。強いて上げれば、以下のような点が上げられる。

(4) Creative Mind を大切にし、新しい発想やアイデアの提案を重んじ、それを促すような雰囲気づくり、試作や実験データが生まれるごとに皆で喜び、表彰されるごとに皆で祝い、研究意欲が駆り立てられるような雰囲気づくりに努めた。
(5)「失敗した時は指導者が至らなかったと思えばよい、失敗した後は、指導者を越える機会が与えられたと思って頑張ればよい」と、学生が勇気を持って研究に臨めるように指導した。

５．その他

本研究に携わった研究スタッフ・学生をご紹介します。苦楽を共にしてくれたみなさん、大変ありがとう。そしてこれからもよろしく。

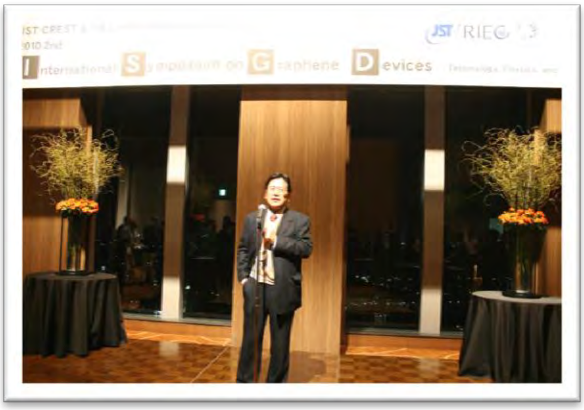
尾辻泰一研究代表者グループ

末光眞希共同研究者グループ（東北大学電気通信研究所）

佐野栄一共同研究者グループ（北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター）

RYZHII Victor / RYZHII Maxim 共同研究者グループ（会津大学コンピュータ理工学部）

ISGD2010 での記念写真



ISGD2012 での記念写真

RPGR2013 での記念写真