

開発項目 「S I P（戦略的イノベーション創造プログラム）／
次世代パワーエレクトロニクス／
将来のパワーエレクトロニクスを支える基盤研究開発／
ダイヤモンドパワーデバイス用ウエハの研究開発」
平成26年度～平成27年度のうち平成26年度分中間年報

委託先名 独立行政法人 産業技術総合研究所
国立大学法人 千葉大学
国立大学法人 大阪大学

[記載項目]

1. 研究開発の内容及び成果等

①低欠陥2インチΦウエハ

本項目では、ダイレクトウエハ化技術（結晶をコピーする技術）およびモザイク接合などの大型化技術の組み合わせにより、パワーデバイスに適用可能な低欠陥で大面積のウエハの開発を行う。

今年度は、低欠陥ウエハの大型化に必要な基盤技術開発を行った。高温高压合成の低欠陥基板（転位密度 $<10^3$ 個 cm^{-2} ）を種として、イオン注入を用いたウエハコピー技術（ダイレクトウエハ化技術）により、単結晶 CVD 基板を作製した。その際、研磨などによって入る種基板の表面損傷層を除去するとともに、窒素添加量などの CVD 成長条件を最適化するなどの工夫を行った。得られた基板の欠陥状況を放射光 X 線トポグラフィで観察した結果、基板のほぼ全域において、転位密度約 900 個 cm^{-2} の低欠陥基板（大きさ： $7 \times 6 \text{ mm}^2$ ）を作製できたことがわかった。

またバルク結晶の大型化に必要な基盤技術開発として、プラズマの低温化を目指し、パルスマイクロ波電源の仕様検討を行った。本電源をマイクロ波プラズマ CVD 装置に導入し、水素プラズマの形成実験を行ったところ、パルスプラズマを形成できること、仕様通りの出力が得られることを確認した。

②ウエハ加工技術

②-1：レーザー応用加工

ダイヤモンドは最も硬い材料で機械的加工は困難であることから、硬さに依存せず比較的高速度で加工できるレーザを主に利用し、応用方法と必要な仕様の関係を明らかにすることを目指して、本年度はスライシング、面取り加工技術、高速平滑化技術、ダイシング技術などレーザを応用する加工を選定して予備実験を実施した。

Nd:YV04 レーザの第四高調波 (266nm) を用いてダイヤモンドへの高アスペクト比でダイシング及びスライス切断に取り組んだ。(i) 走査速度 $10 \mu\text{m/s}$, 走査回数 2 回, (ii) 走査速度 $100 \mu\text{m/s}$, 走査回数 20 回の条件で加工した例を図 1 に示す。(b) より、除去幅はレーザー入射側で最大であり、出口側に向かうに従って小さくなる。(b) (i) の条件で加工溝が途切れているように見える。しかし、矢印で示した先に微細な溝を形成しており、裏面まで到達している。なお加工溝の傾きは、試料セッティング方法に因ることが分かっている。上下側面、切断面いずれも加工部周辺に亀裂、剥離などの大きな欠陥は見られなかった。最大で 1mm の厚さのウエハまでダイシング出来ることを確認した。さらにレーザをわずかにずらしながら走査し、切断溝幅を広げ、より奥まで

行うレーザー光を伝搬させることで、深溝化しスライシングを施す。

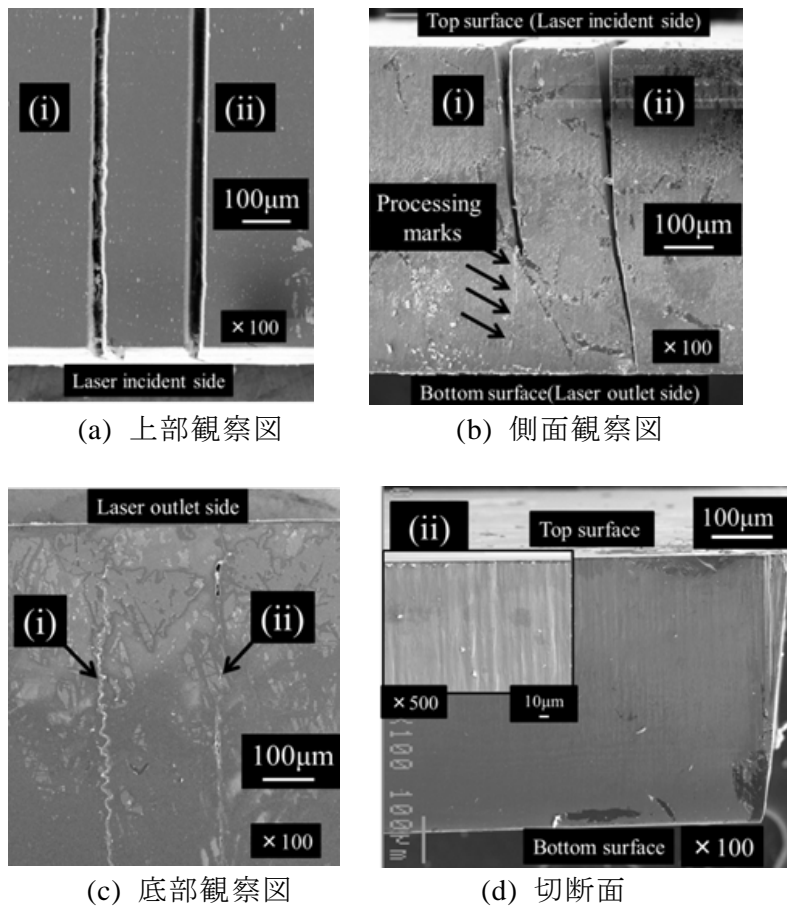


図1 レーザー切断の断面図

②-2：高速平滑化

エピタキシャル成長層を低欠陥化するためには、ダイヤモンド種結晶や基板の成長面を無損傷で平坦化する必要がある。平滑化方法として犠牲層エッチング、機械化学研磨の加工条件最適化を行う。本年度は犠牲層エッチング実験を行うためのRFエッチング装置を整備した。犠牲層材料としてガラスを想定して、単結晶ダイヤモンドとガラスのエッチング速度のデータを取得した。エッチングガスとしてArとCO₂の混合ガスを用い、混合比を変化させることによって、ガラスとダイヤモンドのエッチング速度を等しくできること、すなわち犠牲層エッチングによる平坦化が可能であることを示した。また、機械化学研磨として、研磨損傷の原因であるダイヤモンド砥粒を用いることなく、研磨盤材料としてガラス、SUS304、鋳鉄を用いた研磨について比較した。SUS304および鋳鉄を研磨盤として用いた場合は、研磨速度が非常に遅いが、精密研磨が可能であり、そのままエピ成長基板に利用できた。ガラス研磨盤の場合、極めて高速な研磨が可能であり、1cm角の単結晶ダイヤモンドで30µm/時の研磨速度が得られた。ただし、ガラス研磨盤表面の荒れが顕著であり精密研磨にはガラス研磨面の平坦性管理が必須である。以上から、ガラス研磨盤を用いた研磨が、ダイヤモンドの平坦化プロセスにおいて特に粗研磨工程として有効であることが分かった。今後、エピ成長層の欠陥密度への平坦化手法の影響を比較実験する予定である。

③デバイス応用机上検討及びウェハ仕様決定

ダイヤモンドは、他のワイドバンドギャップ半導体に比べてさらに低損失化が可能な、究極のパワーデバイスとして期待されている。但し容易にデバイスプロセスを行い、縦型構造の高電圧大電流の大型パワーデバイスを実現するウェハがないことから、半導体材料としてのダイヤモンドの優位性や、他材料との住分け、有効な利用方法などが十分に示されていなかった。本年度はダイヤモンドを半導体パワーデバイスに適用した場合のメリットを明らかにするための方法について議論を行うとともに、ダイヤモンドの現状デバイスの基礎特性について調べた。

ダイヤモンド半導体の利点として高破壊電界強度(10000kV/cm)があり、これは高耐圧のユニポーラパワーデバイスの実現を容易にする。ユニポーラダイオードは、ターンオフ時の逆回復がないためにスイッチング損失が少ない。またユニポーラトランジスタは、立ち上がり電圧がないため、抵抗性により小電流時の損失が小さいメリットがある。さらに金属より熱抵抗小さい高熱伝導率(2000W/mK, Cu:398, Al:236)は、ヒートスプレッドとしても有効であり拡散用金属プレートが不要となりパッケージの軽量化を可能とする。これらを踏まえアプリケーションとして直列接続の不要な高電圧送配電用スイッチを考え損失を試算した。デバイスの順方向電圧降下と交流電流は次式で表せる。

$$V_F = V_0 + R k I_{max} \sin \omega t$$

但し V_0 : 立上り電圧, R : 導通抵抗, I_{max} : 定格電流, k : 負荷率, ω : 交流の角周波数である。これに対して瞬時電力であらわされる導通損失は次式となる。

$$p(t) = V_F I = V_0 k I_{max} \sin \omega t + R I^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$$

したがって、半周期平均導通損失を求めると次式となる。

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} p(t) d\omega t = \left(\frac{2}{\pi} V_0 + \frac{R}{2} k I_{max} \right) k I_{max}$$

これを用いて、負荷率に対する損失を試算した結果を図2に示す。バイポーラデバイスに比べてユニポーラデバイスでは、低負荷率において損失が少ないことが分かる。

現状のダイヤモンドショットキーバリアダイオード(SBD)の評価を実施した。温度はホットプレートを用いて298Kから523Kまで設定した。ダイオードの接合部の電流電圧特性及び端子間電圧 v_d と接合部に印加される電圧 v_c との関係を表す特性式を以下に示す。

$$i_d = I_s \left[e^{\frac{q v_c}{n k T}} - 1 \right]$$

$$v_d = R_s i_d + v_c$$

但し i_d は端子間電流、 v_c は接合部に印加される電圧、 R_s はドリフト層による直列抵抗である。直列抵抗 R_s は、直線近似可能な大電流領域の測定結果から最小二乗法によって一次関数で近似しその傾きより求めた。

$e^{\frac{q v_c}{n k T}} \gg 1$ となる電圧 v_c に対して、 $i_d \cong I_s e^{\frac{q v_c}{n k T}}$ と近似できる。両辺の対数をとると、

$\ln i_d = \ln I_s + \frac{q v_c}{n k T}$ となる。 R_s の影響が小さい微小電流領域の測定結果の直線部分を用いて i_d

の対数の直線部分を最小二乗法近似し、傾きからエミッション係数 n を、切片より飽和電流 I_s を求めた。ダイヤモンド SBD の測定結果から抽出したパラメータの温度依存性を図 3 に示す。(c)に示す直列抵抗 R_s の温度特性より、直列抵抗 R_s は 450K 付近で最小になっている。一般的に、半導体の多数キャリアの移動度は温度上昇とともに低下するため、直列抵抗は温度に対して単調増加する。ダイヤモンド SBD において温度上昇によって 450K まで抵抗が減少するのは、結晶欠陥によってできた深い準位にトラップされたキャリアが活性化することによる、実効キャリア濃度の増加が考えられる。400K 以上で直列抵抗 R_s の変化が少ないのは、実効キャリア濃度の増加と移動度の低下の影響が相殺しているためと考えられる。

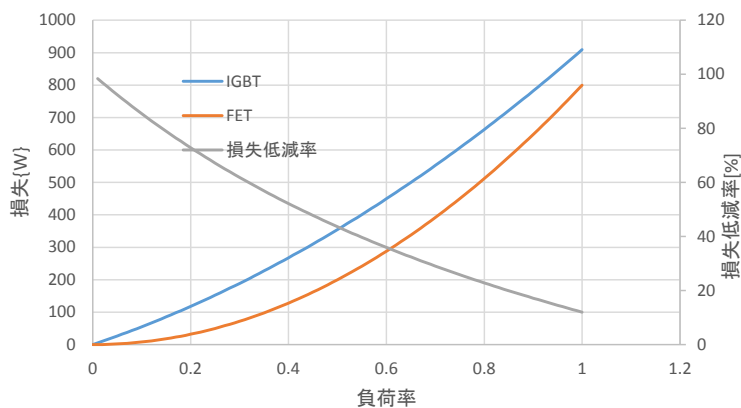
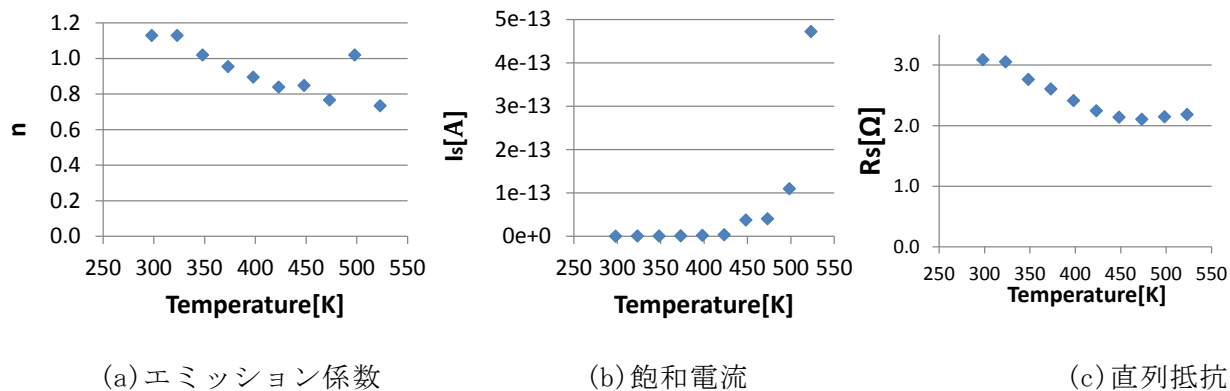


図 2 半導体スイッチとして使用した場合の負荷率と損失の関係



(a) エミッション係数

(b) 飽和電流

(c) 直列抵抗

図 3 デバイスパラメータの温度依存性

2. 成果（当該年度分についてのみ記載）

(1) 研究発表・講演（口頭発表も含む）

なし

(2) 特許等

なし

(3) 受賞実績

なし

3. その他特記事項（当該年度分についてのみ記載）

(1) 成果普及の努力（プレス発表等）
なし

(2) その他
なし

契約管理番号	1 4 1 0 1 7 1 5 - 0
	1 4 1 0 1 7 1 6 - 0
	1 4 1 0 1 7 1 7 - 0

開発項目

「SiC パワーデバイス応用による低容量小型パワー集積回路およびパワープロセッシング技術の研究開発」

平成26年度～平成27年度のうち平成26年度分中間年報

委託先名：京都大学，東京電機大学，千葉工業大学

1. 研究開発の内容および成果等

①-1 高周波絶縁型ゲートドライバの開発：高周波絶縁型ゲートドライバの回路構成を検討した。①-2 で開発されたドライバを追試することにより GaN を用いる有効性を確認するとともに，D 級，E 級，EF 級，Φ 級増幅器について回路解析を通じた比較検討を行い，EF 級増幅器のゲートドライバへの適用可能性を明らかにした。

①-2 GaN デバイスを適用したドライバ開発：京都大学と企業（ローム）で開発している SiC MOSFET の MHz オーダーの高周波駆動を実現する GaN を用いた高速ゲートドライブ回路の汎用基板を製作し共通仕様とした。

②-1 受動素子の高周波対応性調査・検討：汎用的な絶縁型フライバックコンバータに関して，回路内に使用されるフライバックトランスの磁気コアの飽和特性の改善について検討した。その結果，材料物性の優れるリカロイを高周波駆動の磁気コアの候補とし，RM タイプのコアを作製し，周波数応答特性を精査した。

②-2 CMOS 開発と機能回路の集積化，②-3 パワー集積回路設計：SiC パワー MOSFET の電流特性と容量特性について，フィッティングパラメータを用いる回路シミュレーションモデルを定義してモデル化を行った。電流特性は，Si-CMOS デバイスにおいて提案されているしきい値電圧に基づく電流式を採用しており，容量特性は，SiC パワー MOSFET の縦構造を考慮したモデル式を採用している。本モデルを Verilog-A 言語により記述して回路シミュレータに組み込み実デバイスに対してフィッティングパラメータを推定したところ，両特性とも，良好な模擬結果を得た。

③-1 デジタルリンクセル統合制御の開発：電力パケットの通信プロトコル仕様の策定，電力ルータおよび電力ミキサの仕様書を作成し，来期における実験装置製作の準備を行った。FPGA・VHDL の開発環境の立ち上げを行い，基本機能の確認を行った。

③-2 小容量変換回路の超小型化：スイッチング周波数 1MHz，出力 50W の絶縁型フライバックコンバータ回路を作成し，各部の電圧・電流の計測による回路動作を評価した。実製作に基づく回路評価によってトランスの自己共振周波数(8MHz)の存在を明らかにし，DC/DC コンバータ回路の超小型化に向けた回路設計指針を蓄積している。

④-1 量子化制御のロボット駆動系への適用：本年度は，電力パケットによってエネルギーが供給される環境下での制御を，間欠的な制御入力が増加されるシステムの制御と捉えて問題の定式化を行った。また，その問題の解として，蓄積型の電力パケット処理機の提案を行った。さらに，5 台の不安定な機械システム（シーソーボール系）からなる電力パケット実験装置を製作し，提案した電力パケット処理機の実証実験を実施した。電力パケットの量子化制御により，同一配線を用いた電力パケットの伝送の実現し，ロボット等のパワー配線の数の低減が期待できることを示した。

④-2 情報ネットワークとパワーネットワークの統合・最適化制御：大規模情報ネットワークを実現するインターネット技術を基礎とし，パワーネットワークのためのネットワークアーキテクチャおよびプロトコルについて検討を行った。ハードウェア性能や許容遅延などの制約条件のもとで，プロトコルの階層モデル，アドレスサイズ，パケットフォーマットなどの最適化手法についての考察を行った。

④-3 生物系的エネルギー運用のモデル形成:一般のネットワークにおけるダイナミクスの頑健性解析法と、ゆらぎを抑制するための制御機構を考案した。これらは、生物系的ネットワークにおいて、エネルギー伝送上重要なリンクの同定や、電力パケット伝送の際に生じるゆらぎを抑える効果などへの応用が期待できる。

2. 成果（当該年度分についてのみ記載）

(1) 研究発表・講演（口頭発表を含む）

[委託先：京都大学（再委託先：千葉大学，東京理科大学，筑波大学）]

- 1) 縄田信哉，高橋亮，引原隆士，電力パケットによるエネルギー表現の漸近的性質，電子情報通信学会和文論文誌，Vol. J97-A, No. 9, pp. 584-592 (2014).
- 2) Ryo Takahashi, Keiji Tashiro, and Takashi Hikihara, "Router for Power Packet Distribution Network: Design and Experimental Verification", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol.6, No.2, pp.618-626 (2015).
- 3) Shinya Nawata, Naoaki Fujii, Yanzi Zhou, Ryo Takahashi and Takashi Hikihara, "A Theoretical Examination of an Unexpected Transfer of Power Packets by Synchronization Failure", Proc. 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2014).
- 4) Naoaki Fujii, Ryo Takahashi, and Takashi Hikihara, "Networked Power Packet Dispatching System for Multi-path Routing", Proc. 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2014), pp. 357-362, Japan (2014. 12.13).
- 5) 長岡晃平，引原隆士，GaN HEMTを用いたSiC MOSFET高速ゲートドライブ回路の一検討，電気学会電子デバイス・半導体電力変換合同研究会，EDD-14-059 & SPC-14-121 (2014.10.30).
- 6) 藤居直章，高橋 亮，引原隆士，電力パケット伝送システムのステッピングモータ駆動系への適用，電気学会電子デバイス・半導体電力変換合同研究会，EDD-14-060 & SPC-14-122 (2014.10.30).
- 7) 持山志宇，藤居直章，高橋 亮，引原隆士，電力パケット給電を用いたマニピュレータ軌道制御に関する数値的検討，電子情報通信学会 総合大会，回路とシステム A-1-14，立命館大学 (2015.3.10).
- 8) 佐段田裕平，引原隆士，並列接続されたコンバータにおける受動性に基づく制御の制御ゲインに関する一検討，回路とシステム A-1-15，立命館大学 (2015.3.10).
- 9) 児嶋佑典，東 俊一，杉江俊治，パケットベース制御：間欠的な制御入力による精密な制御，計測自動制御学会第2回マルチシンポジウム (2015.3.7)
- 10) X. Wei, H. Sekiya, T. Nagashima, M. K. Kazimierczuk, and T. Suetsugu, "Analytical expressions for class-D ZVS inverter at any duty ratio," IEEE Transactions on Power Electronics, 2015. (採録決定)
- 11) H. Sekiya, K. Inoue, T. Nagashima, T. Suetsugu, S. Kuga, X. Wei, K. Shirota, H. Hatamoto, and S. Shimizu, "A loosely coupled inductive wireless power transfer systems with class-E transmitter and multiple receivers," 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2014), pp.675-680, Sept. 2014.
- 12) Y. Yamada, T. Nagashima, Y. Ibuki, Y. Fukumoto, and H. Sekiya, "Numerical algorithm for distribution-map derivations of switching converters," The 40th

Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2014), Nov. 2014.

- 13) Mikio Hasegawa, “Distributed Optimization of Cognitive Radio Networks,” International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies (2014.12.5)
- 14) Yoshimasa Narumiya, Mikio Hasegawa, “Mathematical analysis on effectiveness of SS code having negative autocorrelation,” IEEE International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS) (2014.12.16)
- 15) Ryo Kikuchi, Kohei Hosaki, Mikio Hasegawa, “Implementation and Evaluation of A Combined Optimization Scheme for Routing and Channel Assignment in Wireless Mesh Networks,” IEEE Consumer Communications & Networking Conference, (CCNC) (2015.1.11)
- 16) Hiroyasu Ando, Ernesto Estrada, Communication Robustness in Graphs Measured by the Communicability, in Proc. 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 533-536, (2014).
- 17) Hiroyasu Ando, Control of Stochastic Processes by Time-delayed Feedback and its Application, in Conference on Nonlinear Systems and Dynamics 2015, IISER Mohali/India. 2015/03/13

[委託先：千葉工業大学]

- 1) 潤間威史, 佐藤宣夫, 石川博康, 「走査型プローブ顕微鏡による Sapphire 基板上 GaN の観測」, 平成 27 年電気学会全国大会 2-098 (2015.3.25).
- 2) 牛崎 拓, 佐藤宣夫, 「リチウムイオン電池に対する電気二重層キャパシタおよびアルミ電解コンデンサの併用に関する検討」, 平成 27 年電気学会全国大会 7-054 (2015.3.24).
- 3) N. Satoh, S. Katori, K. Kobayashi, K. Matsushige, H. Yamada, “Surface Potential Measurement of Organic Multi-layered Films on Electrodes by Kelvin Probe Force Microscopy”, IEICE TRANSACTIONS on Electronics Vol.E98-C, pp.91-97 (2015).
- 4) 佐藤宣夫, 山本秀和, 「SiC パワーMOSFET の静特性/動特性評価」, 千葉工業大学研究報告, Vol. 62, pp.23-27 (2015).

[委託先：東京電機大学]

現時点では発表なし

(2) 特許等 なし

(3) 受賞実績

- (i) 藤居直章 (大学院生), 平成 26 年度電子デバイス・半導体電力変換合同研究会学生奨励賞 (電気学会) (2014.10.30).
- (ii) 藤居直章 (大学院生), IEEE PELS Japan Young Engineer Award (2015.2.13).
- (iii) 関屋大雄 (他共著者 3 名) 電子情報通信学会非線形問題研究会発表奨励賞受賞 (2014.12)
- (iv) 縄田信哉, 高橋亮, 引原隆士, 電子情報通信学会論文賞 (2015) (内定)

3. その他特記事項（街頭年度分についてのみ記載）

- (1) 成果普及の努力（プレス発表等） なし
- (2) その他 なし

契約管理番号：14101718-0（京大）