

学会日より「耐放射線デバイス研究会」

報告者：産業技術総合研究所センシングシステム研究センター

大曲 新矢

2021年10月8日(金)、産業技術総合研究所九州センター大ホールにて、耐放射線デバイス研究会（主催：産業技術総合研究所、九州シンクロトン光研究センター）を開催した。本研究会は、宇宙や原子炉などの高温・放射線環境下での動作が期待されるワイドギャップ半導体に焦点を当て、ダイヤモンドおよび SiC における結晶成長からディスクリート素子の開発、放射線損傷評価、ソフトエラーの解析について議論を行った。また本研究会は、新型コロナウイルスの感染拡大防止の観点を鑑み、現地開催とオンラインのハイブリッドで運営した。現地参加者は 23 名、オンライン登録者は 75 名であった（各講演のオンライン聴講平均は 65 名）。以下に、各講演の内容の一部を紹介する。

「過酷事故対応可能なダイヤモンド半導体素子と検出器回路の開発」

梅沢 仁（産業技術総合研究所）

ダイヤモンド半導体をベースとした、放射線検出器および信号処理デバイスのレビューを行った。ダイヤモンド放射線検出器では、500°Cまでの良好なエネルギー分解能および 100%に近い高い電荷収集効率を報告した。これらを原子炉格納容器のエリアモニタ用に展開するため、前置増幅器の開発に取り組んでいる。特に、Ru をベースとしたダイヤモンド半導体のディスクリート素子において、ダイオード、FET とともに 250°C以上の高温安定性、10 MGy を超える放射線耐性が示されたことは特筆すべきである。また水素終端チャンネル MOSFET では、シートキャリア濃度 $> 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の実用レベルのチャンネル動作を示すとともに、絶縁膜の改良により 1 MGy までの X線耐性を実証した。

「SiC デバイスの照射損傷」

牧野 高紘（量子科学技術研究開発機構）

SiC はパワーデバイス用ウェハとして大型基板が市販されており、安定した供給が可能であるところから、極限環境（宇宙、原子力）用半導体としても期待が大きい材料である。QST 牧野は、SiC デバイスが、「照射によりどのような物理現象を経て破壊に至るのか？」に着目した研究を展開している。特に、ガンマ線、電子、イオン照射などによる single event（重イオン 1 個が誘発する電荷挙動）について調べた。ディスクリート素子の破壊は、イオン照射による電荷生成と電界増幅によって引き起こされることを指摘し、独自の取り組みとしてクリプトン照射による SiC アバランシェ増倍の観測と評価を紹介した。

「ダイヤモンド pin 接合形成とその放射線検出器利用」

小泉 聡 (物質・材料研究機構)

ダイヤモンド pin 型ダイオードを用いた中性子検出器の開発現状について報告した。福島原発の廃炉に向けた作業を想定して、高いガンマ線と高温という複合環境下で、中性子線をマーカーとして原子炉格納容器内のデブリを見つけ出すプロジェクトを紹介した。その中で、物質・材料研究機構で長年取り組んでいる高品質・高濃度ドーピング技術と、pin 型ダイオードの作製技術を紹介し、中性子線に対する高品位なレスポンスを確認した。真性ドリフト (i 層) 中における不純物濃度の低減に向けた取り組みとして、 O_2/CH_4 濃度の上昇により B 濃度 $3e14\text{ cm}^{-3}$ まで低減できることを示した。世界最高品質の結晶育成技術とデバイス化技術で、耐放射線デバイスの更なる性能向上が期待される。

「半導体デバイスの宇宙線起因ソフトウェア解析」

渡辺 幸信 (九州大学)

電子機器の誤作動を引き起こす原因の一つとして、「ソフトウェア」と呼ばれる現象がある。ソフトウェアとは一過性の誤作動や故障のことで、その要因の一つは宇宙線が電子機器に衝突して生じる半導体デバイスのビット情報反転である。宇宙線は地上に降り注ぐ自然の放射線で、この正体は目に見えない中性子やミュオンである。半導体デバイスの微細化・低消費電力化が進むにつれ、放射線耐性は低下しており、従来懸念されてきた宇宙線中性子ばかりでなく、宇宙線ミュオンによるソフトウェア発生の可能性も指摘されている。誤動作件数は年間 3 万件ほどと報告されており、大半は安全装置などで自動修正されるものの、半導体デバイスの信頼性や情報の堅牢性を高めるために、宇宙線起因のソフトウェアを解析することは重要である。講演では、実デバイスにおけるフィールド試験とシミュレーションにより、過渡電流特性を報告した。特に微細化高密度半導体として応用が進む、Fin-FET 構造によるソフトウェア解析について報告した。

「原子力プラントに適用する検出器の信頼性について(半導体デバイスに対する要求)」

吉田 成臣 (三菱重工業)

原子力プラントで使われるセンサとして、圧力計、蒸気発生器、水位計、沸騰水センサを紹介し、過酷事故を想定した半導体デバイスの信頼性向上に関する情報提供を行った。ディスクリット素子 (オペアンプ、トランジスタ、ダイオード、定電圧素子、抵抗、コンデンサ) のうち、オペアンプとトランジスタ、定電圧素子の熱劣化、放射線劣化に懸念を示し、過酷環境に耐えうる強靱化した素子開発の必要性を示した。また、半導体デバイスの信頼性に関して、各素子の試験項目 (熱劣化、放射線、機械、圧力、振動、耐震) に関する指標が提示され、デバイス研究者への的確な要求として受け入れられた。

「超ワイドギャップ半導体による原子力電池開発」

嶋岡 毅紘（産業技術総合研究所）

原子力電池は、半減期の長い放射性同位体をエネルギー源として、半導体素子（ダイオード）で電力を取り出すデバイスであり、資源探索や活火山のモニタリングなど、人の立ち入りが困難な空間でのセンシングデバイス用の電源として活用が期待されている。電力変換効率は、ワイドギャップ半導体材料が有利であり、嶋岡らは pn 伝導型制御が可能なダイヤモンドに着目している。本発表では動作原理を紹介し、ダイヤモンド pin 接合型ダイオードを用いて、原子力電池としての変換効率 28%（世界最高）を達成したことを報告した。

「ダイヤモンド大口径ウエハおよびパワートランジスタの最近の進展」

嘉数 誠（佐賀大学）、金 聖祐（アダマンド並木精密宝石）

大口径ヘテロエピタキシャルダイヤモンドウエハの実現と、NO₂ 選択ドーピングを用いた二次元ホールガス MOSFET の評価結果を報告した。今回はヘテロエピタキシャル基板として、線膨張係数がダイヤモンドと比較的近いサファイアを用い、成長オフ角と CVD 成長条件の最適化により、最大 2 インチの大型ウエハの作製に成功した。ロッキングカーブの半値全幅は 113 秒 (004) であり、ヘテロエピタキシャル法としては最高品質であった。この方法では Ir 界面から自然剥離でダイヤモンドが自立化できるため、低コスト化の手法としても期待できる。また、NO₂ 表面ドーパダイヤモンド MOSFET では、2.6 kV の高い耐圧を示し、それにより求められたバリガの figure of merit (BFOM) は 344 MW/cm² と、GaN-HEMT デバイスに比類する性能まで高められたことを報告した。

以上のように、ダイヤモンドおよび SiC 半導体を用いた耐放射線デバイスの最新の研究開発動向の発表を通して、素材からデバイス開発に至るまで非常に示唆に富む有意義な情報交換ができた。