

大阪公立大学 大学院工学研究科 電子物理系専攻 電子物理工学分野 教授

ひがしわかき まさたか

東脇 正高 先生

今回の Interview は、大阪公立大学 大学院工学研究科を訪ね、東脇正高先生にパワーエレクトロニクスと極限環境エレクトロニクスに応用できる酸化ガリウム (Ga_2O_3) デバイスのご研究についてお話を伺いました。

略 歴	1994年 3月	大阪大学基礎工学部物性物理工学科 卒業
	1996年 3月	大阪大学大学院基礎工学研究科物理系物性学専攻博士前期課程 修了
	1998年 3月	大阪大学大学院基礎工学研究科物理系物性学専攻博士後期課程 修了:博士(工学)
	1998年 4月-2000年 3月	日本学術振興会 博士特別研究員
	2000年 4月-2004年 9月	郵政省通信総合研究所 研究員 [2004年4月(独) 情報通信研究機構に改組]
	2004年10月-2007年 8月	情報通信研究機構 主任研究員
	2007年 9月-2010年 3月	Department of Electrical and Computer Engineering, University of California, Santa Barbara, Project Scientist (情報通信研究機構より転籍出向)
	2010年 4月-2012年 9月	情報通信研究機構 主任研究員 (転籍出向より復帰)
	2012年10月-2013年11月	情報通信研究機構 未来ICT研究所 総括主任研究員
	2013年12月-2016年 3月	情報通信研究機構 未来ICT研究所 統括 兼 グリーンICTデバイス先端開発センター センター長
	2016年 4月-2021年 3月	情報通信研究機構 未来ICT研究所 グリーンICTデバイス先端開発センター センター長
	2021年 4月-2022年 3月	情報通信研究機構 未来ICT研究所 小金井フロンティア研究センター グリーンICTデバイス研究室 室長
	2022年 4月-現在	大阪公立大学 大学院工学研究科 電子物理系専攻 電子物理工学分野 教授



“ Ga_2O_3 デバイスを実用化につなげるところまで 研究を進めたいと考えています。”

▶ 先生の現在のご研究について ご紹介ください。

酸化ガリウム (Ga_2O_3) という新しい半導体の優れた材料特性を活かした、新機能電子デバイス (トランジスタ、ダイオード) の研究開発を進めています。 Ga_2O_3 は4.5 eVと大きなバンドギャップを持つことが特徴です。次世代パワーデバイスとして注目を集めるSiCやGaNが持つ3.4 eVと比べ1eV以上大きく、 Ga_2O_3 の方が高耐圧や大電流を流せるといった特性に優れます。また、極限環境と呼ばれる高温、放射線下、腐食性ガスの中で使えるデバイスへの応用も目指しています。企業、国立研究機関、国内外の大学とも広く連携し、パワーエレクトロニクスと極限環境エレクトロニクスに応用できる Ga_2O_3 デバイスの研究開発を行っています。

▶ ご研究を始められたきっかけと、現在に至る経緯についてご紹介ください。

大阪大学の基礎工学部で学生時代を過ごしました。研究室配属の時に半導体に興味があったので、MBE (Molecular Beam Epitaxy: 分子線エピタキシー) によるGaAsの薄膜成長の研究をされていた冷水佐壽先生の研究室に入りました。私はGaAsの

量子細線の研究で博士の学位を取得しました。冷水先生は富士通研究所の三村高志名誉フェローと共に、世界で初めてGaAs-HEMTの論文を発表したことで多くの研究者に知られています。三村フェローがHEMTのアイデアを出され、GaAsの結晶成長を冷水先生のMBEに依頼して実現した論文です。そんなつながりもあり冷水研究室で博士課程を修了した後、富士通研究所の三村フェロー研究室へ研修生として行かせてもらいました。大学では主に材料の研究をしていましたが、富士通研ではInP-HEMTの研究を通じてデバイスプロセスを学びました。その後、1年半ほど在籍し、2000年4月に通信総合研究所 (現在の情報通信研究機構: NICT) に研究員として入所しました。

通信総研では比較的自由に研究テーマを選ぶことができたため、InP-HEMTを超える無線通信用のInN-FETを開発する研究に着手しました。これは野心的な研究テーマだったのですが、2年半ほどでMBEを用いて良い結晶を成長させられるところまで進みました。ところが、理論上1.9 eVと言われていたInNのバンドギャップが実際は0.6 eVだという話が発表されました。1.9 eVで超高

速トランジスタを作製するという研究テーマの前提が覆されたため、迷いましたが別の研究テーマに変えることにしました。

次のテーマはなんとしても成功させなければいけないと思い、当時はあまり研究が盛んではなかったミリ波帯向けのGaN-HEMTを研究テーマに選びました。ミリ波は波長が1~10 mm、30~300 GHzの電磁波です。実用を考えた場合、その頃の高周波GaN-HEMTの性能限界は30 GHz程度で、世間ではGaNはおおよそ30 GHz以下の周波数帯で使うデバイスという認識でした。ですが、GaNの物性を確認すると100 GHzまでは十分使える可能性があったため、研究を始め比較的順調にデバイスの性能を示すところまで進捗しました。トランジスタの高周波特性の性能指数の一つに、動作可能な最高周波数に相当する電流利得遮断周波数 f_T という値があります。実際のデバイスは f_T 値の半分ぐらいの周波数で使えるというのが目安になります。そこで100 GHz帯で使える高周波デバイスを実現するため、 f_T 値200 GHzを目標にしました。2002年のGaNトランジスタの f_T 値の最高記録は121 GHzでしたが、私たちは2005年に f_T 値152 GHzの性能を示した後、改善を重ね2007年に当時最高記録であった190 GHzを達成しました。200 GHzも手法を調整すれば実現するだろうと考えていました。

そんな時、幸運にもUCSB (University

of California, Santa Barbara: カリフォルニア大学サンタバーバラ校) へ行く機会を得ました。UCSBにはGa₂O₃系トランジスタで有名なUmesh Mishra教授が在籍しておられ、そのグループにNICTから転籍出向という形で2年半所属しました。UCSBでは自分に足りない部分と自分の強みを確認することができました。足りないと感じたのは、半導体物理、デバイスの基本です。本を読んで表面的なことはわかっていたのですが、UCSBの授業を受けることで半導体物理の根本はどこかということに改めて学びました。逆に自分の強みは、研究の計画や実行、思考の仕方や実際の作業の速さで、この部分は米国の研究者より優れていると感じました。

UCSBでも引き続きミリ波帯 GaN-HEMTの研究をしていたのですが、時間はありました。UCSBのクリーンルームはとても混んでおり、学生や研究員に加え、キャンパス周辺の企業の研究者も使用するので、自由に装置を使うことができません。日本では朝から夜までクリーンルームで実験をしていましたが、UCSBだとクリーンルームにいるのは半日ぐらいです。そのため空いた時間に、「次に何の研究をしようか?」と考えることができました。幸いミリ波帯の GaN-HEMTの研究で大きな進展があり、 $f_T=190$ GHzという自身の日本での成果は、米国でもインパクトがありました。例えば、私が渡米して1年半ぐらいの頃に、DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency: 国防高等研究計画局) の GaN系トランジスタの研究開発のプロジェクトが動き始めました。

企業や大規模な組織が自分と同じテーマの研究を開始すると、私は新しい研究テーマに移ることを考えます。それは、企業が多くの資金、人材を投入する場合、大学や公的な研究機関では競争に勝つのが難しいということが理由の一つです。また現在、大学にいる私にとって、その競争に加わる必要も無いと考えています。私は大学の研究者で、しかも純粋な物理学ではなくエンジニアリングを専門としています。したがって、企業が本格的な研究開発を始めると私の使命は終わり、企業が製品を開発する役割を担うのだと思います。そのため、企業が本格的な研究開発に取り組む段階に進むと、私たち大学の研究者は新しい分野に進み、新しいアイデアを再び企業に提供するという関係が良いと考えています。

UCSB滞在中は、日本に戻るかどうかも決

めていませんでしたが、ミリ波帯向けの GaN系トランジスタ開発にも大きな予算が付くようになったため、そろそろ次の研究、新しいチャレンジをしたいと思うようになっていました。

▶酸化ガリウム (Ga₂O₃) のパワーデバイスのご研究を始められたきっかけを教えてください。

UCSBで感じた自分の強みがもう1つあります。それは、材料とデバイス両方の経験と知識を持っていることです。通常、材料の研究者とデバイスの研究者は別々に専門化しますが、私は両方の領域で経験を積んでいます。この経験から、新しい半導体材料を使用してデバイスを開発することが自分ならできらうと思ひ至りました。新しい半導体材料とは、従来の半導体とは異なるバンドギャップを持つ材料という意味です。半導体の物性の多くはバンドギャップに依存するため、これが重要な要素となります。さきほど InN のバンドギャップが 0.6 eV だとわかり研究テーマを変えたと言いました。変えた理由の1つは、0.6 eV だと同じバンドギャップを持つ他の半導体材料、例えば InGaAs や Ge が存在するためです。Si、SiC や GaN とバンドギャップと異なる材料を調べていたところ Ga₂O₃ を発見しました。Ga₂O₃ に関する論文を調査すると、京都大学の藤田静雄先生 (現サムコ株式会社 社外取締役) のお名前が多数出てきますので、まずお声掛けしました。当時、藤田先生は Ga₂O₃ を用いて紫外発光素子への応用を目指されていたのですが、私は「ユニポーラでできるパワーデバイスにも適用できるのでは?」と考え、相談させていただきました。

その後、2010年に帰国、NICTに復帰して Ga₂O₃ デバイス研究をスタートしようと考えていると、藤田先生を通じてたまたま Ga₂O₃ 基板を独自開発している企業から共同研究のお話がありました。そして、その企業から Ga₂O₃ 基板とエピ成長膜を提供してもらって、私はトランジスタの作製、評価を

担当する形で共同研究を開始しました。その後、思いのほか早い段階でトランジスタとしての結果が出ました。Ga₂O₃ が半導体ということは知られていましたが、実際にトランジスタとして動作させたのはこれが世界初でした。このブレイクスルーは、世界的に Ga₂O₃ デバイス研究が活発化するきっかけとなりました。

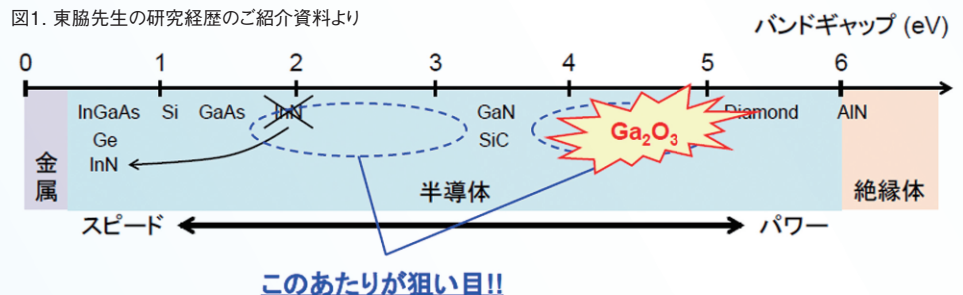
その後も、イオン注入ドーピング技術、耐圧向上のためのフィールドプレートを開けたトランジスタ、ダイオードの開発、パワーデバイスとして構造的により適した縦型トランジスタ開発など、Ga₂O₃ デバイス開発におけるマイルストーンとなる成果を発表してきました。最近、Ga₂O₃ デバイスの放射線耐性をテストするために、高線量γ線照射後も安定動作するか、劣化していないかどうかを確認する実験を行いました。加速器や宇宙応用では積算照射量 100 kGy (キログレイ) 程度、原子炉応用では 1 MGy 以上のγ線耐性が求められます。我々が作製した Ga₂O₃ トランジスタでは、γ線 1 MGy 照射後も問題なく動作するだけでなく、大きな特性劣化も見られませんでした。この結果から、Ga₂O₃ デバイスは、パワーエレクトロニクス応用だけでなく、耐放射線デバイスとしての応用も期待できることが示されました。

▶ご研究の今後の展望についてお聞かせください。

Ga₂O₃ デバイスを実用化につなげるところまで研究を進めたいと考えています。先ほどお伝えした通り、実用化するのには企業の仕事で、自分の役割は企業が本格的に研究開発を始めるところまでデバイス開発を進めることです。既に Ga₂O₃ デバイスの自社開発を行っている企業もありますが、まだ様子見段階のところが多いと感じています。もう一步踏み込んで、企業が本気で Ga₂O₃ デバイス製品化に向けた開発をスタートしてくれれば、もう自分の役割は九割終わりかなと思っています。

2018年に我々が発表した縦型 Ga₂O₃ トランジスタも、単に縦型構造にしたというだけで

図1. 東脇先生の研究経歴のご紹介資料より



はなく、Si、窒素のイオン注入ドーピングを用いて作製できるという点が重要だと考えています。これは、イオン注入というシンプルかつ構造設計自由度が大きい工程を用いてデバイスを作製できることは、生産性の向上に直接的につながるからです。「この成果を発表すれば、企業での研究開発は一気に動くだろう。」と期待していましたが、実際のところ、まだまだ一押しという感じです。現在、総務省からの受託研究において、他大学や企業と協力しながら、その一押しをなんとかしようと努力しています。

昨年度大学に本務を移したので、今後再度MBEを活用した新材料開発に真剣に取り組むことを考えています。残りの研究生活で、もう1つブレークスルーと言ってもらえるような新しい成果を世に出したい気持ちがあります。MBEによる新半導体材料の発掘に挑戦したいと思います。



ロードロック式RIE装置RIE-200NLと東脇先生

方もいますが、私は考えた上で行動することの重要性を強調しています。このアプローチは研究だけでなく、社会でどんな仕事をする

思っています。もう1つは自己評価です。自分自身が自分の研究にどれだけ満足できているかが、私にとって最も重要な評価基準となっています。たとえ他人からの評価が高くても、自分自身が充実感を感じられなければ、研究を続ける意欲が湧かないこともあります。Ga₂O₃トランジスタを初めて動作させた時はものすごく嬉しかったです。正直なところ、「自分の研究人生におけるハイライトではないか?」とも思います。ただ、次の10年、20年でもう1つ自己満足できるような研究を成し遂げたいと考えています。

最後に、私は多くの人から教をいただき、また支えてもらいました。恩返しとまでは言いませんが、今後研究、教育を通じて、同じように若い世代のサポートをしていきたいと思っています。特に、研究室に所属する学生が、何十年か後に「この研究室にいて良かった。」と思えるよう頑張りたいと思います。

▶最後にサムコに対して、一言お願いします。

サムコさんの装置は、日本のメーカーらしく壊れにくく安定していて、使い勝手が良い印象です。サポートも充実していて、とても満足しています。今後、期待したいのはサムコさん独自の装置を開発されることです。半導体の装置産業を見ていると、米国企業が開発して普及した装置を、日本のメーカーが追従することがよくあります。そうではなく、サムコさんから世界に発信する新しい装置を開発してはどうかと思います。例えば、ミストCVD装置です。確かサムコさんも開発していたと思うのですが、ミストCVD装置は、 α -Ga₂O₃の成膜装置として優れています。ですが、ミストCVDの特徴を考えると、他にも多くの用途があります。ALDより厚い膜を、カバレッジ性良く、ハイアスペクト比条件でも成膜できますので、コーティングやパッシベーションへの応用が有望と思います。使い勝手も良いし、材料選択性もあります。ミストCVDの成膜特性を考えると、Ga₂O₃以外にも用途はたくさんあると思います。サムコさんから世界初の装置が登場し、次世代デバイス開発に貢献することを期待しています。

お忙しいところ貴重なお時間をいただき、ありがとうございました。

“20年以上前の装置ですが、サムコさんの装置は壊れにくいのでまだまだ使えると思います。”

▶弊社の装置をご使用いただいておりますが、ご感想をお聞かせください。

NICTのクリーンルームのサムコ製の装置を長年使っていて、最近大阪公立大学にも同じRIE装置RIE-200NLを導入しました。NICTでは20年以上使っていた装置ですが、使いやすくて不満はありません。大学にも同じ機種を入れましたが、以前のものよりインターロック機能も増えていて、学生にも安心して使ってもらえます。2022年に塩素ガス系のRIE-200NLを導入して、今年フッ素ガス系にもう1台同装置を購入しました。塩素系RIE装置は、主にBCl₃ガスを用いたGa₂O₃エッチングに使用しています。近々導入するフッ素系装置は、絶縁膜であるSiO₂やALD成膜したAl₂O₃の加工に使う予定です。また、まだ立ち上げ中ですが、TEOS-SiO₂成膜用のPD-240もNICTから大学へ移設させて頂きました。こちらも20年以上前の装置ですが、サムコさんの装置は壊れにくいのでまだまだ使えると思います。

▶日頃のご研究において、心掛けておられることをお聞かせください。

学生には常々「考えて」と言っています。「とにかく行動してみることが大事」という

上でも求められると考えています。「研究目標を設定した上で、どういう手段をとれば実現できるのか、その可能性はどれくらいか、他の方法はないのか、1番可能性が高いのはどれか、とにかく考えよう。」と言い続けています。選択肢が出たら、自分の頭でそれらを考察し、可能性が高いものから実験してみる。その後、実験データを検証し、思わぬ結果が出た場合には原因を分析する。このプロセスを繰り返すことで成功確率を高めることができます。「考えるのに上手いも下手もない。そこを端折るのは許さない。とにかく一生懸命考えて、最善を尽くすことが大事。」ということを常に学生に言い聞かせるようにしています。ただ、できる限り優しい感じで伝えることも心がけています。

研究者としては、自分自身が自分の研究にどれだけ満足しているかを大切にしています。評価基準は2つです。1つは他人からの評価です。他人からの評価は、研究資金の獲得やキャリアに欠かせないもので、無視できない部分ではあります。しかし、私は他人の評価だけを追求することはあまり好ましく

“サムコさんから世界初の装置が登場し、次世代デバイス開発に貢献することを期待しています。”