

法政大学

イオンビーム工学研究所と マイクロ・ナノテクノロジー研究センター

法政大学イオンビーム工学研究所 さとう まさたか 佐藤 政孝

1. はじめに

法政大学では工学部情報電気電子工学科、電子情報学科やシステム制御学科、物質化学科で、半導体電子デバイスに関連の深い、電子材料や半導体に関する研究が教員を中心に進められています。筆者が所属するイオンビーム工学研究所は、1980年に法政大学が100周年を迎えたことを契機として設立されました。設立当初には、250万ボルトの電圧を発生するイオン加速器が設置され、前述の工学部教員がこのイオン加速器を利用し、電子材料を中心とした固体材料の分析に利用してきました。また、1993年には2台目のイオン加速器が導入されました。この加速器は固体材料への高エネルギーイオン注入が主な用途で、イオンビームを利用した固体材料の分析ばかりでなく、イオンビームを利用した固体材料の改質・加工に関する実験を行うことができるようになりました。この間、イオンビーム工学研究所を利用した研究テーマは、半導体とそれに関連した電子材料に関する研究に重点が置かれ、各種の実験装置や小さいながらもクリーンルームを設置するなどの関連研究設備の整備が進められました。

法政大学マイクロ・ナノテクノロジー研究センターは、文部科学省の高度研究化推進事業・ハイテクセンター整備事業により2003年度に設立され、法政大学が小金井市緑町に新たに取得した校地にその設備が建設されました。このセンターでは3つの研究プロジェクトが進んでおり、筆者は「耐環境分散型電子デバイスに関する研究」プロジェクトに参加しています。他には、メカトロニクスとナノマテリアルやナノバイオ技術に関する研究プロジェクトが進行しています。「耐環境分散型電子デバイスに関する研究」プロジェクトでは、研究センターに約240m²ほどのクリーンルームを整備し、ここではワイドギャップ半導体 (GaN や SiC) の電子デバイスの試作と評価および電子デバイスプロセスに関する研究を行っています。このような半導体デバイスの試作実験設備の他に、試作した電子デバイスの高周波特性を測定・評価する計測器が整備されています。

今回、これらの研究所と筆者の研究室を紹介する機会をいただいたので、それぞれを紹介させていただきます。

2. 法政大学イオンビーム工学研究所

写真1は法政大学イオンビーム工学研究所に最初に設置された、バンデグラフ型イオン加速器です。発生できる電圧は最高250万ボルトです。加速できるイオンは、ヘリウムと水素で、これらを写真2のようにビームラインを通して測定用のチャンバーに導きます。測定用のチャンバーには、固体検出器やX線検出器が装備され、ヘリウムや水素が固体に照射されたときに発生する、散乱イオンやX線を測定することができます。

最も軽い元素であるヘリウムや水素が固体に照射されたとき、一般的に固体を構成する元素はこれらのイオンよりも重いので、ヘリウムや水素はターゲット原子と衝突するとターゲット表面から散乱し、飛び出します。この散乱したイオンのエネルギーはターゲット原子の重さに比例する、すなわちターゲット原子が重たいほど大きなエネルギーで散乱されるので、このエネルギーを固体検出器で測定すれば、たちどころにターゲット原子の種類がわかります。もちろん、化合物の場合でも元素を区別することができます。加えてその組成比を求めることができます。このような元素分析法はラザフォード後方散乱法と呼ばれています。

写真3は2003年に設置された2台目のイオン加速器で、タンデム型高エネルギーイオン注入装置です。写真4はそのイオン注入用ビームラインです。このタンデム型高エネルギーイオン注入装置の最大発生電圧は、150万ボルトです。しかし、この加速器から取り出すことのできるイオンのエネルギーは最大600万電子ボルトに設定されています。この加速器は図1に示すように、対称に設置された2本の加速管の接続点にプラスの高電圧を印加します。図1のように、入り口からは、負イオンを入射します。すると、クーロン引力によって加速管の接続点に向かって加速されます。接続点にまで達したイオンはここで、E電子ボルトのエネルギーを獲得します。しかし、このままイオンが進んでは今度はクーロン引力でエネルギーを失ってしまいます。そこで、2本の加速管の接続点で、負イオンを正イオンに荷電変換します。荷電変換で発生した正イオンは再びクーロン反発力によって再び加速され、イオン加速器の出口では(2×E)電子ボルトのエネルギーに加速

されたこととなります。このように、2本の加速管を接続していることから、“タンデム”型イオン加速器と呼ばれます。高電圧発生回路は、高周波駆動型のコッククロフトン回路です。2本の加速管の接続点での荷電変換では、1価の負イオンから1価の正イオンだけでなく、2価や3価の正イオンも同時に発生します。したがって、高エネルギー側の加速管では、これらの多価のイオンも同時に加速されます。これらのイオンは、その価数を n とすると、加速器出口では $(n + 1) \times E$ エレクトロンボルトの運動エネルギーを有することとなります。エネルギーの異なるイオンの弁別には、加速器出口にある偏向電磁石を用います。このようなメカニズムにより、150万ボルトの電圧を発生することで、600万エレクトロンボルトにイオンを加速することができます。

このタンデム型イオン加速器は、前出のバンデグラーフイオン加速器と同様に、イオン散乱による元素分析も行えますが、イオンビーム工学研究所では写真4のように、イオン注入用のビームラインを接続し、半導体ばかりでなる、ステンレス素材や石英ガラスなどに、さまざまなイオン注入を行っています。時には、非常に多くのイオンを注入することで新機能物質を創製する研究も行われてきました。

イオンビーム工学研究所ではこのほかに透過型電子顕微鏡や真空蒸着装置など、イオンビームによる元素分析試料の調製や、イオン注入するもしくは行った試料の分析およ

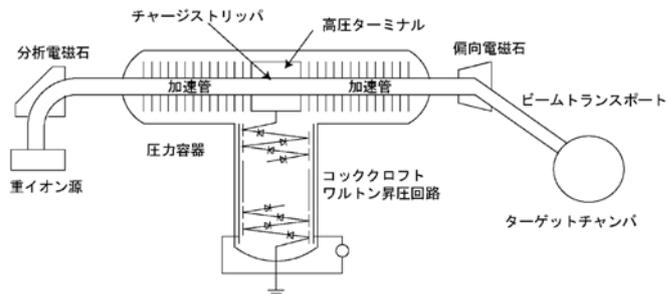


図1

び加工を行う実験設備が整備されています。

3. 法政大学マイクロ・ナノテクノロジー研究センター

法政大学では2003年に、文部科学省学術研究高度化推進事業ハイテクリサーチセンター整備事業の選定を受け、小金井市緑町にマイクロ・ナノテクノロジー研究センターを開設しました。この研究センターでは、ナノ材料やナノバイオロジーなどの研究プロジェクトが展開しています。筆者の所属する耐環境型分散電子デバイスに関する研究プロジェクトでは、約240m²程度のクリーンルームを整備し、半導体電子デバイスの設計、シミュレーションから、電子デバイスの試作、評価するまでの一貫した研究装置を整備しました。

クリーンルームには、電子線描画、真空蒸着、スパッタ、ドライエッチング、酸化炉などの各種研究試作装置や GaN や SiC を1300度以上で熱処理する高温加熱装置など、トランジスタの試作を行えるほどの設備を用意することができました。このクリーンルームは、一部がクラス100および1000の清浄度に設定され、これらの一画で、リソグラフィや試作デバイスの試験を行っています。真空蒸着装置などはクラス10000のエリアに設置されています。写真5は、クラス10000に設置されている研究装置です。

これらの設備を用いて、GaNを用いた高周波用トランジスタの設計、試作およびその製造プロセスの研究や、SiCを用いた高耐圧・低損失電子



写真1



写真2



写真3



写真4

デバイスの試作と製造プロセスの研究を行っています。筆者は、SiC についての研究を主に担当しています。SiC で製造したトランジスタは、Si よりも高温で動作する、トランジスタでの損失が低減できるなどの性能が期待され、研究が進展しています。写真6は、これらの研究を毎日クリーンルームにこもりながら実験・試作に取り組んでいる、私が指導する大学院生（法政大学大学院工学研究科電気工学専攻）たちです。もちろん彼らとはクリーンルームの外でも会うのですが、クリーンスーツを着込んでいる彼らになじみがあるほどです。

4. 半導体製造装置の省エネルギー化に関する研究

ここで紹介させていただいたように筆者は、半導体材料と電子デバイスを研究するなかで、非常に多くの装置や設備を利用してきました。また、このような大規模の設備を1つの研究室で維持することは、非常に困難なことなので、法政大学では、イオンビーム工学研究所やマイクロ・ナノテクノロジー研究センターを整備し、学内外の研究者へ提供してきました。

筆者は、日立製作所からおいでになった工学部情報電気電子工学科中村徹教授とこれらの研究センターで共同して研究にあたっています。このようなときに、1999年頃、日本半導体製造装置協会から畑氏（当時東京エレクトロン）と原田氏（SEAJ 環境部）のお二人が中村教授を訪問され、半導体製造装置が消費するエネルギーの調査・研究を企画していると、協力を要請されました。そこに筆者も呼ばれ、意見交換させていただきました。筆者はその頃からSiCに関する研究を始めていましたが、SiCを用いた低損失電子デバイスの目的の1つはいうまでもなく、電気・電子機器の省エネルギー化にあります。このようなこともあり、それからSEAJにおける半導体製造装置の省エネルギー化に関する調査・研究に協力させていただいています。

2000年には早速、前出のタンデム型高エネルギーイオン加速器が消費する電力を各構成部毎に測定するなどの活動に着手しました。スペック上では想像していたものの、ターボ分子ポンプの起動時の電力消費の具合や高周波回路の効率が高いなど、具体的なデータを目にする事ができるなど貴重な経験をしました。その後は、中電流イオン注入装置（情報電気電子工学科に設置）を利用し、注入装置からの発熱や排気熱の測定など、装置が消費する電力ばかりでなく、ユーティリティへ与える負荷の定量測定へと調査は進展しました。1994年からは前出のマイクロ・ナノテクノロジー研究センターのクリーンルームが整備されたことで、各種の蒸着装置や酸化炉の消費エネルギーと発熱およびクリーンルーム（付帯設備を含む）へ与える負荷の評価などに進展しました。環境部省エネルギー専門委員会では、普段の学会活動などではお会いできないような半導体製造装置メーカーや関連業界の技術者の方々にお会いすることができ、大いに刺激を受けています。

5. おわりに

このたび筆者の研究室の紹介する機会をいただきましたが、法政大学の主な半導体を中心とした研究センターの紹介となってしまいました。筆者は常にイオンビーム工学研究所やマイクロ・ナノテクノロジー研究センターの諸設備の管理・維持に目を配り、時には学生と一緒にこれらの設備の修理、オーバーホールまで行います（おかげでここ1年、肩痛が…）。このような意味で私の研究室は、2つの研究センターを跨いで広がっています。

最後に、本稿が読者の皆様のお役に立たないまでも、少しでも興味をお持ちいただければと思います。なお、2つの研究センターの詳細については、<http://www.hosei.ac.jp/>をご参考いただければと思います。



写真5

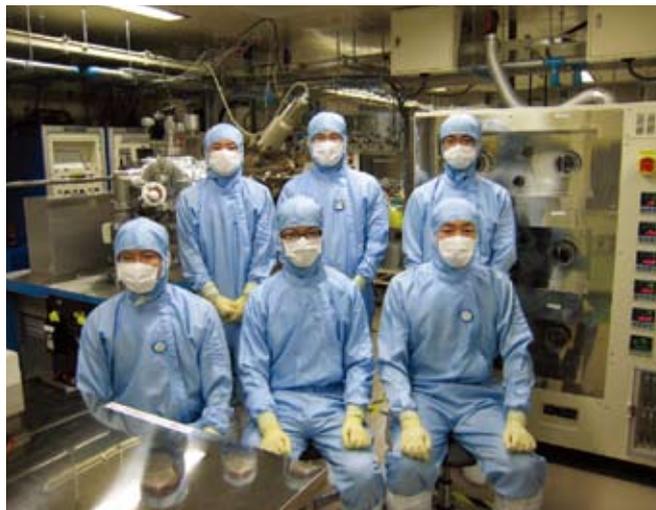


写真6

佐藤研究室紹介

M1 工藤 尚宏 記

法政大学佐藤政孝研究室は佐藤政孝教授と電気工学専攻の大学院生、工学部情報電気電子工学科の学生で構成されています。

本学は私学では珍しく2台のイオン加速器を備えるイオンビーム工学研究所があるため、イオンビームを用いた半導体材料の改質、評価などをはじめ、多岐に渡る半導体プロセスに関する研究を行っています。近年はイオンビーム工学研究所の設備の他に小金井キャンパスの近隣に位置するマイクロ・ナノテクノロジー研究センター内の設備も使用しながら研究を進めています。研究設備の充実により、学生は円滑に研究を進めていくことが可能です。また、企業からの共同研究の依頼も多数あり、大学外との連携も行われています。

研究室での日常は、やはり研究が主です。大学院生は1人1テーマ以上を持ち、学部学生と協力しながら研究を進めていきます。研究室全体の打ち合わせは週に1度、1時間半程度設けられており、研究の進捗状況を共有することができます。そのほかに学生が教授室を訪ねて報告することもあります。そこでは議論に熱が入り、部屋から大きな声が聞こえてくることもしばしばです（叱られているとも言います）。また、教授が頻繁に学生のゼミ室を訪れるため、様々な状況で研究の相談をすることができます。その際、研究に関する相談のみならず、時には学生のプライベートな相談にも応じてくれます。時折、実験の息抜きに、バドミントンで汗を流したり、教授と学生の飲み会が行われ、佐藤教授推薦のお店でおいしい料理をいただきます。そこでは実験を忘れ、何気ない話題に花を咲かせています。このように、教授室、学生のゼミ室ともにイオンビーム工学研究所内にあり、教授と学生が常に密な連携を取ることが出来る非常に珍しい環境にあることで、より親密な教授と学生の関係を築くことができています。

本研究室は、毎年、様々な通例イベントが行われています。



イオンビーム工学研究所



佐藤研ゼミ室の風景

年度が替わり、新3年生がゼミに所属する4月は新3年生歓迎会があります。新3年生と研究室生の初顔合わせの場であり、お酒と肴を通じて交流します。お酒を飲んだ佐藤教授が見せる意外な一面に、新3年生は驚きを隠せません。そして毎年8月は年間最大のイベントである2泊3日の夏合宿が、法政大学の富士セミナーハウスで開催されます。合宿初日は、卒論生による卒論中間発表会があり、親交の深い同大学の栗山研究室と合同で行っています。緊張した面持ちの卒論生の発表を聞き、学生同士が意見を交し合います。先生の鋭い質問に、思わず絶句してしまう発表者もいます。発表が終わると、いよいよお楽しみの懇親会が始まります。お酒、卓球や麻雀など、宴は朝まで続きます。合宿2日目、こちら恒例のボーリング大会が行われます。親交の深い栗山研究室、そして中村研究室も加わり、真剣勝負を繰り広げます。成績優秀者は、豪華景品が授与されます。ボーリング大会が終わると、バーベキュー、そして再び宴会へ流れます。2泊3日で行われる合宿により、学生同士そして学生と教授の交流がしっかり深まります。12月は忘年会、そして3月はいよいよ卒論修論発表会があり、卒論修論生は学生生活の幕を閉じます。こうしたイベントを通して、印象深い佐藤研生活の1年が過ぎてゆきます。

佐藤研究室は、発足後10年が経過し、今年は初のOB会が行われます。このイベントは、学生が卒業した後も、世代を越えて気軽に交流を行なうことができる場となります。今後、佐藤研究室の新たな通例イベントとなるでしょう。



佐藤研ゼミ生と佐藤教授