

デバイスの可能性 究極の素材ダイヤモンド

電子物理工学専攻 波多野 睦子 研究室

波多野 睦子 教授 1960年兵庫県生まれ。(株)日立製作所中央研究所に入社。途中、1991年工学博士取得(慶應義塾大学)。1997年から3年間UCバークレーにて共同研究。2010年より東京工業大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻教授。2011年より博士課程教育リーディングプログラム「環境エネルギー協創教育院」院長兼任。



2012年4月に完成したばかりのソーラーパネルで囲まれた建物、その名も環境エネルギーイノベーション棟。そこは学部や専攻の垣根を越えて環境やエネルギーに関連した研究室を集めた場所である。本稿ではその中でもパワーデバイスという電力変換を行う電子素子の研究を主に行なっている波多野研究室について紹介していく。

あなたの隣にパワーデバイス

■ パワーデバイスとは

みなさんは電気がまったく使えない世界を想像できるだろうか。携帯電話は通じず、電車も走らない。そんな世界である。電気がまったく使えないといった状況はそうそう起こるものではないが、あらゆる電子機器からたった一つの部品を取り除くだけで同じような状況になってしまう。その部品がパワーデバイスである。

とても重要であるにも関わらず、パワーデバイスと聞いてどんなものであるかわかる人はおそらくほとんどいないであろう。パワーデバイスとは電力の変換や制御を行う半導体のことを言い、直流を交流に変換したり、交流を直流に変換したりしているものを指す。さて、ここで重要なのは世界のコンセントのほとんどが交流であるということだ。多くの電子機器は直流下で動作する。そ

こで交流を直流に変換する際、不可欠になってくのがパワーデバイスなのである。

また、パワーデバイスは送電、自動車、鉄道、太陽光発電、風力発電などへのニーズが高い電子素子であり、IT技術でエネルギー需要をリアルタイムに把握して効率よく送電する仕組みであるスマートグリッドのキーデバイスでもある。さらに、身近なものでは携帯電話やテレビ、エアコンなどさまざまなものに使われている、私たちの生活に密着したとても重要な電子素子なのだ。

■ 電力損失低減のカギを握る

このように、いたるところで使われているパワーデバイスであるが、電力損失の原因にもなっている。そもそも、電力損失は直流と交流を変換する際や、電圧レベルや周波数の変換の際に起こる。例えば電気自動車の場合を考えると電池が直流であるのに対し、モーターは交流であるため変換の際に電力損失が出る。さらに、電気自動車ではた

くさんの変換器が使われているため、積み積みもって15%以上の大きな損失が出てしまうのである。

パワーデバイスは私たちの生活のあらゆるところに使われている。だからこそ先生は、電力損失の低減を進めれば大きな変化が起これると考えたのである。そして、先生はこの状況を打破するために従来のパワーデバイスと比べて電力損失を低減させることを目標とした。

先生がそのように思い立った理由はただひとつ、持続可能な社会を実現するためである。その持続可能な社会に欠かせないものとして再生エネルギーが挙げられる。環境省の「2050年のエネルギー構成予測」によると、全エネルギーに対する再生エネルギーの割合は2050年には25%、2100年には33%となる予想である。太陽光や風力などの再生エネルギーを電力系統に供給するための電力変換には、これまでより低損失で大容量のパワーデバイスが必要となっていくであろう。

また、再生エネルギーの普及が進むことによって、直流方式での発電・送電・蓄電の電力システムが検討されている。例えば現在でも洋上風力発電では直流送電が用いられている。風力発電といえば海や山に沿ってずらりと並んだ白いプロペラを連想するだろうが、私たちがすぐに連想する地上で行われている風力発電は騒音や安定的な電力の供給が難しいなどの問題がある。その点、騒音の被害がなく、海風もあるため安定的な電力供給が可能である洋上風力発電は世界的に増加傾向にある。しかし、海底に沿って地上に送電する際に大きな電力損失が出てしまうため、洋上風力発電には直流送電が必要なのである。

さらに、直流送電の方が効率がよいのは、なにも海中に限ったことではない。かつてエジソンが直流送電をしようとしたように直流送電には電力損失が小さいという大きなメリットがある。しかし、直流送電にするとどうしても高電圧になってしまうため、これからの時代には高耐電圧のデバイスが必要となるのである。そのデバイスの核となるものがワイドバンドギャップ半導体であり、先生はパワーデバイスという観点からワイドバンドギャップ半導体の研究を進めている。そして、この研究のカギとなるのが炭素なのである。

■ 新時代！それは炭素の時代！

私たちの生活を支える半導体。その半導体で現在主流となっているのがシリコン半導体である。

シリコン半導体は開発時から進歩を重ね、理論上可能な最大効率にまで達しており、先生もシリコンを超えたワイドバンドギャップ半導体のパワーデバイスが必要だと言っている。そこで今注目されている素材が炭素なのだ。実際に業界では、SiC半導体のパワーデバイス応用が盛んになっており、ケイ素から炭素への移行が着実に進んでいる。

■ 炭素って面白い

炭素は黒鉛やダイヤモンド、グラフェン、カーボンナノチューブやフラーレンなど、その構造によって示す性質は大きく異なる。なかでも、先生が行なっている研究にグラフェンデバイスがある。

グラフェンには金属と半導体の中間の性質をもった半金属という特徴がある。そんなグラフェンはバンドギャップが開いていないため、電気が流れたままになってしまう(図1)。電気が流れたままというのはマイナス要素であるが、裏を返せば電子が動きやすいということであり、これを上手に利用すればPCなどの高速処理を必要とする電子機器に最適な材料ができる。

そして、先生の研究室でグラフェンのこのマイナス要素を見事プラス要素に変えたのがフッ素だ。シート状の単層構造であるグラフェンにフッ素を付加することでバンドギャップが開き、グラフェンを半導体のスイッチング素子として使用することが可能になったのである。

■ 動き出したSiCパワーデバイス

シリコンにさらなる進歩を求めるのが難しい今、世界中の企業が新しい可能性を求めてSiCの実用化に乗り出している。SiCはシリコンと比べてバンドギャップと熱伝導率は3倍、電圧への耐性は13倍と優れており、世界中の企業が食いつくのも納得の性能である。

このように優れた性質をもつSiCだが、課題もある。シリコン半導体はケイ素のみで構成されているため、きれいな結晶を作ることができるのだ

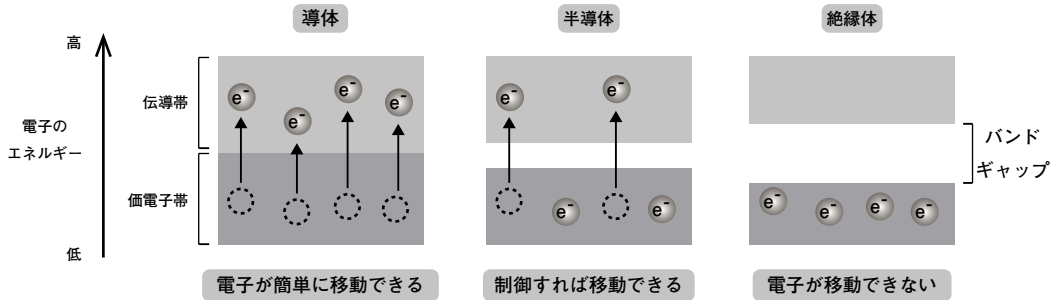


図1 バンドギャップ

バンドギャップとは電子の存在できない領域のことであり、これが大きいほど電気を通しにくくなる。

が、SiCは炭素とケイ素という2種類の異なる物質が混ざっているので均一できれいな結晶を作ることがとても困難なのである。また、シリコン半導体が直径30 cmもの大きさの基板を作れるのに対し、SiCは直径15 cmの基板しか作れないため、これからは基板の大面积化が課題となっている。

■ 身近にあるものから

ここまででわかるように先生の研究室では主に炭素を扱っている。炭素は私たちを形作る重要な元素であり、身近な元素でもある。先生は希少なことから半導体を作ることよりもたくさん存在する元素から半導体を作ることにごこだわっている。近年、その性能のよさから研究対象となっているGaNも先生からみれば希少で有限な物質である。

炭素から半導体を作る研究をしている先生に、とある記者が生ごみから半導体を作れると記事に書いていいかと聞いたそうだ。その時は先生もそれはさすがにやめてくださいと断ったそうだが、生ごみから出るメタンガスから作ることが可能であると先生は言っている。生ごみのような、どの家からも必ず出る身近なものからでも半導体を作り出せる。それも炭素という身近にあるものから半導体を作るアドバンテージの一つなのである。

究極の素材ダイヤモンド

前述の通りさまざまなおもしろい特性をもつ炭素であるが、その中でも先生が最も熱心に研究しているのがダイヤモンドである。ダイヤモンドといえば何を連想するだろうか。なんだかとても硬

そうなイメージがあるダイヤモンドだが、他にも熱伝導や耐電圧などの優れた物性をもっている。

ダイヤモンドは熱伝導率がシリコンの12倍と優れている。熱伝導が優れているということは熱を逃がしやすいということだ。パワーデバイスのような装置は熱がこもってしまうため、大きな冷却装置が必要となる。しかし、ダイヤモンドを用いれば冷却装置が小さくて済むので直流・交流の変換装置であるインバータやコンバータのサイズも小さくなり、電子機器の軽量化・小型化が望める。

また、ダイヤモンドの耐電圧（絶縁破壊電圧）はシリコンの30倍である。耐電圧とは文字通り耐えることのできる電圧の最大値であり、この耐電圧を超えると素子は壊れてしまい、電子機器は機能しなくなる。時代が進んでいくにつれてシステムが大規模化し、高耐電圧の電子素子のニーズが高まってきている。今までは数百Vが主流だったが、最近では数kVもの高電圧を必要とするものが増えている。例えば電気自動車は1.1 kV、太陽電池は1.2 kV、風力発電は1.7 kV、鉄道なら3.3 kVの電圧が必要となる。他にも高耐電圧を利用した分野で、電力損失の少ない直流送電の需要がある。例えば、中国やサハラ砂漠などの広大な土地では交流だと長距離の送電をする間にどうしても電力損失が大きくなってしまふ。したがって、直流送電の方が向いているのである。しかし、直流になると高電圧になってしまうため、やはり高い耐電圧のパワーデバイスが必要となるのである。

さらに、地球上の物質で最も硬いことで有名なダイヤモンドは過酷な環境下でもその性能が落ちることはない。そのため、高温環境、化学薬品や

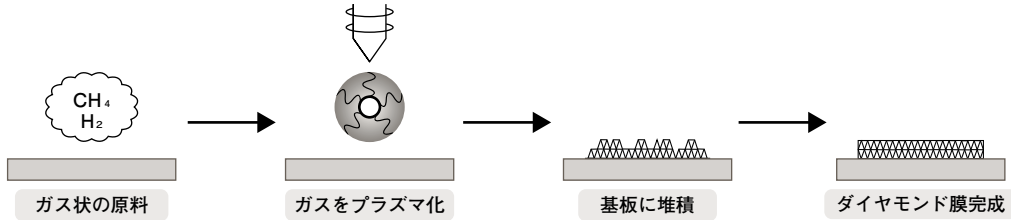


図2 プラズマ化学気相成長の過程

放射線のある極限環境のみならず宇宙や海底の調査などへの利用が期待されている。

■ ダイヤモンドの作り方

天然のダイヤモンドはマントルにおける高温高压状態の炭素が地表近くまで移動することでできる物質であり、私たちの目に触れるまでとても長い時間がかかっている。そんなダイヤモンドは採掘するもの。皆さんはそう思っていないだろうか。実は東工大の研究室でも作れるのである。先生の研究室ではダイヤモンドの生成方法にプラズマ化学気相成長という方法を用いて、大面積のシリコンやサファイアなどの異なる種類の基板にダイヤモンド膜を形成している。成長のさせ方としては原料ガスであるメタンと水素をプラズマ化し、それを基板上に堆積させ、ダイヤモンド膜を作製するといったものである (図2、図3)。

■ ダイヤモンドパワーデバイス実現の苦労

さて、半導体が機能するには電子をやり取りする必要があるが、この電子のやり取りをするためにはn型半導体とp型半導体が必要になる。n型半導体とはリンのように電子を余計にもった不純物を含む半導体で、この余計な電子をやり取りすることで半導体は機能する。逆にp型半導体とはホウ素のように電子の少ない不純物を含む半導体であり、正孔(電子の足りない穴)が電子の代わりに働きをし、半導体が機能する。

今までは、ダイヤモンド半導体中への局所的な不純物の導入が難しく、パワーデバイスとしての基本構造であるp型とn型を横に並べた横型pn接合の形成ができなかった。しかし、共同研究をしている産業総合技術研究所と先生はn型ダイヤモンドを選択的に成長させる方法を見つけ、その方

法を用いたダイヤモンド接合型トランジスタを作製した。このトランジスタは450℃の高温でもSiCやGaNよりずっと高い電圧まで安定して動作することが確認されている。

n型選択成長法は、ダイヤモンド中の炭素同士の結合が強いため、面の向きによって成長機構が大きく異なるというダイヤモンドのユニークな特性を利用して、ある方位の成長だけを誘起するといったものである。この方法を用いることで、ロッド状に加工したp型層をチャンネル(電子の流れる通路)とし、その両側面にn型ダイヤモンドを選択的に成長することによりダブルサイドゲート構造が得られる(図4)。

このようにして作られるデバイスは電界効果トランジスタと呼ばれ、チャンネルの側面に形成された横型pn接合に加わるゲート電圧により、チャンネルへの空乏層(電氣的に絶縁された領域)の拡がりを制御し、ソース電極とドレイン電極の間の電流を制御することで動作する。

このn型選択成長法を見つけるに至った背景と

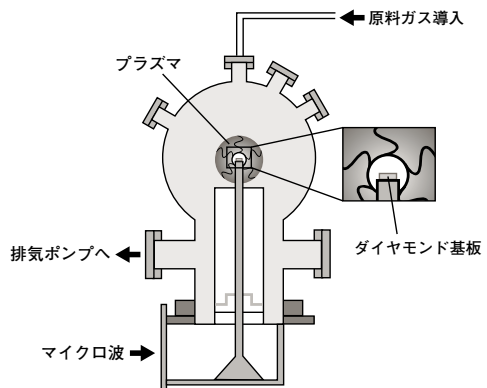


図3 プラズマ化学気相成長装置

装置上部の球体部分にプラズマを発生させてダイヤモンドを基板に堆積させ生成する。

して、2000年になって高品質なダイヤモンドが作製可能となったことが挙げられる。これによりダイヤモンド半導体のデバイスは、より広い分野への応用を行う段階へと進むことができたのだ。

波多野研究室の目標

主に炭素のデバイスを研究している波多野研究室であるが、先生の興味は環境から医療まで広い応用分野に及ぶ。

先生の研究は環境にも配慮しており、前述の通り先生の研究するデバイスによって電力損失が低減し、ダイヤモンドデバイスが普及すれば、CO₂の大幅な削減が可能になる。

ここまで紹介してきた研究はCO₂の排出量を減らすという消極的なものであったが、先生はCO₂を使うことにより、削減を目指す積極的な研究も行なっている。

CO₂の排出を抑えるエネルギー生成方法の一つとして太陽光を使った太陽電池が挙げられる。しかし、太陽電池は電池という言葉が付くものの、太陽電池自体には電気を蓄える機能がないため、実は電池ではない。そこで先生は3CSiCを用いて太陽の光を使ってエネルギーを蓄えることのできる人工光合成の研究を行なっている。光合成と言うくらいなので、もちろんCO₂と水を使ってエネルギーを取り出そうとしている。CO₂をギ酸やメタンなどに還元し、できた物質を液化させればタンクに入れて持ち運ぶことが可能である。ギ酸は化学的にとても有用性があり、メタンなどは燃焼させればエネルギーとして使うことができる。また、先生は生成したメタンなどからダイヤモンドを作ることも視野に入れ、さらなるダイヤモンドデバイスの普及を目指している。

また、先生は電気電子工学の技術の生体応用に意欲的である。先生が行う研究の中にはダイヤモンドの特異な物性を使った磁気センサーの研究がある。この磁気センサーを用いて心臓や脳の活動を測ることによって、心臓や脳の疾患を発見できるのだ。今までもそのようなセンサーがあったが、超伝導を用いるため、センサーを極低温に冷やさなければならなかった。しかし、この現象を超伝

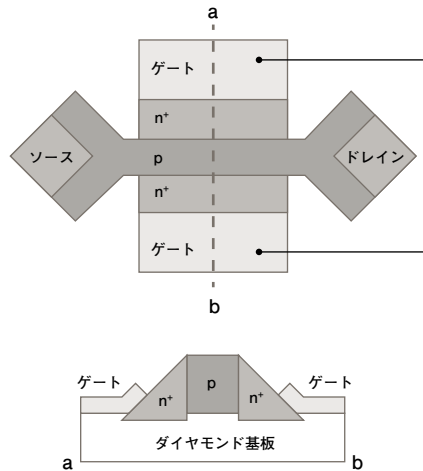


図4 ダイヤモンドデバイス

電界効果トランジスタはゲートに電圧をかけている時のみソースからドレインに電子が流れる。

導を用いずに、ダイヤモンドを使って室温で起こせることがわかったため、先生はダイヤモンドの磁気センサーについて研究している。

さらに、先生は今後金属などとは違い、人体に対して親和性のある炭素を使ったデバイスを診断、さらには治療へ応用したいと考えている。医療分野に応用するにあたって、治療に使用するには安全性や費用などのさまざまな条件をクリアしなければならないという問題がある。先生は少しハードルが高いが、まずは診断から始め、最終的には治療に応用できるようにしたいと言っている。

先生の夢は基本的なデバイスをさまざまなところに展開したいというものである。私たちの生活を陰ながら支えるデバイスの研究を進めていくことで社会全体に貢献していく先生の研究から、これからも目が離せない。

執筆者より

はじめはダイヤモンドを人の手から作り出せるということで先生の研究に興味をもったのですが、取材を重ねていくにつれて、ダイヤモンドデバイスのもつ可能性を知り、さらに先生の研究に興味が出ていきました。お忙しい中、快く取材を引き受けていただきありがとうございます。

(山田 太郎)