平成２４年１２月９日
科学技術振興機構（ＪＳＴ）
Tel：03-5214-8404(広報課)
産業技術総合研究所
Tel：029-862-6216（報道室）
物質・材料研究機構
Tel：029-859-2026（広報室）

真空を利用したパワースイッチを開発
－ダイヤモンド半導体を使うことにより世界で初めて成功－

ポイント

- 優れた絶縁性と高効率な電流制御が可能な真空を絶縁体に利用
- ダイヤモンド固有の原理を電子放出源として応用
- スマートグリッドなどに大きく貢献する超高耐圧小型電力変換装置の開発に期待

ＪＳＴ 課題達成型基礎研究の一環として、産業技術総合研究所の竹内 大輔　主任研究員と物質・材料研究機構の小泉 聡　主幹研究員らのグループは、ダイヤモンド半導体[注1)]の特長を利用することにより、真空を用いた高耐圧パワースイッチ[注2)]を作製し、動作実証に世界で初めて成功しました。

電力系統への再生可能エネルギーの導入やスマートグリッド[注3)]構想を実現するためには、電圧・電流・周波数を変換、制御する小型大電力変換装置（複数のパワースイッチを組み合わせた装置）が必要です。しかし、これまで開発されてきたシリコンなどを用いたパワースイッチは、高電圧に耐えようとすると電力変換装置が巨大になってしまい、実用化に問題がありました。そのため、固体である半導体よりもさらに絶縁耐圧に優れる真空を利用した革新的な超高耐圧高効率小型パワースイッチの開発が期待されています。

真空をスイッチ素子に用いるには、スイッチがオンのときに真空に電流を流す電子放出源が必要です。本研究グループは、ダイヤモンドの表面を水素原子で覆うと、真空中に自由に電子が飛び出すことを明らかにしました。そこで、電子放出源の素材にダイヤモンド半導体を採用した真空パワースイッチ[注4)]を開発し、動作の検証を行ったところ、１０ｋＶの電圧でパワースイッチとして機能することを確認できました。今回の実験結果から１００ｋＶほどの高電圧に耐えられる真空パワースイッチを作ることができれば、理論的に従来の１０分の１の大きさの大電力変換装置が可能になります。

将来、日本近海の洋上風力エネルギー導入や日本列島間での効率的な送電などを行う際に、この技術を利用することで、新しいエネルギー戦略に貢献することが期待されます。

本研究成果は、２０１２年のInternational Electron Devices Meeting（ＩＥＤＭ２０１２）のハイライトとしてオンラインで紹介され、２０１２年１２月１０日（米国東部時間）同会議で発表されます。

本成果は、以下の事業・開発課題によって得られました。
戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発（ＡＬＣＡ）
開発課題名：「超高耐圧高効率小型真空パワースイッチ」
研究開発代表者：竹内 大輔（産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門　主任研究員）
研究開発期間：平成２４年１０月～平成３０年３月（予定）

ＪＳＴは本事業において、温室効果ガスの排出削減を中長期にわたって継続的かつ着実に進めていくために、ブレークスルーの実現や既存の概念を大転換するような『ゲームチェンジング・テクノロジー』の創出を目指し、新たな科学的・技術的知見に基づいて温室効果ガス削減に大きな可能性を有する技術を創出するための研究開発を実施しています。

＜研究の背景と経緯＞

省エネルギーによって二酸化炭素の排出を抑制するためには、再生可能エネルギーを大量に導入したり、電力系統のスマートグリッド化によって電力をコントロールしたりする必要があります。例えば、日本近海の洋上風力エネルギーは膨大にあるといわれていますが、これを利用するためには洋上で１００ｋＶ以上の高圧電力を安全で安定にコントロールできる超高耐圧高効率小型パワースイッチの開発が必須となります。さらに、得られた再生可能エネルギーを日本列島間で効率よく送電するためのスマートグリッド構想には超高電圧直流送電[注5)]が不可欠で、ここでも超高耐圧のパワースイッチの創出が大きな課題となっています。

従来のパワースイッチとして、シリコンなどを材料とする半導体デバイスが開発されていますが、高電圧に耐えるためには多数の素子を直列接続する必要があり、電力変換装置が巨大になってしまい、実用化に問題がありました。

そのため、固体である半導体よりもさらに優れた絶縁体が求められていました。真空は変電所などの遮断機やＸ線発生装置に用いられている優れた絶縁体です。また、電子の動きを邪魔しないため、電子源から十分な電子放出が自由に得られれば、わずかな電圧でも電流がよく流れます。そのため、電子放出をしない「オフ」状態と、電子放出を伴った「オン」状態を利用してスイッチを構成することができ（図１）、さらに真空中では電子を固体内よりも早く動かせるため、高速でのオン・オフが期待できます。

＜研究の内容＞

真空をパワースイッチに利用するためには、真空中に高効率かつ低電圧で大電流を流すための理想的な電子放出源[注6)]を実現する材料が必要です。従来の真空管の電子放出源であるフィラメントは、大電流を素早くオン・オフすると切れてしまい、信頼性、効率、応答性の面から、真空パワースイッチに使用することはできません。この問題を解決するために､本研究グループは真空への電子放出源の材料にダイヤモンド半導体を採用しました。

まず、ダイヤモンドの表面を水素原子で覆うと、外の真空よりもダイヤモンド中の自由電子のエネルギー位置が高くなり、真空中に自由に電子が飛び出すことができる「負の電子親和力[注7)]」をもつ面となることを、実験で実証しました。水素で覆ったダイヤモンドは、水素原子と炭素原子の強い共有結合で安定化しており、大気中でも安定していて、真空中では８００℃の高温まで安定していることも明らかになっています。今回の研究では水素で覆ったダイヤモンドのＰＮ接合[注8)]ダイオードを作製して、ダイオードをオンすると電子放出が起こる現象を発見しました。しかし、ダイヤモンドの誘電率は他の半導体材料に比べ小さいため､動き回れる電子の量が少なく室温動作で流れる電流はわずかであり、この段階では高耐圧真空スイッチとしての動作の検証は困難でした。

そこで、ホウ素を添加したｐ層とリンを高濃度に添加したｎ$^{+}$層との間に、不純物の混入を極力低くした真性形の層（ｉ層）を入れたＰＩＮ接合形[注9)]のダイヤモンドダイオードを開発し、電子放出源を作製しました（図２）。そして、このダイオードの真上から約１００マイクロメートル離したところに陽極を置いて、真空パワースイッチとしての検証を行いました（図３）。ダイオードがオフのままであれば、真空は絶縁体として働くため、真空パワースイッチはオフ状態となって、陽極電圧を１０ｋＶまでかけても全く電流は流れません。一方、ダイオードに電圧をかけてオンにすると、ほぼ０Ｖ付近から電子放出電流が立ち上がって真空パワースイッチがオン状態になることを確認しました。

さらに詳細に動作を確認するために１０ｋＶ高圧回路に組み込んでダイオード入力のオン・オフを行い、出力となる高圧回路側の電流と、負荷にかかる電圧の変化を測定しました（図４）。ダイオードをオンにすると、１０ｋＶ高圧回路に電流が流れ、負荷にほぼ１

０ｋＶの電圧が加わったことが観測できました。ダイオードへの入力電力は、ダイオード電圧２３．６Ｖ、電流７ｍＡ、駆動時間０．５秒の積で、８２．６mWであるのに対し、負荷への出力電力は、負荷電圧[注10)]９．６４ｋＶ、電流４８μＡ、駆動時間０．５秒の積で、２３１mWとなり、２３１／（８２．６＋２３１）＝７３．７%の電力伝達効率[注11)]が確認できました。これは、真空管で固体素子同様のパワースイッチングが可能であることを世界で初めて実証したことを意味しています。理論的には、１００ｋＶ以上の場合、電力伝達効率９９．９%を超える設計が可能であることが期待されます。真空を用いることで、このような１００ｋＶ以上の耐圧設計が十分可能であることは、従来の固体素子のパワースイッチに比べて大きな優位性になっています。

なお、本研究のＰＩＮ接合ダイオード製作にあたっては、ＪＳＴ 戦略的創造研究推進事業 チーム型研究（ＣＲＥＳＴ）における研究課題「超低損失パワーデバイス実現のための基盤構築」（研究代表者：山崎 聡　産業技術総合研究所　主幹研究員）からの協力を受けています。

＜今後の展開＞

ダイヤモンド半導体の優れた物性を生かした、室温で動作する真空パワースイッチの動作実証ができたことは、再生可能エネルギーやスマートグリッド技術を十分に活用できる電力系統の実現への第一歩といえます。今後は、さらに真空パワースイッチの特性を向上させて絶縁耐圧性や電力伝達可能性などにおける優位性を確認し、従来の１０分の１以下のサイズの超高耐圧高効率小型パワースイッチの具体的な実用化へつなげていきます。

＜参考図＞

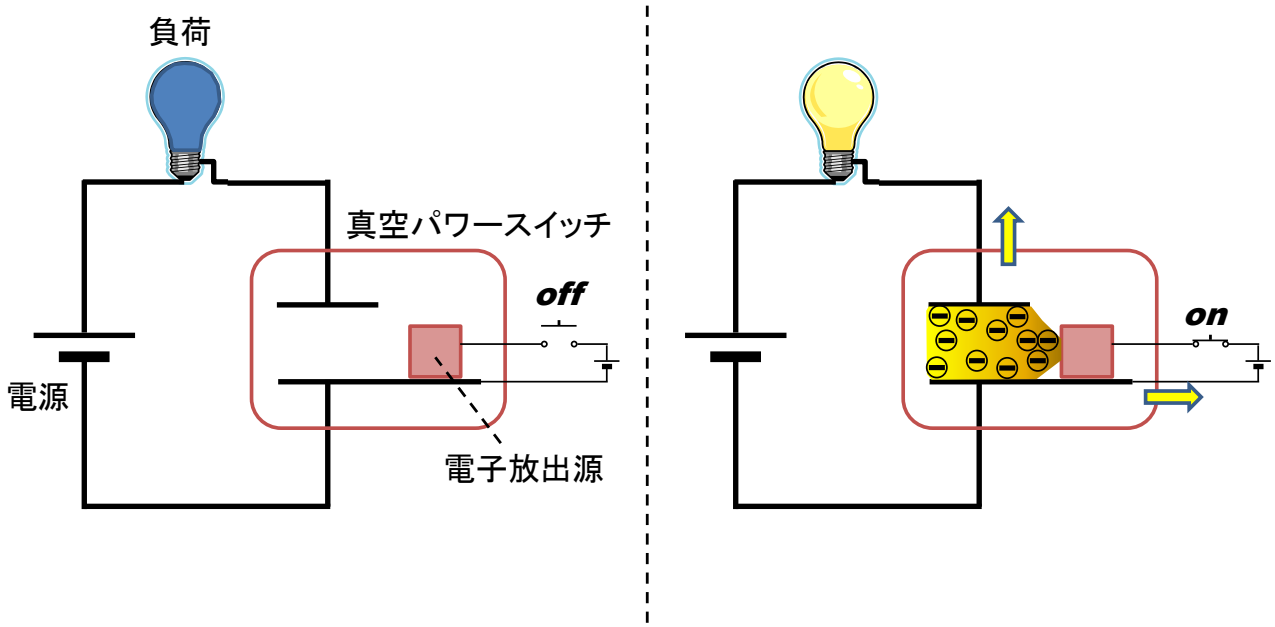


図１　真空パワースイッチの概念図

左が理想的なオフ状態と､右が真空中の電極間が十分な数の電子で満たされたオン状態。オフでは真空空間が高電圧を絶縁し、オンでは真空が電子で満たされて電流が流れる状態になる。真空は電子の流れにとって抵抗がないため、原理的にはスイッチに残るオン電圧をゼロにすることが可能である。

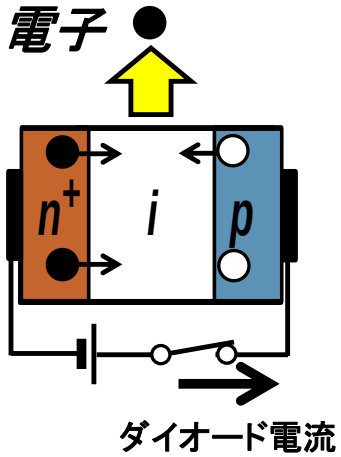
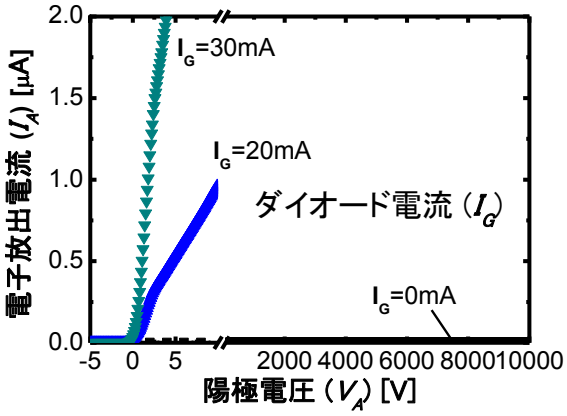


図２　高濃度不純物層（ｎ$^{+}$層）を使った
ダイヤモンドＰＩＮダイオード形電子源の模式図

ダイヤモンドの誘電率は他の半導体材料に比べ小さいため、動き回れる電子の量が少なく、単純なＰＮダイオードでは室温での動作では流れる電流はわずかである。そこで、ホウ素を添加したｐ層とリンを高濃度に添加したｎ$^{+}$層との間に、不純物の混入を極力低くした真性形の層（ｉ層）を入れたＰＩＮ接合形のダイヤモンドダイオードを開発した。ｎ$^{+}$層からは室温でも多くの電子をｉ層に注入でき、電気的に中性となることから正孔も多く入り、抵抗がほぼゼロになるので、全体として大電流を流せるダイオード形電子放出源が開発できた。



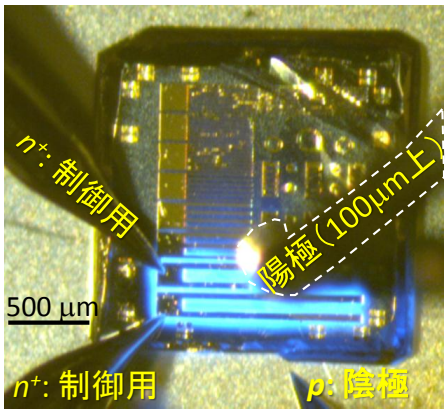


図３　真空パワースイッチの電子放出特性（左）と動作の様子（右）

（左）ダイオードがオフ（I_G＝０ｍＡ）では、真空には全く電流が流れないが、ダイオードに電流を流していくと、真空に電流が流れる。陽極電圧がほぼゼロから電流が立ち上がっている。（右）真空スイッチがオンの状態を上から見た様子。ダイオードがオンすると可視光が発光するが、ダイオード全体が光っていることから、固体内部を均一に電流が流れていることが分かる。電子放出も、集中することなく光っている全体から起こっていると考えられる。

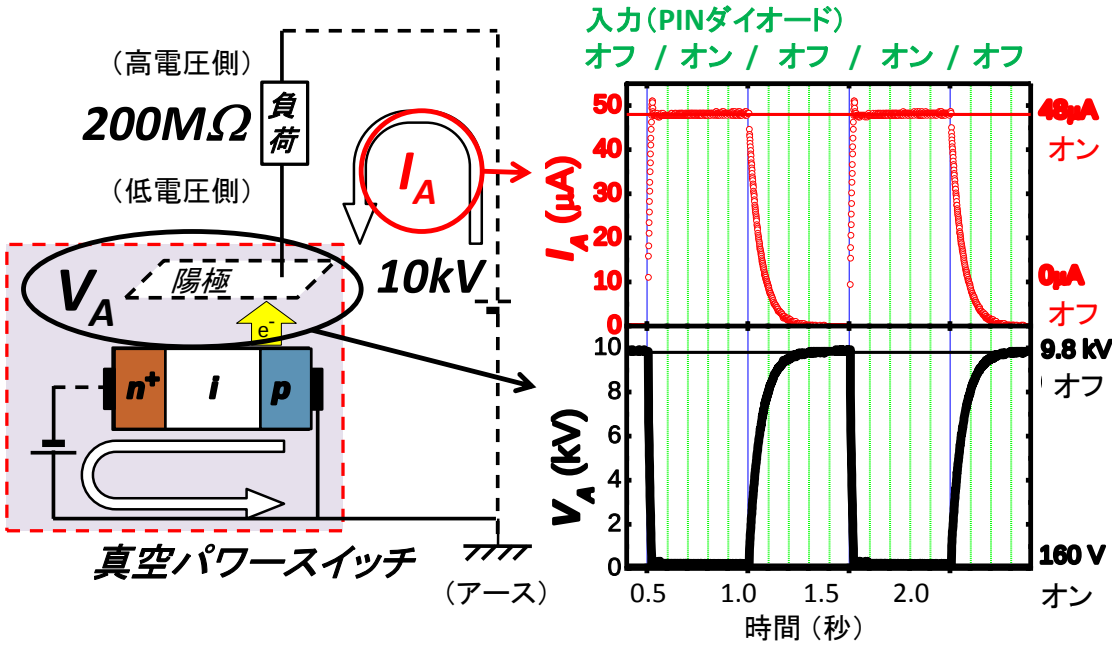


図４　出力となる１０ｋＶ高圧回路側の電流（Ｉ$_A$）と負荷の低電圧側電圧（Ｖ$_A$）の変化

ダイオードがオフの時、負荷の低電圧側の電圧（Ｖ$_A$）は約１０ｋＶで高圧回路の起電力１０ｋＶにほぼ等しく、負荷に電圧がかからない。ダイオードをオンにすると、１０ｋＶ高圧回路に電流（Ｉ$_A$）が流れて負荷の低電圧側の電圧（Ｖ$_A$）が一気に低下し、負荷にほぼ１０ｋＶの電圧が加わったことが観測できる。ここでは、ダイヤモンドＰＩＮダイオードへの入力電力に対して、およそ３倍の出力電力が負荷抵抗に伝達でき、１０ｋＶで効率７４％のスイッチができている。なお、実際の応用では、負荷と真空スイッチの位置は逆にして使用するが、実証実験では電気回路の動きとして全く同じで、かつ簡便であるため、図４のようにして観測した。

＜補足説明＞

注１）ダイヤモンド半導体

ダイヤモンドは元素周期表では第ＩＶ族の炭素だけからできており、電子部品の主役である第ＩＶ族のケイ素（シリコン）と同じ結晶構造を持つ。そのため、ケイ素と似た半導体としての性質を持っている。しかし、不純物や格子欠陥の少ない高品質のダイヤモンドがなかったことから、半導体としてのダイヤモンド研究は進んでいなかった。しかし、１９８０年頃に化学気相合成法により高品質なダイヤモンドが人工的に合成できるようになったことから急速に半導体としての研究が進み、深紫外線発光ＬＥＤやトランジスターが作製できるようになった。パワーデバイスの素材として要求される絶縁耐圧や熱伝導率といった特性は、シリコン（Ｓｉ）や炭化ケイ素（ＳｉＣ）、窒化ガリウム（ＧａＮ）よりも優れている。

注２）パワースイッチ

電圧・電流・周波数を変換、制御するための素子。現在は半導体素子が主流である。基本的な動作原理はメモリーやマイクロコンピューターなどと同じであるが、高耐圧・大電流を制御することができるものをパワースイッチという。パワースイッチの半導体材料としてはシリコン（Ｓｉ）が通常用いられているが、耐電圧・電流容量・耐熱性・動作速度などの面で、利用可能な性能はほぼ限界に近くなってきている。

注３）スマートグリッド

効率的なエネルギー利用のために情報・通信技術（ＩＴ）とともに、パワースイッチや蓄電技術を駆使して構成される新しい電力網のこと。

注４）真空パワースイッチ

真空の電子放出源から電子を放出しない「オフ」状態と電子放出を伴った「オン」状態を利用することにより、オン・オフ切り替えが可能で、効率よく電力（パワー）を伝達できる真空スイッチング素子のことを指す。真空では、電子放出源から十分な電子放出が自由に得られれば、わずかな電圧でもよく電流が流れ、また電子を固体内よりも早く動かせることから、固体素子同様のパワースイッチングが可能となると考えられてきたが、動作を実証するために必要な電子源となるものがこれまでなかった。

注５）直流送電

海中の送電や、４００ｋｍを超える長距離送電では、現在の交流ではなく、直流で送電する方が損失が少ないことや、６００～８００ｋｍを超える場合はコストが安くなることは１９７０年代に明らかになっている。１００ｋＶを超える送電電圧での直流送電と直流・交流の変換が高効率にできれば、西日本と東日本の周波数の違いに関わらず送電が可能となるため、電力系統におけるスマートグリッド構想の実現において大変重要な技術要素である。

注６）理想的な電子放出源

従来の真空管や蛍光灯で用いられている熱電子源は、熱損失が極めて大きく、高速でのスイッチ動作は不可能であった。一方、電界で固体内部から電子を引き出す電界放出形電子源（冷陰極）は損失は小さいが、引出電界に極めて敏感なため、電流が集中しやすく、動作が不安定となってしまい、特に高電圧スイッチとしては、開発が大変困難であった。真空パワースイッチにとっては、この両者の弱点を克服する、室温で自発的に電子放出できる電子源が「理想的」といえる。

注７）電子親和力
　金属、半導体、絶縁体など、あらゆる材料は、材料の中の自由電子のエネルギーの位置が外（真空）よりも低い状態が安定である。その自由電子のエネルギーの位置（伝導帯底）から見た真空の位置（真空準位）までのエネルギーの壁は、原子や分子の場合と同様に、「電子親和力」と呼ばれる。ダイヤモンドは、自由電子にとって、材料の中のエネルギーの位置が外よりも高くなるため、「負の電子親和力」を持つと呼ばれる。

注８）ＰＮ接合
　正孔を伝導キャリアとするｐ形半導体と自由電子を伝導キャリアとするｎ形半導体の領域が接する界面をＰＮ接合と呼ぶ。電圧をかけてオンすると、電子と正孔がそれぞれ接合を超えて拡散し、それらが互いに再結合して電流が流れる。半導体デバイスのさまざまな機能をもたらす源となる。

注９）ＰＩＮ接合形
　ＰＮ接合よりもさらに両キャリアの再結合をバランスよく、かつ大きな領域で得るために、間に極めて高品質な同半導体材料の真性形（ｉ形）を挟んだ構造をＰＩＮ接合と呼ぶ。再結合によって効率よく発光する場合は、発光ダイオード（ＬＥＤ）として利用できる。ダイヤモンド半導体においては、ｉ形層で電子と正孔が結合した自由励起子を形成しやすく、この自由励起子の生成を介した深紫外線発光とともに電子放出特性が確認されていることから、デバイス開発において重要な構造とされる。

注１０）負荷電圧
　負荷にかかる電圧で、スイッチがオンした場合、電源電圧が伝わるのが理想。本実証実験では、陽極電圧の簡便な測定の為に、１０ＧΩの大きな抵抗を用いた分圧回路を用いている。その影響で、オフ時の陽極電圧は９．８０ｋＶであり、オン・オフの変化の速度は１秒程度に制限されている。無負荷では、オン・オフは少なくとも０．００１秒未満である。また、オン時の電子放出電流は、負荷とのバランスで決まる。

注１１）電力伝達効率
　スイッチに入る全電力に対して、出力できる電力の割合。理想的なスイッチならば１００％であるが、スイッチ動作による損失は必ずあり、１００％より小さくなる。通常、損失は熱になり、発電所規模の巨大なシステムでは、大きな問題となる。

＜論文タイトル＞
“A 10kV Vacuum Switch with Negative Electron Affinity of Diamond p-i-n Electron Emitter”
（負性電子親和力を持つダイヤモンドｐ－ｉ－ｎ形電子源を利用した１０ｋＶ耐圧真空スイッチ）

＜お問い合わせ先＞

＜研究に関すること＞
産業技術総合研究所 広報部 報道室
〒305-8568 茨城県つくば市梅園１－１－１
Tel：029-862-6216　Fax：029-862-6212

＜ＪＳＴの事業に関すること＞
葉山 雅（ハヤマ ミヤビ）、古賀 明嗣（コガ アキツグ）
科学技術振興機構 環境エネルギー研究開発推進部 低炭素研究担当
〒102-0076 東京都千代田区五番町７　Ｋ’ｓ五番町
Tel：03-3512-3543　Fax：03-3512-3533
E-mail：alca@jst.go.jp