

# 工業用ダイヤモンドの合成・加工技術

工学研究院電気電子工学研究系 准教授

片宗 優貴(電気電子H23)



## はじめに

近年、半導体産業が再注目されて日本各地で大規模な投資が進み、製造装置や製造プロセスのほか新材料も注目を集めています。材料研究は研究費や時間、労力を要しますが、新材料によって従来製品から大幅な性能向上や新領域の開拓などが期待されます。私は本学に着任してからダイヤモンドの結晶合成や研磨加工に関する研究に取り掛かり、2024年4月から研究室を立ち上げることなりしました。本稿では、ダイヤモンド材料とこれまで取り組んできた研究について紹介します。

## ダイヤモンドの人工合成と産業利用

少し材料寄りの話になりますが、人工ダイヤモンドといえば、2019年は宝飾業界では合成ダイヤモンドの元年とも呼ばれ、ラボグロウンダイヤモンド(研究室などで人工的に作られたダイヤモンド)という言葉が聞かれるようになりました。価格の違いから早くも天然と人工の住み分けが進んでいるようです。ダイヤモンドの人工合成は、合成と呼ばれていますが、何もないところからダイヤモンドを生成するというよりも種となる結晶を成長させて大きくする方式がとられます。寶石に限らず、最終的に出来るダイヤモンドには種結晶の特徴が色濃く表れるため、とりわけ半導体のように高い品質が求められる分野では、良質な種結晶から高品質な結晶を成長できるかどうかが重要になります。人工的にダイヤモンドを作る方法には高圧法と気相法がありますが、

半導体用途では後者が用いられます。気相中で結晶を成長させる化学気相成長(CVD)法は、メタンなどの炭化水素ガスを原料としてダイヤモンドに成長させる方法で、この方法で作られたものはCVDダイヤモンドと呼ばれます。1980年代はCVDダイヤモンドの黎明期にあたり、当時の無機材質研究所(現 物質・材料研究機構)の熱フィラメント法やマイクロ波プラズマ法をはじめ、日本の研究機関からさまざまなCVD法が提案されました。対象物の表面に膜状のダイヤモンドを形成できるため、機械加工用のコーティングや化学電極の作製に利用されています。CVD法の利点として、高純度な結晶が得られること、任意の元素を含んだ原料を成長中に加えることで結晶への不純物を加えることができることが挙げられます(図1)。この不純物導入技術は、宝飾向けの色付けにも使われますが、電子デバイスに必要なp、n型半導体のほか、ダイヤモンド結晶中の不純物欠陥を利用した量子センサの作製プロセスにも用いられており、ダイヤモンドの研究には欠かせない技術となっています。

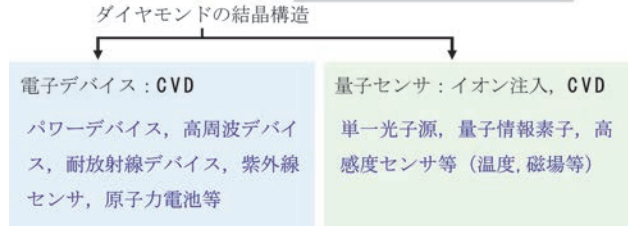
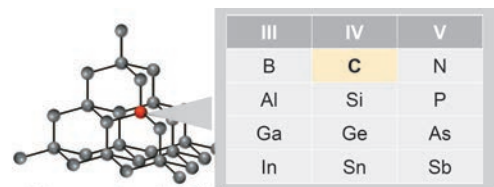


図1 ダイヤモンドへの不純物添加と応用例

## ダイヤモンド半導体の結晶成長に関する研究

ダイヤモンドは、バンドギャップが広い(原子間の化学結合が強い)ことからウルトラワイドバンドギャップ半導体と呼ばれ、高温・放射線環境下で動作可能な耐環境性や高耐圧・高周波特性など材料の中でも優れた性質を持ちます。これらの性質を生かして、数10kV級の超高耐圧電力制御用の送配電設備や Beyond5G のような高出力・高周波性能が求められる基地局などへの利用が期待されています。

ダイヤモンドは基本的には電気を通さないので、半導体として利用するには電気を流すための工夫が必要です。その方法は、ダイヤモンドの結晶そのものを半導体化して使う方法と表面終端を利用した表面伝導層を使う方法に分けられます。前者の結晶そのものを使う方法は、従来のSiやGe等と同様に結晶中に不純物を添加することで電子や正孔の濃度を制御したp型やn型の電気伝導性を利用します。ショットキーバリアダイオードやpn接合ダイオードをはじめ、接合型トランジスタのほか金属半導体(MES)構造や金属酸化物半導体(MOS)構造の電界効果トランジスタ(FET)など各種トランジスタの動作実証例が報告されています。後者の表面伝導を使う方法は、ダイヤモンドの結晶表面を水素原子で終端することで生じる2次元正孔ガス層のp型電気伝導を利用します。この表面伝導層をチャネルに利用したデバイスはpチャネルFETのみとなりますが、表面終端構造やゲート絶縁構造を工夫することでノーマリーオフ化や移動度向上の結果が報告されています。

ダイヤモンド半導体の実用化には、ウエハの高品質・大口径化や研磨加工、不純物ドーピングや微細加工などの課題があります。私たちのところでは、CVD技術をベースにした結晶成長とドーピング制御の開発に取り組んでいます。前述の通り、ダイヤモンドに電気が流れるようにするには不純物添加が必要で、中でもn型ダイヤモンドは天然に存在せず作製方法が限られていました。私たちは、物質・材料研究機構のグループとの協働で、大面積プロセスが可能な熱フィラメントCVDという手法でリンを添加したn型ダイヤモンドの作製を実現しました。現在はダイヤモンドの電気伝導と不純物の関係の解明や電子デバイスへの適用について取り組んでいます。

### ダイヤモンドのレーザー研磨に関する研究

半導体とは話が少し変わりますが、ダイヤモンドは工業用として切削工具などの被覆材として利用されています。ダイヤモンドの研磨については歴史が古く、ダイヤモンド粉末をオリブオイルで溶いたペースト状の研磨剤を使って磨く方法(ムガールカット)があります。平面形状の加工には適していませんが、ドリルなどの立体形状物の加工は容易ではありません。私たちは、九州大学のグループとの協働で、レーザーを用いた非接触での加工方法に注目し、これまで表面のみが選択的に加工されることを発見しました(図2)。

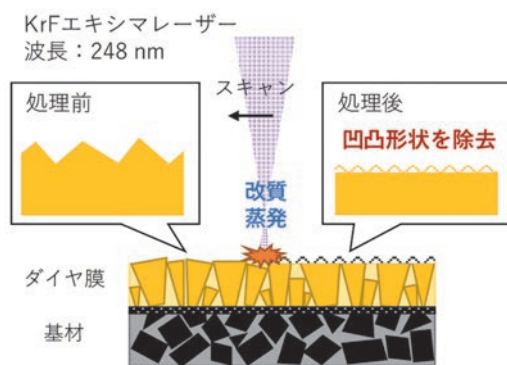


図2 レーザー研磨の概略図

### ダイヤモンド半導体の社会実装に向けた動き

ダイヤモンドの工業応用について、機械加工分野以外では長い基礎科学研究の期間を経て、2020年に入ってから産業応用を目指した具体的な動きがみられています。日本国内では学官の研究機関から特にダイヤモンド半導体の開発に取り組むベンチャー企業が複数設立され、ニュースでも見聞きするようになりました。各ベンチャー企業が開発目標は、耐放射線デバイスや高周波通信デバイス、パワーデバイスのほか、電気化学実装には技術的な課題が多く残されていますが、そう遠くない将来、ダイヤモンドを使ったデバイスが身近なところで使われるようになるかもしれません。

### おわりに