

ダイヤモンド「材料の王様」が次世代電子デバイスを変える

将来はダイヤモンドが家庭用照明に使われる時代も ダイヤモンドの結晶を支えるMgO基板

青山学院大学理工学部電気電子工学科教授
工学博士 澤邊厚仁氏



澤邊 厚仁 氏

- 1986年 青山学院大学理工学部 助手
(電気電子工学科所属)
 - 1988年 株式会社 東芝 総合研究所
(現研究開発センター) 入社
 - 1995年 青山学院大学理工学部
助教授 (電気電子工学科所属)
 - 1999年 同 教授
(電気電子工学科所属)
- 現在に至る。

ダイヤモンドと言えば「宝石の王様」。その輝きの価値を疑う人はいないだろう。しかしそれだけではない。ダイヤモンドは輝きとともにあらゆる物質の中で最も硬く、熱伝導率が高く熱膨張が小さく、全ての材料の中で一番の音速スピードを性質として兼ね備えている物質でもある。その優れた性質から「材料の王様」と呼ばれ、多様な用途への応用、そして基礎研究開発が取り組まれており、半導体応用もそのひとつである。ダイヤモンドは良く知られてい

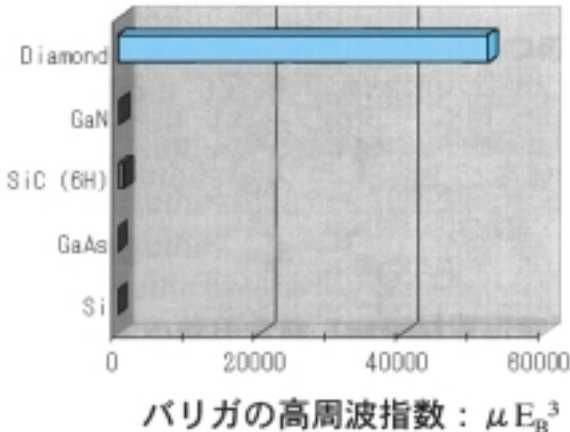
るようにC(炭素)の単結晶であり、今回注目されるのは土台の基板としてマグネシア(MgO)の単結晶が用いられる点である。そして、日本における国際的な権威である青山学院大学理工学部電気電子工学科の工学博士、澤邊厚仁教授に電子デバイス用基板としてのダイヤモンドの可能性について訊いてみた。

CVDでダイヤモンドをつくる

研究のテーマは。

エレクトロニクスへの応用を念頭に置いた薄膜材料の作製と、成長プロセス・表面にできる結晶の結晶性を評価しています。現在尽力しているのが気相成長法(以下CVD法)による高品質なダイヤモンドの薄膜形成です。これは1981年に当時の無機材質研究所(現物質材料研究機構)から、CVD法によるダイヤモンド作製が可能であるという報告がなされました。それを受けて、青山学院大学の大家直夫教授(当時)の研究室がテーマとして取り組みだしたのが83年です。当時私は大学院博士課程(ドクターコース)に進学したばかりで、ダイヤモンドの気相成長を研究テーマに選びまし

ダイヤモンドの電子デバイスとしての能力



人工ダイヤモンド合成の歴史と青山学院大学

- 1797年: イギリスの科学者テナントが、ダイヤモンドは炭素の1つの型であり、黒鉛とは構造が異なることを発見。
- 1955年: 高温高压合成による人工ダイヤモンド(GE社)
- 1982年: ダイヤモンドの低压合成(無機材質研究所) 熱フィラメントCVD法を用いた実験
- 1983年: マイクロ波プラズマCVD法による低压合成(無機材質研究所)
- 1985年: 電子衝撃CVD法によるダイヤモンド薄膜合成(青山学院大学) (ダイヤモンド薄膜に関する研究の始まり)
- 1986年: 燃焼炎を用いたダイヤモンド合成(日本工業大学)
- 1987年: 直流プラズマCVD法によるダイヤモンド合成(青山学院大学)
- 1987年: アークプラズマ(熱プラズマ)を用いたダイヤモンド合成(無機材質研究所等)

ダイヤモンドのエピタキシャル成長技術

- ・n形、p形半導体ダイヤモンド形成技術（開発中）
（shallow donor及びaccepter材料の開発、低抵抗化技術）
（オーミック接触材料の開発）
- ・大面積自立型ダイヤモンド基板の形成技術（技術確立）
（半導体デバイス研究開発用基板の供給を可能に）

ホモエピタキシャル成長技術（単結晶ダイヤモンド表面）：
モザイク基板表面への成長
→（4mm角高圧合成基板 4枚×4枚表面への成長）

ヘテロエピタキシャル成長技術（異種基板表面）
（青山学院大学が世界をリード）
→IrまたはPt表面への成長 大面積化技術



図1.直径1センチのヘテロエピタキシャル
ダイヤモンド基板

た。大塚先生がはじめた研究テーマを私が引き継ぎ、2代にわたり取り組んできました。ですから、日本国内および世界においてもCVD法によるダイヤモンド薄膜合成の研究室としては歴史の長い研究室といえます。

半導体素子としてのダイヤモンドの特長はどのようなものですか。

ダイヤモンドは、シリコンやゲルマニウムと同様に、不純物を入れると半導体材料になります。考えてみると元素周期表で見るとC（炭素）、Si（ケイ素）、Ge（ゲルマニウム）は同じ族に属します。誘電率が低く、電子および正孔の移動度が高いという特長があります。またダイヤモンドは電子を放出しやすい材料です。何か物体から電子を放出するには表面に存在するポテンシャル障壁を乗り越えるエネルギーを与える必要があります。ダイヤモンドはその障壁がほとんどない材料です。よって、これらの性質を利用した高周波デバイス、電子放出素子、パワーデバイスなど様々な応用が期待されています。しかし、現在作られている高圧合成の人工ダイヤモンドは、商業ベースで直径約1cmが限

界であり、大きくする技術は大変難しいのが現実です。

そこで、ダイヤモンドを用いた電子デバイス用基板の実用化を目指すには、ダイヤモンドを基板にダイヤモンド結晶を成長させる「ホモエピタキシャル成長」ではなく、異種の基板上にダイヤモンドを成長させる「ヘテロエピタキシャル成長」が重要です。このヘテロエピタキシャル成長法の技術確立はダイヤモンド半導体を実際に産業化するための重要な課題のひとつなのです。そしてダイヤモンドを成長させるための土台、つまり基板材料を何にするかが重要で、私たちの研究室では一番下の基板には「マグネシア」を利用しているのです。

10年の研究、1mmが1インチへ 薄膜形成の技術は。

私たちはダイヤモンドの薄膜合成には、気相成長法（CVD法）を採用しています。材料としてメタン（ CH_4 ）と水素ガス（ H_2 ）を使用しています。それらを熱やプラズマを用いて分解し、基板表面にダイヤモンドを成長させるのですが、我々の研究室では直流プラズマCVD法を使って、ダイヤモンドの成長を行っています。

1980年代後半から先程のヘテロエピタキシャル成長法の研究が盛んになるとともに、基板となる材料は何が良いのかという議論が数多くなされ、私たちもシリコン基板やニッケル基板を試しましたが、決して品質が良いものとは言えませんでした。

試行錯誤を続ける中、1995年、下地材料としてイリジウムを使うと、非常に結晶性の良いダイヤモンドが成長することが分かりました。そこで別の基板にイリジウムをエピタキシャル成長させ、そしてそのイリジウムの上にダイヤモンドをエピタキシャル成長させるという、二段階の薄膜形成技術に取り組むことになりました。イリジウムの成膜をエピタキシャル成長するときの下地材料には、「マグネシア」を利用しました。イリジウムの下地材料としては、シリコンはシリサイドを形成するので使えない。他の半導体系材料を使ってもあまり面白くないというところで酸化物系に着目しました。それまでエピタキシャル成長による金属の成膜にはMgOを使用していたことも選択した理由の一つです。その結果今までのヘテロエピタキシャル成長ダイヤモンドに比べると非常に質の良いものが作製出来ました。その段階で研究

大面積ダイヤモンド基板の作製方法

プロセスフロー(大面積化技術)

1. MgO(001)表面へのエピタキシャルIrの成長
(rfマグネトロンスパッタリング)
2. Ir表面へのイオン照射による下地前処理
(対向2電極型直流プラズマ)
3. ダイヤモンドのエピタキシャル成長
(多電極直流プラズマCVD)

(1.~3.に必要な時間:2日)

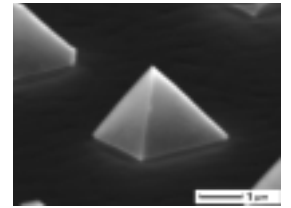
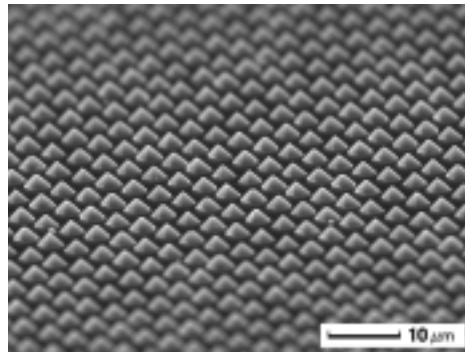


図2. 選択成長法によって形成されたヘテロエピタキシャルダイヤモンドピラミッドアレイ

室では結晶の大型化に注力することと方向性を決め、製造装置の改良を重ねていきました。

最初はイリジウムの上でエピタキシャル成長できたのは、1mm程度の結晶です。装置改良につれ3mm、そして1cm角の結晶ができたのは2001年ごろであったと思います。そしてこの方法で技術を磨き、2004年度の前半に直径1インチの地下表面にダイヤモンドを成長させることに成功しました。約10年かかって1mmが1インチにやっとなった(笑)。

それだけ難しい技術なのです。1インチサイズになれば、厚さは100μm(ミクロン)をきる程度で、素手で持てるダイヤモンドウエハーが作れるようになりました。そうすると、結晶メーカーなど中心にダイヤモンドウエハーの事業化を検討するところも出てきています。漸く実用化に向け一歩踏み出したというところです。

ダイヤモンド照明も? 広がる可能性

ダイヤモンド素子の用途として考えられるものは、

電子素子の分野では、液晶のパックライトに用いられている陰極管(蛍光管)の電極の金属をダイ

ヤモンドに替えて利用する研究や、ナノ加工用電子放出素子、高周波デバイスなどがNEDOの「ダイヤモンド極限機能プロジェクト」で行われています。特にパックライト用電極の開発は、実用化すれば一般の蛍光灯にも応用できます。そうなれば皆さんの家庭の照明はダイヤモンドで輝くことになります。

既存の電子デバイスを大きく超える可能性もありますか。

今まで全くなかった用途が生まれるかどうかは分かりませんが、いろんなフィールドでの広い用途が考えられるようになるでしょう。

ダイヤモンド自体は炭素で、環境的配慮も問題なく、放射線のモニターにも応用できます。またMEMS関連でも、ダイヤモンドの上にマイクロファクトリーを形成して化学反応を起こすと、ダイヤモンドの表面は非常に安定していますから色々な反応を見ることが出来ます。非常に微量の化学物質をセンシングするセンサーとしての可能性は高いと言えるでしょう。

ただ、様々な応用を考えた場合、量産するためには大きな面積を有

するダイヤモンド基板が必要であることは事実ですし、今後を視野に入れるとダイヤモンドの結晶性が向上するにつれて、その下の基板であるイリジウムやマグネシウムの品質は必ず問われるようになります。ここ1、2年で材料についての要求もさらに増すものと思われます。

欠陥をなくす

MgOとの相性は、

金属をエピタキシャル成長させるにはMgOが優れています。ダイヤモンドの結晶性を良くしたい、その下の基板も良くしたい、それにはMgOが必要だと私の中では必然的なものになっています。ものづくりへの興味はつきませんが、ダイヤモンドの結晶性のブラッシュアップにあわせて、MgOなど基板の品質追求も行う必然性が出て来ると思います。

研究上の問題点などはありますか。

異種基板上にダイヤモンドを成長させれば必ず欠陥が入ります。小さな欠陥でも最終的にダイヤモンドウエハーを作ろうとしたときに何らかのネックになりますか

ら、その欠陥をどのようになくしていくかということも考えねばなりません。

その対策として私たちが一つの可能性として始めたことですが、ダイヤモンドのエピタキシャル核成長を行ったイリジウム表面にフオトレジストを使ってパターン形成を行い、そのパターンを打ったところの下にあるエピタキシャル核は、レジストにより保護され、それ以外は前処理した面が剥き出しという状態になります。その面をイオンビームで叩いて壊し、それからレジストを剥がしてダイヤモンドを成長させることによって、形の揃った単結晶が形成されます。成長としては小さいですが、それらを接合することによってできる層は欠陥が少ないことが明らかになりました。このような技術も検討しながら、CVDダイヤモンドで成長する層の欠陥をどれだけ減らせるのかということも、結晶の大型化に伴う改良点として研究に臨んでいます。そして先述したように基板となる物質の結晶性も大変重要ですからあわせて評価を行っています。

3インチの結晶を目指して

結晶の目標はどのくらいの大きさですか。

決定しているわけではありませんが、薄膜のプロセスに乗せるには、3インチは必要だと心積もりしています。多方面のプロセスでは基板のサイズがどんどん大きくなっていますが、ダイヤモンド素子を作製するのは時間がかかりますし、私個人としてはまず3インチを目標にしています。

そのためにも、サンプルを出して使用した人たちからの反応を見てからどこまで性能を上げれば良いのかというやりとりが大切になります。その時点で、ダイヤモンド素子としての必要な条件が見えてくるのではないかと思います。

ダイヤモンドは可能性のある材料ではありますが、一番硬い材料ということもあって加工するのは大変です。しかし私が20年間もダイヤモンドに付き合っているというのにはやはり面白いからです。目がくらんだともいえますね(笑)。



先端技術開発研究センター

The world's largest diamond and magnesia Charmed by the King of Materials

Dr. Atsuhito Sawabe, PhD. Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering
College of Engineering Aoyama Gakuin University

The diamond is known as the King of Jewels and is also called the King of Materials because it is a material with excellent qualities. It is the hardest material, has small heat expansion, and its sonic speed is faster than anything. Utilizing these qualities, research and development on diamond substrates is being conducted in the field of semiconductors. One of these areas involves magnesia which is used as the base for the diamond substrate. Professor Sawabe is continuing his research internationally concerning on the formation of thin diamond films. We had an opportunity to interview him concerning the possibilities of diamonds as substrates for electronic devices.

Making diamonds with the CVD

Silicon and germanium become semiconductor materials when impurities are added and diamonds belong to the same IV family as they do. With these, since the movement ratio of electrons and holes is very fast, and there is no potential barriers, hopes are being placed on applying them to such items as high frequency devices, surface conduction electron emitters, and power devices.

Right now for artificial diamonds the limit is a diameter of 1 cm, and under the present circumstances it is extremely difficult to make them larger. Establishing the technology for the heteroepitaxial growth method is very important for reaching the goal of practical application of these as the substrate for electronic devices.

With 10 years of research 1 mm turns into 1 inch

Along with being involved in the heteroepitaxial growth method, he has repeatedly come out with a large amount of arguments to decide on the material for the most suitable diamond substrate. In 1995 he started a two stage thin film formation technology by causing epitaxial growth of a diamond on iridium grown on a substrate. Based on this he found out that a diamond with good crystalline quality grew. He also found out that when he used magnesia for the base material for the iridium, he was able to produce far better quality than diamonds made with other base material. He then decided to aim at larger crystals and constantly carried out improvements of the production facilities.

In 2004 a diamond with a diameter of one inch was made. The point started to appear when he could consider commercialization of diamond wafers mainly by producers of crystals. He took one step in the direction of practical application.

The potentials of diamonds

If they go into practical application, they can be applied to the development of high frequency devices and surface conduction, electron emitters for nano finishing, as well as electrodes for liquid crystal backlights. There is a very good possibility that they can be applied as sensors with respect to MEMS as well. Still, when various applications are considered, it's absolutely necessary that diamond substrates of three inches be mass produced. With improvement in the crystalline quality of the diamonds, it is felt that the demand for the iridium and magnesia which are the base materials will increase. Magnesia is indispensable for improving the crystalline quality of the diamond, and along with what will be happening from now on, the need for undertaking improvement might appear.