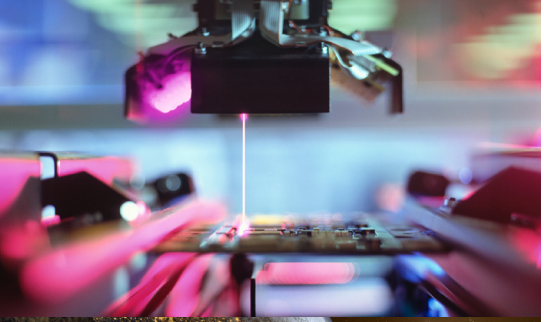
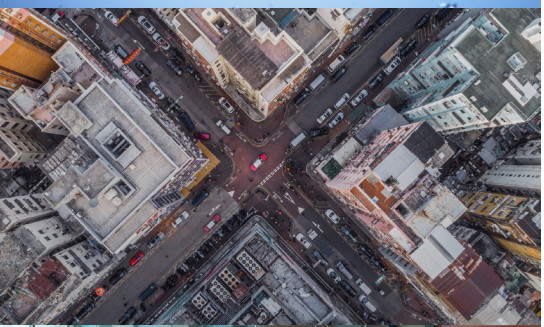




elementsix™

DE BEERS GROUP

ダイヤモンド ハンドブック

technologies@e6.com

ダイヤモンドのご紹介 3
物理的特性 4
ダイヤモンドの分類 5
ダイヤモンドの合成 6
CVDダイヤモンドの種類 7
結晶学 8
機械的強度 9
ダイヤモンドの研磨 10
ダイヤモンドの表面 11

特性

光学特性 12
光学定数 13
ラマン散乱 14
単結晶オプティクス 15
多結晶オプティクス 16
放射率およびRFウィンドウ 17
精密部品 18
熱的特性 19
ダイヤモンドヒートスプレッダ 20
超精密加工 21
電子物性 22
量子応用におけるダイヤモンド 23
電気化学特性 24

データシート

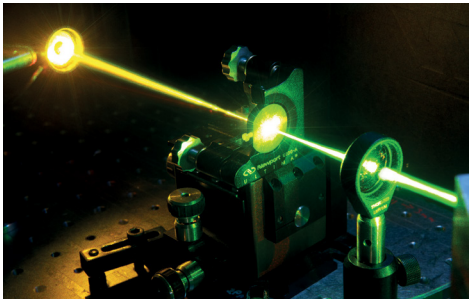
光学グレードおよびRFグレード 25
熱的グレード 26
機械的グレード 27
電気化学処理グレード 28
電子グレード 29
DNVグレード材料 30

参考文献 31

情報はこちら

CVDダイヤモンド製品のご注文はこちら

e6cvd.com



CVDダイヤモンドの合成および処理技術の進歩により、実用的なコンポーネントに優れたダイヤモンド特性を備えた材料が誕生。超低吸収と複屈折に長光路長を兼ね備えた人工単結晶CVDダイヤモンドにより、モノリシックダイヤモンドラマンレーザーを実用化。

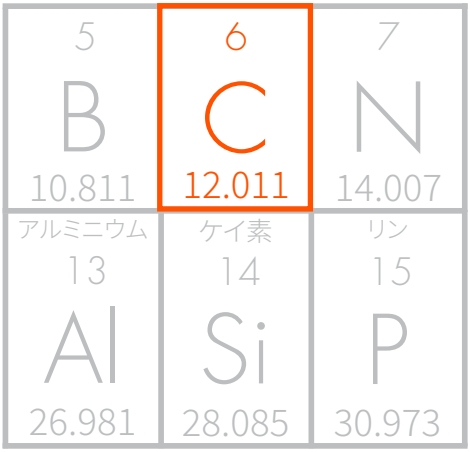
参考文献

1. Monolithic Diamond Raman Lasers (モノリシックダイヤモンドラマンレーザー)

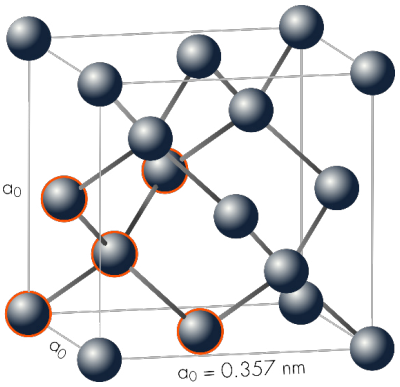
ダイヤモンドは、その並外れた硬度、堅牢性、そして光学的、熱的特性が特徴であり、宝石や産業用工具として非常に優れています。

天然ダイヤモンドには固有の差異と希少性があり、エンジニアリング用途での使用は制限されます。合成プロセスの開発により、一貫性のある人工合成ダイヤモンドの製造が可能になりました。1950年代の当初には高圧と高温が使用され、その後1980年代にはCVDを使用して優れた共有結合結晶ダイヤモンドが製造されました。

現代の産業界では約800トンの合成ダイヤモンドが消費されており、これは宝石として採掘される天然ダイヤモンドの約150倍に相当します。

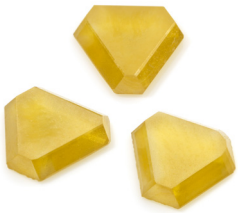


周期表でケイ素の上にある、IV族元素としての炭素の位置。



すべては構造から

ダイヤモンドの特性は、原子1個と最近接原子4個が立方格子状に接合した、四面体の共有結合という構造からなります。強固で密に結合し、高密度かつ高剛性の構造が、その優れた特性を生み出しています。欠陥の影響と合成条件を操作することで、材料分野の科学者は幅広い用途向けにダイヤモンドの優れた特性を最適化できるようになりました。



高圧高温による合成ダイヤモンドには通常、窒素がドープされており、独特の黄色が特徴。

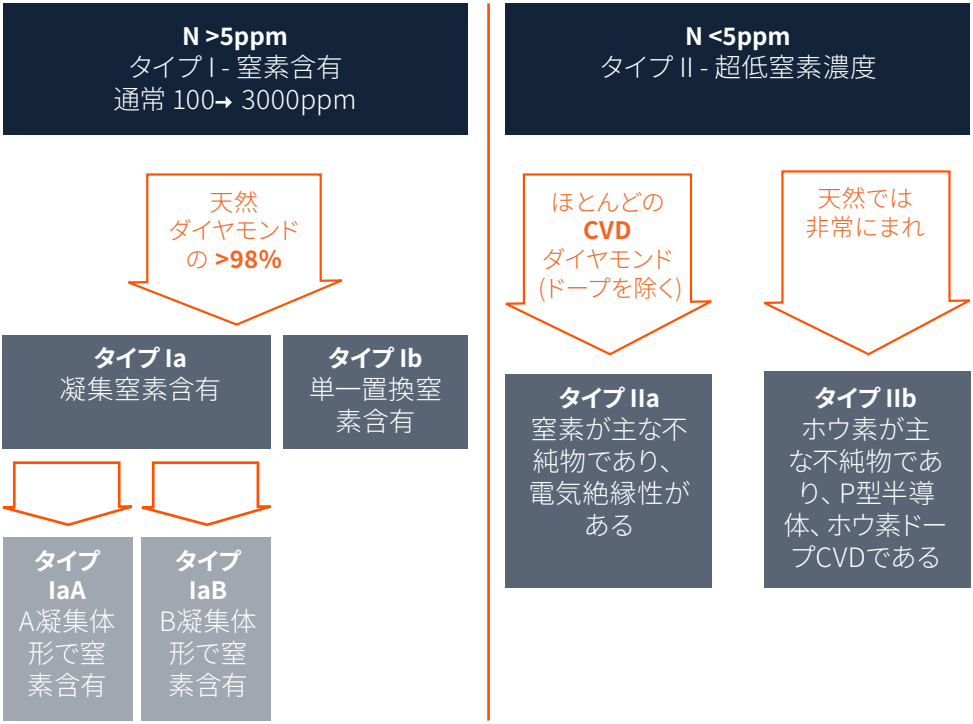
参考文献

2. Science's Gem (科学の宝石)

特性	値
密度	3.51524 x 10^{3}kg m^{-3}
数密度	1.77 x $10^{23}$$cm^{-3}$
格子タイプ	Cubic Fd3m-O_h^7
格子面間隔	格子定数 (298 K時) 0.356683 ± -0.000001 ～ 0.356725 ± -0.000003nm
破壊靭性 K_{1c}	5MPa $m^{0.5}$ 単結晶
	8.5MPa $m^{0.5}$ 多結晶
ポアソン比	0.1
ヤング係数	1050GPa
破壊強度	2.5 to 3GPa 単結晶 (表面仕上げによる)
	200 to 1100MPa 多結晶 (粒径と粒子による)
疲労寿命	強度>95%、破壊応力 70%で>10^{7}サイクル後
破断面	{111}および時折{110}
ワイブル係数	2.5 単結晶
	20 多結晶 成長面
	10 多結晶 基板面
硬度	70 ～ 120GPa 単結晶 (結晶面の平面と方向に依存)
	およそ81±18GPa 多結晶 (粒子の方位に依存)
摩擦係数 (μ)	0.05 ~ 0.15 (方位による) 空気中 (表面終端が必要)

参考文献

3. Mechanical Properties of Diamond (ダイヤモンドの機械的特性)



天然ダイヤモンドは当初、その光学特性に従って分類されていました。天然ダイヤモンドの大半はタイプIで、吸収端は約330nmであり、少数となるタイプIIの吸収端は約220nmです。長年の間に、この自然分類スキームは拡張され、窒素や窒素クラスターなどの異なる主要な欠陥が、さらに関連付けられるようになりました。最広義的には、この分類スキームは合成ダイヤモンドにも該当するものであり、窒素レベルの相違により、ほとんどのHPHT成長ダイヤモンドはタイプIb分類に、そしてCVDの多くはタイプIIaに分類されます。ただし現在は、こうした分類内に単純な分類システムでは区別できない、特定の用途に合わせた特性を持つように開発された、多結晶や単結晶グレードも複数存在します。

参考文献

4. The "Type" Classification (「タイプ」の分類)

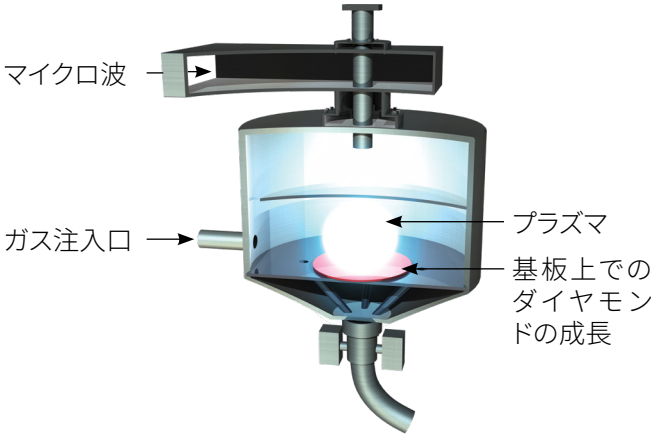
化学気相成長 (CVD)

CVDダイヤモンドは、炭素の2つの同素体(sp2とsp3)間にある比較的小さな安定性上の違いを利用します。適切な表面状態、水素原子の存在、そして約600°Cを超える表面温度を造り出してダイヤモンドを形成するには、グラファイトよりも核形成と成長速度を速くする必要があります。

成長条件は、水素の熱解離とプラズマ中の炭素のガス源によって作成され、ガス温度は2000°Cを超えます。

プラズマは、マイクロ波、高周波、レーザー、直流、熱フィラメントおよび化学反応によって加熱できます。連続したダイヤモンドの核形成と成長には、耐火性、安定した炭化物生成、および低熱膨張係数を備えた基板が必要です。

CVDダイヤモンド成長の研究では、40年近くにわたり中断と再開が繰り返された後、1990年代にマイクロ波プラズマによるCVDダイヤモンド合成が商業的な合成方法として確立されました。この方法で成長速度と純度を制御することにより、高品質の自立体多結晶および単結晶CVDダイヤモンドの製造が可能となりました。



高温高圧合成 (HPHT)

合成ダイヤモンドの大半は、高温高圧合成を用いて作られます。HPHTでは、ダイヤモンドが自然に形成される熱力学的条件を模倣していますが、溶融金属溶媒または触媒を追加して反応速度という大きな障壁を縮小し、溶存炭素の輸送媒体として機能させます。この方法で成長した材料は、大気と成長材料からダイヤモンドの格子に窒素が取り込まれるため、通常は黄色味を帯びた色合いになります

参考文献

5. CVD: The Early Years (CVD: 初期)
6. Synthesis Methods (合成方法)

工業用セラミック

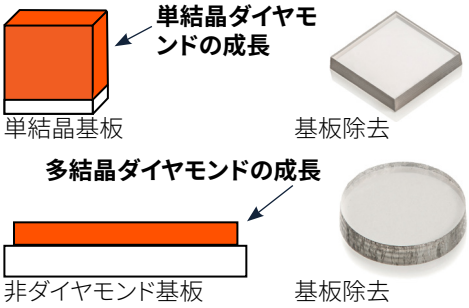
CVDダイヤモンドは、その粒径によって、超ナノ結晶(<10nm)、ナノ結晶(<50nm)、微結晶(<500μm)、および単結晶ダイヤモンドに分類されます。粒径は、合成条件、基板、膜厚によって異なります。約50μmを超える膜厚の場合は、キャリア基板を除去し、自立したバルクCVDダイヤモンド材料を取り出すことができます。

多結晶CVDダイヤモンド

不純物と結晶粒界を制御することにより、最高品質で最上級のダイヤモンドに迫る熱特性と赤外光学特性を持つ、直径120mmの自立多結晶ダイヤモンドウェハを造り上げられます。耐久性に優れ、粒度が細かく、熱伝導率が銅の2.5倍以上を有する直径140mmの自立体多結晶ダイヤモンドウェハも製造さしています。

単結晶CVDダイヤモンド

IIa型の優れた光学的、熱的、機械的特性を均一に有する単結晶ダイヤモンド材料は通常、ホモエピタキシャル成長によって造られます。最大8 x 8 x 2mmのサンプルサイズが実現されています。



単結晶CVDダイヤモンドのグレード	
単結晶 MCC	天然IIa型ダイヤモンドの人工代替品
光学グレード	最適化された吸収率と複屈折ダイヤモンド
エレクトロニックグレード	量子オプティクスおよびエレクトロニクス向け超高純度

多結晶CVDダイヤモンド	
光学グレード	遠赤外レーザー光学用途として設計
エレクトロニックグレード	大面積パッシブエレクトロニクス向け超高純度品
サーマルグレード	高熱伝導率ダイヤモンドによる熱拡散
メカニカルグレード	精密加工用高強度ダイヤモンド
電気化学グレード	電気化学用途向けホウ素ドープダイヤモンド

参考文献

7. Technology and Applications (技術および応用)

ダイヤモンドの構造

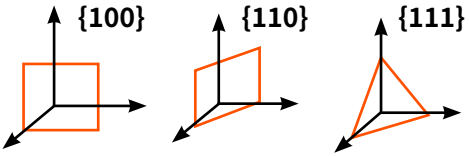
ダイヤモンドの各炭素原子は、正四面体中で4個の最近接原子と結合しています。これらは、面心立方構造Fd3m-0_h^7のバリエーションで配置されています。

八面体ダイヤモンドの結晶で考慮する3つの主要な面は、{111}、{100}および{110}です。ダイヤモンド業界でより一般的に使用される命名法では、それぞれ3ポイント、4ポイント、2ポイントと記述します。

単結晶ダイヤモンドの大部分は、{100}が配向表面で、{110}にエッジがあり、{111}はへき開面です。これらの表面すべては、CVDダイヤモンドエンジニアリング向けとして製造可能です。

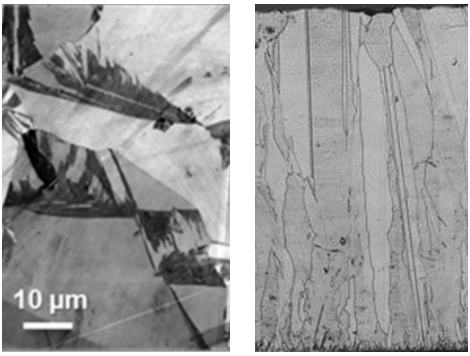
多結晶ダイヤモンド

多結晶CVDダイヤモンドの粒子構造は、成長工程のために均一には合成されません。核生成過程では、ランダムに配向された小粒子が形成され、次に成長条件に有利なファセットの粒子が急速に大粒子を形成します。これは直径で膜厚の10%程度となり、成長方向に伸びます。処理後も、多数の方位を有する不均質な表面が残ります。



4pt (ポイント) 2pt (ポイント) 3pt (ポイント)

結晶面	4pt (100)	2pt (110)	3pt (111)
4pt {100}	0° 90°	45° 90°	54°44’
2pt {110}	45° 90°	0° 60° 90°	35°16’ 90°
3pt {111}	54°44’	35°16’ 90°	0° 72°32’



ホウ素ドープダイヤモンドの研磨済み表面のSEM画像、異なる面方位が確認できる。研磨断面部、基板面から成長する細長い構造を示す。

参考文献

8. Structure of Diamond (ダイヤモンドの構造)

ダイヤモンドの強度

ダイヤモンドの強度が非常に高いのは、炭素間の共有結合によります。ダイヤモンドの格子も非常に剛性が高いため、高硬度の材料となります。そのため、ダイヤモンドは究極の高強度セラミックです。ダイヤモンドを破壊するための応力は、材料の臨界欠陥の大きさに関係します。

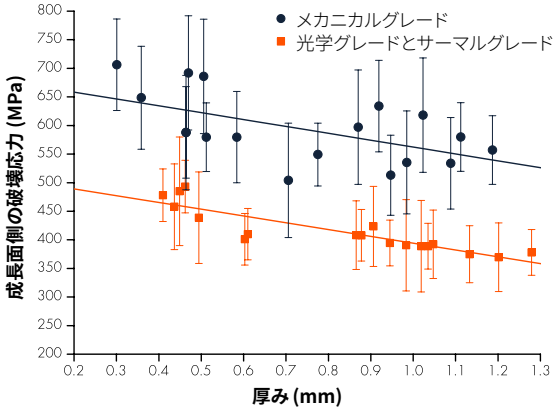
単結晶の強度

単結晶ダイヤモンドの引張破壊試験により、限界欠陥寸法は約100nmであることがわかります。機械的試験において、破壊強度は被試験体の表面の仕上げと体積によって異なります。慎重な表面加工により、3 x 5 x 0.2mmのサンプルでは、2.5～3.0GPaの破壊応力が得られます。

多結晶ダイヤモンドの強度

バルク多結晶ダイヤモンド(PCD)の範囲は200～1100MPaです。限界欠陥は粒径に比例することが知られているため、強度は著しく低下します。限界欠陥／粒径は約50～300μmと大きいため、PCDの強度は表面仕上げと相対的に無関係であり、粒径が約100μmを超えるとワイブル係数は約20になります。

層の厚さに応じて粒径が大きくなるため、強度も厚さによって異なります。また粒径は、成長条件や層の方位によっても異なります。核生成面に張力が働いている場合は破壊応力が高くなり、粒子間の差異は小さくなります。使用時には、どちら面に張力が働いているかを考慮する必要があります。70%の破壊応力で10^7サイクル実施後、破壊強度には予期される劣化は見られませんでした。



多結晶ダイヤモンドの粒径は強度に影響。小さな粒形で生成すると機械的強度は高まるが、強度はすべての生成法において材料の厚みによる影響がある。この影響は、成長表面で最も顕著にみられる。

参考文献

3. Mechanical Properties of Diamond (ダイヤモンドの機械的特性)

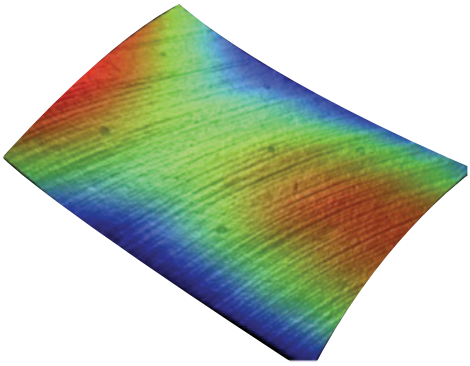
非常に硬度の高いバルク材を加工することは、容易ではありません。今日でもほとんどのダイヤモンド加工には、ダイヤモンドが用いられています。ダイヤモンドの{111}面は、他と比べて硬度と耐摩耗性に極めて優れています。

ラップ加工
ダイヤモンドの粗加工は、ダイヤモンド砥粒スラリーを用いたラップ加工により、ダイヤモンドを速やかに取り除きます。物理的な摩耗メカニズムは脆性破壊であり、表面に比較的大きなダメージが残る粗い表面になります。

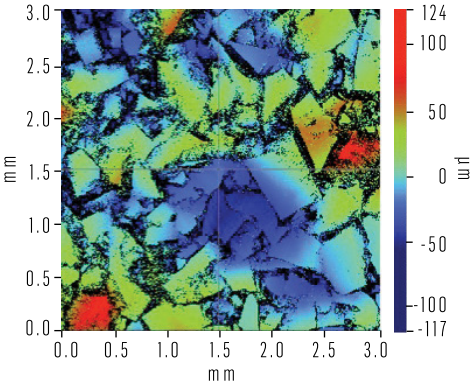
スカイフ研磨
単結晶ダイヤモンドの場合は、摩耗破壊面の方向を限定すると、損傷と表面の粗さを低減できます。高速で回転する、スカイフと呼ばれるダイヤモンド粒子が埋め込まれた鋳鉄プレートにダイヤモンドを押し付けます。これにより、損傷の少ない、Ra < 1nmの高精度表面仕上げを実現できます。

レジンボンドホイール研磨
これは、単結晶ダイヤモンドと多結晶ダイヤモンドの両方の処理に使用できます。広面積の処理が可能で、高い平坦性が得られますが、スカイフ研磨に比べて表面下の加工損傷は大きくなります。

ダイヤモンドのエッチング
CVDダイヤモンドは、高pH化学機械研磨(CMP)スラリーや反応性プラズマイオンエッチング処理でエッチングできます。



従来のスカイフ研磨による、高品質、低損傷の単結晶ダイヤモンド表面処理。研磨条痕は< 5 nmと浅く、幅は> 20 nm。



固定砥粒のダイヤモンドホイールで研磨した多結晶ダイヤモンド。粒子レリーフは、異なる速度で研磨した異なる粒子の方位に起因。

参考文献
9. Diamond Polishing (ダイヤモンド研磨)

炭化物形成
ダイヤモンド格子は、炭素のダングリングボンドで終端し、通常はそれらにOとOH基が共有結合しています。また、プラズマ処理工程を介して、表面を水素で終端することもできます。露出したダイヤモンドの表面は、油分やダストに対する親和性を本質的に備えています。

ダイヤモンドの洗浄
ダイヤモンドの表面に残留した不純物は、酸(H_2SO_4など)と酸化剤(KNO_3など)の組み合わせのような酸化溶液と、150°Cを超える攻撃性の高い高温を使用して除去できます。これらのタイプの洗浄手順は、バルクCVDダイヤモンドの製造工程で使用され、ダイヤモンドの表面に酸素終端が残ります。ダイヤモンドの洗浄や表面の汚染を避けるための処理は、ボンディングやメタライズなどの工程の直前に実施する必要があります。

酸化と黒鉛化
空気中の熱酸化は600°C以上になった時に始まります。還元性雰囲気、例えばH_2では、黒鉛化は1300°C以上から始まります。表面の黒鉛化は、低圧プラズマ洗浄工程などのイオン照射下でも発生する可能性があります。

炭化物形成
2つの異なる金属グループがダイヤモンドに反応します。第1のグループ、Si、W、Tiなどは、安定した炭化物を形成します。Fe、Co、Cr、Niなどの第2のグループは、炭素向けの溶媒であり、黒鉛化された界面を介した場合、接着性は乏しいか、接着性がありません。

メタライズと光学コーティング
金属カーバイドのオーミック接触は、カーバイドフォーマーを接着のベースとし、次いでAu、Ptなどの安定した不活性金属を用いた薄膜の多層金属コーティングを用いて形成することができます。約400°Cまでは安定したコーティングで、接点やヒートシンクの間接的な取り付けに使用されます。また、極薄の炭化物接着層を用いて、誘電体光学コーティングを採用することもできます。

多結晶CVDダイヤモンドヒートスプレッダ上にチタン、白金、金の多層スパッタコーティングを施すことで、標準的な低温はんだ付け技術を使用できます。

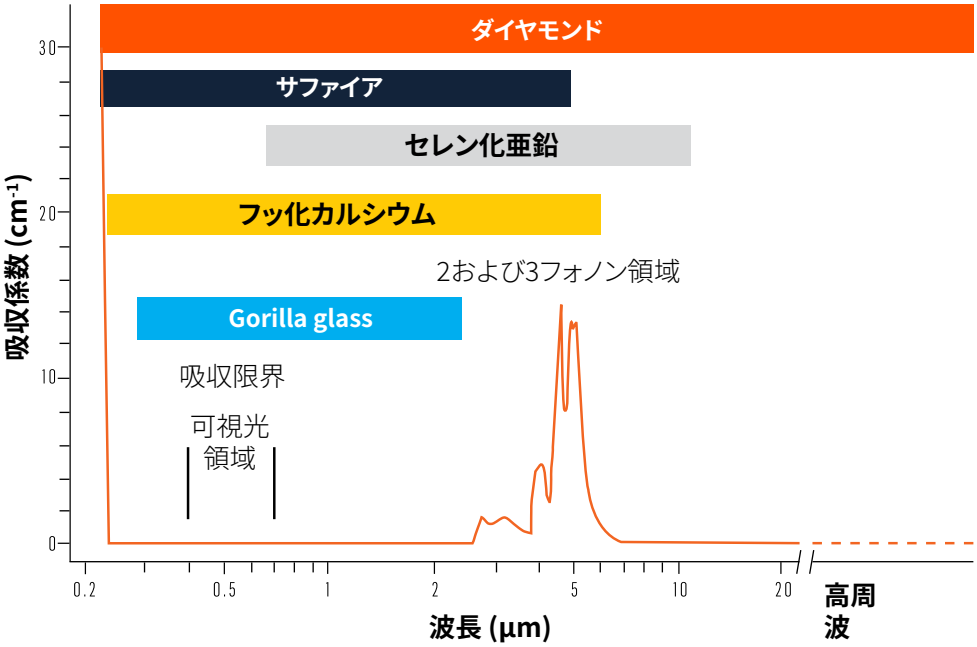
ろう付け
CVDダイヤモンドは、約800°Cの高温真空工程で安定した炭化物界面を形成するように配合された活性ろうを使用して、取り付けることができます。> 200 MPaの界面せん断強度を達成できます。ダイヤモンドと大半のマウント材との間に見られる熱膨張不一致により発生する応力については、慎重に検討する必要があります。

参考文献

10. Cleaning Diamond (ダイヤモンドの洗浄)
11. Brazing Parameters (ろう付けパラメーター)

透過スペクトル

合成CVDダイヤモンドの優れた特性は、紫外線(UV)から高周波伝送に至るまで、現代の光学材料の頂点に君臨しています。固有の光学特性は、225nm (5.47 eV)でカットオフされた深紫外のバンドギャップによって決まります。そして、紫外線、可視光から近赤外領域、遠赤外および高周波は透過しますが、約2.5から7µmの領域においてフォノンバンドの吸収が若干あり、ピークは4.63µmで14cm^{-1}です。



超高純度CVDダイヤモンドのUVカットオフ225nmから遠赤外領域までの吸収係数。ダイヤモンドは比誘電率が比較的低いため、高周波窓に最適。

参考文献

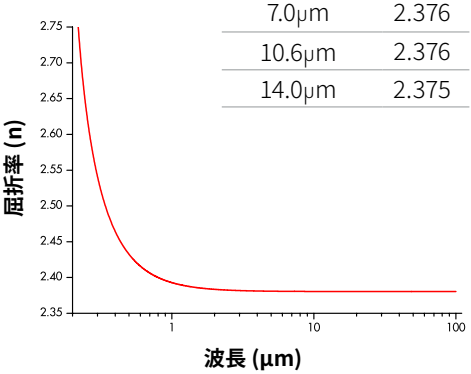
12. Single Crystal Optics (単結晶オプティクス)

ダイヤモンドの屈折率

ダイヤモンドの屈折率は、220nmにおいて2.7、10.6μmにおいて2.38の範囲にあります。入射反射率は21.3%～16.7%の範囲です。Turriの方程式により、300～1650nmにおける分散曲線の近似が得られます。この場合、λの単位はnmです。

波長	n
300nm	2.534
400nm	2.461
500nm	2.430
600nm	2.414
700nm	2.404
1064nm	2.390
7.0μm	2.376
10.6μm	2.376
14.0μm	2.375

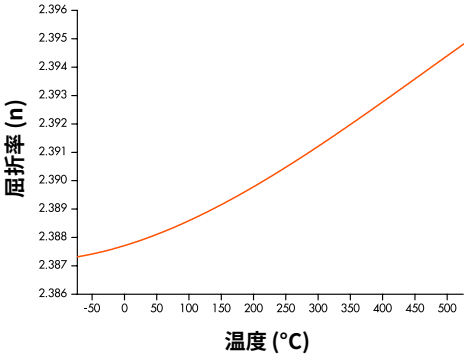
$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{4.658\lambda^2}{\lambda^2 - 112.5^2}$$



2μmを超えるとダイヤモンドにはほとんど分散が見られず、上記の方程式は25μmまでにおいてある程度の精度(±0.004)で使用できます。2.5～25μmの範囲の実験データに適した代替のヘルツバーガー式は以下のとおりです。

$$n(\lambda) = 2.37837 + \frac{1.18897}{\frac{\lambda}{1000} - 0.028} - \frac{1.0083 \times 10^{-4}}{\left(\frac{\lambda}{1000} - 0.028\right)^2} - 2.3676 \times 10^{-5}\lambda^2 + 3.24263 \times 10^{-8}\lambda^4$$

熱光学屈折率係数 (1/n) x (dn /dT)は、IR領域で3.2～6.7 x 10^{-6} K^{-1}、UV～NIR領域で2.0～4.0 × 10^{-6} K^{-1}です。



参考文献

13. Refractive Index (屈折率)
14. Thermo Optic Properties (熱光学特性)

ラマン分光法

室温でのダイヤモンドのラマン周波数はω = 1332.3cm^{-1}、線幅は1.5cm^{-1}です。ラマン分光法でのピーク形状、位置、および発光は、材料科学者により相純度、結晶の完全性、応力といったダイヤモンド膜の品質を評価するために使用できます。

応用では、ラマンシフトをセンサーそのものとして使用できます。温度依存性は、半経験的な式で表すことができます。

$$T = \frac{Dhc\omega_0}{k\ln\{1 + c/[\omega_0 - \omega(T)]\}}$$

ここではω$_0$ = 1333 ± 0.6cm^{-1}、c = 61.14 ± 5、D = 0.787 ± 0.03となります。cとDは近似定数であり、ω$_0$はT = 0 Kでのラマン周波数です。

ピークシフトと静水圧の近似関係は以下の式で表すことができます。

$$\Delta\omega(P) = 3.2\ \mathrm{cm}^{-1}\ \mathrm{GPa}^{-1}$$

ラマンレーザー

CVD合成により、ラマン周波数変換器などの内部共振器のレーザーオプティクスが実現します。他の高ゲインのラマン用結晶と比較すると、合成ダイヤモンドは非常に高い輝度での大きな周波数シフトが特徴です。

$$\text{Raman FOM} = \frac{kgl}{(dn/dT)\,\Delta\lambda}$$

CVDダイヤモンド6 x 2 x 2mmのラマンレーザー用結晶は、大きな周波数シフトとダイヤモンド固有の極めて優れた機械的特性による高ゲインを兼ね備えており、環境による影響を大幅に低減。

	単結晶 CVD ダイヤモンド	KGW KGD(WO_4)$_2$	YVO_4	$Ba(NO_3)_2$
ラマンゲイン (g)	15	4	5	11
ラマンシフトΔλcm^{-1}	1332	901	892	1047
結晶の長さ (L) mm	8	25	25	25
熱伝導率 (k) W m^{-1} K^{-1}	> 2000	5	5.2	1.2
ラマン性能指数	1440	3	20	1

参考文献
15. Raman Thermometers (ラマン温度計)
16. Raman Spectroscopy (ラマン分光法)
17. Raman Laser (ラマンレーザー)

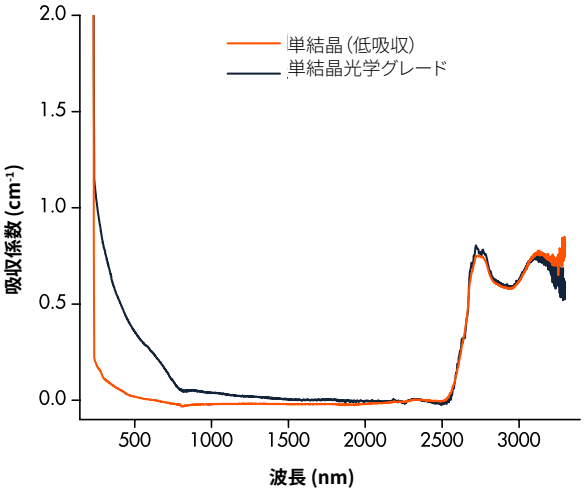
UV～NIRでの光学特性
最大で約60mm^{2}の大面積の高純度単結晶CVDダイヤモンドが提供されており、UV、可視光および近赤外帯域において多くの用途に利用できます。

散乱
散乱の増大を引き起こす、巨視的欠陥や表面仕上げが高度に制御されているため、CVD単結晶ダイヤモンドの散乱は非常に少なくなっています。総前方散乱は、1064nmにおいて0.02%まで小さくなります。

単結晶CVDダイヤモンド
220～約2.5μmの範囲の吸収は、主に窒素に起因します。窒素が5ppm未満の場合、単結晶光学グレードのダイヤモンドはタイプIIaの光学特性を持ちます。スペクトル範囲は広く、吸収nは、約1μm未満です。

光学プラス（低吸収）
窒素が20ppb未満の場合、単結晶ダイヤモンドの吸収は最小になります。最も要求の厳しい光学用途に適した、新しいクラスの合成光学材料です。

光学プラス（低複屈折）
立方格子対称性を持つダイヤモンドは光学的に等方性の材料であるため、屈折率は偏光性に依存しないはずです。しかし、概して成長時の欠陥に起因する歪みの存在により、複屈折が生じます。ダイヤモンドの光学部品の欠陥密度と方向を慎重に調整すると、偏光性を大きく損なうことなく、等方的な屈折特性を持つサンプルが得られます。偏光の複屈折損失（Δn）は、可視光およびNIR帯域で$< 2 \times 10^{-5}$となります。



参考文献

18. Low Birefringence (低複屈折)

多結晶光学グレードダイヤモンド

UV、VIS、IR帯域にわたって吸収率が低い多結晶ダイヤモンドも、優れた光学材料になります。熱的および機械的特性に加え、従来のIRレーザーオプティクスに比べて最大100倍ものパワーを取り扱える能力があります。

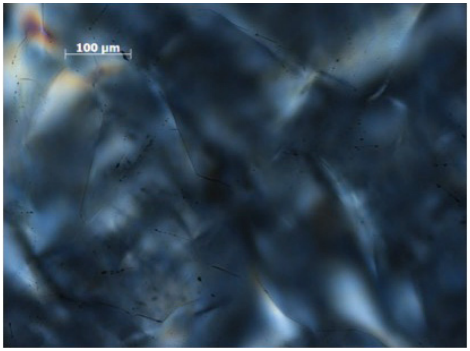
入り組んだ結晶成長や積層欠陥などの高い欠陥密度により、比較的大きな歪みが発生します。そのため、低複屈折や散乱を重視するUV～NIRでの用途にはあまり適していません。ダイヤモンドの屈折率は、10.6μmにおいて2.38であり、薄膜ARコーティングの使用により、透過率 > 99%を達成できます。

散乱

散乱損失は2μm以下と小さく、多結晶ダイヤモンドは優れた赤外光学特性を有しています。大きい入射角散乱はダイヤモンドの微細な特徴と相関性があり、小さい入射角散乱は歪み誘起による複屈折に起因しています。ダイヤモンドの残留減衰係数は10.6μmにおいて0.04～0.07cm^{-1}です。

マイクロクラック

結晶粒界に生じるクラックは、多結晶CVDダイヤモンドの成長の特徴としてみられます。これらの巨視的なクラックは合成時に生じ、粒状内および粒内応力緩和のメカニズムとなっています。



多結晶透過グレードCVDダイヤモンドのクロスポーラー透過型顕微鏡写真には、歪み誘起による複屈折が色として出現。

産業用レーザーでは、大面積の多結晶CVDダイヤモンドオプティクスにより、一般的な代替品のZnSeオプティクスよりも堅牢で高い信頼性を確保。

参考文献

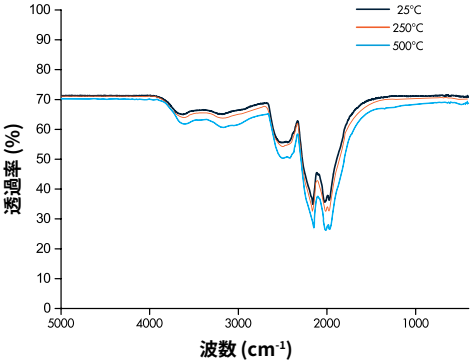
19. Polycrystalline Optics (多結晶オプティクス)

赤外域の放射率

遠赤外域の残留吸収は、マルチフォノンの振動吸収過程のテールに起因します。これらは温度に左右され、ダイヤモンドから放射されます。ただし、これらの過程は約100°Cを超える場合のみに有意であり、吸収はフォノン再結合や破壊モデルによって正常に特徴付けられます。

誘電特性

ダイヤモンドは、テラヘルツ領域から高周波数以降も、ほぼ一定の誘電率を保ちます。ダイヤモンドの誘電率は35GHzにおいて $\varepsilon = 5.68 \pm 0.15$、損失正接は $< 1 \times 10^{-4}$ です。



光学グレード多結晶CVDダイヤモンドの温度依存性赤外スペクトル。

直径が ＞ 100mmの多結晶ダイヤモンドオプティクスは高出力用窓向けに使用。

温度 (°C)	10.6µm Abs. cm^{-1}
25	0.035
100	0.063
150	0.082
200	0.102
250	0.123
300	0.145
350	0.168
400	0.191
450	0.216
500	0.241

温度関数としての近似吸収係数。参考文献を参照。

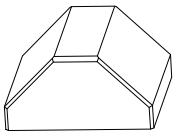
$$\epsilon(T) = 5.700111 - 5.35167 \times 10^{-5} T + 1.6603 \times 10^{-7} T^2$$

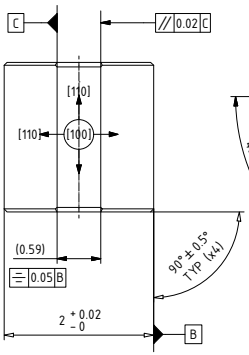
参考文献

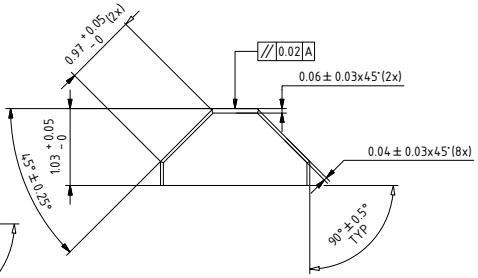
20. Emissivity (放射率)

	多結晶CVD ダイヤモンド (光、熱、電子)	多結晶CVD ダイヤモンド (メカニカル、電気化学)	単結晶CVD ダイヤモンド
サイズ厚み (mm)	< Φ 100mm、< 4mm	< Φ 130mm; < 2mm	8 x 8mm; < 6mm
寸法公差	-0, + 0.2mm	-0, + 0.2mm	-0, + 0.2mm
厚み	± 25µm	± 25µm	± 25µm
カットエッジカーフ角	3˚, ± 2˚	3˚, ± 2˚	3˚, ± 2˚
表面粗さラップ仕上 (Ra)	< 200nm	< 200nm	< 200nm
表面粗さ研磨仕上げ (Ra)	< 20nm	< 20nm	< 5nm
平坦度 (633nm)	10mmで1フリンジ		3mm で1フリンジ
方位ミスカット			± 3˚
ファセット角 (プリズム)			± 0.25˚

記載されている仕様は通常の製造工程でのもの。よりタイトな仕様については応相談。

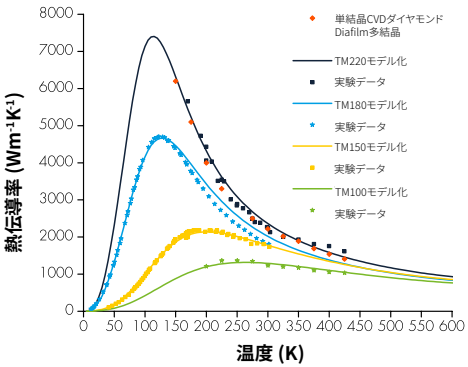






熱伝導

金属とは異なり、ダイヤモンドの熱伝導は、格子振動 (フォノン)によるものが大半を占めます。そして、これらの散乱方法によって熱伝導率が決まります。ダイヤモンドでは、室温の場合、フォノン間での散乱(ウムクラップ過程)と欠陥/不純物による散乱が関係します。約50μmより大きい粒径と高い相純度を持つ多結晶CVDダイヤモンドは、面内値の10%未満で変動する面内伝導率を持つことがわかっています。



ダイヤモンドの熱伝導率と温度の比較。単結晶および高純度多結晶ダイヤモンドでは、フォノン散乱が支配的。より粒形が小さいグレードでは熱伝導率は低くなるが、温度に対する依存性は小さくなる。多結晶CVDダイヤモンド光学グレードの室温熱伝導率は2200W m^{-1} K^{-1}以上となる。

熱膨張

ダイヤモンドは、非常に高い結合エネルギーに起因する、極めて小さい熱膨張係数を有します。一般に材料の膨張は、温度関数としてフォノン特性に関連しており、通常は温度によって異なります。ダイヤモンドは常温の場合、熱膨張係数が小さく、下表に記されているとおり温度とともに上昇します。

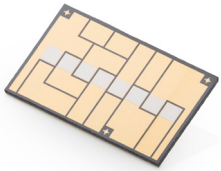
温度 (K)	線形係数 (α) ppm	300Kを基準とした平均膨張率
200	0.37	-
300	1.07	-
400	1.81	1.45
500	2.46	1.80
600	3.02	2.11
800	3.86	2.65
1000	4.45	3.09

多結晶サーマルグレードは、熱拡散用途に使用。

参考文献

21. Thermal Conductivity (熱伝導率)
22. Thermal Expansion (熱膨張)

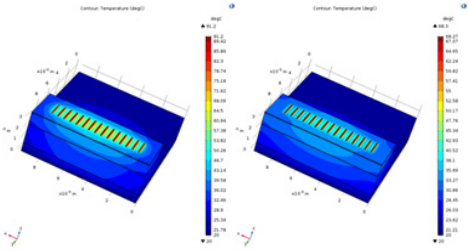
CVDダイヤモンドは極めて高い熱伝導率を有するため、理想的なヒートスプレッダ材料になります。典型的な銅ベースのヒートスプレッダは380 ～ 450W m^{-1} K^{-1}であるのに対し、絶縁体(AlN、BeOなど)は、200 ～300W m^{-1} K^{-1}です。



パターン形成された金端子のメタライズにより、高品質であるDiafilm™ TM100のヒートスプレッダ機能はデバイスへの接合およびパッケージング技術の要望に応える。

ヒートフローのモデリング

高出力密度のデバイスは、半導体、ヒートスプレッダ、ヒートシンクの間に重要なインターフェースを持つ複雑な構造をしています。パッケージ化されたデバイスの設計と性能評価には、有限要素モデリングを使用して、さまざまなヒートスプレッダとパッケージのオプションを比較します。



CMCヒートスプレッダ上のマルチチャネルASICチップ　(左)と、CMC上にあるCVDダイヤモンドヒートスプレッダ上のASIC(右)のFEモデル。このデバイスの性能は、チャンネル内のピーク温度により決定。

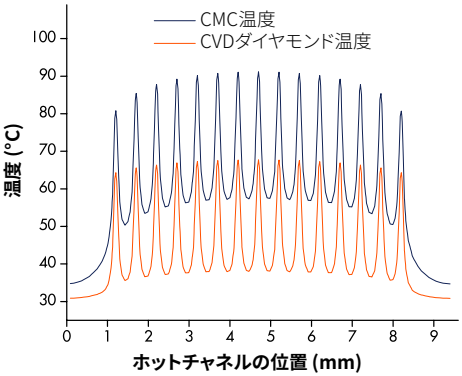
参考文献

27. Thermal Management (温度管理)
33. Thermal Modelling (熱的モデリング)

材料オプション

FEモデル化されたシステムでは、異なる熱伝導率、アタッチメント、サイズの影響を評価できます。CVDダイヤモンドのサーマルグレードは、700～2200W m^{-1} K^{-1}になるように設計されており、RF抵抗用途に作られた導電性グレードもあります。

インジェクション温度の低下



モデリングでは、ASICと350 W m^{-1} K^{-1} CMCヒートシンクの間に、1mmのTM220ダイヤモンドヒートスプレッダを挿入することで、アクティブアンプ領域のピーク温度は、92°Cから68°Cに25%低下すると予測。

アプリケーション

CVDダイヤモンドヒートスプレッダは、ASIC、RFパワーアンプ、半導体、固体レーザーの性能や信頼性を向上させるために使用されており、材料加工、通信、航空宇宙、宇宙などの多様な産業で利用されています。

タイプIIa単結晶ダイヤモンド

単結晶ダイヤモンドは、ここ数十年の超精密加工の発展に欠かせないものとなっています。用途によっては、高純度のタイプIIaダイヤモンド(N < 1ppm)の方が硬度が優れているため、HPHTプロセスで合成されたタイプIbダイヤモンド(N > 100ppm)よりもメリットがあります。

CVDタイプIIa単結晶が登場して以来、より大きな面積、規則的な形状、より安定した特性が得られるようになり、超精密加工用途では天然素材のIIaタイプダイヤモンドに取って代わる。

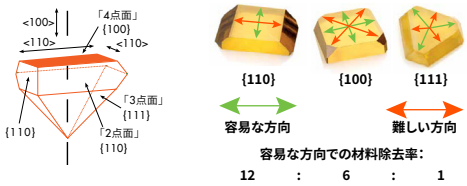
HPHTタイプIb単結晶ダイヤモンド

すべての高硬度材料において、硬度と靭性には相反する関係が存在します。超精密用途では、耐摩耗性と破壊靭性との間でトレードオフがあります。結晶欠陥が多くみられるタイプIbは、IIaタイプのダイヤモンドよりも高い靭性を発揮します。

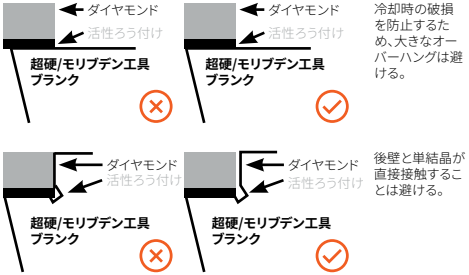
超精密工具の加工

結晶学的面と方向性を理解することが、刃先のサイジングと仕上げに成功するためのかぎとなる要素です。摩耗性または研磨の容易性の度合いは、原子の面がワークピースに現れる方向によって異なります。

実際には、ダイヤモンドの面対称性における「容易な方向」と「難しい方向」が、工具加工中の材料除去率を決定します。



{100}の面で最も柔らかい研磨方向は、面内に横たわる<100>の方向と平行。最も研磨が難しい方向は、{111}面内に横たわる<110>の方向。



工具は硬質金属キャリアとツールホルダーに活性ろう付けされており (11ページを参照)、熱膨張の相違による破損を回避するには、位置決めが重要。

多結晶機械切削工具

耐摩耗性、破壊靭性、熱安定性のバランスに優れた多結晶CVDダイヤモンドは、用途によっては優れた切削性能を発揮します。多結晶の性質上、工具の切削性も結晶方位の影響を受けません。工具製作を容易にするために、金属に似た導電性をもつホウ素ドープ多結晶CVDダイヤモンドもあります。

参考文献

34. Diamond Turning (ダイヤモンド切削)

半導体特性

ダイヤモンドは、バンドギャップが5.47 eVある、ワイドバンドギャップ半導体です。高純度CVDダイヤモンドに対する実験では、電子と正孔の移動度が大きく、長寿命であることが報告されています。高い絶縁破壊電界と熱伝導性を兼ね備えたダイヤモンドは、多くの要求が厳しい電子機器用途として優れた材料です。

ダイヤモンドの耐放射性は、その高い原子変位エネルギー(42eV/原子)と低い原子番号に起因しています。そのため、他の半導体検出器の材料と比較して、電磁放射に対して高い感度を安定的に発揮します。

ダイヤモンドのドーピング

ダイヤモンド用の既知のドーパントはすべて準位が深いものですが、$B > 1 \times 10^{20}$ atoms cm^{-3}では、ダイヤモンドがモット転移を経て金属のようなp型伝導性を示すようになると、アクセプターレベルは価電子帯と重なります。

ダイヤモンドのn型ドーピングは活性化エネルギーが原因で、高温およびUV用途に対してのみ検討されてきましたが、成功したケースは限られてます。

	多結晶	単結晶
バンドギャップ(eV)	5.47	5.47
$[N]_s^0$ (ppb) EPR	< 50	< 5
B (ppb) SIMS	< 0.5	< 0.5
ドーパント	活性化エネルギー	達成可能水準
ホウ素	0.37eV	10^{21}
リン	0.6eV	10^{20}
窒素	1.7eV	10^{19} (111)

高エネルギー粒子検出で使用される、高純度エレクトロニックグレード単結晶ダイヤモンド。

エレクトロニックグレード単結晶ダイヤモンド

CVD合成により、10億分の1水準程度(約$10^{14} cm^{-3}$)またはそれ以下の欠陥密度を持つ合成ダイヤモンドを製造できます。こうしたダイヤモンドは、並外れて大きいバンドギャップ電子特性を持っています。また、点欠陥が極めて少ない材料として、低濃度または単点に着目したエンジニアリング欠陥のためのプラットフォームとなります。

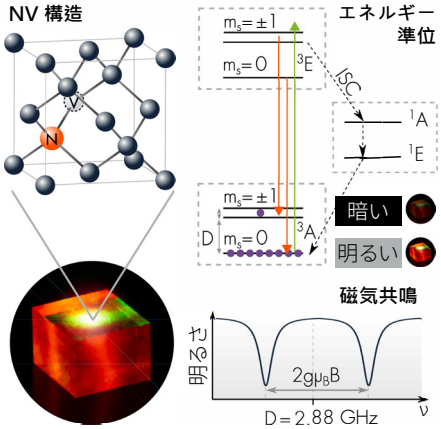
参考文献

23. Diamond Detectors (ダイヤモンド検出器)
24. Boron Doping (ホウ素ドーピング)
35. Electronic Diamond (エレクトロニックダイヤモンド)

材料の欠陥は、「スピン」と呼ばれる量子的な特性を有する場合があります。ダイヤモンドの強固なC-C結合により、高いデバイ温度 (約2200 K)が得られます。これは、室温 (RT)でもスピン状態が長期間続くという結果をもたらします。

ダイヤモンドのNVセンター

ダイヤモンドに含まれる負に帯電した窒素空孔(NV)は、このようなスピンを保有しており、複数の独特な特性を備えています。



NVセンター、そのエネルギー準位の構造、および磁場測定での使用。

上図のように、緑色光源(多くの場合、レーザー)を用いて、NV欠陥から赤色光を発生させることができます。照射中、NVは特定のスピン状態に初期化されます。そして、マイクロ波の応用と、赤色光の発光量を監視して状態を読み出すことにより、コヒーレントに制御します。NVは必要な濃度でCVDダイヤモンドに設計できます。

参考文献

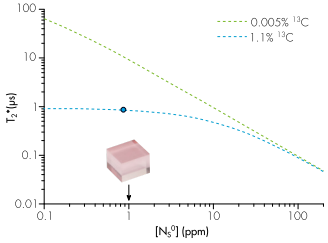
36. Quantum Revolution (量子革命)
37. Coherence Times (コヒーレンス時間)
38. Magnetic-field Sensing (磁界センシング)

^{13}Cが非常に少ないELグレードの試料に単一のNV欠陥がある場合、コヒーレンス時間(量子状態が保持されている時間)が、室温で数秒に及ぶことがあります。そのため、以下の領域におけるNVセンターの活用に大きな関心が寄せられています。

- セキュア通信
- 量子計算/量子シミュレーション
- 次世代センサー

Bフィールドセンシング及びNVコヒーレンス時間

NVセンターのスピンレベルは、ゼーマン効果を介して磁束密度(B)の影響を受けます。複数のNVセンターにより、Bの強度や方向を測定でき、高感度でダイナミックレンジの広いベクトルセンサーを形成します。



ダイヤモンド中のNと^{13}Cの濃度によるNVコヒーレンス時間 (T_2^*)の依存性。

感度は (η) 以下のように推定できます。

$$\eta \sim \frac{1}{g_e \mu_B} \frac{1}{C\sqrt{\beta}} \frac{1}{\sqrt{N_{NV} T_2^*}}$$

NVセンターの数 (N_{NV}) とコヒーレンス時間(T_2^*)は材料の重要な特性です。窒素の濃度を上げるとT_2^*が低下するため、これらは連動しています。したがって、NVと^{13}Cの濃度はデバイスのサイズと感度の要求に応じて調整できます。

ホウ素ドープダイヤモンド

導電性の多結晶ホウ素ドープダイヤモンド(BDD)は、水溶液内にある電極材料すべての中で最も広い溶媒電位窓を有しています。また、他の電極に比べてバックグラウンド電流や容量性電流が非常に小さく、ファウリングが少ないうえ、極端な電位や過酷な環境にも耐えることができます。しかし、これらの特性はダイヤモンドの品質によって大きく異なり、非ダイヤモンドカーボン(NDC)の含有量が減少するに従い、特性は向上します。少量および微量のNDC含有両方で、自立した固体BDD電極を成長させることができます。

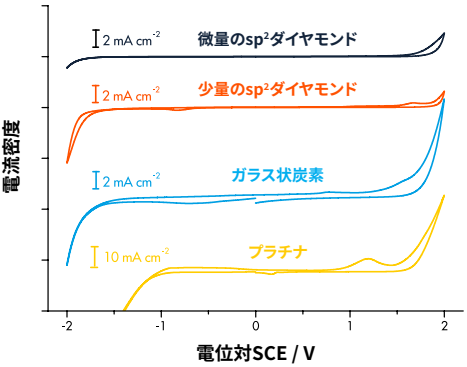
BDDの用途

ダイヤモンドは、水溶液中において非常に広い溶媒電位窓が得られるため、非常に高いカソード電位/アノード電位まで気体発生を抑制でき、優れた電流効率によって高酸化性のヒドロキシルラジカルを生成できます。この現象は、高度な酸化工程で活用できます。BDD電極は不活性な特性を有するため、電気化学センシング用途に理想的なプラットフォームです。

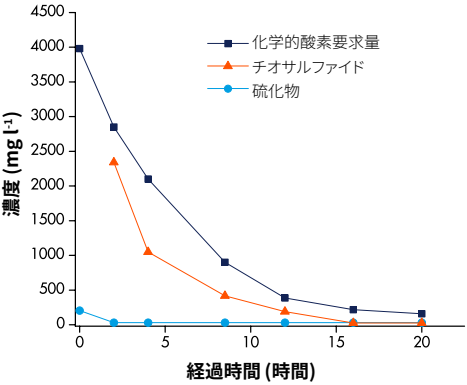
BDDの電気化学特性

研磨されたバルクの自立型多結晶BDDは、$B > 1 \times 10^{20}$ atoms cm^{-3}で微量のNDCと酸素終端表面がある場合、次の電気化学特性を示します。

- 抵抗率約0.5×10^{-3}Ohm m
- ダイヤモンド溶媒電位窓> 3.0 V
- 可逆性< 70mV ($Ru(NH_3)_6^{3+}$)
- キャパシタンス< 10µF cm^{-1}



0.1M KNO_3、pH 6.5の溶媒窓。ダイヤモンド電極の場合、BDD電極の非ダイヤモンドカーボン含有量が溶媒電位窓に大きく影響。



使用済み苛性産業廃水からの難分解性溶存汚染物質の除去。化学的酸素要求量(COD)は、排水の汚染度を示す指標であり、BDDを利用した電気化学的高度酸化は、汚染物質を安全な排出限界以下まで除去することができる数少ない技術の一つ。

参考文献

25. BDD Electrochemistry (BDD電気化学)
26. BDD Water Treatment (BDD水処理)

光学グレードおよびRFグレード

		多結晶		単結晶	
特性		光学グレード	RFグレード	光学グレード	光学グレードプラス
硬度 (GPa)		81 ± 18 [30]	81 ± 18 [30]	70 - 120 [3]	70 - 120 [3]
破壊靭性 (MPa $m^{0.5}$)		8.5 [3]	8.5 [3]	5 - 7 [3]	5 - 7 [3]
ヤング係数 (GPa)		1050 [3]	1050 [3]	1050 [3]	1050 [3]
ポアソン比		0.1 [3]	0.1 [3]	0.1 [3]	0.1 [3]
破壊応力 (MPa)[ワイブル係数]				3500 [2.5] [3]	3500 [2.5] [3]
基板面		800 [10]	800 [10]		
成長面		400 [15]	300 [15]		
雨滴衝撃 DTV (m s^{-1}) 2mm 雨滴粒径		525 [31]		457 ~ 533 [31]	-
100ms^{-1} C300/600砂での 砂の侵食 (mg kg^{-1})		2.1 ± 0.6 [30]		-	-
300Kでの熱伝導率 (W $m^{-1}K^{-1}$)		>2200	>2000	>2200	2200
425Kでの熱伝導率 (W $m^{-1}K^{-1}$)		>1600	>1500	>1600	>1600
熱膨張係数 (ppm K^{-1})		1.0 で 300K 4.4 で 1000K	1.0 で 300K 4.4 で 1000K	1.0 で 300K [22] 4.4 で 1000K [22]	1.0 で 300K 4.4 で 1000K
屈折率	(10.6μm)	2.376 [30]		2.376 [30]	2.376 [30]
	(1550nm)	2.386 [13]		2.386 [13]	2.386 [13]
	(1064nm)	2.392 [13]		2.392 [13]	2.392 [13]
dn/dT (K^{-1})		9.6 x 10^{-6} [30]		9.6 x 10^{-6} [30]	9.6 x 10^{-6} [30]
誘電率 D (35GHz)		5.68 ± 0.15 [30]	5.68 ± 0.15 [30]	-	-
損失正接 145GHz (10^{-6})		8 ~ 20 [32]	10 ~ 100 [32]	-	-
10.6μm吸収係数 (cm^{-1})		< 0.07		< 0.05 [12]	< 0.05
3 ~ 5μm吸収係数 (cm^{-1})		3.7μm [30]で 最小0.8		3.7μm [30]で 最小0.8	3.7μm [30]で 最小0.8
1.064μm 吸収係数 (cm^{-1})		通常 0.12 [12]		< 0.1[12]	0.005[12]
10μm (1mm厚)での放射率		573Kで0.02 773K [19]で 0.03		573Kで0.02 773K [19]で 0.03	573Kで0.02 773K [19]で 0.03
統合前方散乱 8 ~ 12μm (%)		0.1 ~ 0.7% [19]		-	該当なし
統合前方散乱 可視 (%)		< 4% [19]		< 0.7% [12]	0.10%
複屈折 (n_e - n_0)				1 x 10^{-4} [18]	< 5 x 10^{-5} [18]
比熱容量 (J $Kg^{-1}K^{-1}$)300K		520 [21]	520 [21]	520 [21]	520 [21]
透過率8 ~ 200μm (1mm厚)		71.4% #	68 - 70% #	71.4% #	71.4% #
透過率633nm (1mm厚)		> 64% #		> 69% #	70.6% #

参考文献 [xx] については31ページを参照　# = 反射と散乱の損失に制限あり　- = 不明

特性	TM100	TM150	TM180	TM200	TM220	ETC700
熱伝導率						
@ 300K (W $m^{-1} K^{-1}$)	>1000	>1500	>1800	>2000	>2200*	~700*
@ 425K (W $m^{-1} K^{-1}$)	>900	>1400	>1500	>1500	>1620	>500
熱膨張係数						
@ 300K (ppm K^{-1})	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1
@ 1000K (ppm K^{-1})	4.4 ± 0.1	4.4 ± 0.1	4.4 ± 0.1	4.4 ± 0.1	4.4 ± 0.1	4.4 ± 0.1
熱拡散率						
300K ($cm^2 s^{-1}$)	>5.5	>8.3	>10.0	>11.1	>12.2	>3.9
比熱容量						
300K (J $kg^{-1} K^{-1}$)	520	520	520	520	520	520
硬度						
GPa	81 ± 18	81 ± 18	81 ± 18	81 ± 18	81 ± 18	81 ± 18
破壊靭性						
(MPa $m^{0.5}$)	5.3 ~ 7.0	5.3 ~ 7.0	5.3 ~ 7.0	5.3 ~ 7.0	5.3 ~ 7.0	8.5
ヤング係数						
(GPa)	1050	1050	1050	1050	1050	1050
ポアソン比	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
密度						
(10^3 kg m^{-3})	3.52	3.52	3.52	3.52	3.52	3.52
抵抗率						
バルク Rv (Ω cm)	10^{12}	10^{12}	10^{12}	10^{12}	10^{13}	0.05 ~ 0.07
表面 Rs (Ω cm)	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{11}	0.05 ~ 0.07

* 293Kで測定

参考文献

28. Thermal Applications (熱的用途)
29. Metallized CVD Diamond (メタライズCVD ダイヤモンド)

特性	Diafilm™ CDM	Diafilm™ CDE	MCC - 単結晶	Mono
熱伝導率				
@ 300K (W $m^{-1} K^{-1}$)	1000	600	>1900	>800
@ 425K (W $m^{-1} K^{-1}$)	900	500	>1500	>700
熱膨張係数				
@ 300K (ppm K^{-1})	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1
@ 1000K (ppm K^{-1})	4.4 ± 0.1	4.4 ± 0.1	4.4 ± 0.1	4.4 ± 0.1
熱拡散率				
300K ($cm^2 s^{-1}$)	>8.3	>10.0 >	11.1	
比熱容量				
300K (J $kg^{-1} K^{-1}$)	520	520	520	520
硬度				
GPa	80 ± 18	80 ± 18	70 - 120†	11 - 100†
破壊応力	**成長面 – 基板面**	**成長面 – 基板面**	**表面仕上げに依存**	
(MPa)	500 ~ 1100	500 ~ 1100	2000 ~ 3000	2000 ~ 3000
破壊靭性				
(MPa $m^{0.5}$)	8.5	8.5	5	3.4
ヤング係数				
(GPa)	1050	1050	1050	1050
ポアソン比	0.1	0.1	0.1	0.1
密度				
(10^3 kg m^{-3})	3.52	3.52	3.52	3.52
抵抗率				
バルク Rv (Ω cm)	1 x 10^{12}	0.05 - 0.07	1 x 10^{12}	1 x 10^{10}

† 方位による

特性	EP グレード	備考
電気化学特性		
ホウ素ドーピング濃度 (代表値)	2 ~ 6 x 10^{20} atoms cm^{-3}	平均 0.16mm^2以上
非ダイヤモンドカーボン	少量	ラマン分光法で測定した場合
抵抗率 (Ω m)	0.2 ~ 1.8 x 10^{-3}	± 0.25 x 10^{-3}
接触抵抗率 (Ω m)	< 1 x 10^{-3}	Ti:Pt:Au メタライズの場合
研磨された表面のオーミック接触ダイヤモンドで測定の値を引用		
溶媒電位窓* (V)	> 3.0	0.1 M KNO_3 対SCE
キャパシタンス* (μF cm^{-2})	< 20μF	0.1 Vs^{-1}のスキャンレートでのサイクリックボルタンメトリーから導出
可逆性 (ΔEp)* (mV)	< 100	1mM Ru $(NH3)_6^{3+/2+}$を用いた直径1 mmの円板電極を、ダイヤモンドにオーミック接触させた時のスキャンレート100mV s^{-1}で記録
浸食速度 (μg h^{-1} m^{-2})	< 6	10000A m^{-2}で測定
動作電流密度 (A m^{-2})	> 20000	2mm間隔 50mS cm^{-1}電解質
機械的特性		
核分裂側破壊応力 (MPa)	> 800	
成長側の破壊応力 (MPa)	> 450	
ヤング係数 (GPa)	1050	
破壊靭性 (MPa $m^{0.5}$)	8.5	
ワイブル係数	> 10	
硬度 (GPa)	81 ± 18	
熱的特性		
熱伝導率 (W m^{-1} K^{-1})	約 700	300Kでのスループレーン
未加工の寸法公差		
厚さ均一性	± 25%	標準値
基板面粗さ(μm)	Ra < 0.5	標準値
成長面粗さ(μm)	Ra < 200	標準値
最大使用可能面積 (円形mm^2)	12 270	直径 130mm
最大使用可能面積 (長方形mm^2)	7150	長方形 110 x 65mm
側面寸法公差 (mm)	± 0.2	すべてのエッジはレーザーカット
加工済み		
ラップ面の粗さ(μm)	Ra < 0.25	標準公差
研磨面粗さ(μm)	Ra < 0.03	標準公差
厚み公差 (mm)	± 0.05	標準公差

*Ra < 0.03μmの表面仕上げをしたオーミック接点ダイヤモンドで測定した値

特性	単結晶	多結晶	備考
電子			
正孔移動度 ($cm^2 V^{-1} s^{-1}$)	> 2000	1000	
電子移動度 ($cm^2 V^{-1} s^{-1}$)	> 2000	1800	
キャリア寿命 (ns)	約2000	約1 - 10	
電荷収集距離	> 475 µm (*代表値)	>180 µm (†代表値)	*0.5 V $µm^{-1}$ 印加電界、500 µmプレートの場合 †1V $µm^{-1}$ 印加電界、500 µmプレートの場合
電荷収集効率	> 95% (代表値)	> 36% (代表値)	500 µmプレートの場合
バンドギャップ (eV)	5.47	5.47	
電子飽和速度 (cms^{-1})	20	20	
耐放射性cm^{-2} 24 GeV陽子		> 10^{15}	< 25%の信号低下
絶縁破壊電圧 (MV cm^{-1})	1 ~ 2		実験値電流しきい値10µA 4 x 4mm x 20µm接触面積0.71mm^2
不純物			
[N^0_S] (ppb)	<5 (0.1 ~ 1 代表値)	< 50	EPRによる測定
[B] (ppb)	< 1	< 1	SIMSによる測定
熱的特性			
熱伝導率 (W $m^{-1} K^{-1}$)	> 2000	> 1900	
熱膨張係数 (ppm K^{-1}) 300K時	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	
熱膨張係数 (ppm K^{-1}) 1000K時	4.4 ± 0.1	4.4 ± 0.1	
寸法			
標準サイズ (mm)	2 x 2、4 x 4、 4.5 x 4.5	5 x 5、10 x 10、 20 x 20	許容範囲± 0.05mm、多結晶は Ø 110mmまで可能
標準厚さ (mm)	0.3および0.5	0.3および0.5	許容範囲± 0.05mm
レーザーカーフ	3°	3°	
外周欠陥 (mm)	<0.2	<0.2	
結晶方位 (面/エッジ)	{100} ± 3°<110>		
研磨加工			
表面仕上 サイド 1Ra (nm)	< 0.5	Ra < 20	{100}上の研磨された単結晶
表面仕上 サイド 2Ra (nm)	< 0.5	Ra < 20	{100}上の研磨された単結晶

DNV™ Series - B1 & B14

特性	値		備考
量子的特性	**DNV B1**	**DNV B14**	
^{13}C 留分	1.1%		
[N_S^0] (処理前) (代表値)	800ppb	13ppm	
[NV] (代表値)	300ppb	4.5ppm	
スピンコヒーレンス時間T_2* (代表値)	1μs	0.5μs	
スピンコヒーレンス時間T_2 (代表値)	200μs	10μs	
寸法			
標準サイズ (mm)	3 x 3		許容範囲± 0.05mm
標準厚さ (mm)	0.5		許容範囲± 0.05mm
外周欠陥 (mm)	<0.2		
結晶方位	{100}		
結晶方向ミスカット	<3°		
加工済み			
研磨面粗さ (μm)	Ra < 30*		{100}上の研磨された単結晶 *< 1nm達成可能

参考文献

1. Monolithic Diamond Raman Lasers (モノリシックダイヤモンドラマンレーザー): Reilly S et al. Opt. Lett. 40 (6) pp. 930-933 (2015)
2. Science’s Gem (科学の宝石): Mainwood A et al. J. Phys. Condens. Matter, 21 360301 (2009)
3. Mechanical Properties of Diamond (ダイヤモンドの機械的特性): Field J E. Rep. Prog. Phys., 75 (12) 126505 (2012)
4. The “Type” Classification (「タイプ」の分類): Breeding C M et al. Gems & Gemology, 45 (2) 96-111 (2009)
5. CVD: The Early Years (CVD：初期): Angus J C. Diam Relat Mater 49 77-86 (2014)
6. Synthesis Methods (合成方法): Schwander M et al. Diam Relat Mater 20(9) 1287-1301 (2011)
7. Technology and Applications (技術と応用): Balmer R S et al. J. Phys. Condens. Matter 21 364221 (2009)
8. Structure of the Diamond (ダイヤモンド構造): Bragg, W H et al. Proc. R. Soc. A, 89 (610) 277–291 (1913)
9. Diamond Polishing (ダイヤモンド研磨): Schuelke T et al. Diam Relat Mater 32 17-26 (2013)
10. Cleaning Diamond (ダイヤモンドの洗浄): Brown K J et al. J. Chem. Health Saf. 26 (6) 40–44 (2019)
11. Brazing Parameters (ろう付けパラメーター): Buhl S et al. J Mater Sci 45 4358–4368 (2010)
12. Single Crystal Optics (単結晶光学): Dodson J M et al. Proc. SPIE 8016 80160L (2011)
13. Refractive Index (屈折率): Turri G et al. Op. Mat. Ex. 7, 855-859 (2017)
14. Thermo Optic Properties (熱光学特性): Ruf T et al. Phys. Rev. B 62, 16578 (2000)
15. Raman Thermometers (ラマン温度計): Simon R B et al. Appl. Phys. Lett. 104, 213503 (2014)
16. Raman Spectroscopy (ラマン分光法): Prawer S et al. Phil. Trans. R. Soc. A. 362 2537–2565 (2004)
17. Raman Laser (ラマンレーザー): Antipov S et al. Opt. Lett. 44, 2506-2509 (2019)
18. Low Birefringence (低複屈折): Friel I et al. Diam Relat Mater 18 808–815 (2009)
19. Polycrystalline Optics (多結晶オプティクス): Mollart T P et al. Semicond Sci Technol, Volume 18, No. 3 (2003)
20. Emissivity (放射率): Piccirillo C et al. J. Appl. Phys. 92, 756 (2002)
21. Thermal Conductivity (熱伝導率): Twitchen D J et al. Diam Relat Mater 10 (3–7) 731-735 (2001)
22. Thermal Expansion (熱膨張): Jacobson P et al. Diam Relat Mater 97 107469. (2019)
23. Diamond Detectors (ダイヤモンド検出器): Pernegger H. Phys. Status Solidi A 203 (13) 3201-3386 (2006)
24. Boron Doping (ホウ素ドーピング): Pernot J P et al. Phys. Rev. B 81 (20) 205203 (2010)
25. BDD Electrochemistry (BDD電気化学): Macpherson J V. Phys. Chem. Chem. Phys.17 2935-2949 (2015)
26. BDD Water Treatment (BDD水処理): Zimpro(R) Electro-oxidation: The Solution for Difficult-to-treat Wastewaters
27. Thermal Management (温度管理): Obeloer T et al. Electronics Cooling. (2014)
28. Thermal Applications (熱応用): Element Six Thermal Management
29. Metallized CVD Diamond (金属化CVDダイヤモンド): Iacovangelo C D. Thin Solid Films 286 264-269 (1996)
30. Materials for Infrared Windows and Domes (赤外線窓およびドーム用材料): Harris D C. SPIE, Optical Engineering Press, ISBN 0819434825 (1999)
31. Liquid Impact Resistance (液体の耐衝撃性): Coad E J, Field J E. Proc. SPIE 3060 277041 (1997)
32. State of the Art of High Power Gyro-Devices (ハイパワージャイロデバイスの現状): Thumm M. FZKA 6815, (2003)
33. Thermal Modelling (熱的モデル): Matin K et al. ITherm 6892264 (2014)
34. Diamond Turning (ダイヤモンド切削): Suet T S et al. In Materials Characterisation and Mechanism of Micro-Cutting in Ultra-Precision Diamond Turning. Springer, Berlin, Heidelberg (2018)
35. Electronic Diamond (電子ダイヤモンド): Isberg J et al. Science 297 (5587) 1670-1672 (2002)
36. Quantum Revolution (量子革命): Markham M L, Twitchen D J. Physics World 33, 39 (2020)
37. Coherence Times (コヒーレンス時間): Balasubramanian G et al. Nature Materials 8 383–387 (2009)
38. Magnetic-field Sensing (磁界センシング): Edmonds A M et al. arXiv:2004.01746 [cond-mat.mtrl-sci]

エレメントシックスは、デビアスグループに属しており、合成ダイヤモンドやその他のスーパーマテリアルの設計、開発および製造を手がけています。世界各地で事業を展開しており、主要な生産拠点は、中国、ドイツ、アイルランド、南アフリカ、英国およびアメリカ合衆国にあります。

エレメントシックスのスーパーマテリアルソリューションは、切削、研削、穴あけ、せん断、研磨などの用途に使用されています。また、合成ダイヤモンドは、硬度以外にも極めて優れた特性を有しているため、光学、送電、水処理、半導体、センサーなどの幅広い産業で新たな用途を切り開いています。

エレメントシックスについての詳細をご希望される場合は、当社のウェブサイト(e6.com)をご覧になるか、以下の住所にお問い合わせください。

お問合せ先

欧州
カスタマーサービス
T +44 1344 638 200
E technologies@e6.com

南北アメリカ
T +1 408 986 2400
E ustechnologies@e6.com

*米国務省に登録済み、ITARの機密性が高く、規制されている防衛プロジェクトの取り扱いが可能。

©Element Six. 2024年11月