



CVD Reactors for Diamond Growth

Volker Cimalla – volker.cimalla@iaf.fraunhofer.de

Every year, nearly 5000 million carats (1000 tons) of synthetic diamond are produced for industrial use. While most of these diamonds are used in machine and cutting tools, an increasing proportion are also being made into gemstones. Novel applications, however, require a more precise control of basic material parameters, including their spatial distribution. Fraunhofer IAF has developed a flexible reactor family that can be tailored to meet the new challenges of growing high-quality synthetic diamond.

1 Gemstone made from a diamond crystal grown at Fraunhofer IAF.

Brilliant, geschliffen aus einem am Fraunhofer IAF hergestellten Kristall.

Diamond is known as a material with superlative physical qualities. It is the hardest known material, and is highly resistant to scratching and abrasion. Diamond is also chemically inert and resistant to extremely corrosive, radioactive and high temperature environments. As a result, most industrial applications of synthetic diamond have long made use of its hardness, as this property makes diamond the ideal material for machine and cutting tools.

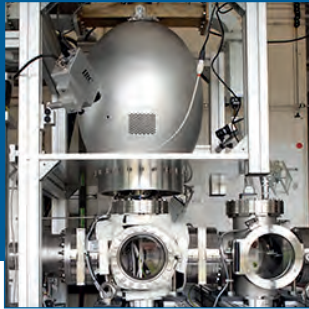
Novel Applications

Additional outstanding properties widen the range of applications. In contrast to most electrical insulators, pure diamond has a high thermal conductivity of 2000 W/m.K, which is the highest of any known solid. It is an attractive option for heat sinks in high-power lasers and transistors, as it can prolong the lifetime of these devices. The wide transmission range

for electromagnetic radiation makes diamond superior to any other existing window material, enabling it to be used in output windows of high-power CO₂ lasers, for example. Finally, synthetic diamond can be doped with impurities like boron and phosphorus, giving it p-type or n-type semiconducting properties. Its large electronic bandgap of 5.45 eV allows diamond to withstand high electric fields and, combined with a high carrier mobility of 4500 cm²/(V·s), this makes it favorable for high-power high-frequency electronics.

Synthetic diamond

The diamond industry can be divided into two main fields: (i) gem-grade diamonds and (ii) industrial-grade diamonds. Both markets have created a high demand for rough stones, which can be satisfied by synthetic diamonds. About 90 % of the diamond material used in cutting tools is of synthetic origin. Synthetic



- Synthetic diamond
- Plasma-assisted chemical vapor deposition
- Homo- and heteroepitaxy
- Ellipsoid plasma reactor
- Doping control

CVD-Reaktoren für das Wachstum von Diamant

Jährlich werden ca. 5000 Millionen Karat (1000 Tonnen) synthetische Diamanten für industrielle Anwendungen produziert. Die meisten Diamanten sind für Bearbeitungs- und Schneidwerkzeuge bestimmt; ein zunehmender Anteil wird auch zu Brillanten verarbeitet. Die neuen Anwendungen erfordern eine präzisere Kontrolle der grundlegenden Materialparameter, einschließlich ihrer räumlichen Verteilung. Das Fraunhofer IAF entwickelte eine Reaktorfamilie, die für die neuen Herausforderungen beim Wachstum von hochwertigen synthetischen Diamanten spezifisch angepasst werden kann.

600

Reactors are designed to grow up to 600 diamond stones simultaneously.

Die Reaktoren sind zum gleichzeitigen Wachstum von 600 Diamanten vorgesehen.

Diamant ist ein Material mit hervorragenden physikalischen Eigenschaften. Es ist der härteste bekannte Werkstoff und sehr kratz- und abriebfest. Darüber hinaus ist Diamant auch chemisch inert und resistent gegen extrem korrosive, radioaktive Umgebungen sowie stabil bei hohen Temperaturen. Deshalb sind die meisten industriellen Anwendungen von synthetischem Diamant seit langem mit seiner Härte verbunden, denn diese Eigenschaft macht Diamant zum idealen Werkstoff für Bearbeitungs- und Schneidwerkzeuge.

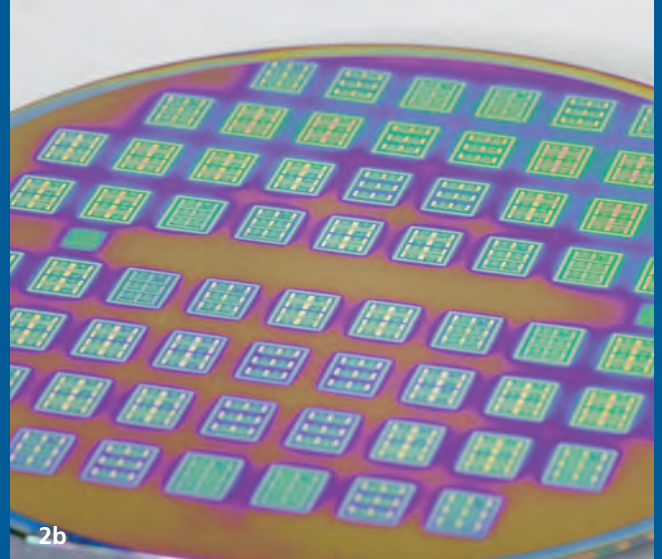
Neue Anwendungen

Seine zusätzlichen herausragenden Eigenschaften erweitern das Anwendungsspektrum. Im Gegensatz zu den meisten elektrischen Isolatoren hat reiner Diamant eine hohe Wärmeleitfähigkeit von 2000 W/m.K, welche die höchste aller bekannten Feststoffe ist. Folglich ist der Einsatz in Kühlkörpern für Hochleistungs-

laser und Transistoren eine attraktive Option, um die Lebensdauer dieser Bauelemente zu verlängern. Der breite Transmissionsbereich für elektromagnetische Strahlung macht Diamant jedem anderen bestehenden Fenstermaterial überlegen, wodurch z. B. die Verwendung in Ausgangsfenstern von Hochleistungs-CO₂-Lasern möglich wird. Zudem kann synthetischer Diamant auch mit Fremdstoffen wie Bor und Phosphor dotiert werden, was zu p-leitenden oder n-leitenden halbleitenden Eigenschaften führt. Sein großer elektronischer Bandabstand von 5,45 eV gewährleistet, dass Diamant hohen elektrischen Feldern standhält. Die Kombination mit einer hohen Ladungsträgermobilität von 4500 cm²/(V·s) ist besonders für die Hochleistungs-Hochfrequenz-Elektronik vorteilhaft.

Synthetischer Diamant

Die Diamant-Industrie kann in zwei Haupt-



- 2 a) *Single crystalline diamond seeds on a multiple mount.*
 b) *Nanocrystalline diamond for MEMS on a 4" wafer.*
 a) *Einkristalline Diamanten auf einem Mehrfachhalter.*
 b) *Nanokristalliner Diamant für MEMS auf einem 4"-Wafer.*

diamond, however, can also be cut into gems and various colors can be produced. Such diamonds represent about 2 % of the gem-quality diamond market, but this is set to increase. Novel applications in electronics, photonics, and quantum technologies, however, require the diamond material to have tailored properties, such as controlled doping with impurities in order to define specific conductivity. Moreover, these properties have to be realized in well-defined spatial profiles. Such structures can only be created using a layer deposition technique such as plasma-assisted chemical vapor deposition.

Chemical Vapor Deposition

Chemical vapor deposition (CVD) is a common method for growing synthetic diamond from a hydrogen-hydrocarbon gas mixture. Typically, methane is used as a carbon source, while hydrogen in a ratio of about 100:1 is essential to selectively etch off non-diamond carbon. In contrast to the second major technique, high pressure and high temperature (HPHT), CVD is flexible enough to grow customized synthetic diamond for different applications. Important parameters are high purity, process stability, and repeatability for small single crystalline diamond seeds as well as for large-area

wafer-scale deposition. Moreover, precise doping control with boron or phosphorus, which is a prerequisite for forthcoming applications in electronics, can be realized without contamination by further impurities.

Fraunhofer IAF has a long-standing experience in growing diamond using ellipsoid plasma reactors invented and built in-house. Initially designed to grow polycrystalline diamond, the reactor was further developed to grow diamond material covering a wide range of specifications. Recent activities concentrate on growing single crystalline diamond. Examples are intentionally doped diamond for electronic devices, ultra-pure diamond with localized defects for use in quantum technology experiments and devices, as well as pure diamonds to be used as gemstones. In all cases, the CVD reactors were adapted to the specific requirements for the diamond. Most recently, a new reactor was built and transferred to an industrial partner, which is able to grow a large number of diamonds simultaneously to be used as gemstones. The technology is also being developed to enable the scaling of heteroepitaxial growth of single crystalline diamond to wafer level for use as heat spreaders and in electronics.



3

3 Growth reactor that can be loaded with up to 600 diamond seeds or a single 6" wafer.
CVD-Reaktor, der mit bis zu 600 Diamanten oder einem 6"-Wafer beladen werden kann.

6"

*Maximum wafer size for growing diamond.
 Maximale Wafergröße, auf der Diamant gewachsen werden kann.*

bereiche unterteilt werden: (i) Diamanten für Schmuck und (ii) Diamanten industrieller Qualität. Beide Märkte haben hohen Bedarf an Rohsteinen, der durch synthetische Diamanten befriedigt werden kann. Etwa 90 % des Diamantmaterials für Schneidwerkzeuge ist synthetischer Herkunft. Synthetischer Diamant kann jedoch auch zu Edelsteinen geschliffen werden; zudem sind verschiedene Farben herstellbar. Solche Diamanten repräsentieren etwa 2 % des Diamantmarkts für Edelsteinqualität, mit einer Tendenz zur weiteren Zunahme. Neuartige Anwendungen in der Elektronik, Photonik und Quantentechnologie erfordern jedoch maßgeschneiderte Eigenschaften des Diamantmaterials, wie eine kontrollierte Dotierung mit Fremdatomen, um eine spezifische Leitfähigkeit zu definieren. Zudem müssen diese Eigenschaften in gut definierten räumlichen Profilen eingestellt werden. Solche Strukturen können nur durch eine Schichtabscheidungstechnik, wie die plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung, realisiert werden.

Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)

CVD ist eine gängige Methode, bei der synthetische Diamanten in einem Wasserstoff-Kohlenwasserstoff-Gasgemisch gewachsen werden. Typischerweise wird Methan als Kohlenstoffquelle verwendet, während Wasserstoff in einem Verhältnis von etwa 100:1 den gleichzeitig entstehenden, nicht diamantartigen Kohlenstoff wegätzt. Im Gegensatz zu der zweiten etablierten Methode, der Synthese bei hohen Drücken und Temperaturen (HPHT), zeichnet sich CVD durch eine hohe

Flexibilität aus, um synthetische Diamanten anwendungsspezifisch zu wachsen. Wichtige Parameter sind hohe Reinheit, Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit. Außerdem kann eine präzise Dotierungskontrolle mit Bor oder Phosphor, die eine Voraussetzung für zukünftige Anwendungen in der Elektronik ist, ohne Verunreinigung durch weitere Fremdstoffe realisiert werden.

Das Fraunhofer IAF verfügt über langjährige Erfahrung im Diamantenwachstum mit Plasmareaktoren, die am IAF entwickelt und gebaut wurden. Sie wurden zunächst für das Wachstum polykristalliner Diamanten entwickelt, mittlerweile wird damit aber Diamant für eine breite Palette von Spezifikationen hergestellt. Die jüngsten Aktivitäten konzentrieren sich auf das Wachstum einkristalliner Diamanten. Beispiele sind dotierte Diamanten für elektronische Bauelemente, ultrareine Diamanten mit lokalisierten Defekten zur Verwendung in quantentechnischen Experimenten und Bauelementen sowie reine Diamanten, die zu Brillianten verarbeitet werden können. 2016 wurde ein neuer Reaktor gebaut und an einen industriellen Partner übertragen, der in der Lage ist, gleichzeitig eine große Anzahl von Diamanten zu wachsen, die für die Verarbeitung zu Edelsteinen geeignet sind. Gegenwärtig zielt die Weiterentwicklung der Reaktoren am Fraunhofer IAF auf eine Skalierung des heteroepitaktischen Wachstums von einkristallinem Diamant auf größere Flächen (Wafers) für Anwendungen als Wärmespreizer und in der Elektronik.