

LEISTUNGSELEKTRONISCHE BAUELEMENTE BASIEREND AUF EINKRISTALLINEM DIAMANT

DIE AUFGABE

Für die Entwicklung effizienter leistungselektronischer Bauelemente sind Halbleitermaterialien mit größerer Bandlücke als Silizium von besonderer Bedeutung. Könnte man Diamant anstelle von Silizium verwenden, würden der elektrische Widerstand und damit die Verlustleistung des Bauelements um das Tausendfache sinken und erhebliche Energieeinsparungen in leistungselektronischen Anwendungen ermöglichen.

Die nach Silizium folgende Generation von leistungselektronischen Bauelementen basiert auf Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN). Die für leistungselektronische Anwendungen relevanten intrinsischen Eigenschaften von Diamant übersteigen diejenigen von SiC und GaN noch einmal erheblich (Abb. 1). Werden zur Isolierung von 10 kV noch 1000 µm dicke Siliziumelemente und ca. 100 µm dicke SiC- oder GaN-Elemente benötigt, reichen bereits 20 µm dicke Diamantelemente zur Isolation dieser Spannung aus.

Gegenwärtig basieren die Erwartungen an die Diamantelektronik auf dem Vergleich von intrinsischen Materialeigenschaften und den daraus ableitbaren Möglichkeiten. Die Aufgabe besteht deshalb darin, reale leistungselektronische Bauelemente aus Diamant herzustellen und die theoretisch erwarteten Vorteile praktisch zu demonstrieren.

Ausgewählte Eigenschaften von Halbleitern mit großer Bandlücke

	Si	6H-SiC	GaN	Diamant
Bandlücke / eV	1,12	3,03	3,45	5,45
Elektrische Durchbruchfeldstärke / kV cm ⁻¹	300	2500	2000	10000
Wärmeleitfähigkeit / W cm ⁻¹ K	1,5	4,9	1,3	22

1

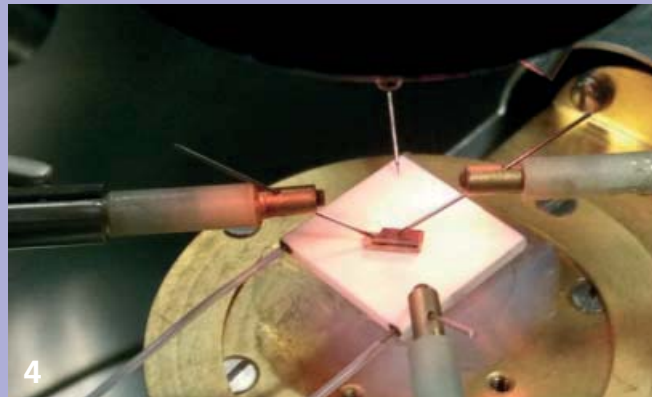
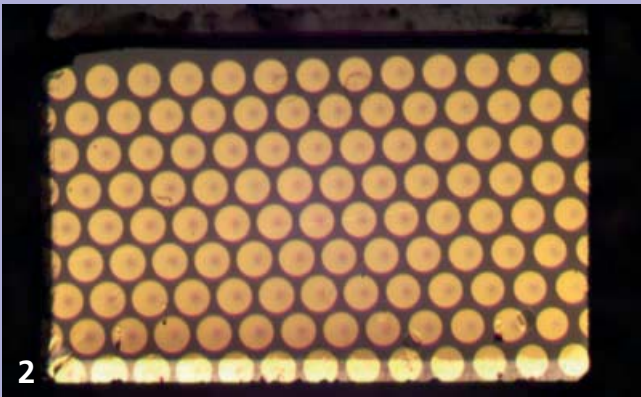
UNSERE LÖSUNG

Am Fraunhofer Center for Coatings and Diamond Technologies CCD (siehe auch S. 128) werden in enger Zusammenarbeit mit der Michigan State University Diamantdioden für leistungselektronische Anwendungen entwickelt und gefertigt. Der Fokus liegt auf vertikalen Schottky- und Schottky-pn-Übergangsdioden.

Bei der Herstellung der Dioden sind die Prozesse für die p- und n-Dotierung von Diamant besonders anspruchsvoll. Am CCD erfolgt die Dotierung während des plasmabasierten homoepitaktischen Wachstums des Diamantkristalls mit Bor als p-Dotierstoff und Phosphor als n-Dotierstoff. In einem durch das U.S. Department of Energy finanzierten Projekt (FKZ: DE-AR0000455) werden die Herstellungsschritte für Diamantdioden erforscht und in Zusammenhang mit den erzielten Eigenschaften gebracht.

Drei auf plasmagestützter CVD basierende Dotierprozesse stehen aktuell im Fokus. Zwei der Prozesse erzeugen hochdotierte n- und p-Typ-halbleitende Regionen. Der dritte Prozess erzeugt niedrig dotierte Regionen vom p-Typ. Diese dotierten Regionen wurden mit Diagnostikmethoden analysiert, um deren Dotierstoffkonzentrationen und elektrische Eigenschaften zu bestimmen.

In einem Halleffektsystem werden die elektrischen Eigenschaften der Halbleiter von Raumtemperatur bis 700 K studiert. Messungen bei diesen höheren Temperaturen sind wichtig, da von Diamantbauelementen gerade in diesem Bereich besondere Leistungen erwartet werden.

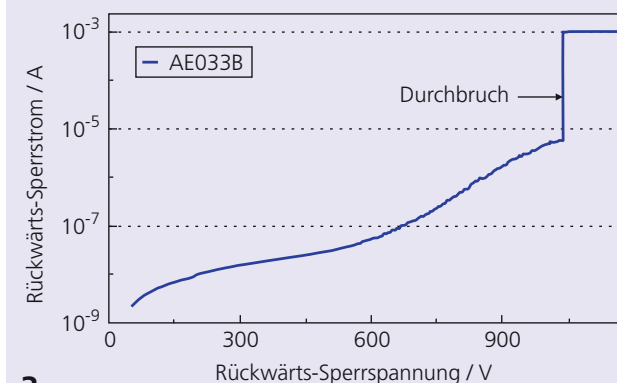


ERGEBNISSE

Mit 0,36 eV bzw. 0,58 eV sind die Aktivierungsenergien der Elemente Bor und Phosphor für die Freisetzung von Ladungsträgern so hoch, dass bei niedrigen Temperaturen (z. B. Raumtemperatur) nur wenige Ladungsträger verfügbar sind. Damit sind der elektrische Widerstand und die Verlustleistung in Vorwärtsrichtung eines solchen Gebietes hoch.

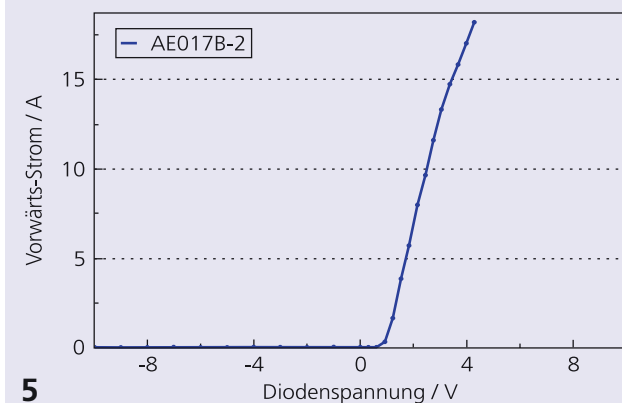
Abbildung 2 zeigt ein am CCD hergestelltes Feld von Schottky-Dioden mit jeweils 150 µm Durchmesser. Die leicht mit Bor dotierte Diamantregion (Dotierlevel = 10^{16} Atome cm^{-3}) ist 10 µm dick. Viele dieser Dioden haben im Test eine Durchbruchspannung (Spannung in Gegenrichtung) von mehr als 1000 V ausgehalten (siehe Abb. 3).

Stromfluss einer in Gegenrichtung vorgespannten Diamant-Schottky-Diode mit 1040 V Durchbruchspannung



Kontaktfläche von 1 mm x 2 mm, Abbildung 5 das dazugehörige Strom-Spannungs-Diagramm. Die Diode hat ebenfalls eine leichtdotierte Region von 10 µm Dicke mit einem Dotierlevel von 5×10^{17} Atome cm^{-3} . Der Vorwärtsstrom erreicht Werte bis 18 A.

Strom-Spannungs-Verlauf einer 1 mm x 2 mm großen Diamant-Schottky-Diode mit einem Vorwärtsstrom von 18 A



Die Ergebnisse demonstrieren die Herstellbarkeit von Diamant-Schottky-Dioden sowie erste vielversprechende Messdaten von Spannungs- und Stromkennwerten. Gegenwärtige Arbeiten fokussieren auf die Vereinigung von hohen Vorwärtsströmen und hohen Durchbruchsspannungen in ein und derselben Diode.

In hochdotierten Diamanten sind die Aktivierungsenergien erheblich geringer. Zudem werden bei höheren Betriebstemperaturen (z. B. durch Erwärmung) mehr Ladungsträger freigesetzt. Gleichzeitig hat Diamant eine sehr große Bandlücke, so dass das Material bei hohen Temperaturen stabil als Halbleiter funktioniert. Derartige Überlegungen werden beim Design der elektronischen Bauelemente aus Diamant berücksichtigt. Abbildung 4 zeigt eine Diamant-Schottky-Diode mit einer

- 2 *Diamant-Schottky-Dioden mit jeweils 150 µm Durchmesser*
- 4 *1 mm x 2 mm große Diamant-Schottky-Diode im Messaufbau*

KONTAKT

Prof. Timothy Grotjohn

+1 517 353 8906

tgrotjohn@fraunhofer.org

