

PRÄZISE BOR-DOTIERUNG VON EINKRISTALLINEN DIAMANTEN

DIE AUFGABE

Diamant ist eines der vielversprechendsten Materialien für Anwendungen in der Hochtemperatur-, Hochleistungs- und Hochfrequenzelektronik. Die einzigartige Kombination von herausragenden physikalischen Eigenschaften (Abb. 1) erlaubt den Entwurf elektronischer Bauteile, welche das Leistungsvermögen anderer Halbleiterelemente (Si, SiC und GaN) deutlich übersteigen. Denkbar ist eine neue Generation von Hochleistungselektronik, welche mit Spannungen von mehreren 10 kV und einer Leistung von 100 kW bis 5 MW betrieben werden kann. Diamantbasierte Hochleistungselektronik eignet sich für den Einsatz bei höheren Temperaturen, ohne dass externe Kühlung und extensive Schutzschaltungen notwendig sind, was Gewicht und Kosten spart.

Um das volle Potenzial von Diamantelektronik nutzen zu können, müssen die elektrischen Eigenschaften von Diamant, z. B. die elektrische Durchbruchfeldstärke sowie die Ladungsträgerleitfähigkeiten, maximiert und präzise definierte Dotierprofile bei der p- und n-Dotierung erreicht werden. Die Herstellung von Dotierprofilen mit exakten lateralen und vertikalen Ausmaßen sowie definierten Akzeptor- und Donorkonzentrationen sind der Schlüssel, um Halbleiterübergänge in Dioden und Transistoren mit kontrollierten elektrischen Feldern und Durchbruchfeldstärken zu erreichen.

Physikalische Eigenschaften ausgewählter Halbleiter

Eigenschaften	Si	GaAs	6H-SiC	GaN	Diamant
Bandlücke, E_g (eV)	1,12	1,43	3,03	3,45	5,45
Durchbruchfeldstärke, E_c (kV cm ⁻¹)	300	400	2500	2000	10000
thermische Leitfähigkeit, λ (W cm ⁻¹ K)	1,5	0,46	4,9	1,3	22

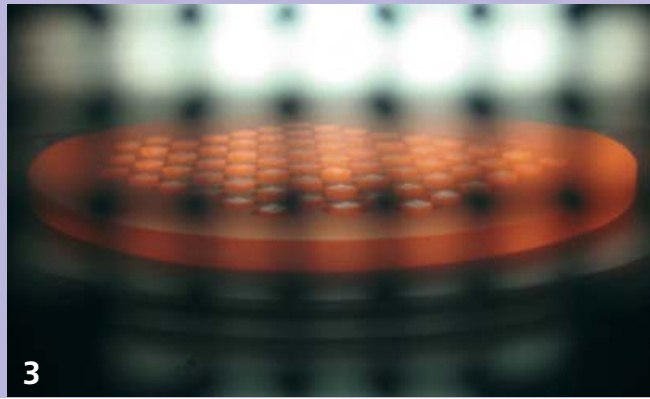
1

UNSERE LÖSUNG

Diamant wird typischerweise mit Bor p- und mit Phosphor n-dotiert. Normalerweise erfolgt die Dotierung in-situ während der homoepitaktischen Diamantsynthese durch die Zugabe von Dotierquellen (z. B. in Form eines Prozessgases) während des CVD-Prozesses. Die direkte Dotierung während des Wachstums hat allerdings einen entscheidenden Nachteil: Es ist unmöglich das laterale Dotierprofil zu variieren. Dies steht in starkem Kontrast zu anderen Halbleitermaterialien, wo die Dotierung typischerweise mittels Ionenimplantation der Dotieratome und anschließendem thermischen Ausheilen durchgeführt wird.

Leider ist diese Methode für Diamant nur schwer umsetzbar, da Diamant unter Atmosphärendruck nur eine metastabile Variante des Kohlenstoffs ist. Dies wirkt sich vor allem auf das Ausheilen aus, bei welchem sich Diamant in Graphit umwandeln kann. Außerdem ist die Diffusion von Dotieratomen in Diamant problematisch, da die hohe Atomdichte zu sehr niedrigen Diffusionsraten führt, außer wenn der Diamant sehr hohen Temperaturen ausgesetzt wird, bei denen wiederum eine Umwandlung in Graphit stattfinden kann.

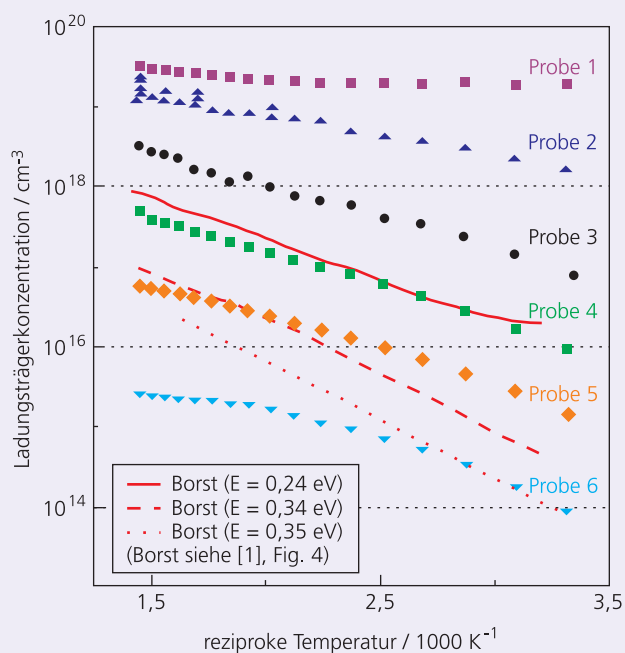
Das Fraunhofer USA Center for Coatings and Diamond Technologies CCD erhielt gemeinsam mit der Michigan State University MSU ein 4-Jahres Forschungsprojekt der US National Science Foundation (NSF), bei dem neuartige Dotiermethoden für Diamant zur Realisierung von Hochleistungselektronik studiert werden. Die Schwerpunkte liegen auf einer weiteren Optimierung des Dotierprozesses auch mit alternativen Methoden wie der Eindiffusion von einer festen Dotierquelle und der Ionenimplantation mit Dotieratomen.



ERGEBNISSE

Die Synthese von dotiertem Diamant mittels in-situ-Dotierung wird am Fraunhofer CCD routinemäßig durchgeführt. Während der CVD-Diamantsynthese (Abb. 3) werden die Dotiergase Diboran (für n-Dotierung) sowie Phosphin (für p-Dotierung) zugegeben. Sowohl mit p- als auch mit n-Dotierung wurden Dotierkonzentrationen zwischen 10^{15} cm^{-3} und 10^{20} cm^{-3} erreicht. Abbildung 2 zeigt die Störstellenkonzentration von Bor-dotierten Diamantfilmen mit verschiedenen Dotierkonzentrationen, gemessen mittels Hall-Effekt. Der Schwerpunkt der Studie zur in-situ-Dotierung liegt auf der Optimierung des Wachstumsprozesses, um die Defektdichte in der gewachsenen epitaktischen Schicht zu reduzieren. Außerdem ist es wichtig die einzelnen Prozessparameter sukzessiv zu variieren, so dass definierte Dotierkonzentrationen abgeschieden werden können.

Ladungsträgerkonzentration in dotierten Diamanten in einem Temperaturfenster zwischen 300 K (Raumtemperatur) und 700 K. Die verschiedenen Proben wurden mit unterschiedlichen Dotiergaskonzentrationen erzeugt.



2

Bei der Eindiffusion werden Kohlenstoffschichten, welche Bor oder Phosphor enthalten, auf der zu dotierenden Oberfläche abgeschieden. Anschließend wird der Verbund in einem Ofen unter Stickstoffatmosphäre bei Temperaturen zwischen 1000 °C und 1600 °C erwärmt. Das Hauptziel der Studie ist die Quantifizierung des Diffusionskoeffizienten von Bor und Phosphor in den Diamanten in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Analyse basiert weitestgehend auf SIMS und Kapazitäts-Spannungsmessungen sowie der Bestimmung von Materialkonstanten mittels Hall-Effekt.

Der bisher nur für die verlustfreie Separierung von Diamantwafern angewendete Ionenimplantationsprozess wird so modifiziert, dass Dotieratome nahe der Oberfläche implantiert werden. Eine homogene Verteilung der Dotieratome innerhalb der leitfähigen Schicht wird mittels Hochtemperaturerwärmung erreicht. Die Dotierung der leitfähigen Schicht mit sehr hohen Dosen (10^{19} cm^{-3}) und der Einbau der Fremdatome in das Diamantgitter ist die größte Herausforderung innerhalb dieser Studie, da Ionenbestrahlung mit zu hohen Dosen das Kristallgitter zerstört und diese Regionen in Graphit umwandelt.

[1] Borst, T. H.; Weis, O.: *Electrical characterization of homoepitaxial diamond films doped with B, P, Lo and Na during crystal growth, Diamond and Related Materials* 4 (1995) 948-953

3 Homoepitaktische Synthese von 70 Diamantkristallen mit der Abmessung $3,5 \times 3,5 \text{ mm}^2$

KONTAKT

Prof. Dr. Timothy Grotjohn

+1 517 353 8906

tgrotjohn@fraunhofer.org

