Presseinformation

3D-Detektor für die Neutrinoforschung

Mikrochips mit Tiefenstruktur sollen Teilchen nach ihrem Einfallswinkel unterscheiden

Fraunhofer-Forschende haben gemeinsam mit der Universität Münster einen waferbasierten Fertigungsprozess für eine neuartige, winkelabhängig messende Siliziumdiode entwickelt. Die Energiefilter-Diode soll künftig dabei helfen, Signal- und Hintergrundelektronen zu unterscheiden, die mit nahezu gleicher Energie, aber unterschiedlichen Einfallswinkeln auf einen Detektor treffen. Eine mögliche Anwendung ist das internationale KATRIN-Experiment zur Bestimmung der Neutrinomasse. Im Reinraum des Fraunhofer IZM wurden dafür tiefe, wabenförmige Mikrostrukturen in großflächige Detektorwafer eingebracht, elektrisch passiviert und für weitere Untersuchungen an die Universität Münster übergeben.

Das KATRIN-Experiment untersucht das Elektronenspektrum des Tritium-Betazerfalls nahe seiner Endpunktenergie von 18,57 Kiloelektronenvolt. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf die Masse des Neutrinos ziehen. Die Messung wird dadurch erschwert, dass bestimmte Hintergrundelektronen mit nahezu derselben kinetischen Energie wie die gesuchten Signalelektronen am Detektor eintreffen. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch in ihrem Einfallswinkel: Ein großer Teil der Hintergrundelektronen erreicht den Detektor mit Winkeln von typischerweise weniger als zehn Grad, während Signalelektronen Winkel bis etwa 50 Grad aufweisen können.

Konventionelle Detektoren liefern bei niedrigen Teilchenenergien, starken Magnetfeldern und Ultrahochvakuumbedingungen keine geeignete Winkelinformation. Genau hier setzt der aktive transversale Energiefilter an. In die Oberfläche einer Si-PIN-Diode werden tiefe, hexagonale Vertiefungen geätzt. Elektronen mit einem größeren Einfallswinkel treffen mit höherer Wahrscheinlichkeit auf die aktiven Seitenwände der Wabenstruktur und erzeugen dort ein messbares Signal. Elektronen mit kleinen Winkeln gelangen dagegen überwiegend bis zum inaktiven Boden der Struktur.

Frühere Untersuchungen an kleinformatigen Prototypen der Universität Münster haben bereits eine winkelabhängige Detektionseffizienz nachgewiesen. Simulationen zeigen außerdem, dass eine für das KATRIN-Experiment optimierte Struktur den Elektronenuntergrund um das Drei- bis Fünffache reduzieren könnte. Diese Abschätzung hängt von der Zusammensetzung des Hintergrunds ab.

Fraunhofer IZM überträgt das Konzept auf Wafermaßstab

Die zentrale Aufgabe des Fraunhofer-Instituts für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM bestand darin, das physikalische Prinzip in einen reproduzierbaren, waferkompatiblen Fertigungsprozess zu überführen. Ausgangspunkt waren großflächige Si-PIN-Detektorwafer mit einer ungewöhnlichen 24-seitigen Geometrie. Da dieses Sonderformat nicht direkt mit allen Anlagen des 200-Millimeter-Reinraums bearbeitet werden konnte, entwickelten die Fachleute ein temporäres Trägerkonzept: Die Detektorwafer wurden mit Wachs auf 200-Millimeter-Siliziumwafer gebondet und anschließend gemeinsam strukturiert.

Weil lediglich zwei Detektorwafer zur Verfügung standen, wurde die vollständige Prozesskette zunächst an eigens hergestellten Testwafern entwickelt. Dazu gehörten Lithografie, tiefes reaktives Ionenätzen, die Entfernung von Prozessrückständen, das Ablösen vom Trägerwafer sowie die Passivierung der entstandenen Seitenwände. Erst nach der Bewertung und Optimierung der einzelnen Schritte wurde der Prozess auf die eigentlichen Detektoren übertragen.

250 Mikrometer tiefe Waben im Silizium

Eine besondere Herausforderung war die Herstellung annähernd senkrechter, defektarmer Seitenwände bei einer Zieltiefe von rund 250 Mikrometern. Für die Lithografie wählten die Forschenden einen Positivlack, der nahezu vertikale Flanken und eine ausreichende Beständigkeit für den anschließenden Tiefenätzprozess bot. Damit sich die wabenförmige Maskenstruktur möglichst genau in das Silizium übertragen ließ, mussten auch die besonderen Belichtungsbedingungen des erhöht auf dem Träger sitzenden Detektorwafers berücksichtigt werden.

Für das tiefe reaktive Ionenätzen, kurz DRIE, entwickelte das Team am Fraunhofer IZM einen zyklischen Prozess aus Passivierung, anisotropem und isotropem Ätzen. Mithilfe eines statistischen Versuchsplans wurden fünf Prozessparameter systematisch variiert. Untersucht wurden unter anderem Prozessdruck, Plasmaleistung, Gasfluss und Wafertemperatur. Die Ergebnisse zeigten einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Wafertemperatur und der Bildung unerwünschter Siliziumstrukturen, des sogenannten „Silicon Grass“. Durch die Anpassung der Prozessparameter gelang es, ein Prozessfenster für weitgehend vertikale Seitenwände mit minimierten Defekten zu identifizieren.

Passivierung schützt die empfindlichen Seitenwände

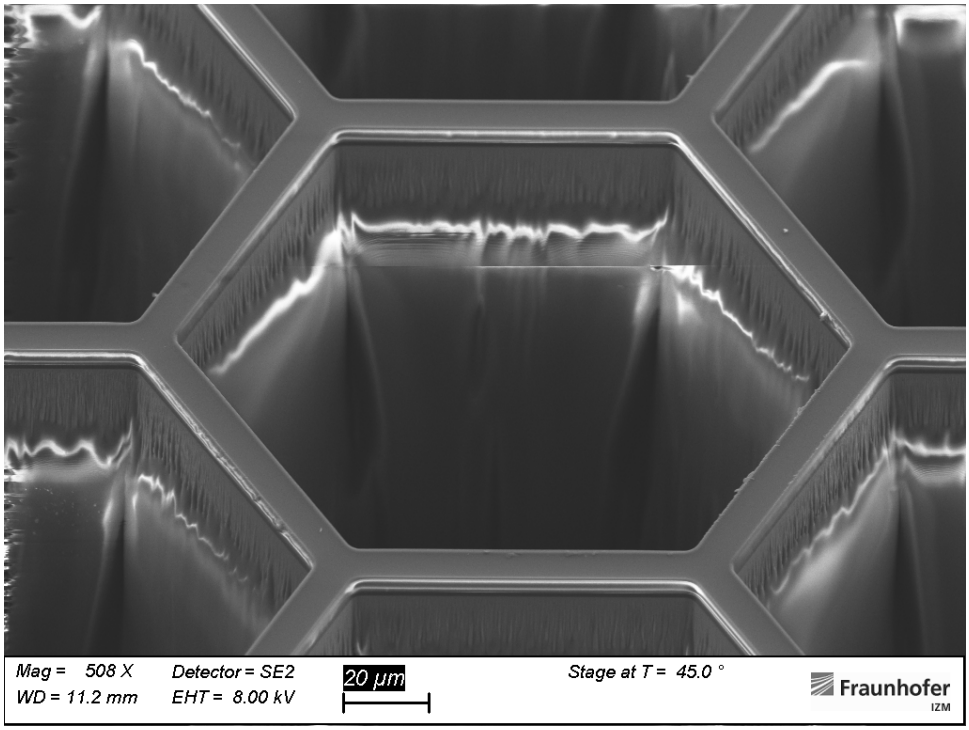
Nach dem Ätzen wurden die Seitenwände mit Siliziumdioxid passiviert. Diese Isolationsschicht soll Oberflächenzustände absättigen, Aufladungseffekte begrenzen und oberflächenbedingte Dunkelströme reduzieren. Eine thermische Oxidation kam wegen der bereits vorhandenen Metallisierung und des begrenzten Temperaturbudgets der Detektorwafer nicht infrage. Das Team setzte deshalb eine plasmaunterstützte Gasphasenabscheidung (PECVD) bei 175 Grad Celsius ein.

Bei tiefen Strukturen ist eine gleichmäßige Beschichtung der oberen, mittleren und unteren Seitenwandbereiche besonders anspruchsvoll. Durch die Anpassung des PECVD-Prozesses erreichte das Team eine verbesserte Schichtabdeckung. Gemessen wurden 161 Nanometer im oberen, 80 Nanometer im mittleren und 55 Nanometer im unteren Seitenwandbereich. Der Prozess ließ sich mit den bereits metallisierten Si-PIN-Dioden kombinieren.
In mehreren Designstufen bauten die Forschenden am Fraunhofer IZM erste Detektorwafer auf, mit denen nun Test-Messungen an der Universität Münster stattfinden.

Technologische Grundlage für neuartige Teilchendetektoren

Mit der Entwicklung der vollständigen Prozesskette hat das Fraunhofer IZM eine technologische Grundlage für dreidimensionale, winkelabhängige Siliziumdetektoren geschaffen. Die Arbeiten verbinden anwendungsorientierte Nanofertigung mit den Anforderungen der experimentellen Teilchenphysik. Besonders wertvoll sind dabei nicht nur die erfolgreich etablierten Lithografie-, DRIE- und PECVD-Prozesse, sondern auch die gewonnenen Erkenntnisse über das Zusammenspiel von Mikrogeometrie, Halbleiterschichtfolge und Signalmessung.

Die 3D-Energiefilter-Diode ist damit noch kein einsatzbereiter Detektor. Die entwickelte Fertigungstechnologie und die Erkenntnisse aus dem ersten Demonstrator bilden jedoch eine belastbare Grundlage, um die Bauelementarchitektur gezielt weiterzuentwickeln und das Potenzial der winkelabhängigen Teilchendetektion experimentell zu erschließen.



Waben im Mikrometermaßstab: Mit einem optimierten Tiefenätzprozess erzeugten Forschende des Fraunhofer IZM rund 250 Mikrometer tiefe 3D-Strukturen in einem Siliziumdetektor. Die aktiven Seitenwände sollen Elektronen abhängig von ihrem Einfallswinkel erfassen.
© Fraunhofer IZM | Bild in Farbe und Druckqualität: www.izm.fraunhofer.de/pics

Die **Fraunhofer-Gesellschaft** mit Sitz in Deutschland ist eine der führenden Organisationen für anwendungsorientierte Forschung. Die 1949 gegründete Organisation betreibt in Deutschland derzeit 74 Institute und Forschungseinrichtungen. Die gegenwärtig knapp 30.000 Mitarbeitenden, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Finanzvolumen von 3,6 Mrd. €. Davon fallen 3,2 Mrd. € auf den Bereich Vertragsforschung.

Das **Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM** ist ein weltweit führendes Forschungsinstitut im Bereich Electronic Packaging, das hochintegrierte und multifunktionale elektronische Systeme entwickelt. Mit Fokus auf Miniaturisierung, Zuverlässigkeit und modernster Laborausstattung unterstützt das Institut die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands und Europas.

Kontakt

Fachliche Ansprechperson
Lucas Herrmann
Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Wafer Level System Integration
Tel. +49 30 46403-652
lucas.herrmann@izm.fraunhofer.de

Redaktionelle Ansprechperson
Georg Weigelt
Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM
Marketing & PR
Tel. +49 30 46403-279
georg.weigelt@izm.fraunhofer.de

https://www.izm.fraunhofer.de/