

Metrologie zur Identifikation und Charakterisierung von Materialdefekten an GaN- und SiC-Wafern

Jana Grundmann, Tim Käseberg, Bernd Bodermann

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany

<mailto:jana.grundmann@ptb.de>

Zur Detektion von Materialdefekten auf Verbindungshalbleitern ist eine Defektinspektion mit hoher Empfindlichkeit nötig. Unterschiedliche Materialdefekte werden mit verschiedenen Messverfahren analysiert und die Eignung der Verfahren untersucht.

1 Einleitung

Die Leistungselektronik ist eine Schlüsseltechnologie in vielen Bereichen unseres täglichen Lebens, wie zum Beispiel in der intelligenten Energieverteilung oder der Elektromobilität. Sie wird zur Zeit von Silizium (Si) als Material dominiert. Es findet aber immer mehr ein Übergang zu Verbindungshalbleitern mit großer Bandlücke statt, zu denen auch Galliumnitrid (GaN) und Siliziumcarbid (SiC) gehören. Diese Verbindungshalbleiter haben gegenüber Silizium einige Vorteile: Sie können bei höheren Spannungen, Temperaturen und Frequenzen arbeiten und ihre Ausgangsprodukte weisen weniger Energieverluste auf. Nachteile dieser Materialien sind, dass sie empfindlicher auf nanoskalige Materialfehler reagieren, woraus derzeit i. Allg. eine deutlich geringere Produktionsausbeute und Betriebssicherheit resultiert. Aus diesem Grund wird eine effektive Defektinspektion mit hoher Empfindlichkeit benötigt. Dafür werden drei verschiedene Probenarten aus den Materialien GaN und SiC mit unterschiedlichen Messverfahren untersucht und analysiert, welche Verfahren am geeignetsten sind.

2 Defekttypen der untersuchten Proben

Bei den Defekten auf SiC unterscheidet man zwischen kristallographischen Defekten im Wafer und Oberflächendefekten. Kristallographische Defekte können sich während des epitaktischen Wachstums auf die Waferoberfläche ausdehnen und formen so die Oberflächendefekte. Auf den hier untersuchten Proben sind verschiedene Oberflächendefekte vorzufinden, am häufigsten treten Partikel und Polytype Inclusions (siehe Abb. 1 a)) mit einer Häufigkeit von $36,9 \text{ cm}^{-2}$ und $1,2 \text{ cm}^{-2}$ auf.

GaN ist nur schwer als Einkristall zu formen, weswegen ein Fremdsubstrat für die Herstellung nötig ist. Hier liegen als Substrate Si und SiC vor.

Die Defekte auf GaN-on-Si entstehen aufgrund von Gitter- und thermischen Fehlanpassungen. Die Gitterparameter von GaN und Si liegen mit $3,189 \text{ \AA}$ und $3,840 \text{ \AA}$ relativ weit auseinander [1, Kap. 3.3.3].

Werden diese Materialien aufeinander aufgebracht, können aufgrund der Fehlanpassungen Versetzungen entstehen, die sich bis an die Oberfläche ausdehnen. Die hier untersuchten Proben haben eine unbekannte Defektdichte. Ein Mikroskopbild mit entsprechenden Defekten ist in Abb. 1 b) zu sehen.

Bei den GaN-on-SiC Proben muss beachtet werden, dass GaN entweder in der Wurtzit- (hexagonale Einheitszelle) oder Zinkblende-Struktur (kubische Einheitszelle) kristallisiert. Die Zinkblende-Struktur wurde durch epitaktisches Wachstum auf [011] Kristallebenen kubischer Substrate, wie z. B. SiC, stabilisiert. Dadurch wurde die intrinsische Tendenz von GaN zur Bildung der Wurtzit-Struktur durch eine topologische Kompatibilität überwunden. Die Wurtzit-Struktur entsteht dann nur noch an erweiterten Defektstellen [1, Kap. 1.1]. Die Defektdichte ist auch hier unbekannt. In Abb. 1 c) ist ein Mikroskopbild von der Oberfläche dargestellt.

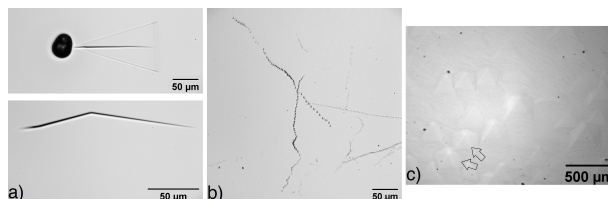


Abb. 1 Mikroskopbilder der Defekte. a) SiC, oben: Partikel mit Polytype Inclusion, unten: Polytype Inclusion; b) GaN-on-Si; c) GaN-on-SiC, Pfeile zeigen auf Wurtzit-Struktur

3 Messergebnisse

An den gezeigten Proben wurden Messungen mit ausschließlich optischen Methoden durchgeführt. Diese bieten die Vorteile zerstörungsfrei und schnell zu messen. Dazu gehören mit einem Scatterometer und einem Müller-Matrix-Ellipsometer zwei integrierende Verfahren mit einem Beleuchtungspunkt von jeweils etwa 1 mm Durchmesser. In der Scatterometrie misst man die Beugungseffizienzen nach der Wechselwirkung des Lichts mit der Probe und in der Ellipsometrie wird die Polarisationsänderung des Lichts nach der Reflexion oder Transmission

an der Probe gemessen. Mit beiden Messverfahren wurden die SiC Proben nicht gemessen, da hier die Defektdichte bereits bekannt war und sie für ein integrierendes Verfahren zu gering ist. Als dritte Methode wurde abbildende Ellipsometrie als bildgebendes eher lokales Messverfahren eingesetzt. Diese kombiniert ein Müller-Matrix-Ellipsometer mit einem Mikroskop, sodass nicht über den gesamten Beleuchtungspunkt integriert wird, sondern für jeden Pixel der Kamera ein eigenes Ergebnis erhalten wird.

3.1 Scatterometer

Als Messergebnis vom Scatterometer ist in Abb. 2 die Signalstärke über den Winkeln des Detektor-Arms aufgetragen. Die Messungen sind in Reflexion bei verschiedenen Einfallswinkeln und einer Wellenlänge von 266 nm durchgeführt worden. Dargestellt sind die Ergebnisse an GaN-on-Si, da die an GaN-on-SiC nahezu identisch sind. Zu sehen sind zwei Peaks neben der nullten Beugungsordnung, die sich im Bereich von Detektor-Winkeln größer als $0,8^\circ$ befindet und eine deutlich höhere Intensität aufweist. Aufgrund des integrierenden Verfahrens kann davon ausgegangen werden, dass die hier zu sehenden Effekte ihren Ursprung im Material haben und nicht in den Defekten.

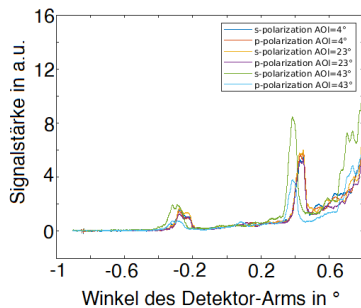


Abb. 2 Messergebnisse am Scatterometer am Beispiel GaN-on-Si (AOI: angle of incidence).

3.2 Müller-Matrix-Ellipsometer

Als Ergebnis der Ellipsometrie-Messungen sind der Polarisationsgrad und die Müller-Matrix in Abb. 3 dargestellt. Die Messungen an den GaN-on-Si Proben sind in Reflexion bei einem Einfallswinkel von 50° durchgeführt worden. Hier treten Oszillationen ab einer Wellenlänge von 380 nm auf. Der Polarisationsgrad bis 380 nm ist nahezu eins. Das bedeutet, dass die Probe kaum Depolarisation erzeugt. Die Müller-Matrix weist im Bereich bis 380 nm retardierende und polarisierende Eigenschaften auf. Diese Effekte lassen vermutlich wiederum auf das Probenmaterial zurückschließen und haben ihre Ursache nicht in den Defekten.

Bei den GaN-on-SiC Proben sind die Messungen in Transmission durchgeführt worden. Der Polarisationsgrad ist ebenfalls nahezu eins, auch hier tritt demnach kaum Depolarisation auf. Die Müller-Matrix ist eine Einheitsmatrix, demzufolge

hat die Probe keine Auswirkung auf das Messergebnis. Dementsprechend sind auch hier keinerlei Einflüsse von den Defekten zu erkennen.

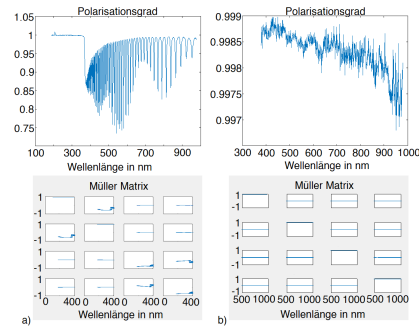


Abb. 3 Messergebnisse am Müller-Matrix-Ellipsometer. a) GaN-on-Si; b) GaN-on-SiC

3.3 Abbildendes Ellipsometer

Die Messungen am abbildenden Ellipsometer sind bei einer Wellenlänge von 550 nm und einem Einfallswinkel von 50° durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt. Bei allen Proben sind die Defekte deutlich zu erkennen sowie ihre Einflüsse auf die Polarisation. Bei den GaN-on-SiC Proben ist die untere GaN-Pyramide eine Wurtzit- und die obere eine Zinkblende-Struktur. Die beiden Typen unterscheiden sich durch den Sprung in der Polarisation, den die Wurtzit-Struktur aufweist und die Zinkblende nicht.

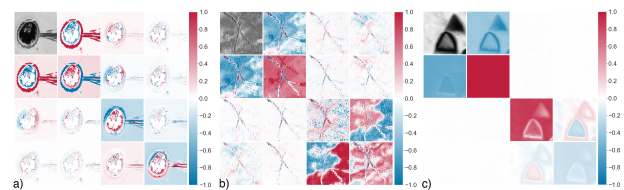


Abb. 4 Messergebnisse am abbildenden Ellipsometer. a) SiC, 20x Vergrößerung; b) GaN-on-Si, 20x Vergrößerung; c) GaN-on-SiC, 10x Vergrößerung

4 Diskussion

Die integrierenden Verfahren liefern aufgrund der geringen Defektdichte keine oder nur geringe Informationen über die Defekte. Die abbildende Ellipsometrie hingegen liefert lokale Informationen über die jeweiligen Defekte und ist damit ein sehr vielversprechendes Verfahren für effiziente Defektinspektion.

Acknowledgement: This project (20IND09) has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

Literatur

[1] H. Morkoc, *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices* (WILEY-VCH, 2008).