

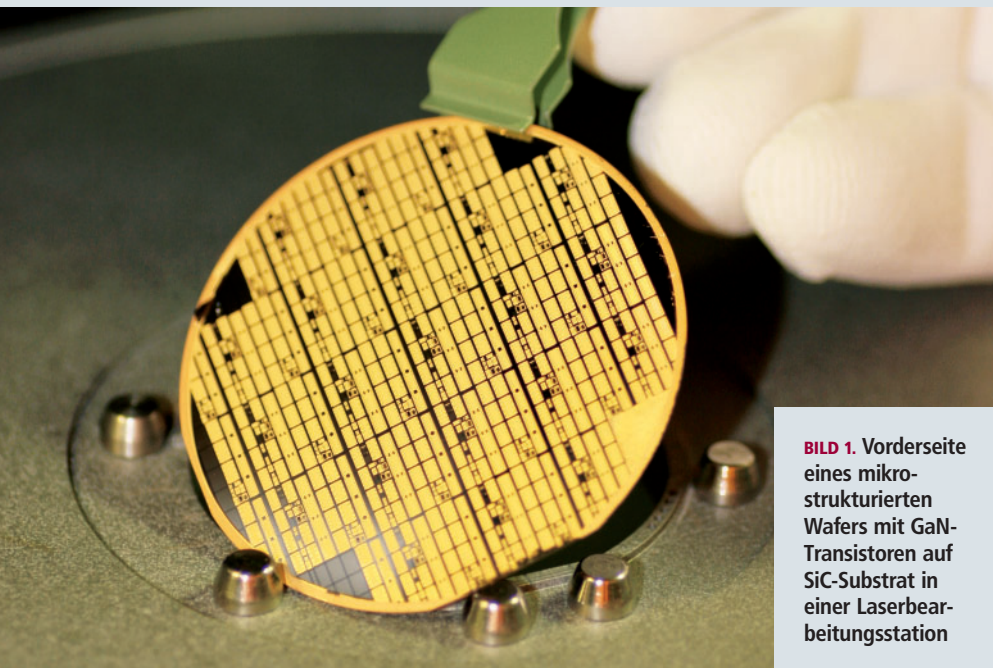
## LASER-MIKROSTRUKTURIERUNG IN DER BAELEMENTEFERTIGUNG

# Mehr Flexibilität mit Laser-Direktstrukturierung

OLAF KRÜGER

In der Mikrostrukturierung sehr harter und chemisch stabiler Materialien für elektronische oder optoelektronische Bauelemente stoßen konventionelle Verfahren wie die Lithografie oder das Ätzen

schnell an ihre Grenzen. Eine sinnvolle Ergänzung findet sich in der direkten Bearbeitung mit gepulster ultravioletter Laserstrahlung.



**BILD 1.** Vorderseite eines mikrostrukturierten Wafers mit GaN-Transistoren auf SiC-Substrat in einer Laserbearbeitungsstation

Moderne Laser-Direkterschreibverfahren erlauben die Modifizierung, Entfernung sowie den Aufbau oder die Synthese von Material zur Herstellung von  $\mu\text{m}$ - und Sub- $\mu\text{m}$ -Strukturen auf Oberflächen oder im Volumen ohne Verwendung von Masken oder Formen [1]. Für den Werkstoffabtrag im  $\mu\text{m}$ -Maßstab bietet der Laser im Gegensatz zu konventionellen mechanischen, physikalischen und chemischen Abtragsverfahren die Möglichkeit, auch sehr harte, spröde und chemisch stabile Werkstoffe zu bearbeiten.

GaN-basierte elektronische und optoelektronische Bauelemente werden gegenwärtig auf Siliziumcarbid (SiC)- und Saphir-Substraten hergestellt. Beide Substratmaterialien sind sowohl hart als auch inert und lassen sich nur eingeschränkt mechanisch oder chemisch bearbeiten. SiC ist praktisch gegen alle

nasschemischen Ätzreagenzien resistent und wird deshalb oft als das beste Ätzstopp-Material der Natur bezeichnet. Die Nutzung von Laserstrahlung bietet eine Ein-Schritt-Alternative für plasma- und nasschemische Ätzprozesse, bei denen in der Regel erst Fotolackmasken erzeugt, belichtet, entwickelt und wieder entfernt werden müssen.

## Laser-Mikrostrukturierung für extrem widerstandsfähige Materialien

Für die Produktion von Hochleistungstransistoren (High Electron Mobility Transistors; HEMTs) suchen die Hersteller nach Wegen, die Prozesszeiten und die kritischen Dimensionen der Bauelemente zu reduzieren. Beim Übergang vom etablierten Galliumarsenid auf das leistungsfähigere GaN-Materialsystem spielt die Prozessierung von Vias (Vertical Interconnect Access; vertikaler Durch-

gangskontakt) wegen ihres erheblichen Zeitaufwands eine bedeutende Rolle. Dieser Rückseitenprozess findet statt, nachdem der Vorderseitenprozess (>Front-End<) abgeschlossen ist und funktionstüchtige Bauelemente entstanden sind. Für die Durchführung eines elektrischen Kontakts vom Source-Kontakt des Transistors auf der Vorderseite zum Massekontakt auf der Rückseite des Bauelementes besteht die Notwendigkeit, das Trägermaterial aus SiC sowie den darüber liegenden GaN-Epitaxieschichtstapel zu durchbohren. Wegen der geringen Plasma-Ätzraten von 0,2 bis 1,3  $\mu\text{m}/\text{min}$  muss das SiC-Substrat bislang aufwendig auf 50 bis 100  $\mu\text{m}$  abgedünnt und mit einer sehr widerstandsfähigen Metallmaske versehen werden, die den langen Ätzzeiten von bis zu vier Stunden standhält. Ätzen von Vias durch 400  $\mu\text{m}$  dickes SiC ist derzeit nicht möglich. Mit der Laserablation existiert hierfür jedoch eine wirtschaftliche Lösung. Da das Laserbearbeitungssystem die konventionellen Strukturierungsverfahren in der Bauelementefertigung ergänzen und in bestehende Prozesse integriert werden soll, muss es zur bestehenden Technologie kompatibel sowie reinraumtauglich sein. Schwerpunktmäßig steht die Bearbeitung von harten und inertem Werkstoffen wie Siliziumcarbid (SiC) und Saphir im Mittelpunkt. Einkristallines SiC (4H-Polytyp) besitzt als direkter Halbleiter eine Bandlücke von 3,23 eV, was einer Absorptionskante bei etwa 380 nm entspricht. Ultraviolettes (UV-) Laserlicht wird daher gut absorbiert und ermöglicht außerdem die

gewünschte  $\mu\text{m}$ -Auflösung. Wegen der sehr guten Strahleigenschaften, seiner ausgereiften Technik und hohen Verlässlichkeit wurde für die hier gezeigten Anwendungen ein diodengepumpter Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 355 nm ausgewählt, der eine Durchschnittsleistung von 4,5 W bei einer Puls-Wiederholfrequenz von 25 kHz und Impulslängen von weniger als 30 ns bereitstellt. Der Laser ist in eine kommerzielle Laser-Bearbeitungsstation »ILS 500 Air« von Innolas aus Krailling integriert (Bild 1). Der Strahl wird auf einen Durchmesser von circa 15  $\mu\text{m}$  fokussiert und durch Kombination der Bewegung von Werkstück (luftgelagerter Kreuztisch) und Laserstrahl (Galvanometer-Ablenkkopf)  $\mu\text{m}$ -genau platziert. Ein System aus vier Kameras mit Bilderkennung ermöglicht die automatische Positionierung des Laserstrahls. Dies dient sowohl für eine Vorderseitenjustage als auch für eine Vorder- zu-Rückseitenjustage, bei der die Markenerkennung auf der Vorderseite erfolgt und der Laserstrahl auf die Rückseite gerichtet wird. Über den Bearbeitungsbereich von 200 mm liegt die Positioniergenauigkeit des Laserfokuszentrums bei  $\pm 1 \mu\text{m}$  [2].

### $\mu\text{m}$ -genaue Bohrungen für »Hohlknoten-Vias«

Die zu bearbeitenden Wafer haben in den vorliegenden Fällen einen vollständigen Front-End-Prozess durchlaufen, sie tragen somit auf ihrer Vorderseite funktionstüchtige Bauelemente aus 2 bis 3  $\mu\text{m}$  dicken aktiven AlGaIn/GaN-Schichten auf etwa 400  $\mu\text{m}$  dicken SiC- oder Saphir-Substraten. Die Aufgabe des Laserprozesses ist es, das Substratmaterial auf der Waferrückseite zu bearbeiten, und zwar positionsgenau zu den Strukturen auf der Vorderseite. Dafür werden die Layoutinformationen der

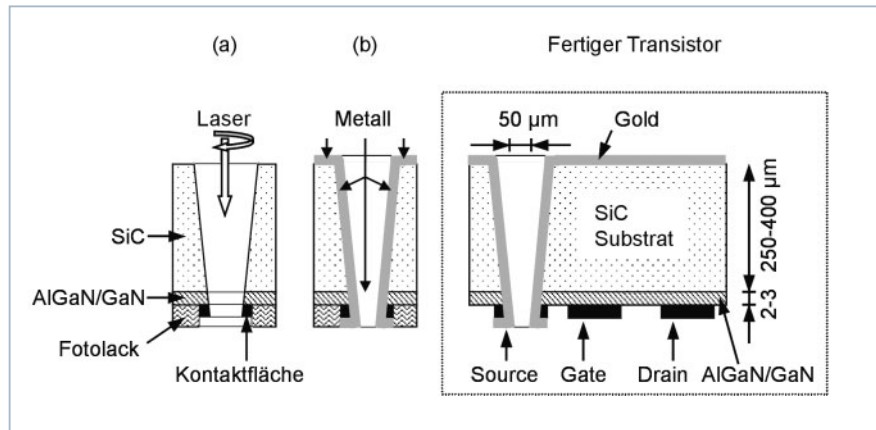


BILD 2. Herstellungsprozess sogenannter Hohlknoten-Vias

Bauelemente genutzt und können gegebenenfalls mithilfe einer CAD-Software aufgearbeitet beziehungsweise modifiziert werden. Der Programmcode für die CNC-Steuerung der Laser-Bearbeitungsstation

### INSTITUT

Ferdinand-Braun-Institut  
für Höchstfrequenztechnik  
12489 Berlin  
Tel. +49/(0) 30/63 92-26 00  
Fax +49/(0) 30/63 92-26 02  
www.fbh-berlin.de

wird mit dem integrierten Postprozessor automatisch generiert. Nach dem Programmstart erfolgt zunächst die Grobjustage zur Feststellung der Lage des Wafers auf dem Kreuztisch und dann jeweils vor der Laser-

bearbeitung die Feinjustage in den einzelnen Bearbeitungsfeldern (Shots).

Der gepulste Laserstrahl wird verwendet, um Loch für Loch direkt von der Waferrückseite durch das 400  $\mu\text{m}$  dicke SiC zu bohren. Dazu wird der punktförmige Laserstrahl mit einer Pulsenergie von circa 65  $\mu\text{J}$  bei einer Puls-Wiederholfrequenz von 20 kHz so auf der Probe bewegt, dass konische Löcher mit Durchmessern von circa 80 bis 90  $\mu\text{m}$  auf der Lasereintrittsseite und circa 20 bis 30  $\mu\text{m}$  auf der Austrittsseite entstehen (Bild 2). Vor dem Laserbohren werden die Bauelemente mit Fotolack bedeckt, um sie vor Partikelablagerungen (Debris) zu schützen. Die Bohrungen werden so platziert, dass sie mittig durch die Source-Kontakte der Transistoren auf der Vorderseite stoßen, wo der Schutzlack zuvor geöffnet wurde. Um eine Bohrung in 400  $\mu\text{m}$  dickes SiC herzustellen, werden circa 3 s benötigt. Damit kann innerhalb von drei Stunden ein typischer 2-Zoll-Wafer mit circa 3600 Löchern gebohrt werden. Der Bohrprozess wurde hier allerdings nicht auf hohen Durchsatz optimiert. Nach dem Laserbohren werden Ablationsrückstände auf der Probe und in den Bohrlöchern nasschemisch mit Flusssäure entfernt. Die elektrische Verbindung durch den Wafer hindurch erfolgt durch Aufdampfen einer dünnen Metallschicht auf die Waferrückseite und die Lochwände, die dann durch eine etwa 5  $\mu\text{m}$  dicke Goldschicht galvanisch verstärkt wird [3]. Auf diese Weise konnten Vias, die in ihrer Form Hohlknoten ähneln, mit Aspektverhältnissen von bislang bis circa 8 erzeugt werden (Bild 3).

### Keine Mikrorisse oder Materialdegeneration

Der Vergleich der elektrischen Kennlinien verschiedener AlGaIn/GaN-HEMTs mit und ohne Vias lässt keine laserinduzierte

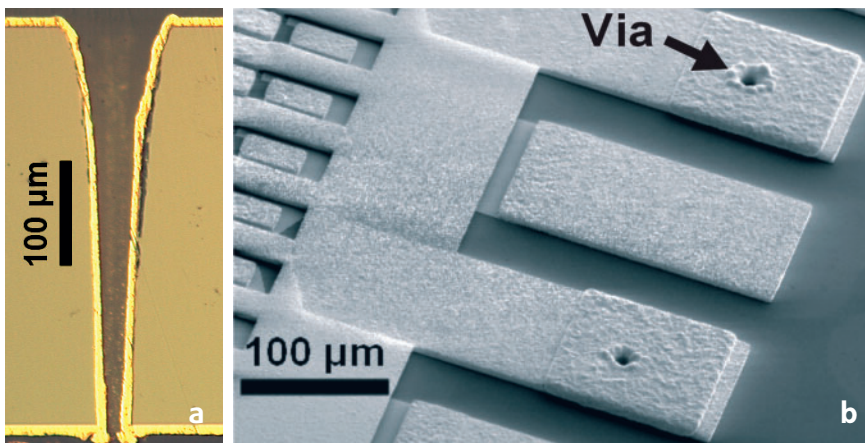
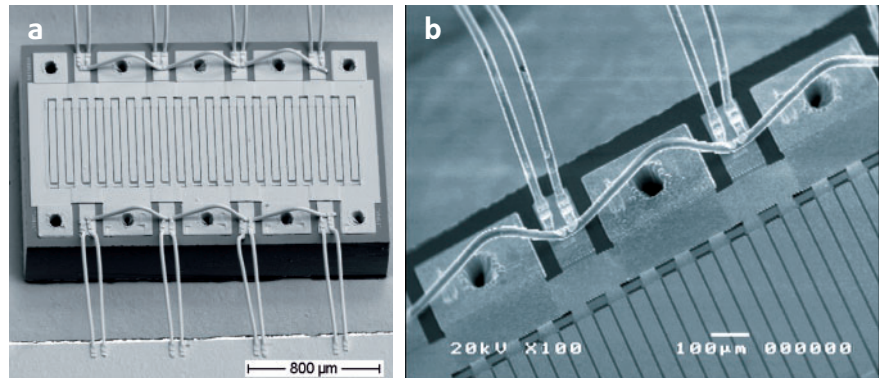


BILD 3A. Querschnitt eines Hohlknoten-Vias mit der Laser-Eintrittsseite (Waferrückseite) oben beziehungsweise der Laser-Austrittsöffnung (Bauelement-Vorderseite) unten  
BILD 3B. Detail eines AlGaIn/GaN-HEMTs mit Vias durch die Source-Kontaktflächen

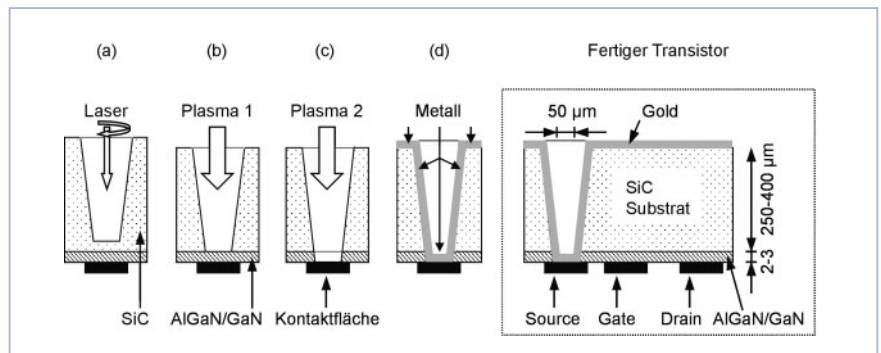
Degradation der Bauelemente erkennen. Die im Waferverbund gemessenen Gleichstrom-Kennlinien sind vor und nach dem Laserprozess praktisch identisch. Hochfrequenzmessungen an aufgebauten Bauelementen zeigten die für den Bauelementeprozess typischen Werte von 41,6 W Ausgangsleistung und von 55,3 Prozent PAE (Bild 4) [4]. Eine detaillierte Untersuchung der Via-Seitenwände auf Materialschädigungen nach dem Laserbohren (Ausdehnung der Lasereinflusszone) lässt eine Schicht mit einer Dicke von weniger als 4  $\mu\text{m}$  von umgeschmolzenem und redeponiertem Material aus Silizium und SiC erkennen, unter der keine Anzeichen für Mikrorisse oder ausgedehnte Kristalldefekte im SiC identifiziert werden konnten [5]. Die Präzision der Materialbearbeitung von SiC mittels ns-Pulsen von UV-Laserstrahlung wird nicht durch Bildung von Kristallschäden unter der Schicht aus umgeschmolzenen Material limitiert.

### Geeignete Prozessführung für »Sackloch«-Vias

In einem anderen lasergestützten Via-Prozess können die Öffnungen (Löcher) in den Kontaktpads auf der Vorderseite der Transistoren vermieden und Sackloch-Vias erzeugt werden (Bild 5)[6]. In einem ersten Prozessschritt wird hierbei von der Waferückseite mit dem Laser eine Bohrung an der gewünschten Position erzeugt. Diesmal wird jedoch der Prozess circa 20 bis 40  $\mu\text{m}$  vor dem Erreichen der SiC/GaN-Grenzfläche gestoppt. Die Aufgabe besteht darin, den Prozess rechtzeitig vor dem Durchstoßen anzuhalten und gleichzeitig ein möglichst ebenes Bodenprofil zu erzeugen. Durch eine geeignete Strahlführung sowie die Abstimmung von Laservorschubgeschwindigkeit, Pulswiederholfrequenz und Bohrzeit lassen sich die gewünschten Löcher mit einem punktförmigen Strahl erzeugen



**BILD 4A.** AlGaIn/GaN-HEMT mit Source-Vias ( $4 \times 10 \times 500 \mu\text{m}$  L-Band-Leistungstransistor)  
**BILD 4B.** Detailsicht der Kontaktierungen: Die Querverdrahtungen verbinden benachbarte Einzeltransistoren miteinander. Die nach außen geführten Drähte kontaktieren die Drain- beziehungsweise Gate-Kontaktflächen, die Source-Kontakte werden durch die Vias vertikal mit dem Massekontakt auf der Chiprückseite (unten) verbunden



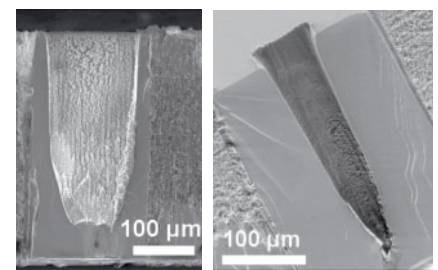
**BILD 5.** Prozessablauf zur Herstellung sogenannter Sackloch-Vias

(Bild 6). In einem zweiten Prozessschritt wird das verbliebene SiC bis zur SiC/GaN-Grenzfläche selektiv durch ein  $\text{SF}_6\text{-O}_2$ -Plasma (Inductively Coupled Plasma; ICP) geätzt. Eine Indium-Zinn-Oxid- (ITO-) Schutzschicht auf der Waferückseite verhindert, dass sich die Waferdicke beim ICP-Ätzen durch flächigen Abtrag des SiC verringert. Das beim Laserbohren erzeugte Lochmuster in der ITO-Schicht wird als Ätzmaske

benutzt und nur das freiliegende SiC in den Löchern geätzt. Der ICP-Ätzprozess stoppt auf der GaN-Epitaxieschicht und gewährleistet eine gute Homogenität der Ätzung. Der dritte Prozessschritt besteht in der selektiven Entfernung der GaN-Schicht durch reaktives Ionenätzen mit  $\text{BCl}_3\text{-Cl}_2$ , das

## LITERATUR

- 1 Arnold, C. B.; Pique, A. (Guest Eds.): Laser direct-write processing. In: MRS Bulletin 32, 2007, S. 9-54
- 2 Krüger, O.; Schöne, G.; Liero, A. et al.: Laser drilling of microvias in silicon carbide for AlGaIn/GaN power transistors. In: Beyer, E.; Dausinger, F. et al.: Proceedings of the 3rd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing. AT-Verlag, Stuttgart, 2005, S. 663-667
- 3 Lossy, R.; Liero, A.; Krüger, O. et al.: Gallium nitride powerbar transistors with via holes fabricated by laser ablation. In: Physica Status Solidi C 3 (3), 2006, S. 482-485
- 4 Krüger, O.; Schöne, G.; Wernicke, T.; Lossy, R.; Liero, A.; Schnieder, F.; Würfl, J.; Tränkle, G.: Laser-assisted processing of VIAs for AlGaIn/ GaN HEMTs on SiC substrates. In: IEEE Electron Device Letters 27 (6), 2006, S. 425-427
- 5 Wernicke, T.; Krüger, O.; Herms, M. et al.: Analysis of materials modifications caused by UV laser micro drilling of via holes in AlGaIn/GaN transistors on SiC. In: Applied Surface Science, 2007, im Druck
- 6 Krüger, O.; Schöne, G.; John, W.; Wernicke, T.; Würfl, J.: Verfahren zur Erzeugung von Durchkontaktierungen in Halbleiterwafern. Bundesrepublik Deutschland Patent, Offenlegungsschrift DE 10 2005 042 074 A1, 8.3.2007

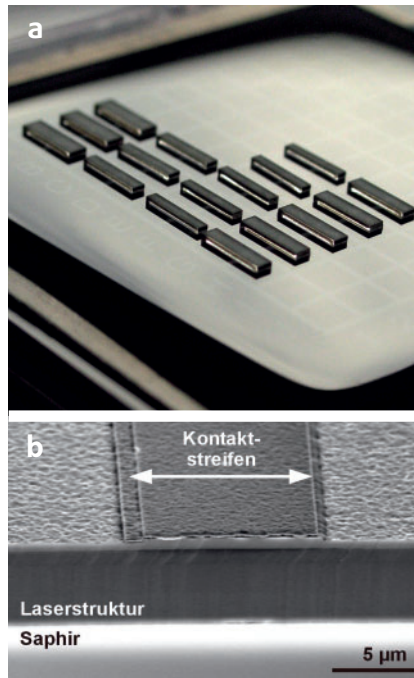


**BILD 6.** Querbrüche durch lasergebohrte Sacklöcher in SiC (links) vor beziehungsweise nach der nasschemischen Reinigung mit Fluss säure (rechts). Bei großem Lochquerschnitt lässt sich ein nahezu ebenes Bodenprofil erzeugen (links), bei größeren Aspektverhältnissen läuft das Loch unten spitz zu (rechts)

sauber an der Metallschicht der Vorderseitenkontakte stoppt und diese freilegt (Bild 7). Die Metallisierung der Mikrolöcher erfolgt analog zur Vorgehensweise bei den Hohlmeten-Vias. Durch Widerstandsmessungen an einzelnen Vias mit Aspektverhältnissen von 3 bis 4 konnte die gute Homogenität und Reproduzierbarkeit der Technologie nachgewiesen werden. Widerstände von  $27 \pm 2 \text{ m}\Omega$  wurden durch 250 bis 300  $\mu\text{m}$  dickes SiC gemessen.

### Laserritzen zum Vereinzeln blauer Diodenlaser

Diodenlaser und LEDs, die blaues oder ultraviolette Licht ausstrahlen, besitzen GaN-basierte Epitaxieschichten, die gegenwärtig vorwiegend auf Saphir abgeschieden werden. Die einzelnen Bauelemente erhält man für gewöhnlich durch Ritzen und Spalten der Wafer, was jedoch eine Reihe von Problemen mit sich bringt. Zum einen existieren wegen der sechs- beziehungsweise dreizähligen Kristallsymmetrie von GaN und Saphir keine senkrecht aufeinanderstehenden Spaltflächen, sodass rechteckige Chips nur schwer herzustellen sind. Zum anderen sind aufgrund der kristallografischen Epitaxiebeziehung zwischen GaN (0001) und Saphir (0001) die Spaltflächen beider Materialien zueinander verdreht. Ein Spalten des Saphirs entlang seiner natürlichen Spaltrichtungen führt folglich zu Spaltflächen im GaN, die meist stark terrasiert sind. Solche Flächen sind für die Verwendung als Laserspiegel ungeeignet. Nicht zuletzt kommt es wegen der Fehlanpassung der Kristallgitter der aktiven Schichten auf dem Fremdsupstrat zu Verspannungen, die den Wafer wölben und mechanische Bearbeitungsverfahren nur noch eingeschränkt einsetzbar machen. All diese Probleme können durch präzises,

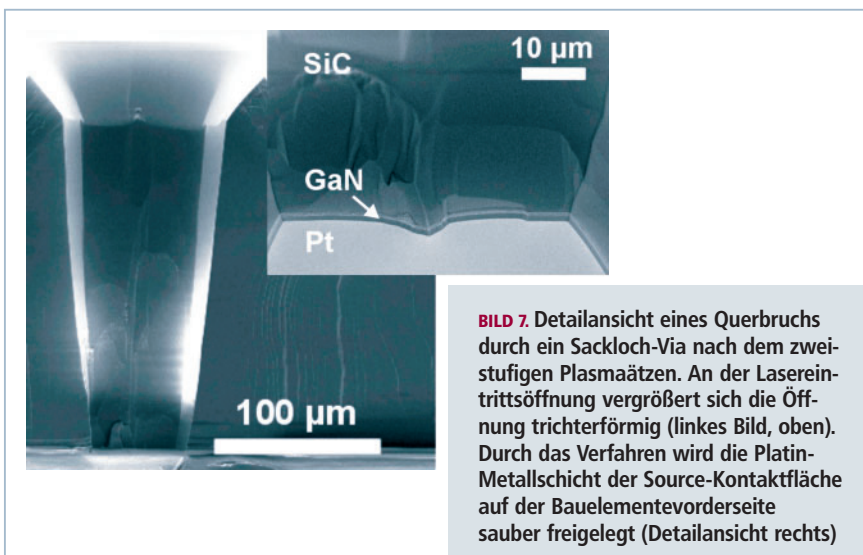


**BILD 8A.** Laserriegel mit einer Größe von  $0,8 \times 5 \text{ mm}^2$  bis  $1,5 \times 5 \text{ mm}^2$ , die aus einem Wafer von 430  $\mu\text{m}$  Dicke mithilfe des Laserritzverfahrens und anschließendem Brechen hergestellt wurden

**BILD 8B.** Spaltfläche einer Laserstruktur mit einem 10  $\mu\text{m}$  breiten Kontaktstreifen

berührungsloses Ritzen mit einem Laser gelöst werden. Dazu wird entlang der gewünschten Spaltflächen des GaN auf der Bauelementerrückseite (also im Saphir) eine Ritzlinie erzeugt. Die einzelnen Laserbauelemente werden dann durch mechanischen Druck entlang dieser geritzten Spaltperforation separiert. Die exakte Ausrichtung der Laserritzung zur Kristallorientierung der aktiven Schicht gelingt analog zur oben beschriebenen Verfahrensweise mithilfe von Justagemarken auf der Vorderseite der Bauelemente, während die Materialbearbeitung auf der matten Rückseite des 430  $\mu\text{m}$  dicken Saphir-Substrats erfolgt. Saphir absorbiert wegen seiner großen Bandlücke von 9,9 eV allerdings nur sehr schwach im UV-Bereich. Durch Mehr-

photonenabsorption kann UV-Laserstrahlung hoher Leistungsdichte jedoch zum Materialabtrag führen. Der fokussierte Laserstrahl erzeugt Störstellen im Material, die als Absorptionszentren den Materialabtrag initiieren. Generell sind die Abtragsraten allerdings kleiner als bei SiC. Zudem sind die Bearbeitungsergebnisse von Saphir bei 355 nm von stärkeren Materialschädigungen, beispielsweise Mikrorissen, gekennzeichnet. Für das Laserverfahren ist es daher wichtig, dass die aktive Schicht nicht geschädigt wird und sich die Laserriegel trotzdem reproduzierbar in guter Qualität separieren lassen. Die Tiefe der Ritzkerbe lässt sich durch die geeignete Wahl der Pulsenergie, Laserpuls-Wiederholfrequenz und Laservorschubgeschwindigkeit sowie der Anzahl der Ritzwiederholungen einstellen. Um bei Pulsenergien von 100 bis 110  $\mu\text{J}/\text{Puls}$  die lokalen thermischen Belastungen des Materials zu reduzieren und unkontrolliertes Reißen und Zerspringen des Saphir-Trägers zu vermeiden, wird der Laserstrahl mit einer relativ hohen Vorschubgeschwindigkeit von bis zu 40 mm/s über die Probe bewegt und die Ritzbahn wiederholt abgefahren. Die Breite des V-förmigen Ritzgrabens beträgt an der Oberfläche (der Rückseite des Substrats) circa 20  $\mu\text{m}$  bei Ritztiefen von etwa 270  $\mu\text{m}$ . Durch anschließendes mechanisches Spalten lassen sich auf diese Weise etwa  $1 \times 5 \text{ mm}^2$  große Laserriegel aus dem rund 430  $\mu\text{m}$  dicken Materialverbund separieren (Bild 8). Die Laser verfügen damit über Riegelbreiten, die nur etwa doppelt so groß wie die Chipdicke sind. Angeregt mit Strompulsen von 50 ns Länge zeigen entsprechende Laserdioden mit Kontaktstreifenbreiten von 20  $\mu\text{m}$  ab einer Schwellstromdichte von 7  $\text{kA}/\text{cm}^2$  Laseremission bei einer Wellenlänge nahe 400 nm. Das zeigt, dass Laserritzen mit UV-Strahlung für das Vereinzeln von Laser-Bauelementen auf Saphir geeignet ist. II



**BILD 7.** Detailansicht eines Querbruchs durch ein Sackloch-Via nach dem zweistufigen Plasmaätzen. An der Lasereintrittsöffnung vergrößert sich die Öffnung trichterförmig (linkes Bild, oben). Durch das Verfahren wird die Platin-Metallschicht der Source-Kontaktfläche auf der Bauelementevorderseite sauber freigelegt (Detailansicht rechts)

#### Dr. rer. nat. Olaf Krüger

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Prozesstechnologie des Ferdinand-Braun-Instituts für Höchstfrequenztechnik in Berlin; olaf.krueger@fbh-berlin.de