

Aufschlussreiche Abtastung

Die Scanning Microwave Impedance Spectroscopy erlaubt nanometergenaue Messungen.

Alexander Klasen und Andrea Cerreta

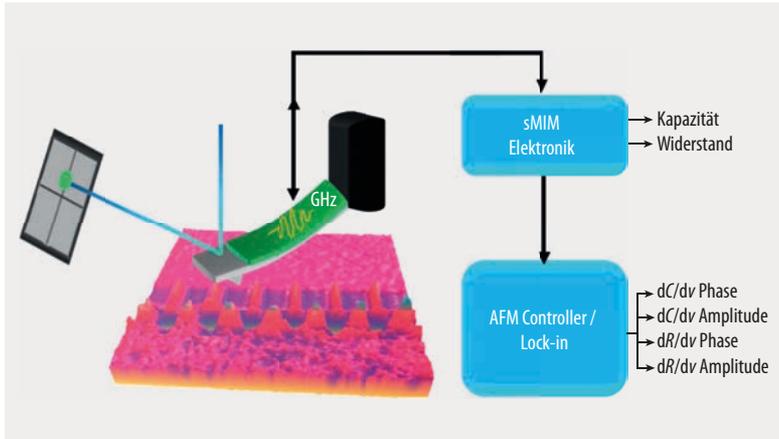


Abb. 1 Bei der Rasterkraftmikroskopie oder der Scanning Microwave Impedance Spectroscopy tastet ein kraftempfindlicher Cantilever die Oberfläche ab. Dabei wird seine Auslenkung durch das Reflexionsverhalten eines Lasers von der Spitze auf eine positionssensitive Photodiode überwacht (grüner Punkt links). Ein Signal mit einer Frequenz im GHz-Bereich wird an den Cantilever angelegt; interne Lock-In-Verstärker schlüsseln das reflektierte Signal auf, um die gewünschten Messgrößen zu ermitteln [2].

Mit zunehmender Miniaturisierung moderner Technologien steigt die Nachfrage nach Analyseinstrumenten, die detaillierte Informationen auf immer kleineren Skalen liefern können. Dieser Trend zeigt sich vor allem bei Halbleiterbauelementen, Dielektrika, Widerständen und Transistoren. Dort ist das Verständnis der lokalen elektronischen Struk-

tur – etwa Dotierungsniveaus, Kapazität und Widerstand – bei gleichzeitiger Kartierung der Probenoberfläche entscheidend. Die Scanning Microwave Impedance Spectroscopy (sMIM), eine Variante der Rasterkraftmikroskopie, ermöglicht die gewünschten Messungen im Nanometerbereich.

Bei der Rasterkraftmikroskopie (Atomic Force Microscopy, AFM) scannt ein mikrometergroßer Cantilever mit einer nanometergroßen Spitze die Oberflächentopografie einer Probe. Während der Abtastung wird die Auslenkung des Cantilevers gemessen (Abb. 1). Damit lassen sich topografische Merkmale bis hin zu Höhendifferenzen einzelner atomarer Schichten

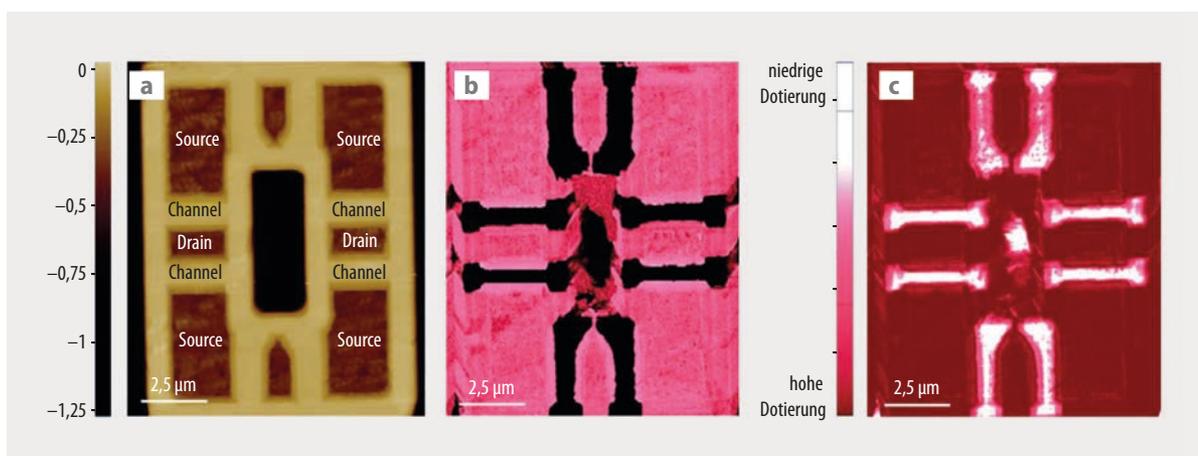


Abb. 2 Diese Speichereinheit wurde mittels sMIM vermessen. a) zeigt die Topografie eines N-Typ-Metalloxid-Halbleiter-Bereichs mit Source, Drain und Channel. Der dC/dV -Phasenkanal (b) liefert Informationen über den Dotierungstyp. Das ausgewählte Implantat besteht hauptsächlich aus N-Dotierung (rosa). Das dC/dV -Amplitudenbild (c) gibt Aufschluss über die Dotierungsdichte [2].

abbilden. Im Gegensatz zu anderen Mikroskopietechniken besitzt die Rasterkraftmikroskopie den einzigartigen Vorteil, physisch mit der Probenoberfläche zu interagieren. Hierdurch sind Eigenschaften über die bloße Topografie hinaus messbar, beispielsweise Adhäsion, Steifigkeit und Youngscher Modulus [1].

Wenn das Rasterkraftmikroskop mit einer leitfähigen Spitze ausgestattet ist, kann es auch elektronische Eigenschaften abbilden. So ist es durch Anlegen einer Spannung möglich, den lokalen Stromfluss zu messen und detaillierte Leitfähigkeitskarten zu erstellen [3]. Die Scanning Microwave Impedance Spectroscopy (sMIM) verwendet ebenfalls einen leitfähigen Cantilever, um die lokalen elektronischen Eigenschaften einer Probe nanometergenau zu untersuchen. Bei dieser Technik wird eine elektronische Schwingung im Mikrowellenbereich, typischerweise um 3 GHz, an die Cantileverspitze

angelegt. Die Spitze fungiert hierdurch als Antenne und emittiert ein Nahfeld von wenigen Nanometern Durchmesser. Ein Teil der emittierten Welle wird reflektiert, wobei die Reflexion von den lokalen elektrischen Eigenschaften der Probe abhängt. Das wichtigste Signal, die gemessene Impedanz, umfasst drei Hauptkomponenten.

Die Hintergrund- oder Streukapazität entsteht durch unerwünschte Komponenten oder Beiträge, die nicht auf die Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe zurückgehen. Dieser Beitrag lässt sich durch einen coaxial abgeschirmten Cantilever minimieren. Die Kopplungsimpedanz zwischen Spitze und Probe hängt vom Abstand zwischen den beiden ab und ist bei geringen Abständen vernachlässigbar.

Dementsprechend dominiert die Spitzen-Proben-Interaktion mit ihren zwei Hauptbeiträgen die gemessene Impedanz.

Das Kapazitätssignal entsteht durch Polarisation, abhängig von den dielektrischen Eigenschaften der Probe, und trägt zum Imaginärteil der Impedanz bei. Der zweite Beitrag resultiert aus der Bewegung freier Elektronen im elektrischen Feld, was zu Widerstandsverlusten führt, die den Realteil der Impedanz ausmachen.

Durch Anlegen einer zusätzlichen Wechselfspannung kann die Scanning Microwave Impedance Spectroscopy Änderungen der Kapazität abhängig von der Spannung (dC/dV) messen. Das ist besonders nützlich für Halbleiter, die ein nicht-lineares Verhalten in dC/dV zeigen. Ein Lock-in-Verstärker erlaubt es, die Amplitude dieses Signals zu messen. Das gibt Aufschluss über die Dotierdichte des Halbleiters, während die Phase des Signals Informationen über den Dotiertyp liefert. Dabei eignet sich die Scanning Microwave Impedance Spectroscopy je nach Material für eine große

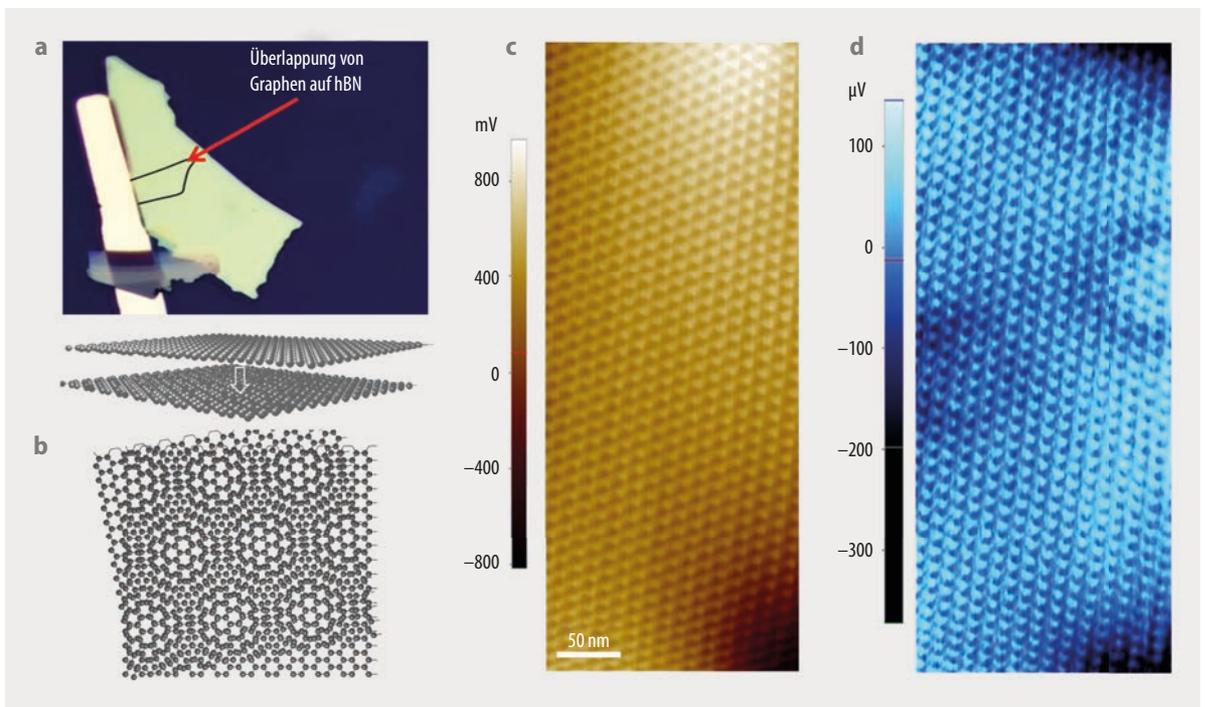


Abb. 3 Das optische Mikroskopiebild (a) zeigt die 2D-Heterostruktur aus Graphen und der hexagonalen Bornitrid-Heterostruktur. Durch den Versatz der atomaren Gitter entsteht ein Moiré-Muster (b). Sowohl der Phasenkanal (c) als auch der Amplitudenkanal (d) offenbaren die lokalen Variationen der Elektronendichte.

Bandbreite an Dotierungskonzentrationen, etwa $10^{10} - 10^{20} \text{ a/cm}^3$ für Silizium-Halbleiter [4]. Aus diesem Kapazitäts- und Widerstandssignal einer sMIM-Messung leiten sich die lokale Permittivität und die Leitfähigkeit der Oberfläche ab.

Auch andere Techniken, die auf der Rasterkraftmikroskopie basieren, eignen sich zur Untersuchung lokaler elektronischer Eigenschaften, etwa leitfähige AFM (cAFM), Kelvin-Sondenkraftmikroskopie (KPFM) oder Scanning-Kapazitätsmikroskopie (SCM). Ein wesentlicher Vorteil der Scanning Microwave Impedance Spectroscopy gegenüber diesen Methoden besteht darin, dass sie keinen direkten elektrischen Kontakt mit der Probe erfordert [5]. Dies ermöglicht es, Isolatoren oder Dielektrika zu messen, Halbleiter, Metalle oder exotische Proben wie 2D-Materialien.

Das Beispiel einer statischen Zufallsspeichereinheit (Static Random Access Memory, SRAM) illustriert das Potenzial dieser Methode. Hierbei wurde ein Bereich untersucht, der nur N-Typ-Metalloxid-Halbleiter (NMOS)-Implantate enthält (**Abb. 2**). Im Topografiebild zeigen sich deutlich Source, Drain und Channels. Der dC/dV -Phasenkanal offenbart Variationen im Dotiertyp, der Amplitudenkanal die lokalen Variationen in der Dotierkonzentration.

Zweidimensional vermessen

Die Scanning Microwave Impedance Spectroscopy findet zunehmend Einsatz, um zweidimensionale Materialien zu untersuchen [6], da die Methode sich auch für atomar dünne Heterostrukturen eignet. Ein Beispiel ist die hochauflösende Abbildung einer 2D-Heterostruktur, die aus einer einzelnen Schicht Graphen auf einer einzelnen Schicht hexagonalen Bornitrids auf einer SiO_2 -Oberfläche besteht (**Abb. 3**). Der Versatz der atomaren

Gitter dieser Monoschichten erzeugt ein Moiré-Muster, das sich als periodische Variation der elektronischen Eigenschaften der Heterostruktur zeigt. Dieses Muster ist im Phasen- und im Amplitudenkanal der sMIM-Messung deutlich sichtbar, was die Auflösung komplexer elektronischer Details im Nanobereich demonstriert.

Die Scanning Microwave Impedance Spectroscopy kombiniert die präzisen topografischen Messungen der Rasterkraftmikroskopie mit der Fähigkeit, lokale elektronische Eigenschaften wie Dotierdichte und -typ zu untersuchen. Dementsprechend stellt sie ein leistungsstarkes Werkzeug für Forschende dar, die an Halbleitern, Dielektrika, Leitern und fortschrittlichen Materialien arbeiten. Die Vielseitigkeit dieser zerstö-

rungsfreien Analyse machen sie zu einem wertvollen Instrument in der fortlaufenden Suche nach dem Verständnis und der Manipulation von Materialien im kleinsten Maßstab.

- [1] J. P. Pineda et al., *Micros. Today* **28**, 48 (2020)
- [2] A. Melgarejo und N. Antoniou, *Park Syst. Appl. Note* #91 1
- [3] S. Y. Leblebici et al., *Nat. Energy* **1**, 1 (2016)
- [4] N. Antoniou und R. Chintala, *Primen. Whitepapers 2021* (2021)
- [5] S. R. Johnston et al., *Appl. Phys. Lett.* **114**, 093106 (2019)
- [6] X. Kong et al., *Phys. Status Solidi – Rapid Res. Lett.* **14**, 1 (2020)

Die Autoren

Dr. Alexander Klasen und **Dr. Andrea Cerreta**, Park Systems Europe GmbH, Schildkroetstr. 15, 68199 Mannheim, www.parksystems.com



BEWEGENDE PRÄZISION FÜR QUANTENTECHNOLOGIEN



KRYO-KOMPATIBEL, NICHT MAGNETISCH, UHV-TAUGLICH