

ELEVATE

Evaluating the limits of EELS and DPC for qualitative and quantitative analysis of trace elements in WBG semiconductors

Programm / Ausschreibung	FORPA, Dissertationen 2024, Industrienahe Dissertationen 2025	Status	laufend
Projektstart	01.03.2025	Projektende	29.02.2028
Zeitraum	2025 - 2028	Projektaufzeit	36 Monate
Keywords	Halbleiter; Dotierstoffe; STEM; Electron Energy-Loss Spectroscopy; Differential Phase Contrast		

Projektbeschreibung

Die exakte Erfassung von Dotierstoffen in sogenannten „Wide Bandgap-Halbleitern“ (WBG SCs) stellt nach wie vor eine Herausforderung dar, die die Analysemöglichkeiten in industriellen Prozessen stark einschränkt.

Die Dominanz von Silizium (Si) während der letzten Jahrzehnte in der Halbleiterindustrie hat viel Fachwissen in den Bereichen Bauteildesign, Prozesstechnik und Charakterisierungsmethoden für auf Si basierende Mikro- und Nanoelektronik hervorgebracht. Das Erstarken von Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) als Halbleiter der nächsten Generation hat jedoch gezeigt, dass sowohl Forschung als auch Industrie hier methodische Schwachstellen bei der Materialcharakterisierung und Fehleranalyse haben: Viele Techniken, die für Si optimiert wurden - und sehr gut verstanden sind - können nicht auf diese neuen Materialien übertragen werden.

Daher besteht ein dringender Bedarf an der Weiterentwicklung von Methoden zur Defektanalyse und Dotierstoffdetektion, die in der Lage sind, eine hohe laterale Auflösung mit ausreichender Empfindlichkeit zu kombinieren, und dabei zuverlässig in die standardisierte Prozessanalyse integrierbar sind.

Die Anforderungen an eine solche Methode sind:

- Ortsauflösung unter 10 nm
- Empfindlichkeit für Dotierungen von 10^{20} cm^{-3} und niedriger
- Ausreichende Signalstärke und Geschwindigkeit für 2D-Erfassung von Elementen
- Fähigkeit, interne elektrische Felder/Übergänge abzubilden
- Wiederholbarkeit der Ergebnisse

Es gibt einige Methoden, die über die erforderliche Empfindlichkeit verfügen (z. B. Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS)); die meisten von ihnen sind jedoch nicht in der Lage, nanoskalige Strukturen aufzulösen. Andere, wie die Ausbreitungswiderstandsprofilometrie (SRP), können nicht für WBG SCs verwendet werden.

Es gibt jedoch eine Technik, die Bildgebung und Spektroskopie mit einer Auflösung im Sub-Å-Bereich ermöglicht: Die Rastertransmissionselektronenmikroskopie (STEM) liefert Daten mit atomarer Auflösung und kann mit Detektoren für die

Bildgebung auf der Grundlage verschiedener Methoden (z. B. ringförmiges Dunkelfeld (ADF), Differentialphasenkontrast (DPC)) angewendet und mit Elementanalyse (wie Elektronenenergieverlustspektroskopie (EELS) und energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDS)) kombiniert werden.

Eine neue Generation von Detektoren ermöglicht nun, dass die Empfindlichkeitsgrenzen der im STEM verfügbaren Methoden kurz vor der Anwendbarkeit für die in Halbleitern oft verwendeten niedrigen Dotierstoffmengen stehen. EELS-Detektoren, die auf direkter Elektronendetektion und verbesserter Elektronenoptik basieren, bieten eine höhere Empfindlichkeit; segmentierte und pixelierte STEM-Detektoren liefern DPC- und 4DSTEM-Datensätze, die eine Fülle zusätzlicher Informationen über die innere Struktur der Probe enthalten, die auf Beugungseffekten sowie internen elektrischen und magnetischen Feldern basieren.

Das Doktorandenprojekt ELEVATE („Evaluierung der Limits von EELS und DPC für die qualitative und quantitative Analyse von Dotierstoffen in WBG-Halbleitern“) wird die Grenzen in Richtung der Anwendbarkeit von EELS- und DPC als Routinemethoden bei der Dotierstoffdetektion und Fehleranalyse verschieben. In enger Zusammenarbeit mit dem Fehleranalyse-Team von Infineon Technologies Austria in Villach wird das Zentrum für Elektronenmikroskopie (ZFE Graz) eine Doktorarbeit realisieren mit dem Ziel, die vielversprechendsten STEM-Techniken in diesem Bereich systematisch weiterzuentwickeln.

Abstract

The qualitative and quantitative assessment of dopants in wide bandgap semiconductor materials (WBG SCs) still remains a challenge that is severely limiting analysis capabilities in industrial processes.

Over the last few decades, the dominance of silicon (Si) for use in semiconductor devices has generated a lot of expertise in device design, process engineering and characterization methods for Si-based microelectronics.

However, the emergence of silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) as next generation semiconductor materials has revealed that research and industry both have methodical weak spots where material characterization and failure analysis are concerned: many techniques and processes that have been extensively refined – and deeply understood – for Si-based microelectronics cannot be transferred to these new materials.

As a consequence, there is urgent demand for the advancement of defect analysis and dopant profiling methods that are capable of combining adequate lateral resolution with sufficient sensitivity to trace elements, while being reasonably priced and reliably integrable in standardized process analysis.

The requirements for a suitable analysis technique are:

- Sub-10 nm spatial resolution
- Sensitivity to dopants levels of 10^{19} to 10^{20} cm $^{-3}$, and below
- Sufficient signal strength and speed for 2D elemental mapping
- Ability to map internal electric fields/junctions
- Repeatability of results

There is a number of methods featuring the necessary sensitivity (e.g. secondary-ion mass spectrometry (SIMS)); but most of them are not capable of resolving nanoscale device structures. Others, like spreading resistance profilometry (SRP),

cannot be transferred to WBG SCs for physical reasons.

However, there is one analysis technique that is capable of imaging and spectroscopy with sub-angstrom resolution: Scanning transmission electron microscopy (STEM) routinely provides atomic resolution information, and can be applied with detectors for imaging based on different methods (like annular dark field (ADF) in various angles, and differential phase contrast (DPC)) and for elemental analysis (like electron energy-loss spectroscopy (EELS) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS)).

A novel generation of detection systems has refined these systems to a point where the sensitivity limit of the analytical methods available in the STEM are on the very verge of applicability for the low level of dopant materials commonly used in semiconductor structures. EELS detectors based on direct electron detection and improved electron optics provide higher sensitivity and low-noise information that can be processed for even better data quality. Segmented and pixelated STEM detectors yield DPC and 4DSTEM datasets that comprise a wealth of additional information of the internal structure of the sample based on effects of diffraction and internal electric and magnetic fields.

The PhD project ELEVATE (“Evaluating the limits of EELS and DPC for qualitative and quantitative analysis of trace elements in WBG semiconductors”) will push these limits towards applicability of EELS and DPC as routine methods in dopant detection and failure analysis. In close cooperation with the Failure Analysis Team of Infineon Technologies Austria in Villach, the Graz Centre for Electron Microscopy (ZFE Graz) will organize and supervise a PhD thesis with the objective to systematically advance the most promising STEM techniques in this field.

Projektpartner

- Verein zur Förderung der Elektronenmikroskopie und Feinstrukturforschung