

Johannes Isenbart

Darstellung der Forschungsaktivitäten

Rasterkapazitätsspektroskopie: Simulationen und Messungen

In der Halbleitertechnologie wird bereits seit einigen Jahren das Rasterkapazitätsmikroskop (Scanning Capacitance Microscope, SCM) erfolgreich zur qualitativen Analyse von zweidimensionalen Dotierprofilen eingesetzt. Allerdings ergeben sich hinsichtlich der quantitativen Auswertung bei kommerziellen SCMs (z.B. bei dem Dimension 3000 von Veeco - Digital Instruments) gewisse Einschränkungen aufgrund des üblichen Messmodus (dC/dV bei festgehaltener V_{DC} -Biasspannung). Diese Einschränkungen betreffen dabei sowohl die Dotierungsaufösung als auch die laterale Auflösung z.B. der Lage eines pn-Überganges.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch Erweiterung des herkömmlichen Messmodus zur Rasterkapazitätsspektroskopie (Scanning Capacitance Spectroscopy, SCS) diese Einschränkungen zu überwinden und aus den spektroskopischen Daten exaktere quantitative Aussagen zu gewinnen. Dabei standen zunächst umfangreiche SCS-Simulationen mit Hilfe des 3D-Device-Simulators ISE-TCAD im Vordergrund, um das Potential dieser Methode auszuloten. Im weiteren Verlauf soll ein praktikabler Algorithmus entwickelt werden, um die quantitative Auswertung von SCS-Messdaten zu automatisieren. Dieses Verfahren soll im Experiment anhand bekannter Teststrukturen überprüft und anschließend auch auf unbekannte Proben angewendet werden, um die Leistungsfähigkeit von SCS in der Praxis auszuloten.

Bei herkömmlichen SCM-Messungen wird mittels einer hochfrequenten Signalspannung ($f_{sig} = 915 \text{ MHz}$) die differentielle Kapazität $C = dQ/dV$ zwischen der Messsonde und der Halbleiterprobe detektiert. Da diese aber sehr empfindlich auf äußere Störungen reagiert, und da zudem die Streukapazitäten des Systems im pF -Bereich liegen, die zu messende Kapazität dagegen im aF -Bereich, wird das Kapazitätssignal nicht direkt ausgelesen, sondern mit 100 kHz moduliert und über einen Lock-In-Verstärker ausgewertet, um diese Einflüsse zu minimieren. Somit erhält man als Messsignal nur die Ableitung der differentiellen Kapazität dC/dV . Beim Rastern über die Probenoberfläche wird dann die Biasspannung V_{DC} festgehalten und an den einzelnen Messpunkten jeweils ein solcher dC/dV -Wert aufgenommen.

Die beiden Hauptprobleme dieser Methode liegen im Informationsverlust über die ursprünglichen Kapazitätswerte durch die zwischengeschaltete Lock-In-Verstärkung, sowie in der starken Abhängigkeit der dC/dV -Werte von der gewählten Biasspannung.

Bei herkömmlichen SCM-Messungen ist es nämlich üblich, bei der Untersuchung heterogener Dotierprofile die Biasspannung so zu wählen, dass gerade das Kontaktpotential zwischen Messsonde und (intrinsischem) Halbleiter ausgeglichen wird ($V_{DC} = 0 \text{ V}$ zum Kontaktpotential des intrinsischen Siliziums). Für dotiertes Silizium weicht zwar das Kontaktpotential in Abhängigkeit von der Dotierung um bis zu 500 mV vom intrinsischen Wert ab,

aber die auftretenden Spannungsdifferenzen verhalten sich dabei für p - und n -Dotierungen symmetrisch zu diesem Nullpunkt. Mit dieser Wahl der Biasspannung soll also einerseits eine Aufladung der Probenoberfläche durch die Messung vermieden werden und andererseits die Beeinflussung der Ladungsträgerverteilung im Halbleiter durch die Messsonde minimiert werden.

Insbesondere die Symmetrie der dC/dV -Response von p - und n -Dotierungen ist aber sehr empfindlich gegenüber Biasspannungsoffsets von wenigen 100 mV , und gerade an pn -Übergängen ergeben sich darüber hinaus durch solche Offsets auch laterale Verschiebungen der Ladungsträgerverteilung und des mit dem elektrischen Übergang gekoppelten Nulldurchganges der dC/dV -Response um einige 10 nm . Abbildung 1 zeigt diesen Effekt am Beispiel eines nahezu symmetrischen pn -Überganges.

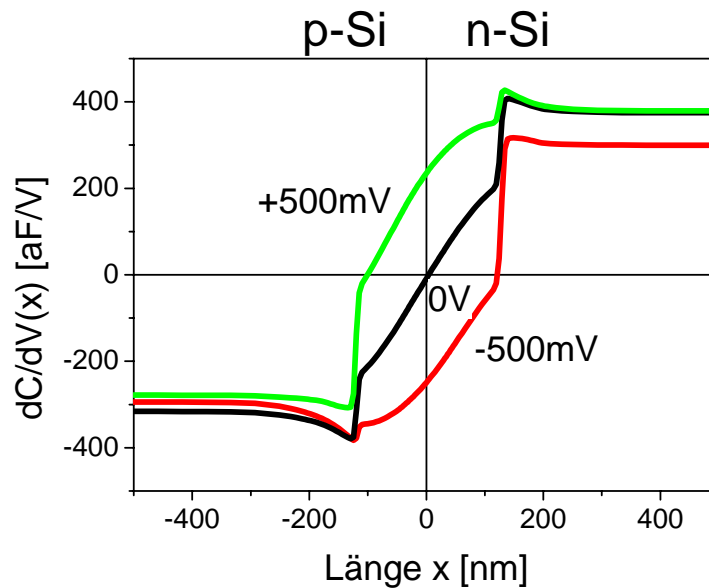


Abbildung 1: Simuliert wurden drei dC/dV -Rasterlinien über einem pn -Übergang zwischen einer $4,9 \cdot 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ - p -Dotierung und einer $1,9 \cdot 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ - n -Dotierung, aufgenommen bei verschiedenen Biasspannungen. Diese liegen um $\pm 500\text{ mV}$ um das Kontaktpotential zum intrinsischen Silizium herum. Deutlich erkennbar ist vor allem die Verschiebung des Nulldurchganges des dC/dV -Signals, die einer Verschiebung des elektrischen Überganges durch den Spannungsoffset entspricht.

Selbst wenn aber die Biasspannung genau auf den gewünschten Wert eingestellt werden kann, reichen bereits die wenigen 100 mV Spannungsdifferenz zwischen den Kontaktpotentialen dotierten Siliziums und intrinsischen Siliziums aus, um bei niedrigen Dotierungen ($< 10^{17}\text{ cm}^{-3}$) eine Verarmungszone im Halbleiter größer als 100 nm im Durchmesser zu erzeugen, und da ferner in der Umgebung eines pn -Überganges (bis über 100 nm zu beiden Seiten) die Ladungsträger des jeweiligen Nachbargebietes die Messwerte stark beeinflussen, sind im Interesse des lateralen Auflösungsvermögens auch Messergebnisse bei anderen Werten der Biasspannung zuweilen wünschenswert.

Legt man nämlich z.B. eine Spannung von $V_{DC} = -2\text{ V}$ an der Messsonde an, so können die Löcher einer p -Dotierung in leichter Akkumulation untersucht werden und die Ausdehnung der Raumladungszone entspricht nur noch etwa dem Durchmesser der Messsonde. Auch

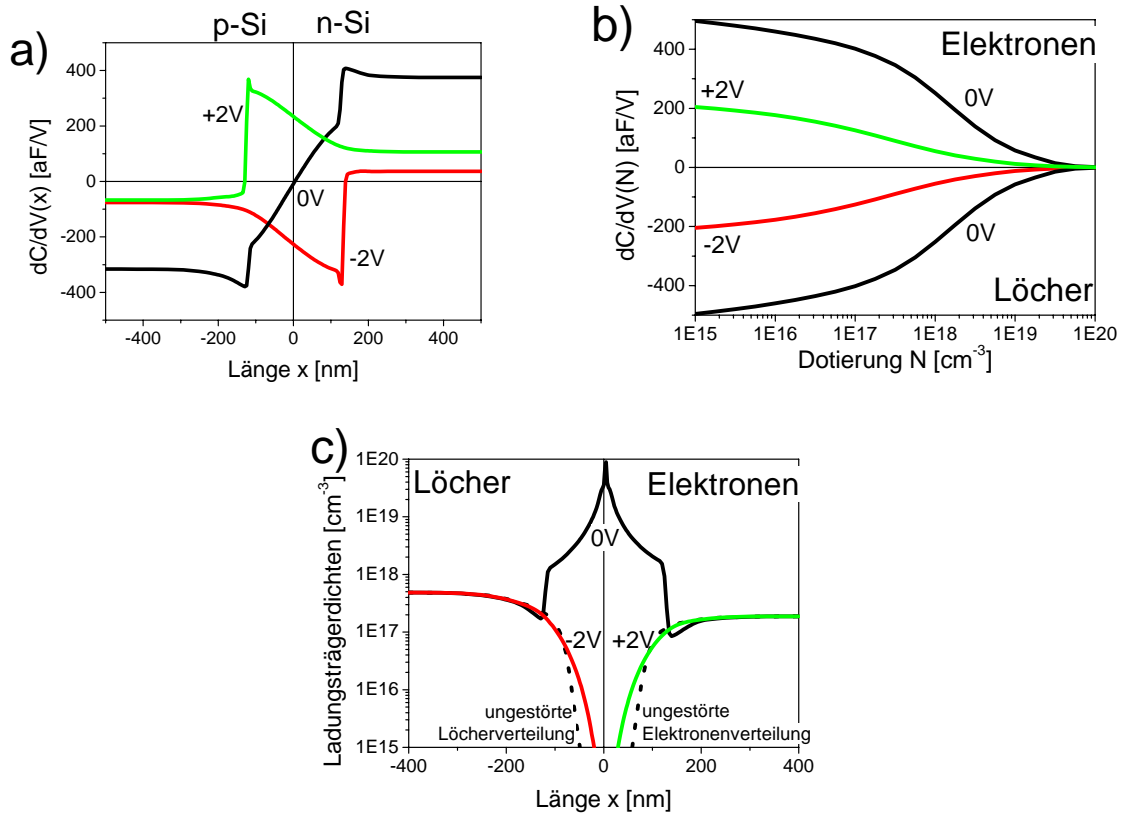


Abbildung 2: a) Simuliert wurden drei dC/dV -Rasterlinien über dem oben genannten pn -Übergang bei verschiedenen Biasspannungen. b) Bei den gleichen Biasspannungen wurden mit der gleichen Messsonde auf homogenen Dotierungen Konversionskurven für die dC/dV -Daten bestimmt (im Experiment z.B. an einer geeigneten Eichstruktur). Die Daten von p -Dotierungen wurden bei $V_{DC} = -2\text{ V}$ konvertiert, die von n -Dotierungen bei $V_{DC} = +2\text{ V}$. c) In einem Bereich von mehr als $\pm 100\text{ nm}$ um den pn -Übergang herum erhält man mit dieser Methode immer noch eine qualitativ gute Übereinstimmung mit den ungestörten Ladungsträgerverteilungen der Probe. Dagegen liefert dasselbe Verfahren mit dC/dV -Werten bei $V_{DC} = 0\text{ V}$ im Übergangsbereich keinerlei verwertbare Informationen.

an einem pn -Übergang können bei dieser Biasspannung Informationen über die Verteilung der Löcher nahezu ungestört von den Elektronen des Nachbargesbietes gewonnen werden, da sich diese dann in der Verarmung befinden. Umgekehrt liefert eine Messung bei $V_{DC} = +2\text{ V}$ präzisere Informationen über die Verteilung der Elektronen, und aus beiden Datensätzen zusammen ließe sich auch die genaue Lage eines pn -Überganges mit deutlich höherer lateraler Auflösung ($30 - 50\text{ nm}$) bestimmen. Abbildung 2 zeigt dies am Beispiel des oben erwähnten pn -Überganges.

Doch das Aufnehmen dieser Messwerte bei festgehaltener Biasspannung von $\pm 2\text{ V}$ führt wie gesagt zu Aufladungserscheinungen, und selbst wenn man jeweils eine vollständige CV -Kurve durchfährt, lassen sich bei langsamer Rampengeschwindigkeit deutliche Hysterese-Effekte nachweisen. Abbildung 3 zeigt sowohl eine typische Messkurve mit aufladungsbedingter Hysterese als auch eine entsprechende Simulation, die unter Verwendung eines stark vereinfachten Ladungstransport-Modelles in der Lage war, die Messergebnisse qualitativ zu

bestätigen und zu erklären.

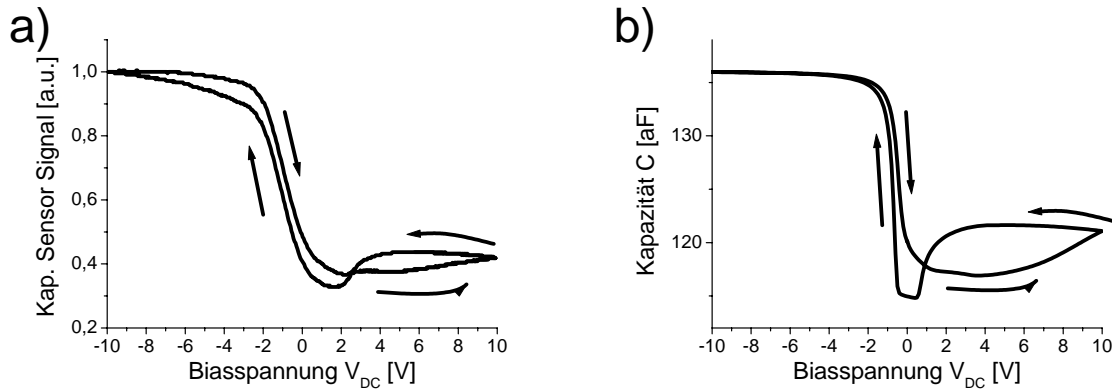


Abbildung 3: a) Gemessen wurde eine vollständige CV -Kurve mit einer Spannungsrampe von ± 10 V und einer Rampenfrequenz von $0,5$ Hz auf einer homogenen p-Dotierung von 10^{16} cm^{-3} . b) Die Simulation einer CV -Kurve auf der gleichen Dotierung unter Berücksichtigung eines stark vereinfachten Modells für den Ladungstransport zeigte eine vergleichbare Charakteristik. Unterschiede in der Gestalt lassen sich z.T. auf unterschiedliche Parameter zurückführen wie z.B. die Signalamplitude der hochfrequenten Messspannung ($\pm 1 - 2$ V im Experiment, ± 10 mV in der Simulation).

Die Lösung für dieses Problem ist eine Rampenfrequenz von z.B. 10 kHz (Spannungsrampe von ± 3 V), denn dieser Rampengeschwindigkeit können die Oberflächenladungen nicht mehr folgen. Aus dieser Wahl ergeben sich weitere Vorteile, weil die Kapazitätsmessdaten durch einen Hochpassfilter (Grenzfrequenz 1 kHz) um den Streukapazitäts-Offset und andere langsame Störungen (z.B. netztypisches 50 Hz-Rauschen) bereinigt werden können, und weil durch die kurze Messdauer eine Mittelung über z.B. 400 CV -Kurven pro Datenpunkt möglich wird, so dass auch höherfrequente Rauschanteile herausgemittelt werden können. Auf diese Weise werden ohne Lock-In-Verstärkung die Kapazitätsmesswerte direkt zugänglich.

Durch die Aufnahme vollständiger CV -Kurven für jeden Rasterpunkt anstelle einzelner dC/dV -Werte wird die Datenauswertung unabhängig von einzelnen Biasspannungswerten, da man für jeden gewünschten Spannungswert die Daten aus den CV -Kurven herauslesen kann, und außerdem können aus den CV -Kurven weitere Informationen über die Qualität der Probenpräparation, speziell der Oxidschicht an der Oberfläche, gewonnen werden. Ferner ermöglicht eine Analyse der einzelnen CV -Kurven entlang einer Rasterlinie über einem pn -Übergang präzisere Aussagen zur Lokalisation desselben.

In der Praxis führt das beschriebene SCS-Verfahren mit ca. 400 CV -Kurven (10 kHz) pro Datenpunkt, 256 Datenpunkten pro Rasterlinie, einer Rasterlinienfrequenz von $0,1$ Hz und 256 Linien pro Messbild einerseits zu einer Gesamtdauer der Aufnahme eines Messbildes von unter 45 Minuten. Andererseits aber stellt dieser Modus entsprechend hohe Anforderungen an die Auswerte-Elektronik, da es einer Datenleserate von 600 kHz bedarf, wenn für jede CV -Kurve 60 Datenpunkte gesammelt werden sollen. Denkbar ist hier z.B. der Einsatz des ADwin-Gold-Systems von Keithley mit einer Datenleserate von bis zu $1,25$ MHz.

Zusammenarbeit mit anderen Mitgliedern des Graduiertenkollegs

In Fragen der Kapazitätsspektroskopie und der Charakterisierung von Si-MOS-Systemen besteht näherer Kontakt zur Forschungsgruppe von Herrn

- Prof. Dr. W. Hansen.

Anregende Diskussionen zu grundsätzlichen Fragen der Simulation nanostrukturierter Halbleiter-Systeme ergaben sich auch mit dem Stipendiaten Herrn

- Dipl.-Phys. Werner Naumann.

Ausblick

Anhand von weitergehenden Simulationen sollen verlässliche Kriterien zur quantitativen Analyse von heterogenen Dotierungsprofilen mittels SCS erarbeitet werden. Dabei soll die neueste Version der Simulationssoftware ISE-TCAD zum Einsatz kommen, die endlich auch für heterogene Halbleiterstrukturen dreidimensionale Simulationen erlaubt (bisher nur zwei-dimensional möglich). Diese Kriterien sollen im Experiment an einer derzeit noch im Aufbau befindlichen SCS-Apparatur erprobt werden. Ziel ist ein automatisierter Algorithmus zur Analyse von SCS-Daten.

Publikationen

Angehörige und Gäste des Graduiertenkollegs sind unterstrichen

Publikationen zu den bisherigen Ergebnissen dieser Arbeit befinden sich in Vorbereitung.

Teilnahme an Tagungen

- Frühjahrstagung des Arbeitskreises Festkörperphysik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)
in Regensburg, 27.-31.03.2000
- 3rd International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (NC-AFM 2000)
in Hamburg, 16.-19.07.2000
- 2nd International Conference on Scanning Probe Spectroscopy (SPS 2000)
in Hamburg, 19.-22.07.2000

Tagungsbeiträge als Mitautor

- “Scanning Capacitance Microscopy and Spectroscopy on Semiconductor Devices“
A. Born, J. Isenbart und R. Wiesendanger
10th International Conference on Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy and Related Proximal Probe Microscopy (STM 1999)
in Seoul, Südkorea, 19.-23.07.1999
Beitragsform: Poster

- „Simulationen der Rasterkapazitätsmikroskopie zur Bestimmung von pn -Übergängen“
O. Krause, J. Isenbart, A. Born und R. Wiesendanger
Treffen des Arbeitskreises Fehleranalyse, Infineon Technologies AG
in München, 21.10.1999
Beitragsform: Vortrag
- „Simulationen zur Rasterkapazitätsmikroskopie“
O. Krause, J. Isenbart, A. Born und R. Wiesendanger
Frühjahrstagung des Arbeitskreises Festkörperphysik der Deutschen Physikalischen
Gesellschaft (DPG)
in Regensburg, 27.-31.03.2000
Beitragsform: Vortrag
- „Dotierungsprofilanalyse von Halbleitermikrostrukturen mittels Scanning Spreading
Resistance Microscopy“
V. Hagen, J. Isenbart, A. Born und R. Wiesendanger
Frühjahrstagung des Arbeitskreises Festkörperphysik der Deutschen Physikalischen
Gesellschaft (DPG)
in Regensburg, 27.-31.03.2000
Beitragsform: Vortrag