

NANOTECHNOLOGISCHE ANWENDUNGEN  
DER RASTERKAPAZITÄTSMIKROSKOPIE  
UND VERWANDTER  
RASTERSONDENMETHODEN

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
des Fachbereichs Physik  
der Universität Hamburg

vorgelegt von

*Axel Born*

aus Bochum

Hamburg  
2000

Gutachter der Dissertation: *Prof. Dr. W. Hansen*  
*Prof. Dr. R. Wiesendanger*

Gutachter der Disputation: *Prof. Dr. D. Heitmann*  
*Prof. Dr. R. Wiesendanger*

Datum der Disputation: *7.6.2000*

Dekan  
des Fachbereichs Physik und  
Vorsitzender  
des Promotionsausschusses: *Prof. Dr. F.-W. Büßer*

## *Inhaltsangabe*

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit zwei attraktiven Themen: der Nanotechnologie und der Rastersondenmikroskopie (engl. Scanning Probe Microscopy, SPM). Die Nanotechnologie scheint das technologische Gebiet zu sein, das zukünftig enorme Chancen bietet, und die SPM scheint das - für die Nanowissenschaft und Technologie – geeignete Instrument zu sein.

Das *erste Kapitel* beginnt mit der Definition von Nanotechnologie und SPM. Weiterhin gibt es einen kurzen Überblick der in dieser Arbeit verwendeten SPMs.

Das *zweite Kapitel* befasst sich mit der SPM-Charakterisierung auf Nanometer-Ebene. Die SPM konnte sich in letzter Zeit als industrielles Analyse-Werkzeug durchsetzen, aufgrund ihrer exzellenten Ortsauflösung und ihrer Fähigkeit, unter Umgebungsbedingungen zu messen. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Analyse von zwei-dimensionalen Dotierprofilen. Das vielversprechendste Gerät für diese Nano-Charakterisierung scheint zz. das Rasterkapazitätsmikroskop (engl. Scanning Capacitance Microscope, SCM) zu sein. Es bietet eine Reihe von Vorteilen: Es ist kommerziell verfügbar, es bietet eine hohe laterale Auflösung und es ist einfach zu benutzen. Demgegenüber bemängeln viele SCM-Benutzer die Schwierigkeit hinsichtlich der Interpretation von SCM-Daten. Das Ziel des Kapitels 2.2 ist, ein physikalisches Verständnis des SCM herauszuarbeiten. Ausgangspunkte sind die Klärung der Auswirkungen der Eigenschaften des Kapazitätssensors, der Effekte der drei-dimensionalen Probe-Sonde-Geometrie und die Rolle einer geeigneten Probenpräparationstechnik. Dieses Wissen ermöglicht uns, Aussagen über die erreichbare Auflösung des SCMs zu treffen. Schließlich werden noch einige Beispiele aus dem Bereich der Fehleranalyse gezeigt.

Des weiteren werden im zweiten Kapitel noch die Auswirkungen des Messens unter Umgebungsbedingungen beleuchtet. Hierbei wird der Schwerpunkt auf die Effekte gelegt, die mit dem Wasserfilm auf der Proben-Oberfläche verbunden sind. Beruhend auf diesem Wasserfilm wird ein Modell vorgestellt, das alle – mittels Rasterkapazitätsspektroskopie (engl. Scanning Capacitance Spectroscopy, SCS) gemessenen – Hysterese-Effekte in C-V-Kurven erklären kann. Ein Vergleich von experimentellen und theoretischen Daten zeigt eine hervorragende Übereinstimmung. Diese Klärung der Hysterese-Effekte stellt eine sichere Basis für quantitative SCM- und SCS-Messungen dar. Von da an ist eine Konversion der SCM/SCS-Daten in eine verlässliche 2D-Karte der Dotier-Konzentration möglich. Dies wird am Ende des zweiten Kapitels dargestellt. Zum ersten Mal konnte auch die Konversion eines p-n-Übergangs gezeigt werden.

Das *dritte Kapitel* liefert einen Einblick in die mögliche Zukunft der Datenspeichertechnologie. Es werden zwei Prototypen beschrieben, die entwickelt wurden um eine ultra-hohe Datendichte und eine hohe Datentransferrate zu erreichen.

Das *letzte Kapitel* zieht ein Resümee der vorliegenden Arbeit und zeigt mögliche zukünftige Projekte auf.

## *Abstract*

The present work deals with two hot topics: Nanotechnology and Scanning Probe Microscopy (SPM). Nanotechnology seems to be the area that will most likely produce the breakthroughs of tomorrow, and SPM seems to be the proper instrument for nanoscience and technology.

The *first chapter* starts from definitions of nanotechnology and SPM. Furthermore, it gives a short survey of SPMs used in this work.

The *second chapter* deals with SPM-characterization on the nanometer scale. SPM has developed to become an important analytical tool in industrial surroundings, owing to its excellent spatial resolution and its ability to work under ambient conditions. The work focuses on the analysis of two-dimensional profiling of the dopant concentration. For nano-characterization, the Scanning Capacitance Microscope (SCM) seems to be the most promising tool. The SCM offers a lot of advantages: it is commercially available, it offers a high spatial resolution and it is easy to use. On the other hand, many SCM operators complain about a difficult interpretation of the results of SCM measurements. The objective of chapter 2.2 is to work out a firm basis for Scanning Capacitance Microscopy. Starting points are the explanation of the influence of the capacitance sensor, the effect of the 3D sample-probe-geometry on the measured capacitance-versus-voltage (C-V) curves and the role of a proper sample preparation technique. This knowledge enables us to make general statements about the possible resolution of SCM. Finally, some examples for failure analysis applications will be given.

Furthermore, the second chapter illustrates the influences of the surrounding environment. Here, the focus lies on effects depending on a water layer on the surface. In consideration of this water layer, it is possible to present a model explaining the hysteresis of C-V curves measured by Scanning Capacitance Spectroscopy (SCS). A comparison of experimental and theoretical data shows an excellent correspondence. This clarification of the hysteresis is the firm basis for quantitative SCM and SCS measurements. From now on, the conversion of SCM/SCS data into a reliable 2D map of the dopant concentration is possible and will be shown at the end of the second chapter. For the first time, the conversion of a p-n junction will be presented.

The *third chapter* gives an insight into the possible future of storage technologies. It deals with the description of two prototypes, that were developed to reach ultra-high-density-storage in combination with high data rates.

The *final chapter* gives a summary and an outlook with regard to further projects.

## *Inhaltsverzeichnis*

|   |            |
|---|------------|
| <b>1 Nanotechnologie und Rastersondenmethoden</b>     | <b>1</b>   |
| 1.1 Nanotechnologie.....                              | 2          |
| 1.2 Rastersondenmethoden.....                         | 4          |
| <br>  |            |
| <b>2 Nanoanalytik mit Rastersondenmethoden</b>        | <b>18</b>  |
| 2.1 Nanoanalytik von integrierten Schaltungen.....    | 19         |
| 2.2 Nanoanalytik zweidimensionaler Dotierprofile..... | 25         |
| 2.2.1 SCM (Scanning Capacitance Microscopy).....      | 38         |
| 2.2.1.1 Instrumentierung.....                         | 46         |
| 2.2.1.2 Sonden.....                                   | 56         |
| 2.2.1.3 Probenpräparation.....                        | 63         |
| 2.2.1.4 Dotierungs-Auflösung.....                     | 75         |
| 2.2.1.5 Laterale Auflösung.....                       | 79         |
| 2.2.1.6 SCM-Eichung.....                              | 87         |
| 2.2.1.7 Beispiele aus der Fehleranalyse.....          | 93         |
| 2.2.2 SCS (Scanning Capacitance Spectroscopy).....    | 99         |
| 2.2.3 Quantitative SCM.....                           | 111        |
| 2.3 Zusammenfassung und Ausblick.....                 | 118        |
| <br>  |            |
| <b>3 Nanostrukturierung mit Rastersondenmethoden</b>  | <b>120</b> |
| 3.1 Rastersondenmethoden für die Speichertechnologie  | 122        |
| 3.1.1 Ultra-High-Density-Storage-Systeme.....         | 124        |
| 3.1.2 High-Speed-Systeme.....                         | 131        |
| <br>  |            |
| <b>4 Zusammenfassung und Ausblick</b>                 | <b>135</b> |
| <br>  |            |
| <b>Literaturverzeichnis.....</b>                      | <b>140</b> |
| <b>Internet-Adressen.....</b>                         | <b>150</b> |
| <b>Anhang</b>   |            |
| Höchstempfindliche Kapazitäts-Sensoren.....           | 151        |
| <b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>                     | <b>159</b> |
| Veröffentlichungen und Präsentationen.....            | 160        |
| Danksagung.....                                       | 165        |

## *Prolog*

The emerging fields of nanoscience and nanoengineering are leading to unprecedented understanding and control over the fundamental building blocks of all physical things. This is likely to change the way almost everything – from vaccines to computers to automobile tires to objects not yet imaging – is designed and made.

Aus: "Nanotechnology. Shaping the World Atom by Atom."  
{<http://www.whitehouse.gov/WH/EOP/OSTP/NSTC/html/iwgn/IWGN.Public.Brochure/IWGN.Nanotechnology.Brochure.pdf>}

Seht ihr den Mond dort stehen?  
Er ist nur halb zu sehen  
Und ist doch rund und schön:  
So sind wohl manche Sachen,  
Die wir getrost belachen,  
Weil unsere Augen sie nicht sehn.

Wir stolzen Menschenkinder  
Sind eitel arme Sünder  
Und wissen gar nicht viel.  
Wir bauen Luftgespinste  
Und suchen viele Künste  
Und kommen weiter von dem Ziel.

Aus: „Der Mond ist aufgegangen.“  
{Kinderlied}