

Raster-Kelvinkraft-Mikroskopie zur quantitativen Dotierprofilierung an dotiertem Silizium und Mn-implantiertem Germanium

Christine Baumgart, Shengqiang Zhou, Manfred Helm, Heidemarie Schmidt

Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e.V., Institut für Ionenstrahlphysik u. Materialforschung, Germany

Einleitung

Die Untersuchung elektrischer Materialeigenschaften auf der Nanometerskala ist von großer Bedeutung für die Materialforschung sowie für verschiedene Industriezweige. Eine besondere Rolle spielt dabei die quantitative Bestimmung von Dotierprofilen in dotierten Halbleitermaterialien. Die Kenntnis der Dotierkonzentration auf der Nanometerskala ist essentiell für die Fehleranalyse von Halbleiterbauelementen sowie für die Optimierung der Herstellungsprozesse. Da sich die Größe der Halbleiterbauelemente in den letzten Jahren immer weiter verringert hat und mittlerweile im nm-Bereich liegt, werden insbesondere verschiedene Rastersonden-Mikroskopie-Methoden zur Untersuchung der Materialeigenschaften eingesetzt.

Die hauptsächlich genutzten Techniken zur Untersuchung der elektrischen Eigenschaften sind die Raster-Kapazitäts-Mikroskopie (Scanning capacitance microscopy, SCM)^[1-3], die Raster-Ausbreitungswiderstands-Mikroskopie (Scanning spreading resistace microscopy, SSRM)^[4-6] und die Raster-Kelvinkraft-Mikroskopie (Kelvin probe force microscopy, KPFM).

Für die quantitative Auswertung von SCM- und SSRM-Messdaten sind zeitaufwändige Kalibrierungsmessungen an wohldefinierten Proben nötig. Des Weiteren arbeiten SCM und SSRM im Kontakt-Modus, was bedeutet, dass die Messspitze während der Untersuchung über die Probenoberfläche kratzt. Dabei können sich lokal sowohl die Eigenschaften der Messspitze als auch die der Probe dramatisch ändern, was die Auswertung der Messergebnisse unter Verwendung von Kalibriermessdaten erheblich erschwert.

Die Raster-Kelvinkraft-Mikroskopie bietet den Vorteil, dass sie im Nicht-Kontakt-Modus arbeitet. Außerdem können gewonnene KPFM-Messdaten ohne Kalibrierung direkt quantitativ ausgewertet werden. Das möchten wir in diesem Artikel anhand von KPFM-Messungen an dotiertem Silizium und Mn-implantiertem Germanium zeigen.

Quantitative Raster-Kelvinkraft-Mikroskopie

Die Raster-Kelvinkraft-Mikroskopie ist eine spezielle Rastersonden-Mikroskopie-Methode, bei der neben der Oberflächen-Topographie auch elektrische Kräfte detektiert werden. KPFM basiert auf einer Methode, die 1898 von Lord Kelvin^[7] entwickelt wurde. Diese Methode wurde 1991 von Nonnenmacher *et al.* zum ersten Mal mit einem Rasterkraft-Mikroskop kombiniert und zur Untersuchung der elektrischen Eigenschaften von Metallen^[8] und Halbleitern^[9] genutzt. Seitdem

wird die KPFM-Technik in verschiedenen Forschungsgebieten, zum Beispiel zur Untersuchung der elektrischen Eigenschaften von metallbeschichteten Alkali-Chlorid-Dünnschichten^[10,11], Schaltungsträgern und planaren Widerständen^[12], oder von organischen Solarzellen^[13] verwendet. Untersucht wurde mittels KPFM auch die elektronische Bandverbiegung in Halbleiter-Grenzflächen^[14], Degradierungsprozesse in Heterostrukturen^[15] und elektrische Eigenschaften von Biomolekülen^[16-18]. Speziell auf dem Gebiet der Halbleiterphysik wurden Dotierprofile vermessen^[19,20] und pn-Übergänge ohne^[21,22] und mit^[23,24] angelegter Spannung untersucht.

Für die quantitative Auswertung der gemessenen KPFM-Daten muss die Ursache der elektrostatischen Kräfte, welche auf die leitende Messspitze wirken, verstanden werden. Erst kürzlich ist es uns gelungen, mithilfe einer neuen Interpretation des KPFM-Signals, quantitative Dotierprofilierung in Halbleitern mittels KPFM-Messungen durchzuführen^[25]. Das seit der Einführung der KPFM-Messtechnik genutzte Modell erklärte das KPFM-Messsignal als Kontakt-Potential-Differenz (Contact potential difference, CPD) zwischen leitender Messspitze und Probe. Abweichungen zwischen Messwert und berechnetem CPD-Wert wurden meist Oberflächenzuständen zugeschrieben^[26-29].

Wir konnten zeigen, dass das CPD-Modell ungeeignet ist, um das gemessene KPFM-Signal quantitativ zu beschreiben. Wie in Ref. 25 erklärt, basieren bei KPFM-Messungen an Halbleitern die elektrostatischen Kräfte, die auf die leitende Messspitze wirken, auf einem elektrischen Dipol, der sich an der Halbleiteroberfläche bildet. Dieser elektrische Dipol besteht aus mobilen Majoritätsladungsträgern, die in Oberflächenzuständen gefangen sind, und unabgeschirmten, unbeweglichen, ionisierten Dotieratomen darunter. Intrinsische Ladungsträger können bei KPFM-Raumtemperaturmessungen und genügend hoher Dotierung vernachlässigt werden. Man kann beispielsweise bei einer Dotierung in Ge größer als 10^{14} cm^{-3} und in Si größer als 10^{10} cm^{-3} von einer gleichen Anzahl von Ladungsträgern in Oberflächenzuständen und unabgeschirmten, unbeweglichen, ionisierten Dotieratomen ausgehen.

In Bezug auf die Position der leitenden Messspitze ist dieser elektrische Dipol asymmetrisch. Deswegen wirkt eine elektrische Kraft auf die Messspitze und die Messspitze wird ausgelenkt. Dieses Phänomen ist schematisch in Abbildung 1 auf der linken Seite dargestellt.

Während der KPFM-Messung wird die elektrostatische Kraft, die auf die Messspitze wirkt, durch Anlegen einer geeigneten Spannung, der KPFM Spannung U_K , abgebaut. Dies funktioniert nur, wenn der asymmetrische elektrische Dipol im Halbleiter abgebaut wird. Dazu werden mobile Majoritätsladungsträger in den Halbleiter injiziert, die daraufhin die unabgeschirmten, unbeweglichen, ionisierten Dotieratome abschirmen. Um Ladungsneutralität zu behalten, entladen sich zur gleichen Zeit die Oberflächenzustände. Dieser Aspekt der KPFM-Messung ist im mittleren Teil von Abbildung 1 dargestellt. Wenn der asymmetrische Dipol abgebaut ist, wirkt keine elektrostatische Kraft mehr auf die Messspitze und sie kehrt in ihre Ruhelage zurück, wie auf der rechten Seite in Abbildung 1 gezeigt ist.

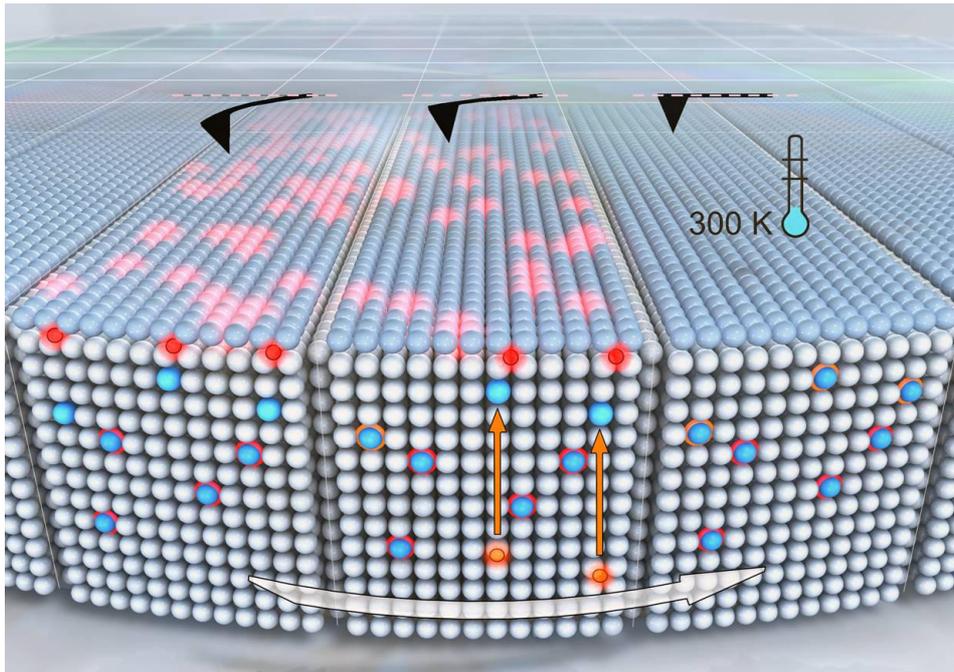


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Raster-Kelvinkraft-Mikroskopie: die Messspitze rastert über einen dotierten Halbleiter mit dünner Oxidschicht (symbolisch grau-blaue oberste Atomlage). Links: Den besetzten Oberflächenzuständen zwischen Oxidschicht und Halbleiter (rot) steht die gleiche Anzahl unabgeschirmter, unbeweglicher, ionisierter Dotieratome (dunkelblau) gegenüber. Der resultierende asymmetrische elektrische Dipol verursacht eine Auslenkung der Messspitze. Mitte: Durch die angelegte Spannung werden bewegliche Majoritätsträger in den Halbleiter eingebracht (orange), welche die unabgeschirmten, unbeweglichen, ionisierten Dotieratome abschirmen. Rechts: Dadurch wird der asymmetrische elektrische Dipol abgebaut und die elektrostatische Kraft auf die Messspitze verschwindet. Die Messspitze bewegt sich zurück in ihre Ruhelage. Die angelegte Spannung wird gemessen und mit der Konzentration der Dotieratome im Halbleiter korreliert. (Bild: Sander Münster, Kunstkosmos)

Eine Akkumulation von Majoritätsträgern wird in Halbleitern erreicht, indem die Spannung $[E_C - E_F(n)]/e$ beziehungsweise $[E_V - E_F(p)]/p$ über n- oder p-Typ dotierten Gebieten angelegt wird. Die KPFM-Spannung ist also korreliert mit der Energiedifferenz zwischen Fermi-Energie E_F und der entsprechenden Bandkante, also dem Leitungsband E_C in n-leitenden Halbleitern oder dem Valenzband E_V in p-leitenden Halbleitern

$$e \cdot U_K (\text{n-Typ}) = E_C - E_F (n), \quad (1)$$

$$p \cdot U_K (\text{p-Typ}) = E_V - E_F (p). \quad (2)$$

Die KPFM-Spannung ist unabhängig vom Spitzenpotential, was wir bereits anhand von Messungen mit verschiedenen dotierten Messspitzen an einer im Querschnitt präparierten Silizium-Epilayer-Probe zeigen konnten^[25]. Weitere Aspekte des präsentierten Modells, wie beispielsweise Besonderheiten bei der Untersuchung von pn-Übergängen, Messungen unter Umgebungsbedingungen und die Untersuchung von Bandverbiegungen sind ausführlich in Refs. 25 und 30 diskutiert.

Experimentelle Details

Die KPFM-Messungen wurden mit Hilfe eines Level-AFM der Anatec Instruments AG durchgeführt. Zur Detektion der elektrostatischen Kräfte werden hochdotierte, leitende Si-Messspitzen (MikroMasch NSC15/hd, $k = 46 \text{ N/m}$) genutzt. Topographie und KPFM-Spannung werden gleichzeitig aufgezeichnet. Die Messspitze schwingt bei ihrer Resonanz-Frequenz von ungefähr 320 kHz in einem mittleren Abstand von ungefähr 30 nm über der Probenoberfläche^[31]. Die Amplitude dieser Schwingung ist kleiner als 10 nm. Für die Detektion der elektrostatischen Kräfte wird eine Spannung U an die Probe angelegt. Diese besteht aus einem dc- und einem ac-Teil.

$$U = U_{\text{dc}} + U_{\text{ac}} \exp(2i\pi f_{\text{ac}} t) \quad (3)$$

Die Amplitude der ac-Spannung U_{ac} beträgt 6 V mit einer ac-Frequenz f_{ac} von 130 kHz. Der dc-Teil der angelegten Spannung wird während der KPFM-Messung variiert, um die elektrostatischen Kräfte auf die Messspitze zu minimieren. Die Schwingungsamplitude der Messspitze, verursacht durch elektrostatische Kräfte, ist kleiner als 20 pm^[31].

Das Level-AFM wird während der KPFM-Messung komplett vom Umgebungslicht abgeschirmt, so dass die Generation von photoinduzierten Ladungsträgern ausgeschlossen werden kann.

Dotiertes Silizium

Eine häufige Anwendung von dotierten Halbleitern sind elektrisch-dotierte Siliziumstrukturen. Im Folgenden wird eine konventionelle Static Random Access Memory (SRAM) Zelle diskutiert. Die SRAM Zelle ist eine Standard SCM-Probe, wie sie von Veeco Instruments verkauft wird^[32]. Die Herstellung der SRAM-Zellen und deren Dotierprofil sind ausführlich in Ref. 33 beschrieben.

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der KPFM-Messung an einer SRAM-Zelle zusammengefasst dargestellt. Die Bilder 2(a) und 2(b) zeigen jeweils die gleichzeitig gemessene Oberflächen-Topographie und die KPFM-Spannung. Die blaue Linie in Bild 2(b) markiert die untersuchte Schnittlinie. Wie in Bild 2(c) am schematischen Aufbau der SRAM dargestellt ist, verläuft die Schnittlinie entlang „n⁺“-Gebieten und „n-channel“-Gebieten. Die „n⁺“-Gebiete wurden mit Arsen implantiert und enthalten eine Donator-Konzentration von $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Die „n-channel“-Gebiete wurden mit BF_{2+} -Ionen implantiert und weisen eine Akzeptor-Konzentration von $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ auf. Diese Werte wurden benutzt, um die Fermi-Energie E_F zu berechnen und die gemessene KPFM-Spannung mit den erwarteten Energie-Differenzen $[E_C - E_F (n)]$ and $[E_V - E_F (p)]$ zu vergleichen. Dies ist in Bild 2(d) dargestellt. Die blaue Kurve entspricht der gemessenen KPFM-Spannung entlang der beschriebenen Schnittlinie. Die Messwerte zeigen eine laterale Differenz von ungefähr 120 mV zwischen den „n⁺“-Gebieten und den „n-channel“-Gebieten. Dieser experimentelle Wert

stimmt sehr gut mit der errechneten Energie-Differenz von 130 meV überein, die mit Hilfe der roten Kurve in Bild 2(d) dargestellt ist.

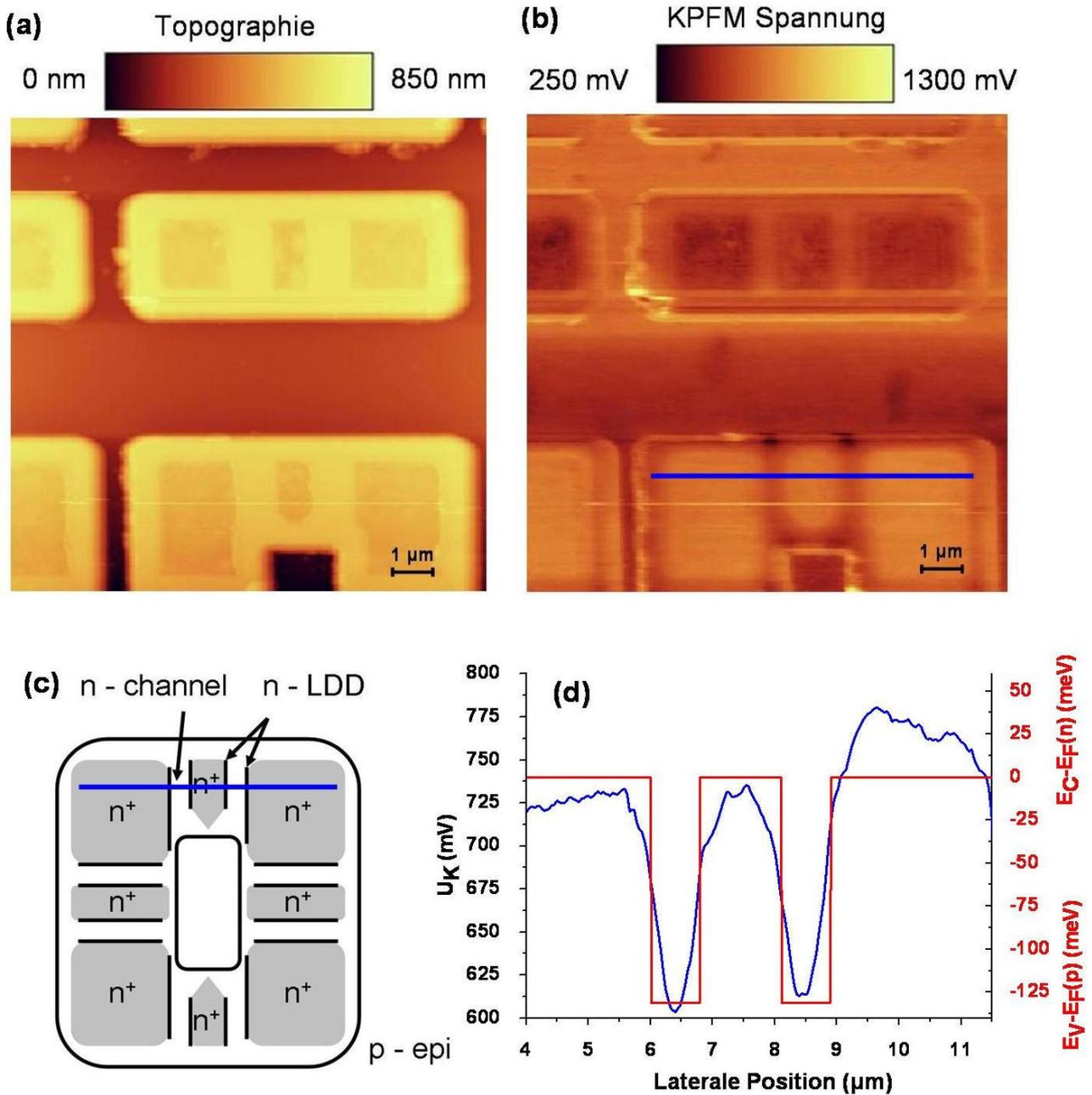


Abbildung 2: Ergebnisse der KPFM-Messung an einer konventionellen Static Random Access Memory (SRAM) Zelle^[32]. (a) Oberflächen-Topographie, (b) KPFM-Spannung mit markierter Schnittlinie (blau), (c) Schematische Skizze der dotierten Bereiche der SRAM-Zelle, (d) Vergleich zwischen der KPFM-Spannungsschnittlinie und den berechneten Energie-Differenzen $[E_C - E_F(n)]$ and $[E_V - E_F(p)]$.

Die präsentierte Interpretation der KPFM-Spannung erlaubt die quantitative Dotierprofilierung an Standard-Strukturen der Halbleiterindustrie.

Mn-implantiertes Germanium

Ein neues, potentiell großes Anwendungsgebiet der KPFM sind verdünnte magnetische Halbleiter. Beispielsweise sind sogenannte verdünnte ferromagnetische Halbleiter (diluted ferromagnetic semiconductors, FMS) vielversprechend für spintronische Anwendungen.

Im Folgenden werden die KPFM-Messungen an Mangan-implantiertem und mittels Laserausheilung rekristallisiertem Germanium diskutiert. Details der Ionenstrahl-Implantation und Laserausheilung werden in Ref. 34 diskutiert. Die Proben zeigen je nach verwendeter Energiedichte bei der gepulsten Laser-Ausheilung extrem verschiedene elektrische Leitfähigkeits- und Magnetotransporteigenschaften. Mit Hilfe der KPFM-Messungen konnte gezeigt werden, dass Mn-implantiertes Germanium, abhängig von der Energiedichte, während der gepulsten Laser-Ausheilung große strukturelle Unterschiede aufweist. Speziell die Verteilung der elektrisch aktivierten Dotanden spielt dabei eine große Rolle und erklärt die beobachteten unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeits- und Magnetotransporteigenschaften^[34].

In Abbildung 3 werden die KPFM-Spannungen für verschiedene Ge:Mn-Proben gezeigt. Bild 3(a) zeigt Mn-dotiertes Germanium direkt nach der Implantation. Die Probe zeigt eine homogene KPFM-Spannung, was auf eine homogene Verteilung der elektrisch aktiven Dotanden hinweist. Mit Hilfe von Hall-Messungen wurde die Loch-Konzentration der Ge:Mn-Probe in Abb. 3 (a) bestimmt. Sie beträgt $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Die dunklen Streifen im Bild der KPFM-Spannung werden durch Kratzer in der Probenoberfläche verursacht. Die Struktur der Oberfläche ist dort geschädigt, was zu einer veränderten KPFM-Spannung an diesen Stellen führt. In Abb. 3(b) ist die KPFM-Spannung über einer Ge:Mn-Probe gezeigt, die für 300 ns bei einer Energiedichte von 1.0 J/cm^2 ausgeheilt wurde.

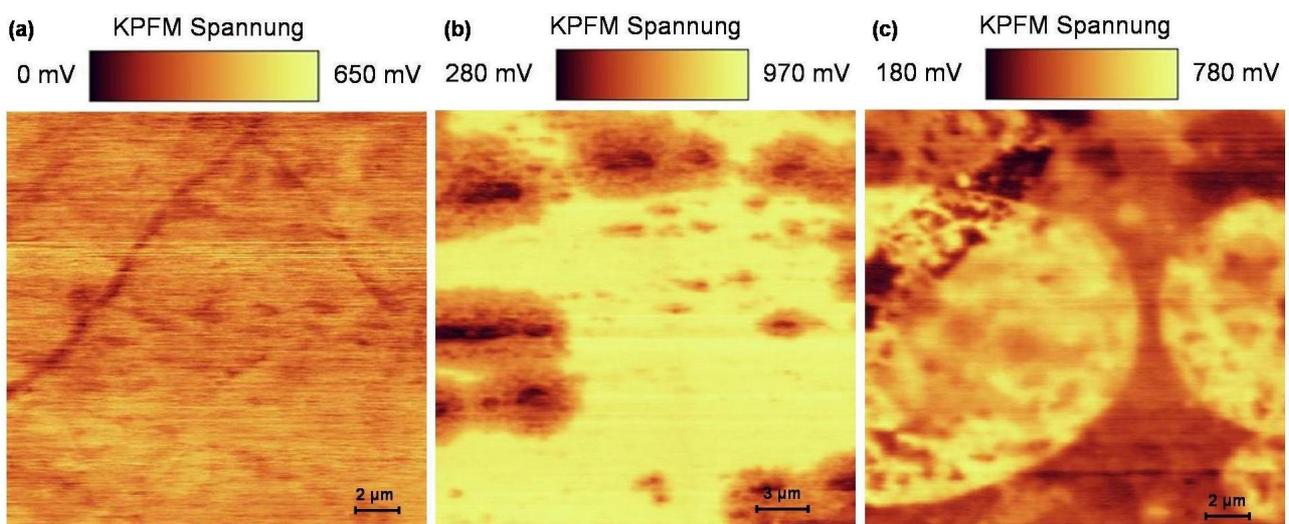


Abbildung 3: Ergebnisse der KPFM-Messung an Mangan-implantiertem Germanium^[34] in Abhängigkeit der gepulsten Laser-Ausheilung (a) nach der Implantation (b) ausgeheilt für 300 ns bei 1.0 J/cm^2 , (c) ausgeheilt für 300 ns bei 1.5 J/cm^2

Man erkennt eine klare strukturelle Unterteilung in Bereiche mit hoher Loch-Konzentration (dunkel) und geringer Loch-Konzentration (hell). Die Bereiche mit hoher Loch-Konzentration sind insel-förmig in einem Gebiet mit der geringen Loch-Konzentration verteilt und nicht durch die Probe hindurch miteinander verbunden. Das erklärt die verringerte elektrische Leitfähigkeit und die Verschlechterung der Magnetotransporteigenschaften dieser Probe^[34]. Die laterale Differenz der KPFM-Spannung zwischen den Bereichen mit hoher und niedriger Loch-Konzentration beträgt ge-mittelt 312 mV. Dies entspricht knapp der Hälfte der Bandlücke E_g von Germanium ($E_g = 660$ meV) und bestätigt die extremen Unterschiede der Lochkonzentration in den beiden untersuchten Be-reichen. Mit Hilfe von Hall-Messungen wurde eine Loch-Konzentration von ungefähr $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ in den Gebieten mit hoher Loch-Konzentration ermittelt. Die Gebiete mit niedriger Loch-Konzentration enthalten eine vernachlässigbar geringe Anzahl von Löchern. Dieses Ergebnis ist in sehr guter Übereinstimmung mit der gemessenen KPFM-Spannungs-Differenz von 312 mV.

Die Ge:Mn-Probe, die in Bild 3(c) präsentiert ist, wurde für 300 ns mit einer Energiedichte von 1.5 J/cm^2 ausgeheilt. Sie zeigt eine extreme Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeits- und Magnetotransporteigenschaften. Aus dem Bild der KPFM-Spannung erkennt man deutlich, dass in diesem Fall die Gebiete mit geringer Loch-Konzentration (hell) cluster-förmig angeordnet sind. Die Bereiche mit hoher Loch-Konzentration (dunkel) sind über die gesamte Probe hinweg miteinander verbunden. Die laterale Differenz der KPFM-Spannung zwischen den Bereichen mit hoher und niedriger Loch-Konzentration beträgt gemittelt 330 mV. Dies entspricht der Hälfte der Bandlücke E_g von Germanium und bestätigt auch in diesem Fall die extremen Unterschiede der Loch-Konzentration in den beiden untersuchten Bereichen. Aus Hall-Messungen ergibt sich eine Loch-Konzentration von ungefähr $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ für die Bereiche mit hoher Loch-Konzentration. Wiederum korreliert die gemessene KPFM-Spannungs-Differenz zwischen den verschiedenen Bereichen sehr gut mit der quantitativen Loch-Konzentration.

Insgesamt ist es möglich, die beobachteten Unterschiede in elektrischem und magnetischem Transport der verschieden ausgeheilten Proben mit Hilfe der Raster-Kelvinkraft-Mikroskopie quantitativ mit der strukturellen Verteilung des Mangans und der damit verbundenen Loch-Konzentration zu verknüpfen.

Zusammenfassung

Am Beispiel von dotierten Halbleitern konnte gezeigt werden, dass es mit Hilfe der korrekten Interpretation von KPFM-Daten möglich ist, die gemessene KPFM-Spannung mit der Ladungsträger-Konzentration in den untersuchten Halbleitern zu korrelieren. Die präsentierten Ergebnisse an dotiertem Silizium und Mn-implantiertem Germanium legen nahe, dass die Modellierung der KPFM-Spannung auf alle dotierten Halbleitermaterialien angewandt werden kann, solange die intrinsische Ladungsträgerkonzentration geringer als die Dotierkonzentration ist. Wir erwarten, dass in Zukunft die KPFM-Methode auch zur quantitativen Untersuchung der

elektrischen Eigenschaften anderer Materialsysteme eingesetzt wird. Grundlage dafür ist immer das Verständnis der Ursache der mittels KPFM detektierten elektrostatischen Kräfte und die damit verbundene korrekte Interpretation der KPFM-Spannung.

Literatur

- [1] J. J. Kopanski, J. F. Marchiando and J. R. Lowney, *Materials Science and Engineering B* **44** (1997) 46.
- [2] F. Giannazzo, D. Goghero, V. Raineri, S. Mirabella and F. Priolo, *Appl. Phys. Lett.* **83** (2003) 2659.
- [3] F. Giannazzo, V. Raineri, S. Mirabella, E. Bruno, G. Impellizzeri and F. Priolo, *Materials Science and Engineering B* **124–125** (2005) 54.
- [4] L. Zhang, K. Ohuchi, K. Adachi, K. Ishimaru, M. Takayanagi and A. Nishiyama, *Appl. Phys. Lett.* **90** (2007) 192103.
- [5] L. Zhang, H. Tanimoto, K. Adachi and A. Nishiyama, *Electron Device Letters* **29** (2008) 799.
- [6] P. De Wolf, W. Vandervorst, H. Smith and N. Khalil, *J. Vac. Sci. Technol. B* **18** (2000) 540.
- [7] Lord Kelvin, *Phil. Mag.* **46** (1898) 82.
- [8] M. Nonnenmacher, M. P. O'Boyle and H. K. Wickramasinghe, *Appl. Phys. Lett.* **58** (1991) 2921.
- [9] M. Nonnenmacher, M. P. O'Boyle and H. K. Wickramasinghe, *Ultramicroscopy* **42-44** (1992) 268.
- [10] C. Loppacher, U. Zerweck and L. Eng, *Nanotechnology* **15** (2004) 49.
- [11] U. Zerweck, C. Loppacher, T. Otto, S. Grafström, and L. Eng, *Phys. Rev. B* **71** (2005) 125424.
- [12] I. Karpov, R. W. Belcher, and J. H. Linn. *Applied Surface Science* **125** (1998) 332 .
- [13] V. Palermo, S. Morelli, M Palma, C. Simpson, F. Nolde, A. Herrmann, K. Müllen and P. Samor. *ChemPhysChem* **7** (2006) 847853.
- [14] Ch. Sommerhalter, T. W. Matthes, T. Glatzel, A. Jäger-Waldau, and M. C. Lux-Steiner, *Applied Physics Letters* **75** (1999) 286.
- [15] W. Bergbauer, T. Lutz, W. Frammelsberger, and G. Benstetter, *Microelectronics Reliability* **46** (2006) 1736.
- [16] A. K. Sinensky and A. M. Belcher, *Nature Nanotechnology* **2** (2007) 653.
- [17] P. Gao and Y. Cai, *Anal. Bioanal. Chem.* **394** (2009) 207.
- [18] E. Mikamo-Satoh, F. Yamada, A. Takagi, T. Matsumoto, and T. Kawai, *Nanotechnology* **20** (2009) 145102.
- [19] N. Duhayon, P. Eyben, M. Fouchier, T. Clarysse, W. Vandervorst, D. Alvarez, S. Schoemann, M. Ciappa, M. Stangoni, W. Fichtner, P. Formanek, M. Kittler, V. Raineri, F. Giannazzo, D. Goghero, Y. Rosenwaks, R. Shikler, S. Saraf, S. Sadewasser, N. Barreau, T. Glatzel, M. Verheijen, S. A. M. Mentink, M. von Sprekelsen, T. Maltezopoulos, R. Wiesendanger and L. Hellemans, *J. Vac. Sci. Technol. B* **22** (2004) 385.
- [20] A. K. Henning, T. Hochwitz, J. Slinkman, J. Never, S. Hoffmann, P. Kaszuba and C. Daghljan, *J. Appl. Phys.* **77** (1995) 1888.
- [21] B.-Y. Tsui, C.-M. Hsieh, P.-C. Su, S.-D. Tzeng and S. Gwo, *Jpn. J. Appl. Phys.* **47** (2008) 4448.
- [22] M. Tanimoto and O. Vatel, *J. Vac. Sci. Technol. B* **14** (1996) 1547.
- [23] A. Doukkali, S. Ledain, C. Guasch and J. Bonnet, *Appl. Surf. Sci.* **235** (2004) 507.
- [24] G.H. Buh, H.J. Chung, C.K. Kim, J.H. Yi, I.T. Yoon and Y. Kuk, *Appl. Phys. Lett.* **77** (2000) 106.
- [25] C. Baumgart, M. Helm, H. Schmidt, *Phys. Rev. B* **80** (2009) 085305.
- [26] A.K. Henning, T. Hochwitz, J. Slinkman, J. Never, S. Hoffmann, P. Kaszuba, and C. Daghljan, *J. Appl. Phys.* **77** (1995) 1888.
- [27] A. Kikukawa, S. Hosaka, and R. Imura, *Appl. Phys. Lett.* **66** (1995) 3510.

- [28] S. Sadewasser, Th. Glatzel, R. Shikler, Y. Rosenwaks and M. Ch. Lux-Steiner, Appl. Surf. Sci. **210** (2003) 32.
- [29] Y. Rosenwaks, R. Shikler, Th. Glatzel and S. Sadewasser, Phys. Rev. B **70** (2004) 085320.
- [30] C. Baumgart, M. Helm, H. Schmidt, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. **1232** © 2010 Materials Research Society **1232-0007-02**, 30th November – 4th December 2009, USA.
- [31] F. Müller, A.-D. Müller, J. Vac. Sci. Technol. B **27** (2009) 969.
- [32] Application note AN079, Electrical characterization with Scanning capacitance probe microscopes, Veeco Instruments (2008).
- [33] M. W. Nelson, P. G. Schroeder, R. Schlaf and B. A. Parkinson, Electrochemical and Solid-State Letters **2** 475 (1999).
- [34] S. Zhou, D. Bürger, A. Mücklich, C. Baumgart, W. Skorupa, C. Timm, P. Oesterlin, M. Helm and H. Schmidt, Phys. Rev. B **81** (2010), 165204.