

# Ionenbestrahlung: neue Physik mit altem Prinzip

Mit Ionenstrahlen lassen sich Materialeigenschaften verändern, aber neuerdings auch geordnete Nanostrukturen erzeugen oder empfindliche Proben analysieren.

Carsten Ronning und Paul Ziemann

Ionenstrahltechniken spielen als Standardmethoden seit langem eine wichtige Rolle in der Festkörper- und Halbleiterphysik. So lassen sich etwa Materialien mit Ionenbestrahlung maßgeschneidert dotieren. In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass mit Ionenstrahlen trotz ihres statistischen Charakters geordnete Strukturen auf der Nanometerskala erzeugt werden können. Dabei spielen nichtlineares Verhalten und Ungleichgewichtseffekte eine entscheidende Rolle. Auch die Ionenstrahlanalytik erschließt sich durch immer bessere räumliche Auflösung neue Anwendungsbereiche.

In großem Stil wurden Ionenstrahlen erstmals zur Anreicherung von  $^{235}\text{U}$  im Manhattan-Projekt angewendet. Trotz dieser „militärischen Vergangenheit“ zeigen die nach dem Krieg rasant einsetzende Entwicklung verschiedener Ionenbestrahlungstechniken und ihre Anwendungen in der Festkörperphysik alle Zutaten einer „friedlichen“ physikalisch-technischen Erfolgsstory. Ionenstrahltechniken beinhalten die Möglichkeit, massenseparierte Ionen auf hohe Energien zu beschleunigen, um dann mit ihnen Festkörpertargets zu bombardieren. Dabei dringen die Ionen in die Targets ein und übertragen längs ihrer Bahn Energie an die umgebenden Atome und Elektronen, bis sie schließlich vollständig gestoppt sind. Eine Übersicht über die klassischen Haupteinsatzgebiete der Ionenbestrahlung, auf die wir in dieser Einleitung kurz eingehen möchten, sind in Abb. 1 als Funktion der Ionenenergie zusammengefasst.

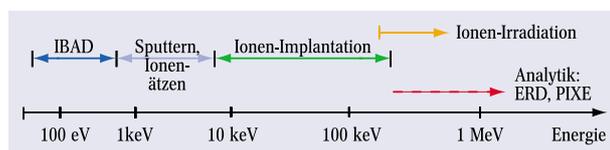
Eine besonders wichtige Anwendung ist die so genannte Ionenimplantation, mit der sich maßgeschneiderte Dotierungen vornehmen lassen. Ihr Erfolg stellte sich parallel zum eindrucksvollen Aufschwung



Eine aktuelle Anwendung für Ionenstrahlen ist die Analyse selbst empfindlicher Kunstgegenstände – hier eine 3600 Jahre alte Sargmaske – mithilfe der sog. PIXE (Proton-Induced X-ray Emission). Dabei wird die Probe mit hochenergetischen Protonen beschossen, die die Atome zur Aussendung charakteristischer Röntgenstrahlung anregen. (Quelle: HMI Berlin)

der Halbleitertechnologie ein mit ihrem Bedarf an lateral und in der Tiefe verschieden dotierten Gebieten. Welch große Rolle die Ionenimplantation als Methode der Wahl dabei spielt, ersieht man daraus, dass zur Herstellung eines modernen Prozessors bis zu 22 Implantationsschritte nötig sind. Als Folge der Halbleiteranwendungen entwickelte sich auch eine kommerzielle Implantator-Technologie mit heute etwa weltweit 4000 industriell eingesetzten Maschinen. Bei der Dotierung durch Implantation zeigt sich aber auch unmittelbar eine Kehrseite der Ionenstrahltechnik, denn die Ionen führen praktisch unvermeidbar zu Schäden am Target. Diese Tatsache führt häufig dazu, dass viele Physiker diese Methode als „grob-schlächtig“ beurteilen. Im Falle der Dotierung sind Defekte natürlich unerwünscht und müssen durch einen nachgeschalteten Ausheilschritt entfernt werden. In vielen Teilgebieten der Festkörperphysik hat sich aber gezeigt, dass umgekehrt ioneninduzierte Defekte ganz gezielt genutzt werden können, um elektrische, supraleitende, optische oder magnetische Eigenschaften zu verändern und für Anwendungen maßzuschneidern.

Ein weiterer wichtiger Prozess, der durch Bestrahlung von Festkörpern mit Ionen im Energiebereich einiger keV ausgelöst wird, ist das Abtragen von Oberflächenatomen („Sputtern“, von engl. to sputter: sprühen, zerstäuben). Impulsüberlegungen zeigen, dass ein solches Zerstäuben nur durch oberflächennahe Stoßkaskaden ausgelöst werden kann, welche lawinenartig viele angestoßene Wirtsatome umfassen. In der Anwendung hat sich dieser Typ Bestrahlung zu einem Standardverfahren entwickelt, beispielsweise unter



**Abb. 1:** Mit Ionenstrahlen lassen sich je nach Energie hochqualitative Filme herstellen (ionenunterstützte Deposition, IBAD), Oberflächen strukturieren (Sputtern), gezielt Halbleiter dotieren (Ionen-Implantation) und Struktur und Zusammensetzung von Materialien analysieren (ERD, PIXE).

Priv.-Doz. Dr. Carsten Ronning, II. Physikalisches Institut, Bunsenstraße 7-9, 37073 Göttingen; Prof. Dr. Paul Ziemann, Abteilung für Festkörperphysik, Albert-Einstein-Allee 11, 89069 Ulm

Nutzung von Edelgasionen zur Reinigung von Oberflächen, aber auch in Kombination mit lithographisch hergestellten Masken zur lateralen Oberflächenstrukturierung. Mithilfe rasterbarer Ionenquellen wird diese Art der bestrahlungsinduzierten Kraterbildung auch vielfach zur Tiefenprofilierung eingesetzt, etwa mittels Cäsium- oder Sauerstoffionen bei der Sekundärionen-Massenspektroskopie (SIMS), häufig aber auch mit Argonionen kombiniert mit Auger-Spektroskopie (AES).

Die Tatsache, dass sich durch Ionenbestrahlung Atome aus einer Festkörperoberfläche abtragen lassen, legt es nahe, sie für die Herstellung dünner Schichten (Filme) zu nutzen. Aus dieser Idee haben sich die vielen Varianten der „Sputterdeposition“ entwickelt. Die hierzu nötigen relativ niederenergetischen Ionen werden meist in einem Plasma erzeugt. Diese Lösung hat sicherlich viele pragmatische Vorteile. Für Grundlagenuntersuchungen ist es jedoch häufig unverzichtbar, Parameter wie Energie und Strom der Ionen kontrolliert und unabhängig voneinander einstellen zu können. In solchen Fällen kommen Ionenquellen zum Einsatz, primär, um aus einem Target Oberflächenatome abzutragen, welche dann auf einem Substrat als Film aufwachsen, sekundär aber auch, um den Film während seines Wachstums zusätzlich niederenergetisch zu bombardieren. Diese ionenunterstützte Depositionsmethode (Ion Beam Assisted Deposition, IBAD) liefert häufig eine hervorragende Filmqualität mit stark ausgeprägter Vorzugsorientierung der Wachstumsrichtung

oder sogar neue attraktive Materialien wie z. B. kubisches Bornitrid, das äußerst temperaturbeständig und fast so hart wie Diamant ist.

Zu den grundlegenden Aspekten, die zu Beginn der Ionenstrahlforschung im Vordergrund standen, zählten etwa die Frage nach den relevanten Wechselwirkungen zwischen Projektil und Festkörperatomen, ihrer Beschreibung durch geeignete Zwei-Körper-Potentiale sowie nach der Anwendbarkeit und den Grenzen klassischer Modelle. Nachdem die wichtigsten Energieverlustmechanismen eines Projektils längs seiner Bahn im Festkörper geklärt waren, ergaben sich daraus unmittelbar Konzepte, mit denen sich die wesentlichen Kenngrößen von Tiefenverteilungen implantierter Fremdatome berechnen ließen. Als Folge der vielen stochastischen Projektilstöße lässt sich ein solches Profil sehr häufig durch eine Gaußkurve beschreiben, charakterisiert durch die mittlere projizierte Reichweite  $R_p$  und die dazugehörige Varianz  $\Delta R_p$  (siehe Infokasten „Grundbegriffe und lineare Näherungen“). Eine weitere wichtige Klasse von Tiefenverteilungen sind die Schädigungsprofile, welche angeben, wieviel Energie von einem Projektil in einer Tiefe  $x$  gemessen von der Oberfläche des bestrahlten Targets innerhalb des Intervalls  $\Delta x$  deponiert wird. Dabei unterscheidet man Energieverluste des Projektils auf Grund seiner Wechselwirkung mit dem Elektronensystem (z. B. Anregung von Elektron-Loch-Paaren oder Plasmonen) und solchen als Folge von elastischen Zweier-Stößen mit Wirtsatomen. Überschreitet die bei einem solchen Stoß

1) Qualitativ verlässliche Ergebnisse liefert etwa das Monte-Carlo-Programm SRIM 2000 (www.srim.org), das realistische Implantationsprofile liefert.

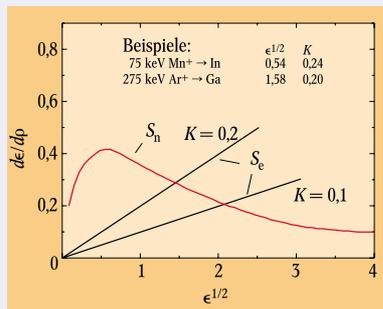
### Grundbegriffe und lineare Näherungen

Die wichtigste Kennzeichnung eines Bestrahlungsexperimentes ist die Angabe der Masse  $M_p$ ,  $M_T$  und Kernladungszahl  $Z_p$ ,  $Z_T$  von Projektil (P) bzw. Target (T). Die notwendige Angabe von  $Z$  signalisiert bereits, dass es sich nicht um „harte-Kugel-Stöße“ handelt wie beim Billard, sondern vielmehr um die Wechselwirkung durch abgeschirmte Coulomb-Potentiale, zumindest für kleine und mittlere Einschussenergien ( $< 1$  MeV) und nicht allzu leichte Projektile. Weitere wichtige Parameter sind, wie bereits erwähnt, Einschussenergie und -winkel; sie legen die projizierte Reichweite  $R_p$  für eine bestimmte Projektil-Target-Kombination fest. Für ein einzelnes Projektil ist  $R_p$  die Projektion des Reichwektektors (Verbindung des Einschuss- und Endpunktes) auf die Einschussrichtung. Auf Grund der Statistik der Stöße längs der Bahn ist  $R_p$  eine stochastische Variable, und man geht über zu Reichweiteverteilungen und ihren Momenten. Dabei erweisen sich Gauß-Verteilungen häufig als recht gute Näherung. In diesem Fall steht  $R_p$  für die mittlere projizierte Reichweite und  $\Delta R_p$  für die Varianz.

Die endliche Reichweite wird durch Energieverluste der Projektile längs ihrer Bahn verursacht. Dabei unterscheidet man zwischen Wechselwirkungen des Projektils mit dem Elektronensystem des Targets oder elastischen Stößen zwischen Projektil und abgeschirmten Kernen der Targetatome. Man spricht deshalb von „elektronischem“ und „nuklearem“ Energieverlust  $[(dE/dx)_e$  bzw.  $(dE/dx)_n]$ . Wählt man dimensionslose Energie- und Längenvariable in der Form

$$\varepsilon = E[a M_p/Z_p Z_T e^2(M_T + M_p)] \text{ und } q = RN M_T [4\pi a^2 M_p/(M_p + M_T)^2]$$

(hier steht  $a$  für den Thomas-Fermi-Abschirmradius,  $N$  für die Anzahldichte des Targets,  $e$  für die Elementarladung, und  $E$  bzw.  $R$  sind die dimensionsbehafteten Energie- und Längenvariablen), so schreiben sich die Energieverluste dimensionslos und universell für beliebige Target-Projektil-Kombinationen als  $(d\varepsilon/dq)_e = S_e$  und  $(d\varepsilon/dq)_n = S_n$ . In dieser Form erweist sich die unabhängige Überlagerung  $(d\varepsilon/dq)_{\text{tot}} = S_e + S_n$  als hervorragende Näherung. Einen Überblick über die Energieabhängigkeit der Einzelbeiträge im nicht-relativistischen Bereich liefert die nebenstehende Abbildung mit einer Auftragung gegen  $\varepsilon^{1/2}$ . Die so gefundene lineare Abhängigkeit des elektronischen Energieverlustes (die Proportionalitätskonstante  $K$  berechnet sich aus den Massen und Kernladungszahlen von Projektil und Targetatom) lässt sich interpretieren als Folge einer geschwindigkeitsproportionalen Reibungskraft, wie man sie auch im Drude-Modell zur Ableitung des elektrischen Widerstands annimmt. Wichtiges Merkmal ist auch das Maximum der nuklearen Energieverluste bei  $\varepsilon_m^{1/2} = 0,6$  sowie die Tatsache, dass bei niedrigen Energien (typisch  $< 10$  keV)  $S_n$  dominiert, bei mittleren Energien von einigen hundert keV  $S_e$  und  $S_n$  etwa gleiche Anteile aufweisen, bei hohen Energien im MeV-Bereich, wie sie überwiegend zur Ionenstrahlanalytik benutzt werden, defekterzeugende nukleare Stöße aber praktisch vernachlässigbar sind.



übertragene Energie einen für das Target charakteristischen Schwellenwert, so können Wirtsatome bleibend verlagert und dadurch Strahlenschaden erzeugt werden. Die Berechnung von Schädigungsprofilen ist erheblich aufwändiger als diejenige von Implantationsverteilungen, da hierzu ja nicht nur die primären Stöße zwischen Projektil und Wirtsatom berücksichtigt werden müssen, sondern auch die dadurch ausgelösten Stoßkaskaden, bei denen primär angestoßene Wirtsatome ihrerseits als Projektile wieder weitere Wirtsatome verlagern. Behandelt man die in der Kaskade auftretenden Wechselwirkungen als Zweier-Stöße in linearer Näherung, bei welcher stets zwischen einem „fliegenden“ Projektil und einem ruhenden Stoßpartner unterschieden wird, so lassen sich auch Schädigungsprofile mit Monte-Carlo-Methoden recht zuverlässig berechnen<sup>1)</sup>. Diese lineare Näherung erwies sich als außerordentlich erfolgreich. Sie erlaubte nicht nur die Berechnung von Reichweite- und Schädigungsprofilen, sondern auch der Abtragsrate einer ionenbombardierte Festkörperoberfläche („Sputter-Effekt“) mit detaillierten Aussagen darüber, wie die Abtragsrate von Einfallswinkel und Einschussenergie der Projektile abhängt.

Viele Experimente haben aber auch bereits klare Hinweise geliefert, dass die Beschreibung von Bestrahlungsprozessen durch lineare Kaskaden nicht ausreichend sein kann. Eine alternative Beschreibung der unmittelbaren Umgebung eines primären Stoßes zwischen Projektil und Wirtsatom – mit vielen sekundär angestoßenen Atomen, die, losgelöst von ihrer Gleichgewichtsposition, miteinander wechselwirken – besteht darin, sie als kurzlebige (typisch  $10^{-12}$  s) lokale Schmelze aufzufassen. Ein solches nichtlineares Szenario wird vielfach „Spike“ genannt, wegen der hohen auftretenden Energiedichte physikalisch korrekt als „Energie-Spike“, häufig auch anschaulicher, aber sehr viel interpretationsbedürftiger als „Temperatur-Spike“. Zur theoretischen Beschreibung solcher Spikes lassen sich die bereits angesprochenen Monte-Carlo-Methoden nicht mehr einsetzen, und sie müssen durch molekulardynamische Rechnungen ersetzt werden. Ein Beispiel findet sich im Infokasten „Nichtlinearitäten und Spikes“.

Bei einer solch ertragreichen Vergangenheit stellt sich die Frage, ob sich mit dieser Standardmethode Ionenbestrahlung auch weiterhin „innovative Physik“ realisieren lässt. In den folgenden Abschnitten wollen wir demonstrieren, dass die Entwicklung der Ionenbestrahlung nicht etwa bereits abgeschlossen ist, vielmehr lassen neue, zum Teil überraschende Phänomene eine erfolgreiche Zukunft erwarten.

### Nichtlinearitäten und Nicht-Gleichgewichte: Effekte auf der Nanoskala

Völlig überraschend und geradezu „gegenintuitiv“ ist für viele Physiker die Tatsache, dass Ionenbestrahlung trotz ihres statistischen Charakters in der Lage ist, geordnete Strukturen auf der Nanometerskala zu erzeugen. Wie wir im Folgenden demonstrieren wollen, gilt dies nicht nur für Strukturen auf Oberflächen, obwohl dort besonders augenscheinlich und spektakulär, sondern auch für solche im Innern eines Festkörpers.

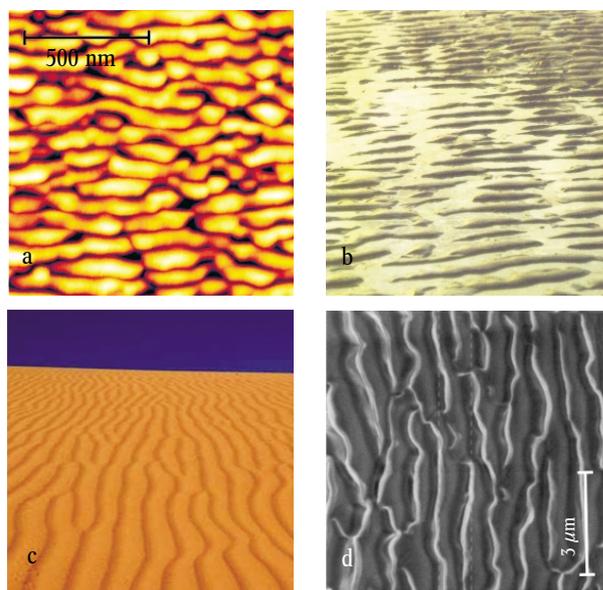
#### Ioneninduzierte Nanostrukturen auf Oberflächen

Durch Ionenbestrahlung erfahren Festkörperoberflächen zwei wesentliche Änderungen. Zum einen werden sie durch Defekte wie Leerstellen, Zwischengitter- und Adatome modifiziert und zum anderen durch Zerstäubung abgetragen. Der durch die Bestrahlung verursachte lokale Energieeintrag führt aber auch zu höheren atomaren Hüpfraten mit Konsequenzen auf die Oberflächendiffusion. Dies gilt insbesondere für relativ geringe Einschussenergien ( $< 30$  keV), wie sie in Sputterexperimenten zur Anwendung kommen, da hierbei oberflächennahe Kaskaden oder Spikes ausgelöst werden. Auf Grund des Zusammenspiels dieser beiden Prozesse – der Zerstäubung und Oberflächendiffusion – kann sich bei nicht-senkrecht Einfall der Ionen ein periodisches Wellenmuster auf der Oberfläche ausbilden wie in Abb. 2 anhand von Ergebnissen aus Göttingen gezeigt.

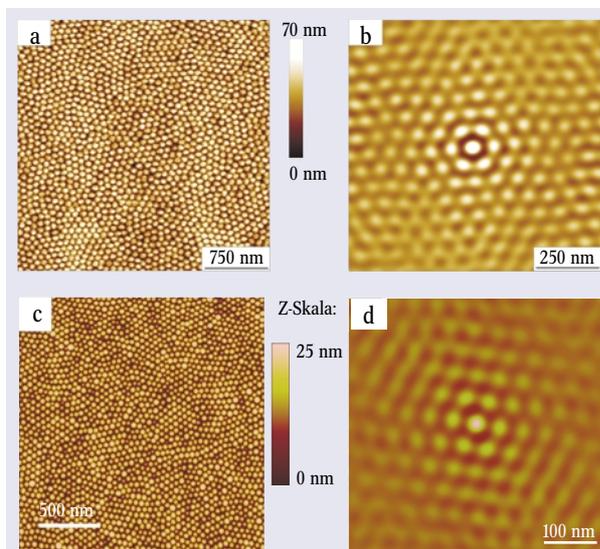
Die Ioneninduzierten Wellenmuster weisen Periodizitäten zwischen 40 und 700 nm auf und sind senkrecht oder parallel zur Bestrahlungsrichtung orientiert, je nachdem, ob ein kritischer Winkel der Einfallrichtung über- oder unterschritten wird [1]. Abbildung 2 demonstriert zwar eine auffallende Ähnlichkeit mit Wellenmustern auf Sandflächen, dort verursacht durch Wind- oder Wassereinwirkung, der physikalische Hintergrund ist jedoch völlig verschieden [2]. Gemeinsam ist zwar der Aspekt eines Materialabtrages, bei den Ionenindu-

zierten Mustern kommen jedoch Diffusionsprozesse auf atomarer Skala hinzu. Entscheidend für das Ausbilden des Ioneninduzierten Wellenmusters ist die Abhängigkeit der Abtragerate von der lokalen Krümmung der Festkörperoberfläche. Dies führt dazu, dass bei senkrechtem Einfall „Täler“ stärker abgetragen werden als „Hügel“, eine glatte oder gleichmäßig raue Oberfläche also durch den Beschuss instabil wird. Der beschriebene Trend wird mit zunehmend schrägem Einfall schwächer und dreht sich ab einem kritischen Winkel sogar um, dann wird die Erosion der Hügel stärker als diejenige in den Tälern. In beiden Fällen wirken aber die Oberflächendiffusion und auch die auftretende erneute Deposition bereits gesputterter Atome der Instabilität entgegen. Aus diesem Gegenspiel resultieren die beobachteten Muster.

Selbstorganisierende Mechanismen wie sie bei der Bestrahlung mit niederenergetischen Ionen zur Erzeugung von Wellenmustern genutzt wurden, spielen auch

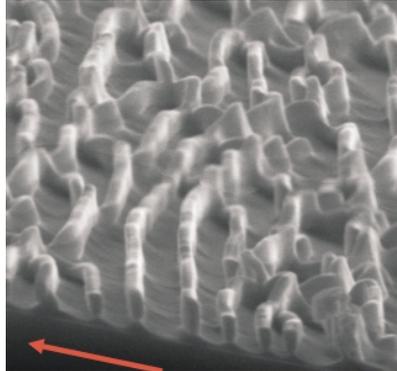


**Abb. 2:** Ionenstrahlen erzeugen oft Oberflächenstrukturen, die etwa den Rippeln am Meeresboden oder auf Dünen ähneln: Graphit-Oberfläche nach Beschuss mit Xenon-Ionen (a), wellenförmige Strukturen im Wattenmeer (b), Strukturbildung im Wüstensand durch Wind (c), Wellenstrukturen auf Silizium-Oberfläche mit einem fokussierten Gallium-Ionenstrahl erzeugt (d). (nach [1])



**Abb. 3:** Unter dem Atomkraftmikroskop zeigen sich nach der Bestrahlung mit Ar-Ionen regelmäßige Nanostrukturen auf einer InP- (a) bzw. GaSb-Oberfläche (c). In beiden Fällen lässt sich anhand der zweidimensionalen Autokorrelationsfunktionen eine hexagonale Nahordnung (b: InP, d: GaSb) feststellen. (nach [3,4])

eine maßgebliche Rolle bei der ioneninduzierten Präparation regelmäßig angeordneter Quantenpunkte. Ein Beispiel hierfür zeigt Abb. 3 mit Ergebnissen aus Leipzig und Aachen [3, 4]. Diese atomkraftmikroskopischen Aufnahmen lassen auf mittlere Durchmesser der InP- und GaSb-Quantenpunkte von ca. 80 bzw. 40 nm schließen. Ähnlich wie bei den Wellenmustern steigen der Durchmesser, die Höhe und auch die Periodizität der Quantenpunkte mit wachsender Bestrah-



**Abb. 4:** Die Oberfläche eines NiO/SiO<sub>2</sub>-Schichtpakets nach Bestrahlung mit 250-MeV-Xe-Ionen. Unter dem Rasterelektronenmikroskop zeigt sich eine zur Strahlrichtung (roter Pfeil) senkrecht orientierte Lamellenstruktur. (aus [5])

lungsfuoz und Einschussenergie an. Die Anordnung der einzelnen Quantenpunkte ist hoch symmetrisch und weist in beiden Fällen eine hexagonale Nahordnung auf. Die Symmetrie lässt sich ebenso wie die Größe und Abstände der Quantenpunkte mithilfe von Bestrahlungsparametern gezielt steuern. So können z. B. durch Änderung der Bestrahlungstemperatur auch quadratische Muster realisiert werden.

Periodische Wellenmuster auf Oberflächen im Nanometerbereich lassen sich auch mit extrem hoch energetischen Ionen herstellen [5], wie die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme (Abb. 4) eines NiO/SiO<sub>2</sub>-Schichtpakets nach Bestrahlung mit hochenergetischen Xe-Ionen zeigt. Bei hohen Ionenenergien spielen die Zerstäubung und die ioneninduzierte Diffusion von

Oberflächenatomen praktisch keine Rolle mehr, der verursachende Mechanismus muss also völlig verschieden von demjenigen im niederenergetischen Fall sein. Wegen des extrem plastischen Verhaltens der Materie unter diesen Bestrahlungsbedingungen wird auch vom „Hammer-Effekt“ der Ionen gesprochen. Es ist der sehr hohe elektronische Energieverlust entlang der Ionenspur, der das Material kurzzeitig lokal aufschmilzt, das sich unmittelbar danach durch schnelles Abschrecken wieder verfestigt. Dieser Nicht-Gleichgewichtsvorgang führt zu mechanischen Scherspannungen, die wiederum mit zunehmender Fluoz dazu führen, dass der Films aufreißt und sich plastisch verformt.

Besonders überraschend ist das letzte Beispiel aus dem Bereich der Oberflächenmodifizierung durch Ionenbestrahlung, das „Nanosculpting“ einer Gruppe aus Harvard (USA) [6]. Während man üblicherweise Ionenbestrahlung benützt, um Material abzutragen, also z. B. um „Löcher“ zu erzeugen, werden beim Nanosculpting vorgefertigte Löcher mit dem Ionenstrahl schrittweise und kontrolliert auf der Nanoskala wieder geschlossen. Durch die ioneninduzierte Oberflächendiffusion entsteht ein lateraler Materialtransport bevorzugt zum Rand des Loches, welches dadurch kontinuierlich geschlossen werden kann. Verringert sich die Oberflächendiffusion durch Absenken der Substrattemperatur, so gewinnt andererseits wieder die Zerstäubung. Der Prozess wird somit reversibel und das Loch lässt sich wieder öffnen. Eine attraktive Anwendung solcher „Nanosiebe“ ist in der Biophysik die Trennung von Makromolekülen.

**Funktionsänderungen auf der Nanoskala**

Um die Eigenschaften eines Festkörpers über einen Bereich von Mikrometern durch Ionenbestrahlung beeinflussen zu können, sind hohe Einschussenergien notwendig. Dies führt zur Ausbildung von „Ionenspuren“ mit typischen Durchmessern von 5–10 nm, deren Struktur und damit häufig auch physikalische Eigenschaften durch den hohen elektronischen oder nuklearen Energieverlust der Ionen stark geändert sind im Vergleich zu ihrer Umgebung. Ein Beispiel sind solche Spuren in isolierendem diamantähnlichen Kohlenstoff [7]. Hierzu werden hochenergetische schwere Ionen (z. B. 250 MeV Au<sup>27+</sup>) eingesetzt mit typischen Energieverlusten längs ihrer Spur von 30 keV pro nm. Dies reicht zur Graphitisierung der Bahn aus. Auf diese Art erhält man elektrisch leitfähige Spuren mit Durchmessern von nur wenigen Nanometern in einer isolierenden Matrix. So hergestellte elektrische Funktionsstrukturen werden zurzeit für Elektronen-Feldemissionsanwendungen in Betracht gezogen.

Die Beschreibung der Entstehung einer Ionenspur und des damit verbundenen plastischen Materialverhaltens hat in jüngster Zeit selbst wieder zu interessanten physikalischen Ergebnissen geführt [5, 8]. Das resultierende Material mit langen schlauchartigen Poren bietet zudem ein hohes Potenzial für biologische Anwendungen, ähnlich wie die bereits beschriebenen, durch „Nanosculpting“ erzeugten Löcher.

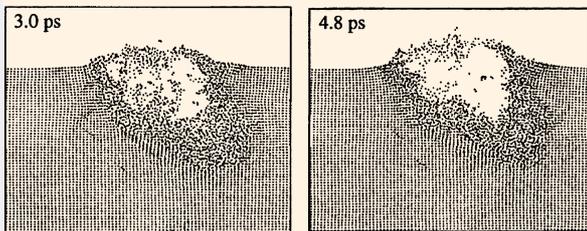
Mithilfe der Ionenbestrahlung lassen sich nicht nur die elektrischen Eigenschaften, sondern auch das Hystereseverhalten magnetischer Proben signifikant ändern. Dieses für Anwendungen wichtige Ergebnis wurde zuerst von einer französischen Gruppe für symmetrische Hysteresen von Co-Pt-Vielfachschichten gezeigt [9], deren Koerzitivfelder durch Ionenbombardement

**Nichtlinearität und Spikes**

Verlässt man die lineare Näherung, wonach bei den ausschließlich behandelten binären Stößen zwischen einem bewegten Projektil und einem ruhenden Stoßpartner unterschieden wird, so kommt man in den nicht-linearen Bereich der Spikes. Auch hier lassen sich noch qualitativ drei Zeitskalen unterscheiden: 1. Übertragung und Verteilung von Energie hauptsächlich in

dichte durch eine entsprechend hohe lokale Temperatur beschreiben („thermal spike“). Die theoretische Beschreibung erfolgt bei Kenntnis geeigneter Wechselwirkungspotentiale durch klassische molekulardynamische Rechnung [16]. In dem nachfolgenden Beispiel ist dies für eine 20-keV-Au<sup>+</sup>-Bestrahlung von Gold demonstriert und zwar anhand zweier „Schnappschüsse“ nach

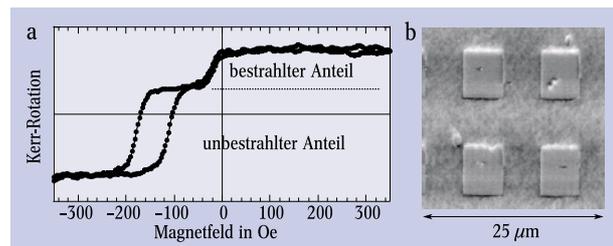
3,0 ps und 4,8 ps. Im Vergleich zur linearen Beschreibung (s. Infokasten „Grundbegriffe ...“) kommt man zwar zu etwa derselben mittleren Reichweite der Au-Projektile von 4,2 nm (Mitte des



Zweier-Stößen in sehr kurzen Zeiten gerechnet vom Primärstoß (<10<sup>-15</sup> s), 2. Thermalisierung der lokal angestoßenen Targetatome (<10<sup>-11</sup> s) und 3. Relaxationsprozesse (<10<sup>-10</sup> s). Näherungsweise lässt sich in Phase 2 das lokal angeregte Gebiet hoher Energie-

Spikegebietes von der Ausgangsoberfläche, augenscheinlich sind aber die vielen gleichzeitig mobilen Goldatome, deren Wechselwirkung in linearer Näherung nicht berücksichtigt ist, sowie die Tendenz einer Leerstellenansammlung im Innern des Spikes.

dramatisch verkleinert werden konnten. Damit ließ sich das magnetische Verhalten lateral auf der  $\mu\text{m}$ -Skala relativ einfach strukturieren, indem es durch lithographische Masken bestrahlt wurde. In jüngster Zeit wurde ein starker Bestrahlungseinfluss auch für asymmetrische Hysteresekurven („exchange bias“) von einer Gruppe aus Kaiserlautern demonstriert [10]. Solche verschobenen Hysteresekurven spielen in der Anwendung des „Riesenmagnetowiderstandes“ (GMR, Giant



**Abb. 5:** Hysteresis-Verhalten (a) und magnetkraftmikroskopische Aufnahme einer FeNi/FeMn-Doppelschicht, die mit 10-keV-He-Ionen durch vier  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  große Fenster bestrahlt wurde. Der bestrahlte Teil weist nach dem Ionenbombardement ein praktisch reversibles Magnetisierungsverhalten auf. (nach [10])

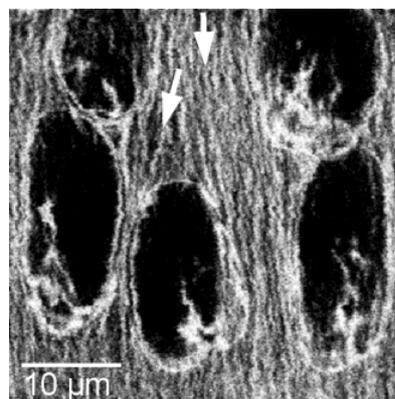
Magneto Resistance) eine entscheidende Rolle. Man nützt dabei aus, dass der elektrische Widerstand eines Schichtpaketes vom Typ FM/NM/FM (hier steht FM für eine ferromagnetische und NM für eine nicht-magnetische Schicht) von der relativen Magnetisierungsorientierung der beiden FM-Schichten abhängt: kleiner Widerstand bei paralleler, großer Widerstand bei antiparalleler Magnetisierung. Gelingt es nun, die Magnetisierung eines der beiden FM-Filme zu fixieren, während die andere noch auf ein äußeres Feld reagieren kann, so hat man einen Sensor realisiert, dessen Widerstand Größe und Orientierung eines externen Magnetfeldes bestimmt. Die dazu notwendige Fixierung erreicht man genau durch den „exchange bias“-Effekt, welcher seinerseits durch Kopplung einer FM-Schicht an eine dritte antiferromagnetische Schicht (AFM) zustande kommt. Das resultierende Verschiebungsfeld der asymmetrischen Hysterese ist ein Maß dafür, inwieweit sich das äußere Feld ändern darf, ohne die festgehaltene Orientierung des FM-Filmes zu verlieren. Dies ist der Hintergrund zu Abbildung 5, welche die Hysterese sowie eine magnetische Kraftmikroskopie-Aufnahme (MFM) einer FM-AFM FeNi-FeMn-Lagenstruktur zeigt, die durch vier Fenster teilweise mit He-Ionen bestrahlt wurde. Deutlich ist in beiden Teilabbildungen der Bestrahlungseffekt zu erkennen. Bei der Hysteresemessung, die hier optisch mit Hilfe des Kerr-Effektes erfolgte, bestimmt man in einem Schritt das Verhalten der bestrahlten und unbestrahlten Bereiche. Letztere zeigen die erwartete verschobene Hysterese, während die bestrahlten Anteile praktisch ein reversibles Magnetisierungsverhalten nahe dem Feld null aufweisen. Die unterschiedliche Remanenz dieser Bereiche spiegelt sich dann auch in den MFM-Aufnahmen wider und macht die vier quadratischen Bestrahlungsfenster sichtbar. Mit dem obigen Anwendungshintergrund wird der Vorteil der Ionenbestrahlung klar: GMR-Sensoren lassen sich lokal „schreiben“ und optimieren und dies, ohne die Oberflächentopologie der benutzten Schichten zu verändern.

Bisher haben wir neuartige Effekte diskutiert, die verursacht wurden durch Bestrahlung mit Projektilen,

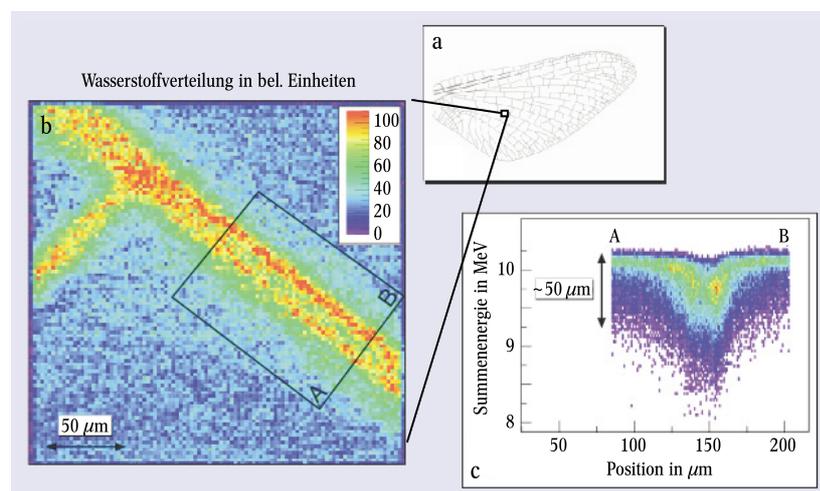
deren spezifisch chemischer Einfluss praktisch vernachlässigbar war, entweder weil chemisch inerte Edelgasionen benutzt wurden oder weil die Projektile nicht im untersuchten Film, sondern im dahinterliegenden Substrat zur Ruhe kamen. Der chemische Aspekt erhält aber beim gezielten Einbringen von Fremdatomen in ein Target entscheidende Bedeutung. Wählt man unlösliche Fremdatome, so lassen sich durch Implantation Nichtgleichgewichtsphasen erzeugen, die selbst wieder attraktive Eigenschaften aufweisen können. Aber auch deren nachträgliches Tempern eröffnet durch Ausbildung komplexer Präzipitatstrukturen auf der Nanometerskala ein neues materialwissenschaftliches Feld [11, 12]. Die Eigenschaften solcher vergrabenen metallischen oder halbleitenden Ausscheidungen sind größenabhängig und bieten ein interessantes elektronisches und nicht-lineares optisches Verhalten. So findet man mit abnehmender Größe der eingebetteten Nanopartikel eine Blauverschiebung der Lumineszenz im Falle von Halbleiterpräzipitaten (Quantenpunkten) und eine Verringerung der Oberflächenplasmonfrequenz für Metalle.

### Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Ionenstrahlanalytik

Der Trend zu immer kleineren Strukturen verlangt eine entsprechende Entwicklung auch auf dem Gebiet der Ionenstrahlanalytik. Dies führt in den Bereich der Mikrostrahlen und ihrer Anwendungen, die anhand dreier Experimente exemplarisch vorgestellt werden sollen.



**Abb. 6:** Mit der STIM-Tomographie (Scanning Transmission Ion Microscopy) lässt sich z. B. die räumliche Dichteverteilung in einem Gelenkknorpel (hier aus einem Schweineknie) messen. (nach [13])



**Abb. 7:** Wasserstoffverteilung am Ausschnitt eines Eintagsfliegen-Flügels (a), gemessen mit Koinzidenz-ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis) und einem Ionen-Mikrostrahl. Teilbild b) zeigt eine T-Kreuzung des kapillaren Versorgungssystems, c) eine Projektion entlang des Kastens und die Tiefeninformation der Streueignisse. (aus [14])

Bei der STIM-Tomographie (Scanning Transmission Ion Microscopy) wird ein Objekt mit einem Ionenstrahl abgerastert und die transmittierte Intensität gemessen. Daraus lässt sich die Materialdichte ortsabhängig mit einer Auflösung bestimmen, die heute bei 100 nm liegt [13]. Die von einer Leipziger Gruppe gelieferte Abb. 6 zeigt als Beispiel für diese Technik einen Ausschnitt des Gelenknorpels eines Schweinekniees. Ziel ist es, einzelne Collagenfasern sichtbar zu machen und damit zur Beantwortung der kontrovers diskutierten Frage beitragen zu können, wie denn diese Fasern ausgerichtet sind.

Kleinste Strukturen lassen sich inzwischen auch elementspezifisch mit Ionenstrahlen auflösen, wobei die dreidimensionale Profilierung von Wasserstoff für Anwendungen in der Biologie am interessantesten ist. Abbildung 7, aufgenommen von einer Gruppe aus München mittels Koinzidenz-ERD (Elastic Recoil Detection), zeigt die Verteilung von Wasserstoff innerhalb des Flügels einer Eintagsfliege mit einer lateralen Auflösung von einigen  $\mu\text{m}$  [14]. Bei dieser Analysetechnik wird die Probe mit hoch energetischen Protonen bestrahlt. Kommt es in der Probe zu einem Stoß zwischen einem Proton und einem Wasserstoffatom, so verlassen beide Teilchen die Probe stets unter einem Winkel von  $90^\circ$ , ähnlich wie beim Stoß zweier gleichschwerer Billardkugeln. Daher können solche Ereignisse mit zwei unter  $90^\circ$  aufgebauten Detektoren eindeutig identifiziert werden. Die laterale Auflösung erhält man durch das Abrastern der Probe mit einem Mikrostrahl, und die Tiefeninformation steckt in der Summe der beiden detektierten Energien.

Ionenstrahlen mit kleinem Durchmesser werden auch zunehmend bei der Analyse von Kunstgegenständen eingesetzt, wie das Foto auf der ersten Seite dieses Artikels zeigt. So wird bei der PIXE die Probe mit Protonen bestrahlt und dadurch zur Aussendung charakteristischer Röntgenstrahlung angeregt, aus der sich die Elementzusammensetzung etwa der Farbe eines Bildes analysieren lässt. Durch Vergleich mit Originalen lässt sich so die Echtheit prüfen [15]. Da für diese Technik nur geringe Protonenströme nötig sind, kann man einen hochenergetischen Protonenstrahl durch ein Fenster aus dem Beschleuniger herauslenken und durch die Luft auf den Kunstgegenstand auftreffen lassen. Auf diese Art eignet sich das Verfahren selbst für große und empfindliche Objekte. Dies erklärt, warum der Louvre in Paris seinen eigenen Beschleuniger unterhält.

### Schlussbetrachtungen

Mit unserem Beitrag wollten wir zeigen, dass die Ionenstrahltechnik trotz oder gerade wegen ihres hohen Reifegrades in der Lage ist, neue Gebiete der Festkörperphysik zu öffnen. Dabei wird ihre spezielle Stärke genutzt, lokal Situationen zu realisieren, die von nichtlinearen Prozessen fern des thermodynamischen Gleichgewichts beherrscht werden. Im Zusammenhang mit dem aktuellen Gebiet „Nanoscience“ bietet sie den zusätzlichen Vorteil einer intrinsischen Nanometerskala durch die in Stoßkaskaden oder Spikes auftretenden Reichweiten, welche sich sogar noch durch Wahl von Projektil und Einschussenergie feineinstellen lassen.

Die Beispiele des Überblicks sollten zeigen, wie reichhaltig die Physik mit Ionenstrahlen ist. Selbstverständlich gibt es auch starke internationale Aktivitäten auf diesem Gebiet mit traditionell hoher Beteiligung japanischer Einrichtungen. Bewusst haben wir uns bei

der Auswahl der Beispiele fast ausschließlich auf Arbeiten deutscher Gruppen gestützt, um das hiesige Umfeld zu beleuchten.<sup>1)</sup>

\*

Unseren Kollegen, die uns durch ihre Ratschläge und Bildmaterialien unterstützt haben, möchten wir recht herzlich danken.

### Literatur

- [1] S. Habenicht et al., Phys. Rev. B **60**, R2200 (1999); Phys. Rev. B **65**, 115327 (2002)
- [2] C. Krülle, Physik Journal, Juli/August 2002, S. 22
- [3] F. Frost, A. Schindler und F. Bigl, Phys. Rev. Lett. **85**, 4116 (2000)
- [4] S. Facsko et al., Science **285**, 1551 (1999)
- [5] W. Bolse, B. Schattat und A. Feyh, akzeptiert bei Appl. Phys. A (2003)
- [6] J. Li et al., Nature **412**, 166 (2001)
- [7] M. Waiblinger et al., Appl. Phys. A **69**, 239 (1999)
- [8] C. Trautmann, S. Klaumünzer und H. Trinkaus, Phys. Rev. Lett. **85**, 3648 (2000)
- [9] C. Chappert et al., Science **280**, 1919 (1998)
- [10] A. Mougín et al., Phys. Rev. B **63**, 060409(R) (2001); J. Appl. Phys. **89**, 6606 (2001)
- [11] M. Strobel, K.H. Heinig und W. Möller, Phys. Rev. B **64**, 245422 (2001); Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **647**, 23 (2001)
- [12] I. Großhans, H. Karl und B. Stritzker, Nucl. Instr. Meth. B **190**, 865 (2002)
- [13] T. Reinert et al., Nucl. Instr. Meth. B **190**, 266 (2002)
- [14] G. Dollinger et al., Appl. Phys. Lett. **82**, 148 (2003)
- [15] A. Denker und K. H. Maier, Nucl. Instr. Meth. B **161-163**, 704 (2000)
- [16] K. Nordlund, Nucl. Instr. Meth. B **164-165**, 441 (2000)

1) Wesentlich vollständiger ist dies in einer „Ionenstrahlbroschüre“ gelungen, die fast fertiggestellt ist und Beiträge praktisch aller deutscher Gruppen enthält, die mit Ionenstrahlen experimentieren. (Anfragen an: II. Physikalisches Institut, Universität Göttingen)

### Die Autoren

**Carsten Ronning**, 35, forscht seit 1998 an der Universität Göttingen. Er studierte Physik in Bremen und Konstanz, wo er auch mit einer prämierten Arbeit über die Herstellung diamantähnlicher Materialien mit Ionenstrahlen promovierte. Nach einem Post-doc-Aufenthalt in Raleigh (USA, North Carolina) habilitierte er sich 2002 in Göttingen. Neben der Ionenstrahlphysik beschäftigt er sich auch mit der Physik von Gruppe-III-Nitriden. Der vielseitige Sportler kann seiner zweiten Leidenschaft, dem Reisen, derzeit bei einem Forschungsaufenthalt am Georgia Institute of Technology nachgehen.



**Paul Ziemann** ist seit 1995 C4-Professor in Ulm, wo er die Abteilung Festkörperphysik leitet. Bereits während der Promotion und der Habilitation in Karlsruhe beschäftigte er sich mit der Ionenbestrahlung. Nach einem Intermezzo im Forschungslabor der Firma Degussa wurde er 1987 auf eine Professur in Konstanz berufen. Seine Arbeitsgebiete sind neben der Ionenbestrahlung die Präparation und Untersuchung von dünnen Schichten und Nanostrukturen. Seine Lieblingsbeschäftigung besteht darin, etwas in Bewegung zu setzen, auch sich selbst beim Badminton, Inline-Scating oder Wandern.

