

## SELBSTORGANISATION DÜNNER SCHICHTEN UNTER HOCHENERGIE-IONENBESTRAHLUNG



*Arbeitsgruppe Nukleare Festkörperphysik  
Institut für Strahlenphysik, Universität Stuttgart  
Gruppenleiter: Prof. Dr. Wolfgang Bolse*

*Working Group Nuclear Solid State Physics  
Institute for Radiation Physics, Stuttgart University  
Groupleader: Prof. Dr. Wolfgang Bolse*

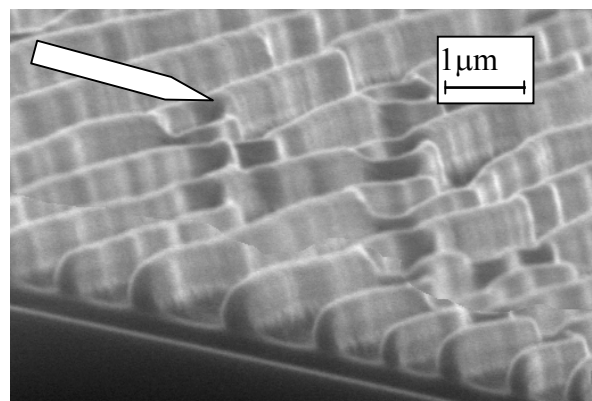
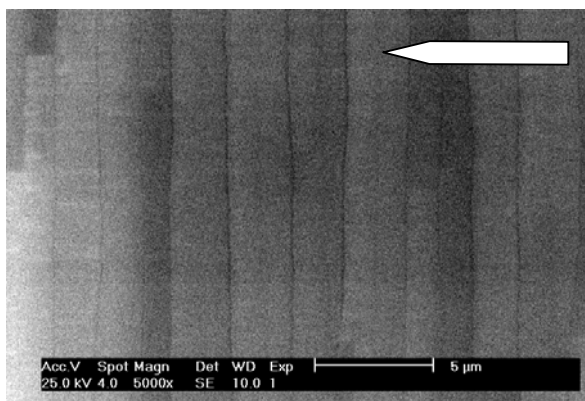
Beim Durchlaufen von Festkörpern verlieren schwere Ionen ihre Energie über zwei Prozesse: elastische Stöße mit den Atomen bei Energien von wenigen keV/Nukleon (nuklearer Energieverlust) bzw. durch Ionisation und elektronische Anregung bei hohen Energien im Bereich MeV/Nukleon (elektronischer Energieverlust). In beiden Fällen kommt es zu sehr hohen lokalen Energieeinträgen in den Festkörper, die ihn weit weg vom Gleichgewicht treiben und unter bestimmten Umständen strukturelle Instabilitäten und Umorganisationsprozesse wie z.B. Wellenbildung oder sogar ein periodisches Muster von Quantenpunkten auf Oberflächen hervorrufen können.

Ein besonders eigentümliches Verhalten zeigen dabei dünne Oxidschichten (z.B. NiO/SiO<sub>2</sub>), die unter flachem Einfallswinkel mit hochenergetischen Ionen (etwa im Maximum der elektronischen Abbremsung) bestrahlt wurden. Sobald der Energieverlust eine bestimmte Schwelle überschreitet bilden sich zunächst mehr oder weniger periodische Risse in der Schicht, die senkrecht zur Richtung des Ions orientiert sind und einen mittleren Abstand von wenigen  $\mu\text{m}$  aufweisen. Im Verlauf weiterer Bestrahlung werden die Risse breiter, das Schichtmaterial zwischen den Rissen schrumpft lateral zusammen und wächst in die Höhe, bis schließlich eine lamellenartige, senkrecht zur Richtung des einfallenden Strahls orientierte Struktur entsteht. Die Lamellen haben dabei eine Höhe von etwa  $1\mu\text{m}$ , eine Dicke von ca.  $0.1\mu\text{m}$  und einen mittleren Abstand von  $1-3\mu\text{m}$ . Das Wachstum der Struktur wird mit zunehmender elektronischer Energiedeposition schneller, während ihre Periodizität und Ordnung mit ansteigendem elektronischen Energieverlust und steiler werdendem Einfallswinkel immer mehr abnimmt. Die Ausbildung der Struktur kann als Sonderfall der sogenannten Grinfeld-Instabilität betrachtet werden, nach der die Oberfläche eines elastisch verspannten Festkörpers instabil ist gegenüber periodischen Störungen bestimmter Wellenlänge. Nach Trinkaus entsteht durch das Aufschmelzen und anschließende Wiedererstarren des Materials entlang der Bahn des hochenergetischen Ions eine Zugspannung entlang der Ionenspur. Falls das Material in der Lage ist, plastisch zu fließen wird es sich in Richtung der Ionenspur also zusammenziehen und senkrecht dazu ausdehnen, was als bestrahlungsinduzierte anisotrope plastische Deformation bekannt ist. Flache Bestrahlungswinkel führen also zur Ausbildung einer uni-axialen, in Strahlrichtung orientierten Zugspannung in der Schicht, die beim Überschreiten eines Grenzwerts zum periodischen Aufreißen der Schicht senkrecht zur Strahlrichtung führt. Die Stressverteilung ist umso homogener und damit das Rissmuster umso geordneter je kleiner der Einfallswinkel des Ions und die pro Ion deponierte Energiedichte sind. Die weitere Bestrahlung führt dann aufgrund desselben Effekts zum plastischen Fließen des Schichtmaterials und dem Aufbau der Lamellenstruktur. Die Frage, welche Materialien diesen Effekt zeigen und welche Zusammenhänge es zwischen den typischen Abständen und Größen der Lamellen und den Eigenschaften der Ausgangsschicht, gibt ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

## SELF-ORGANISATION OF THIN FILMS UNDER SWIFT HEAVY ION BOMBARDMENT

When penetrating a solid heavy ions lose their kinetic energy via two processes: via elastic scattering with the atoms at energies of some keV/nucleon (nuclear stopping) and via ionisation and electronic excitation at high energies of the order of MeV/nucleon (electronic stopping). In both cases a high amount of energy is locally deposited into the solid, which may drive him far from equilibrium and initiate structural instabilities and reorganisation processes like formation of ripple or even a periodic arrangement on surfaces.

A peculiar behaviour was found for thin oxide layers (i.e. NiO/SiO<sub>2</sub>) which were irradiated with high-energy ions (at about the maximum of the electronic stopping) at small angles of incidence. As soon as the electronic stopping is above a certain threshold value more or less periodic cracks appear in the layer, which are oriented perpendicular to the beam direction and have an average distance of a few microns. Under further ion bombardment the cracks become broader, the material between the cracks shrinks laterally and grows into height, until finally a lamella-like structure forms, which is oriented perpendicular to the beam direction and where the lamellae have a height of about 1 μm, a thickness of about 0.1 μm and average distances of 1-3 μm. The growth rate of the structure increases with increasing electronic stopping, while its periodicity and order decreases with increasing energy deposition and increasing angle of incidence. The formation of this structure can be regarded as a special case of the Grinfeld-instability, which causes periodic perturbations of a certain wave-length in the surface of an elastically stressed solid. According to Trinkaus melting and subsequent resolidification of the material surrounding the ions path generates a tensile stress along the ion track. If the material is able for plastic flow, it will shrink along the direction of the ion track and grow perpendicular, which is known as irradiation induced anisotropic plastic deformation. Small incident angles thus generate uni-axial tensile stresses along the beam direction, which causes periodic cracking of the layer perpendicular to the beam direction as soon as a threshold value is exceeded. The stress distribution is the more homogeneous and thus the more ordered is the crack pattern the smaller are the angle of incidence and the energy deposited per ion. Under further irradiation the same phenomenon than causes plastic flow of the layer material and the build-up of the lamella structure. The question, which materials do exhibit this effect and which are the relationships between the typical distances and extensions of the lamellae and the initial properties of the the layer, is subject of further investigations.



*Riss-Struktur / Crack pattern*

*Lamellenstruktur/ Lamellae structure*

*nach Bestrahlung von NiO/SiO<sub>2</sub> mit 90 MeV Ar- (links) bzw. 230 MeV Xe-Ionen (rechts)  
(der Pfeil zeigt in Richtung des einfallenden Strahls)*

*after irradiation of NiO/SiO<sub>2</sub> with 90 MeV Ar- (left) and 230 MeV Xe-ions(right), respectively  
(the arrow indicates the direction of the incident beam)*