

## IONENSTRAHLMISCHEN MIT HOCHENERGETISCHEN SCHWEREN IONEN



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

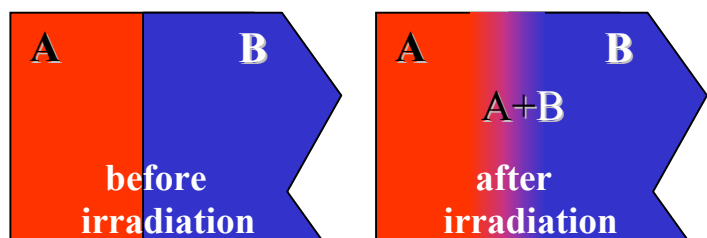
*Working Group Nuclear Solid State Physics  
Institute for Radiation Physics, Stuttgart University  
Groupleader: Prof. Dr. Wolfgang Bolse*

Materialmodifikation mit Ionenstrahlen beruht sehr wesentlich auf Verlagerung und Transport von Atomen. Zur optimierten Herstellung von maßgeschneiderten „neuen Materialien“ mit Hilfe energetischer Ionen benötigt man daher ein tiefgehendes Verständnis der grundlegenden ionenstrahlinduzierten Transportmechanismen. Von einem einzelnen Ion ausgelöste Transportprozesse können nur

schwer direkt beobachtet werden, da sie innerhalb weniger Picosekunden ( $10^{-12}$  s) und in einem sehr kleinen Volumen von wenigen Kubiknanometern ( $10^{-27}$  m<sup>3</sup>) ablaufen. Man ist daher in der Regel darauf angewiesen, indirekte Rückschlüsse auf die Transportmechanismen aus den Materialveränderungen zu ziehen, die von vielen Ionen (mehr als  $10^{12}$ /cm<sup>2</sup>) erzeugt werden. Besonders gut eignet sich hierfür die Durchmischung ursprünglich scharfer Grenzflächen in ionenbestrahlten Schichtpaketen. „Ionenstrahlmischen“ im Energiebereich von wenigen keV/Nukleon, wo das Ion seine Energie durch elastische Stöße mit den Atomen verliert und damit direkte „ballistische“ Verlagerungen erzeugt, wird seit Beginn der 80er Jahre intensiv untersucht und ist recht gut verstanden. Ganz anders die Situation für Ionen mit Energien im Bereich MeV/Nukleon: hier ist bestrahlungsinduzierter Atomtransport viel weniger offensichtlich, da das Ion seine Energie fast ausschließlich an die Elektronen des bestrahlten Materials abgibt. Dennoch werden auch hier massive Materialveränderungen beobachtet, die eine technologische Auswertung erwarten lassen. Ungeachtet dessen gab es bis zum Ende des vergangenen Jahrtausends nur sehr vereinzelte Versuche, die Durchmischung von Schichtpaketen mit hochenergetischen Ionen nachzuweisen, geschweige denn sie detailliert zu untersuchen.

*Schematische Darstellung des Ionenmischeffekts im Doppelschichtsystem*

*Schematic view of the ion beam mixing effect at the interface of a bi-layer*

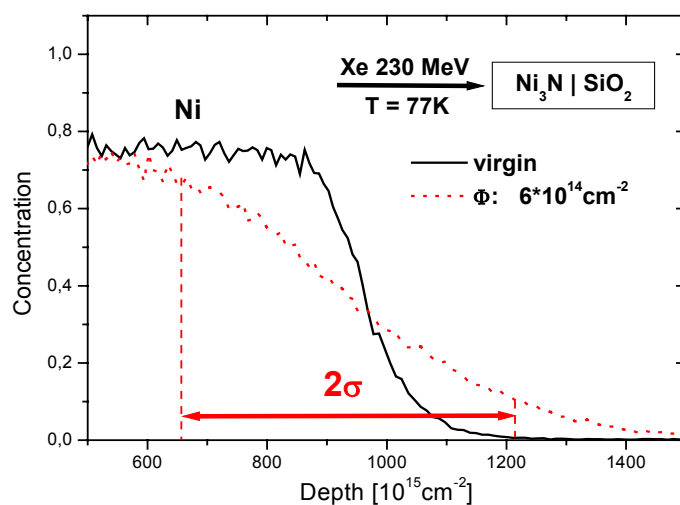


Wir haben uns daher einer systematischen Untersuchung der Transportmechanismen in hochenergie-ionenbestrahlten keramischen Schichtpaketen zugewandt. Diese Materialien sind besonders sensitiv auf den elektronischen Energieverlust schneller schwerer Ionen und erscheinen daher für erste Untersuchungen besonders geeignet. Tatsächlich spiegeln die ersten Ergebnisse die extremen Bedingungen wieder, die aufgrund der sehr großen Energiedeposition im Festkörper erwartet wird. Genaue Analysen der beobachteten sehr großen Durchmischungseffekte weisen deutlich darauf hin, dass der Festkörper in einem Bereich von etwa 10 nm um die Ionenspur für wenige Picosekunden lokal aufschmilzt und innerhalb dieser Zeit atomare Interdiffusion an der Grenzflächen erfolgt. Dies ergibt sich klar aus der Abschätzung der effektiven Diffusionskoeffizienten, die sich deutlich von den von der Festkörperdiffusion bekannten Werten unterscheiden und eher mit der Diffusion in Flüssigkeiten vereinbar sind. Auch zeigt sich, dass der Energieeintrag auf beiden Seiten der

Grenzfläche mindestens so groß sein muss, wie er für die Ausbildung von latenten amorphen Ionenspuren in den entsprechenden Materialien benötigt wird. Die quadratische Abhängigkeit der Mischrate vom elektronischen Energieverlust kann als weiteres Indiz einer Interdiffusion in der Schmelze gewertet werden.

### SWIFT HEAVY ION BEAM MIXING

Materials modification with ion beams is mainly based on the relocation and transport of atoms. In order to optimize the preparation of tailored “new materials” by utilizing energetic ions a detailed knowledge of the basic ion beam induced transport mechanisms is required. The transport processes generated by a single ion can hardly be observed in a direct way, because they take place within a few picoseconds ( $10^{-12}$  s) and in a very small volume of a few cubic-nanometers ( $10^{-27}$  m<sup>3</sup>). One is therefore dependent upon indirect conclusions on the transport mechanisms drawn from the materials alterations produced by a large number of ions (more than  $10^{12}$ /cm<sup>2</sup>). Atomic mixing of initially sharp interfaces during irradiation of thin film packages is well-suited for such a purpose. “Ion Beam Mixing” in the energy range of a few keV/nucleon, where the ion loses its energy by elastic collisions with the atoms and thus directly generates “ballistic” atomic relocations, has been intensively studied since the early 80s and is quite good understood. A completely different situation arises for ions with energies of the order of MeV/nucleon: here the irradiation induced transport of atoms is much less obvious, since the ion transfers its energy almost exclusively to the electrons of the irradiated material. Nevertheless, also here large changes of the materials properties were observed, which might be technologically exploited. However, until the end of the last century there were only very few attempts to evidence interface mixing in layered systems by swift heavy ions, let alone was there any detailed study of the relationships between the beam parameters and the achieved effect.



*Ni-Konzentrationsprofil einer Ni<sub>3</sub>N / SiO<sub>2</sub> - Grenzfläche vor und nach der Bestrahlung mit 230 MeV Xe-Ionen*

*Ni-concentration profile at a Ni<sub>3</sub>N / SiO<sub>2</sub> -interface before and after irradiation with 230 MeV Xe-ions*

We have therefore started a systematic investigation of the transport mechanisms in ceramic thin film packages irradiated with high-energy ions. These materials are most sensitive with respect to damage creation by electronic energy loss and therefore seem to be best suited for such study. Indeed, the first results mirror the extreme conditions expected because of the very high energy deposition in the solid. Proper analysis of the observed strong mixing effects clearly demonstrates that the material within a radius of about 5nm around the ions path locally melts for a few picoseconds and that within this time atomic interdiffusion occurs at the interfaces. This can be clearly deduced from the estimated diffusion coefficients, which compare with those found for diffusion in a liquid rather than with solid state diffusion. In addition we found that the energy deposition on both sides of the interface must be higher than that needed for the generation of latent amorphous tracks in the respective material. The quadratic scaling of the mixing rate with the electronic energy loss of the ion can be regarded as an additional indication, that mixing occurs by transient interdiffusion in the molten zone.