

ANWENDUNG VON ELEKTRONEN- UND IONENSTRAHLEN ZUR FUNKTIONALISIERUNG VON MATERIALIEN



Leibniz-Institut
für Polymerforschung
Dresden e. V.

HZDR



HELMHOLTZ
ZENTRUM DRESDEN
ROSSENDORF



Das Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V. (IPF) ist eine der größten Polymerforschungseinrichtungen in Deutschland. Als Institut der Leibniz-Gemeinschaft ist es der anwendungsorientierten Grundlagenforschung verpflichtet und erhält seine Grundfinanzierung zu gleichen Teilen von Bund und Ländern.

Das IPF betreibt ganzheitliche Polymermaterialforschung von der Synthese und Modifizierung polymerer Materialien, über die Charakterisierung, theoretische Durchdringung bis hin zur Verarbeitung und Prüfung. Charakteristisch für die Arbeiten am IPF ist das enge Zusammenwirken von Natur- und Ingenieurwissenschaftlern, denen eine umfangreiche gerätetechnische Ausstattung bis hin zu Kleintechnika für Werkstoff- und Technologieentwicklungen unter industrienahen Bedingungen zur Verfügung steht. Schwerpunktmäßig werden Materialfragestellungen aus der realen Anwendung aufgegriffen, die über gezielte Steuerung der Grenzflächeneigenschaften bzw. der Wechselwirkungen an der Grenz- und Oberfläche gelöst werden können.

Auf der Basis eines tiefgehenden wissenschaftlichen Verständnisses der notwendigen Techniken und Prozesse sowie der zugrunde liegenden physikalischen und chemischen Aspekte werden langfristig tragfähige Konzepte für Material-, Technologie- und Systementwicklungen erarbeitet, die Innovationen z.B. in der Medizin, Verkehrs- und Energietechnik sowie in der modernen Kommunikationstechnologie ermöglichen.

Das Profil des IPF wird von vier strategischen Themen bestimmt, die institutsübergreifend bearbeitet werden:

- Funktionale nanostrukturierte Grenzflächen und Polymersysteme
- Biologie-inspirierte Grenzflächen- und Materialgestaltung
- Polymere Netzwerke: Struktur, Theorie und Anwendung
- Prozessgeführte Strukturbildung polymerer Materialien





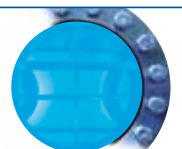
Das Applikationslabor Ionentechnologie ist Bestandteil der Gesamtstrategie zum Wissens- und Technologietransfer des Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR), welches anwendungsorientierte Grundlagenforschung mit den fachübergreifenden Forschungsschwerpunkten Neue Materialien, Krebsforschung und Nukleare Sicherheitsforschung betreibt.

Das Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung des HZDR besitzt eine langjährige Expertise bei der Modifikation und Analyse von Festkörperoberflächen mittels energetischer Ionen. Im Rahmen der Kernkompetenz des Institutes bei der Anwendung von Ionenstrahlen stehen umfangreiche analytische und präparative Möglichkeiten zur Verfügung, die durch das Applikationslabor zunehmend der industriellen Nutzung zugänglich gemacht werden.

Das Ionenstrahlzentrum am Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung ist ein überregionales wissenschaftliches Zentrum für Ionenstrahlanwendungen mit Anlagen zur Ionenimplantation, zur Ionen- und plasmagestützten Schichtabscheidung und zur Ionenstrahlanalytik.

Die Angebote des Applikationslabors umfassen:

- Beratung und Problemevaluierung bei der Anwendung von Ionenstrahlen
- Durchführung von Serviceleistungen auf den Gebieten Ionenimplantation, Plasma-Immersions-Ionen-Implantation (PBII oder PIII) und Ionenstrahlanalytik
- Verfahrensentwicklung zur Anwendung von Ionentechnologien
- Ionenstrahlmodifizierung von Metall-, Keramik- und Polymeroberflächen
- Ionenimplantation in Halbleitersubstrate für mikrosystemtechnische, elektronische und photovoltaische Anwendungen
- Dotierung von Halbleitern
- Erzeugung von Verschleißschutzschichten, optischen und magnetischen Dünnschichten, Nanostrukturen und funktionalen Schichten mittels Ionentechnologien
- Anwendung der Hochenergie-Ionenimplantation für Bauelemente der Leistungselektronik
- Simulation der Wechselwirkungsprozesse von Ionen in Festkörpern



ANWENDUNG VON ELEKTRONENSTRAHLEN

Beschichtungsqualität nach
Multisteinschlagtest
links: Stand Technik,
rechts: IPF-Verfahren

Nachbehandlung von Sheet Moulding Compound (SMC)– Formteilen zur Vermeidung von Lackier-/ Oberflächendefekten

Typische Parameter

Elektronenstrom: 0,2...25 mA

Elektronenenergie: 70...200 keV

Energieeintrag: $< 30 \text{ W/cm}^2$

Oberflächentemperatur: 20...50 °C

Vorteile des Verfahrens

- schnelle Randschichtmodifizierung
- Modifizierung von 3D-Objekten
- Modifizierungsintensität wird dem SMC-Material angepasst

SMC-Materialien

zeichnen sich durch sehr gute gewichts-
spezifische Eigenschaften aus und sind
ein attraktives Leichtbaumaterial für:

- Fahrzeugbau
- Schienenfahrzeugbau

Problem

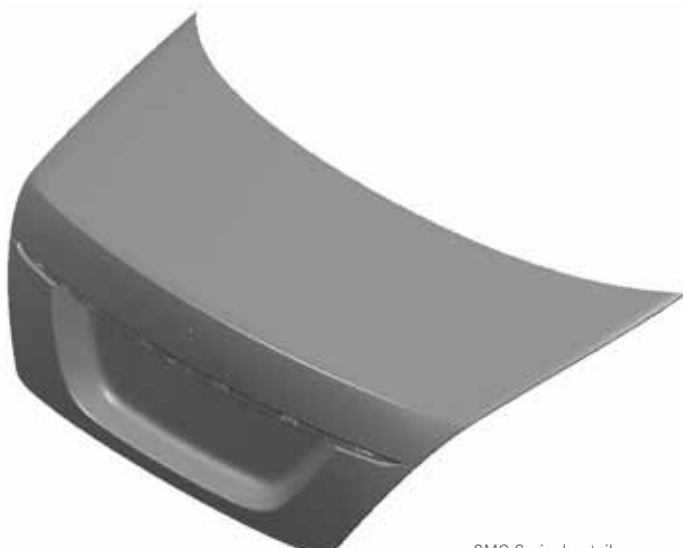
Die für eine nachfolgende Lackierung
erforderliche Oberflächenqualität
erfordert weitere kostenintensive
Prozessschritte (z. B. Entgraten,
Padden, Powerwash oder Beflammen).

Lösung

Randschichtbehandlung mittels
energiereicher Elektronen

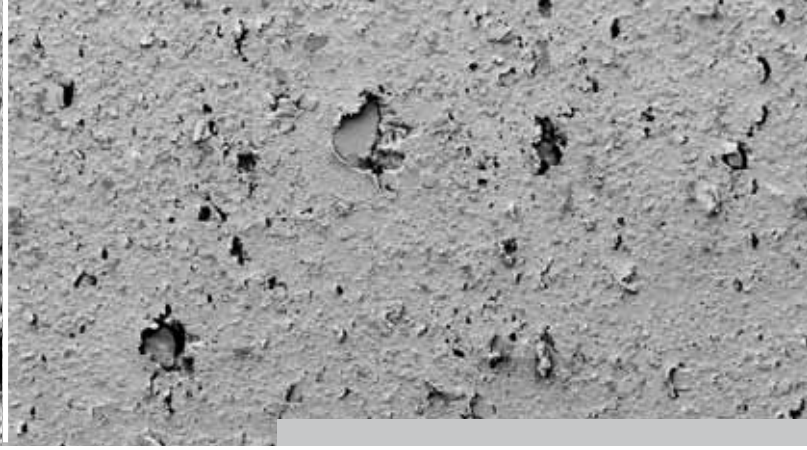
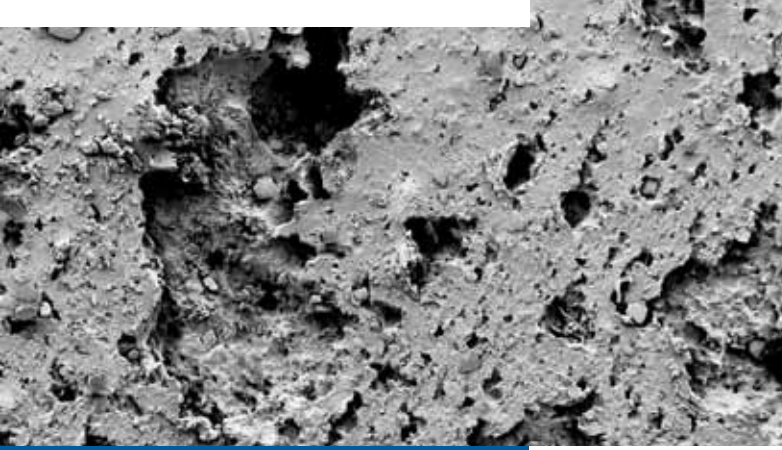
Effekt

- Aushärtung der SMC-Formteile
- Erhöhung der Hydrophilie der SMC-Oberfläche
- bessere Haftfestigkeit der Beschichtung
- elektrostatische Lackapplikation ohne zusätzliche Oberflächenmodifizierung



SMC-Serienbauteile





ANWENDUNG VON ELEKTRONENSTRAHLEN

Oberflächenqualität nach Reibungs- und Verschleißtest
links: EPDM mit unmodifiziertem PTFE,
rechts: EPDM mit modifiziertem PTFE

Verringerung von Reibung und Verschleiß durch Einarbeiten von elektronenmodifiziertem Polytetrafluorethylen (PTFE)

Typische Parameter

Elektronenstrom: 0,2 mA
Elektronenenergie: 1500 keV
Doseeintrag: 500 kGy
Materialtemperatur: 20...50 °C

Vorteile des Verfahrens

- Steuerung des Funktionalisierungsgrades von PTFE
- Steuerung der Radikalkonzentration im PTFE
- chemische Kopplung zwischen PTFE und Polymermatrix
- Modifizierung von 3D-Objekten durch Herstellung von Polymercompounds und anschließender Formgebung

Elastomere zeichnen sich durch sehr gute mechanische Eigenschaften aus und sind ein attraktives Dichtungsmaterial für:

- Maschinenbau
- Fahrzeugbau
- Anlagenbau

Problem

Steigende Anforderungen in tribologischen Anwendungen erfordern ausgezeichnete mechanische Eigenschaften in Kombination mit geringer Reibung und geringem Verschleiß.

Lösung

Einarbeitung von elektronenmodifiziertem PTFE

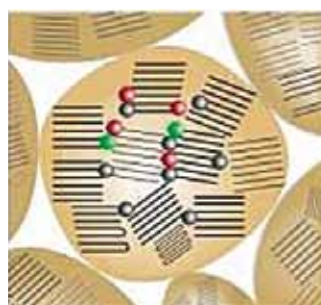
Effekt

- verringerte Reibzahlen
- geringerer Verschleiß
- erhöhtes mechanisches Eigenschaftsniveau

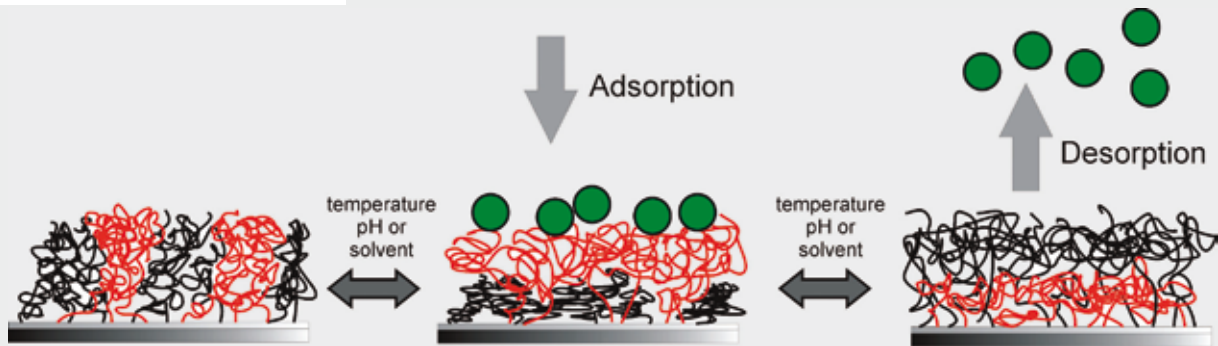
PTFE unmodifiziert



PTFE nach Modifizierung mit Elektronen



- - CF₃
- - COOH
- - COF



ANWENDUNG VON ELEKTRONENSTRAHLEN

Prinzip der Schaltbarkeit

Modifizierung schaltbarer Polymerbeschichtungen

Typische Parameter

Elektronenstrom: 4 mA
 Elektronenenergie: < 600 keV
 Dosisertrag: < 500 kGy
 Materialtemperatur: 20...50 °C

Vorteile des Verfahrens

- Einlagerung sauerstoffhaltiger hydrophiler funktioneller Gruppen
- gezielte Steuerung der Benetzbarkeit über Dosisertrag
- Abnahme des Kontaktwinkels und des isoelektrischen Punktes durch steigende Funktionalisierung
- Anteil hydrophiler Gruppen über absorbierte Dosis steuerbar
- Nutzung polymerspezifischer Funktionalisierungs-/Abbaureaktionen
- Erzeugung beliebiger Gradienten oder Strukturen

Funktionelle Beschichtungen sind aus der heutigen Welt nicht mehr wegzu-denken. Besonders gefragt sind „intelligente Beschichtungen“ für

- Biowissenschaften
- Luftfahrt
- Schutzschichten

Problem

Es sind Beschichtungen erforderlich, die die Volumeneigenschaften nicht verändern, zeitstabil haften und auf ihre Umgebung gezielt reagieren können.

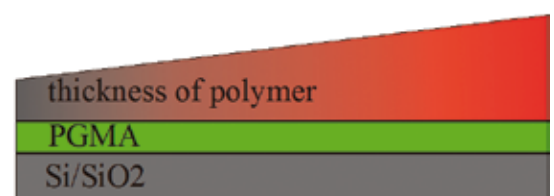
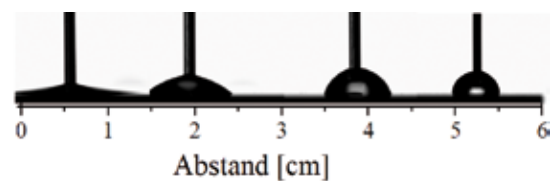
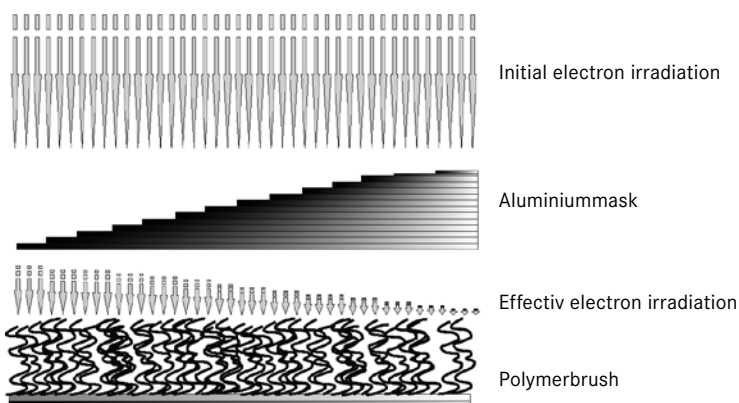
Lösung

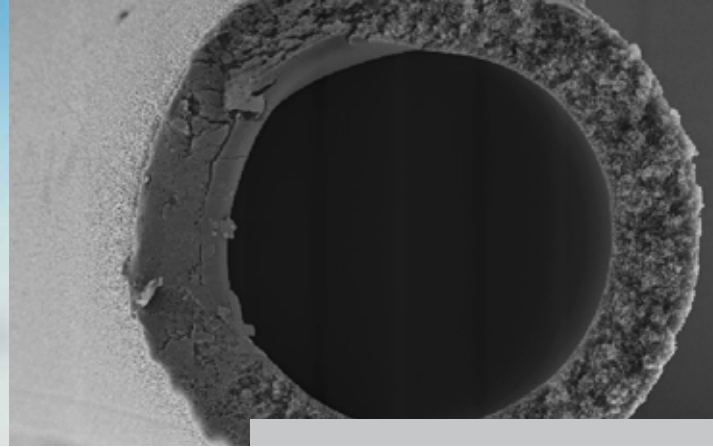
Gezielte Modifizierung schaltbarer Beschichtungen auf Basis von Polymerbürsten mittels energiereicher Elektronen

Effekt

- lokal steuerbare Adsorption von Proteinen
- Separation von Fluiden unterschiedlicher Hydrophilie
- steuerbar über Temperatur und pH-Wert

Prinzip der Gradientenerzeugung





ANWENDUNG VON ELEKTRONENSTRAHLEN

links: Hohlfasermodul
(ASCALON GmbH,
Berggießhübel)
mit ca. 8000 Fasern und
etwa 1,2 m² Kontaktfläche

Oberflächenmodifizierung von Hohlfasermembranen zur Verbesserung der Bio- und Blutkompatibilität

rechts: Querschnitt einer Hohlfaser
(Innendurchmesser ca. 200 µm,
Wandstärke ca. 30 µm)

Typische Parameter

Elektronenstrom: 1 mA
Elektronenenergie: < 1000 keV
Dosiseintrag: < 100 kGy
Materialtemperatur: 20...25 °C

Vorteile des Verfahrens

- additivfreie Immobilisierung von Beschichtungspolymeren
- Ankopplung verschiedener Funktionsmoleküle
- Erzeugung biokompatibler Oberflächen

Die Oberflächenmodifizierung von Hohlfasermembranen ist besonders für Dialysemembranen mit verbesserter Blutkompatibilität gefragt.

- Biokompatibilität der Blutkontaktflächen nicht in allen Fällen ausreichend
- Steigerung der Blutkompatibilität der Membranoberfläche unter Erhalt der Dialysefunktion
- wichtig für Patienten mit einer Unverträglichkeit von Heparin

Problem

Es sind Beschichtungen selektiv allein im Inneren der Hohlfasern der Module erforderlich, die eine weitere Modifizierung der Blutkontaktfläche ermöglichen.

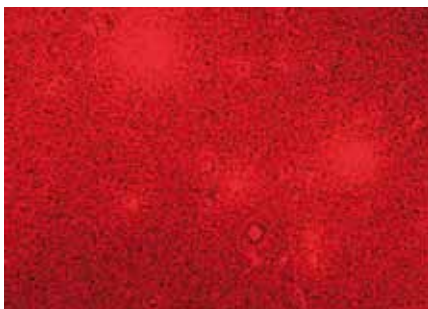
Lösung

Zuerst wird ein reaktives Polymer aufgebracht und anschließend fixiert. Nachfolgend können daran Funktionsmoleküle kovalent gekoppelt werden.

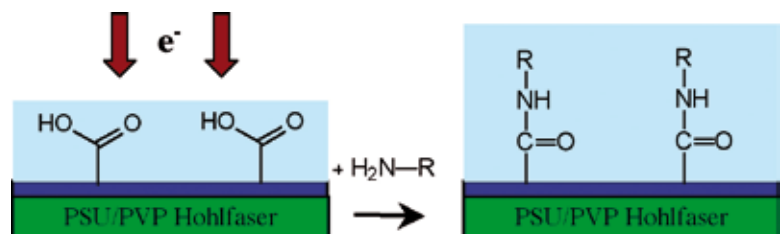
Effekt

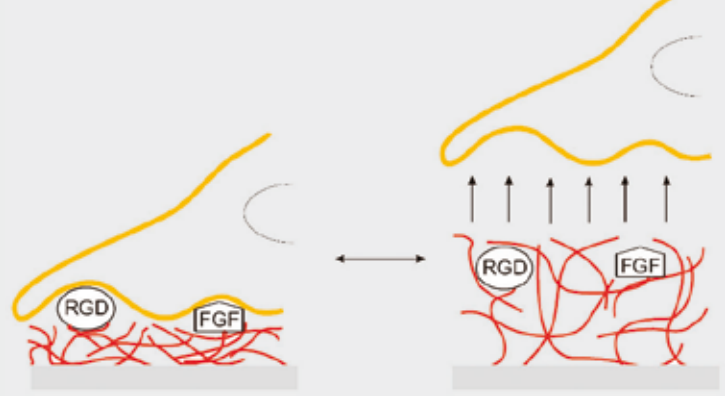
- gezielte Oberflächenmodifizierung
- Fixierung von Funktionspolymer
- modifizierbare Oberflächen
- steuerbare Oberflächeneigenschaften

Oberfläche mit Aminobenzamidin nach Kontakt mit Thrombin, deren spezifische Absorption durch fluoreszenzgelabelte Antikörper sichtbar wird



Beschichtung mit reaktiver Polymerschicht und danach Immobilisierung auf der inneren Oberfläche mittels Elektronenstrahl und Ausrüstung mit Funktionsmolekülen





ANWENDUNG VON ELEKTRONENSTRAHLEN

links: Zellkulturplatte
rechts: Prinzip der
Biofunktionalisierbarkeit und
des Schaltverhaltens

Reizempfindliche Schichten für biomedizinische Zwecke

Typische Parameter

Elektronenstrom: 5 mA
Elektronenenergie: < 150 keV
Doseeintrag: < 800 kGy
Materialtemperatur: 20 °C
Gasatmosphäre: Stickstoff

Vorteile des Verfahrens

- additivfreie Immobilisierung
- Ankopplung verschiedener Funktionsmoleküle ohne Kopplungsadditiv
- Erzeugung biokompatibler Oberflächen
- Erzeugung thermisch definiert schaltbarer Oberflächen
- Einstellung des Quellverhaltens über Doseeintrag
- Immobilisierung von Schichtdicken im nm bis μm Bereich

Für vielfältige biomedizinische Anwendungen sind Zellkulturoberflächen erforderlich, die die natürlichen Wachstumsbedingungen von Zellkulturen nachempfinden.

Problem

- multifunktionale Materialien nicht verfügbar
- eingeschränkte Anwendungsmöglichkeiten
- Ernten von Zellkulturen mit enzymatischen Zusätzen (z.T. toxisch)

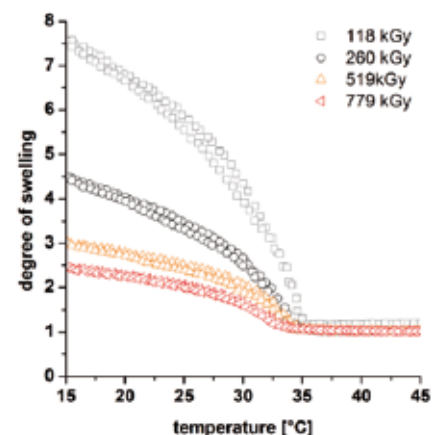
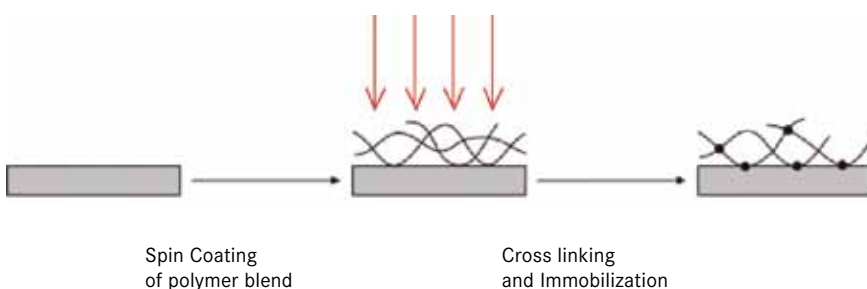
Lösung

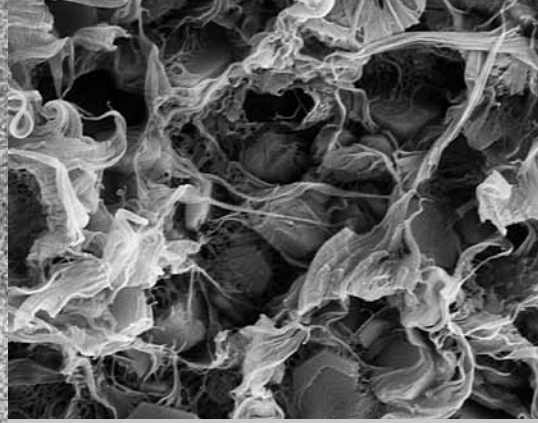
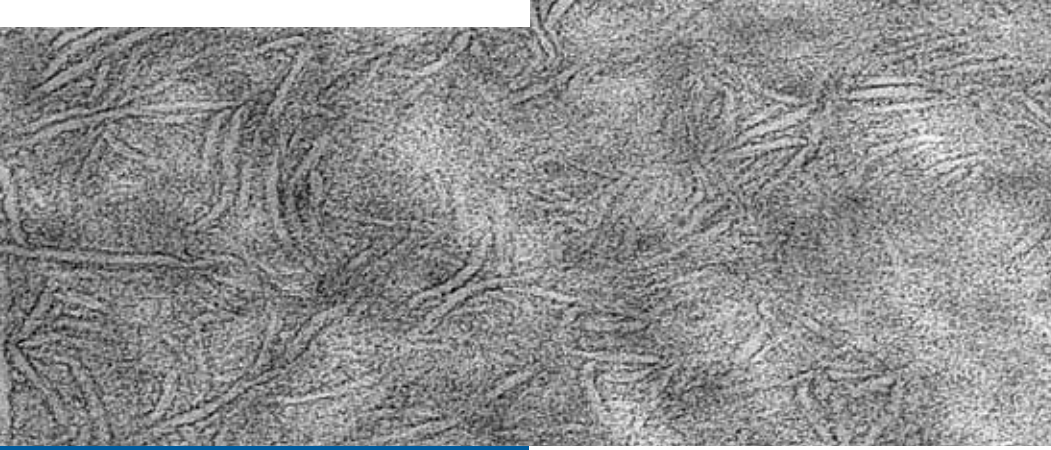
Ein Gemisch aus einem thermisch schaltbaren und einem reaktiven Polymer wird auf ein Substrat aufgetragen und anschließend mittels energiereicher Elektronen fixiert. Weitere Funktionsmoleküle können an dieses Polymergemisch gekoppelt werden.

Effekt

- variable Oberflächeneigenschaften für spezifische Zellkulturen
- Ernten von Zellschichten durch physikalische Reize ohne Einsatz von Toxinen

Beschichtung mit Polymergemisch und anschließende Immobilisierung mittels Elektronenstrahl





ANWENDUNG VON ELEKTRONENSTRAHLEN

links: inhomogene
Polymorphologie
durch Elektronen
induzierte reaktive Aufbereitung
rechts: Füllstoff-Matrix-Kopplung

Multifunktionale Polymerwerkstoffe mit erhöhtem Eigenschaftsniveau

Typische Parameter

Elektronenstrom: < 4 mA
Elektronenenergie: < 1500 keV
Energieeintrag: < 200 W/cm²
Temperatur: 160...400 °C

Vorteile des Verfahrens

- hohe chemische Reaktionsrate
- erhöhte Beweglichkeit der Polymerketten
- intensives Mischen unter instationären Bedingungen
- zeitlich und räumlich präziser Energieeintrag
- in-situ Kompatibilisierung
- in-situ Kopplung
- in-situ Vernetzung
- in-situ Erzeugung inhomogener Strukturen

Neue Anwendungen erfordern multifunktionale Polymerwerkstoffe für:

- Leichtbau
- Elektromobilität
- neue Energien
- Biopolymere

Problem

Materialeigenschaften können durch die Kombination polymerer Materialien mit organischen sowie anorganischen Füll- und Verstärkungsstoffen gezielt verändert werden. Die dabei häufig notwendigen Kompatibilisatoren und Kopplungsadditive können verschiedene Nebenwirkungen verursachen.

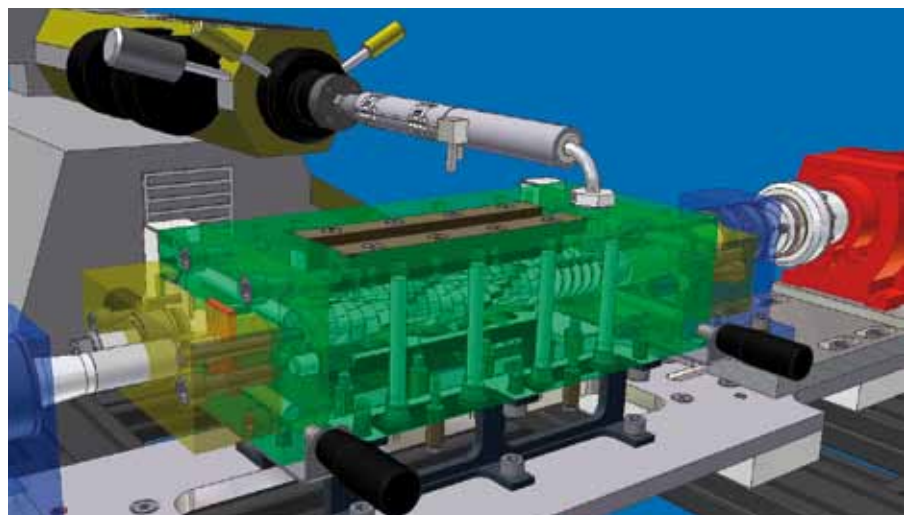
Lösung

Kombination von Schmelzaufbereitungsprozess und Polymermodifizierung mit energiereichen Elektronen

Effekt

- kein Einsatz von Kompatibilisatoren
- erhöhtes mechanisches Eigenschaftsniveau (Zugfestigkeit, Reißdehnung, Zähigkeit) bei geringem Einsatz von Additiven
- multifunktionale Polymerwerkstoffe (z. B. Flammhemmung, Diffusionsbarriere, Leitfähigkeit, UV-Stabilität)

Anlagenkonzept



Anwendung von Ionen- und Elektronenbestrahlung in Forschung und industrieller Praxis

	Verbesserung von Reibung und Verschleiß		Verbesserung von Adhäsion	
	Ionen	Elektronen	Ionen	Elektronen
Maschinenbau Metalle und Legierungen, Isolatoren und Keramiken, Polymere, Werkzeuge	Nitrierung, Borierung, Carbonierung, ionengestützte Hartstoffschichten	Einarbeitung von PTFE-Pulver in Polymere	Ionenstrahlmischen an Grenzflächen, OF-Modifizierung, Spannungsrelaxation	elektroneninduzierte reaktive Aufbereitung von Polymerblends und -kompositen
Automobilindustrie Metalle und Legierungen, Isolatoren und Keramiken, Polymere	HT Oxidationsschutz von TiAl, Nitrierung, Borierung, Carbonierung, Hartstoffschichten	Einarbeitung von PTFE-Pulver in Polymere	Ionenstrahlmischen an Grenzflächen, OF-Modifizierung, Spannungsrelaxation	elektroneninduzierte reaktive Aufbereitung von Polymerblends und -kompositen
Elektronik/Mikroelektronik/Sensorik Halbleiter, Metall und Keramik, Kunststoffe				
Luft- und Raumfahrt Metalle und Legierungen, Isolatoren und Keramiken, Polymere	HT Oxidationsschutz von TiAl, Versprödungsschutz von Ti	Einarbeitung von PTFE-Pulver in Polymere	Ionenstrahlmischen an Grenzflächen, OF-Modifizierung, Spannungsrelaxation	elektroneninduzierte reaktive Aufbereitung von Polymerblends und -kompositen
Medizintechnik Biomaterialien, Metalle und Legierungen, Keramiken, Polymere	Hartstoffbildung durch Ionenimplantation oder ionengestützte Abscheidung	Vernetzung von Implantaten ohne Einsatz chemischer Additive	NE-Ionenimplantation in Polymere, Hydrophobisierung	Randschichtmodifizierung
Optik/Fotovoltaik Halbleiter, Glas	transparente harte Deckschichten	transparente harte Deckschichten mittels Elektronenstrahlhärtung		
Textiltechnik Polymerfasern und -gewebe		PTFE-modifizierte Fasern		Randschichtmodifizierung

Anwendung von Ionen- und Elektronenbestrahlung in Forschung und industrieller Praxis

Nanostrukturierung		Modifizierung elektrischer und magnetischer Eigenschaften		Biokompatibilität		Funktionalisierung und Charakterisierung von Oberflächen				
Ionen	Elektronen	Ionen	Elektronen	Ionen	Elektronen	Ionen	Elektronen			
selbstorganisierte Ionenerosion nanoskalige Beschichtungen, Trockenschmierung	in-situ Erzeugung nanoskaliger Polymerstrukturen	nanoskalige Magnetstrukturen, Hybridmaterialien, magnetische Nanopartikel	Einarbeitung magnetischer Nanopartikel			Beeinflussung von chemischen und physikalischen Eigenschaften wie Korrosion, HT-Oxidation	Nachbehandlung/Funktionalisierung von SMC-Formteilen			
selbstorganisierte Ionenerosion nanoskalige Beschichtungen, Trockenschmierung	in-situ Erzeugung nanoskaliger Polymerstrukturen		Einarbeitung magnetischer Nanopartikel				Nachbehandlung/Funktionalisierung von SMC-Formteilen			
Strukturierung durch FIB und Selbstorganisation, Nanodots, Nanodrähte, Nanomagnete		Dotierung, el. Leitfähigkeit, Isolation, magnetische Speicher, Defektengineering	Defektengineering							
selbstorganisierte Ionenerosion nanoskalige Beschichtungen, Trockenschmierung	in-situ Erzeugung nanoskaliger Polymerstrukturen									Härtung/Funktionalisierung von CFK-Formteilen
nanoporöse OF durch Hochdosis-Implantation und Bubble-segregation	in-situ Erzeugung nanoskaliger Polymerstrukturen							Entzündungshemmung, Antitoxizität durch Implantation von Cu, Ag; Ca und P zur Bildung von Hydroxylapatit	Eigennukleierung, Immobilisierung, Funktionalisierung, Sterilisation	Entzündungshemmung, Antitoxizität durch Implantation von Cu, Ag; Ca und P zur Bildung von Hydroxylapatit
Gradienten, Brechungsindex, Reflexion, Antireflexion, Absorption, Rauigkeit		elektrische Leitfähigkeit, Isolation, Dotierung, Transparenz							ionengestützte Dünnschichtverfahren, Ionenstrahlätzen	
				Einarbeitung magnetischer Nanopartikel		Randschichtmodifizierung				



ANWENDUNG VON IONENSTRAHLEN

Ionenimplantation

Die **Ionenimplantation** ist ein Verfahren zur Einbringung von Fremdatomen (in Form von Ionen) in ein Grundmaterial (Dotierung oder Bildung stöchiometrischer Verbindungen). Auf diese Weise lassen sich die Materialeigenschaften des Grundmaterials im oberflächennahen Bereich ändern.

Das Applikationslabor Ionentechnologie betreibt drei elektrostatischen MV-Beschleuniger, drei Ionenimplanter und die Plasma-Immersions-Ionenimplantation.

Die Ionenimplantation ist verfügbar für Industrieprojekte und -service sowie für grundlegende und anwendungsorientierte Untersuchungen zur Modifizierung oberflächensensitiver Eigenschaften, insbesondere Härte, Reibung, Verschleiß, Ermüdung, Haftfestigkeit, Korrosion von Metallen und anderen Werkstoffen, für Dotierung, Synthese, Nanostrukturierung und Defektengineering im Halbleiterbereich.

50kV DANFYSIK 1050

Niederenergie-Ionenimplanter
200eV bis 40 keV Niederenergie-Ionenimplantation, max. Strom <5 mA, mit UHV Waferhandling

200kV DANFYSIK 1090

Hochstrom-Ionenimplanter
Mit zwei verfügbaren Strahlrohren:
20 keV bis 200 keV Ionenimplantation mit elektrostatischem oder magnetischem Wobbelsystem, max. Strom <0.5 mA mit Standardtargetstation oder Hochtemperatur-Kammer (1100 °C)

500kV Ionenimplanter HVEE

500 keV Ionenimplanter mit verschiedenen Ionenquellen und Strahlrohren, Targettemperaturen 100 K bis 900 K, Doppelimplantationskammer, automatischem Waferhandlingsystem 4“ und 6“

2-MV-Van-de-Graaff-Beschleuniger

Beschleunigungsspannung:
0,3 - 1,7 MV
Strahlstrom: 0,01 - 1,0 μ A
Ionenarten: 1H, 2H, 4He
Ionenquelle: Hochfrequenz-Ionenquelle

3-MV-Tandetron

Beschleunigungsspannung: 0,1 - 3,3 MV
Strahlstrom: 0,001 - 200 μ A
Implantationskanal mit Wafer-Karussell (max. 4-Zoll Durchmesser)
Implantationskammer hoher Reinheit (max. 5-Zoll Durchmesser)

6MV Tandetron

Beschleunigungsspannung: 0,3 - 6 MV
Strahlstrom: 0,001 - 200 μ A
für Ionenstrahlmodifizierung, Ionenstrahlanalytik und Beschleunigermassenspektrometrie.
Implantationskanal mit Wafer-Roboter von 2-Zoll bis 8-Zoll

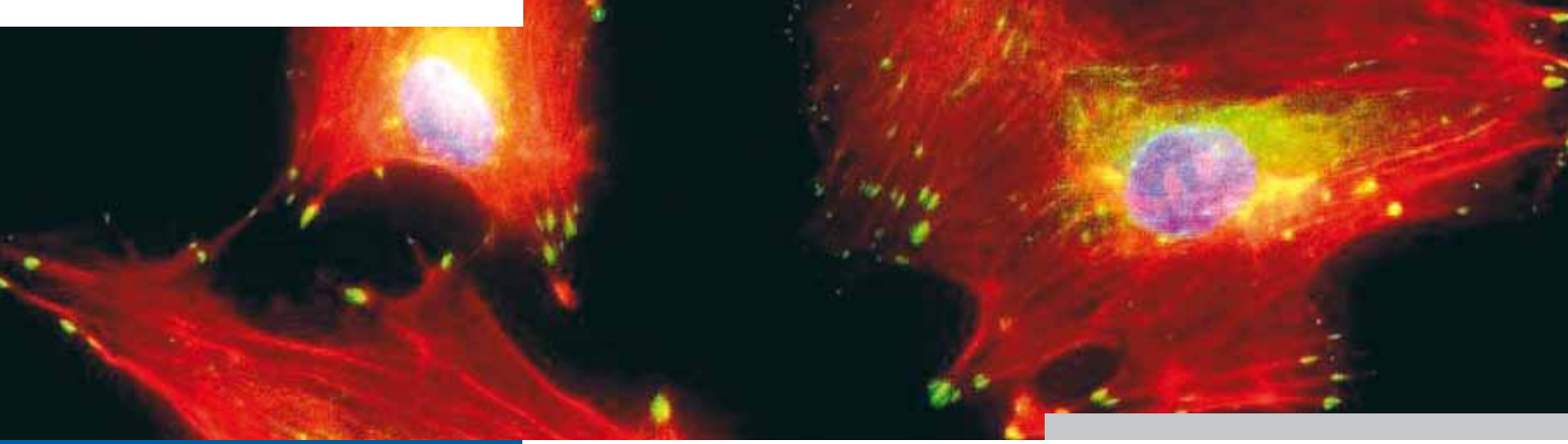
Plasma-Immersions-Ionen-Implantation

Sieben verschiedene PIII-Systeme sind verfügbar bis 40kV Pulsspannung
Vorteile des Verfahrens:

- hohe Ionenstromdichten erlauben eine schnelle Ionenimplantation
- Implantation von 3D-Objekten möglich

Focused Ion Beam

Ionenimplantation (< 50 keV) mit einem fokussierten Ionenstrahl (>100 nm Spotdurchmesser), Flüssigmetall-Ionenquelle, computergesteuertem Schreibstrahl



ANWENDUNG VON IONENSTRAHLEN

Funktionalisierung der Oberflächen

Die Oberflächenmodifizierung von Polymeren mittels Ionenimplantation kann zu einer deutlich erhöhten Biokompatibilität und Langzeitstabilität z.B. von Polyurethan (PUR) in direktem Blutkontakt führen.

Erreicht wird dies durch das Einbringen von speziellen Ionen in die Randschichten und durch das physikalische Auftragen spezieller dünner Schichten. Als „Werkzeuge“ kommen hierfür die für derartige Zwecke besonders effektiven plasma- und ionengestützten Verfahren der physikalischen Oberflächentechnik zum Einsatz. Unter Bioverträglichkeit ist

unter anderem eine schnelle Endothelialisierung und ein geringer biologischer Abbau im Sinne einer verlängerten biologischen Funktionalität zu verstehen. Erreicht werden soll eine gute Anti-thrombogenität des beschichteten Materials selbst bzw. des endothelialisierten Materials.

In der Medizintechnik gibt es eine Reihe von Produkten, die in unmittelbarem Kontakt mit fließendem Blut stehen. Beispiele sind künstliche Gefäße, Herzklappen sowie Schlauchsysteme und Gastauschgewebe in Herz-Lungen-Maschinen. Die Fließeigenschaften des

Blutes und hierbei insbesondere die Thrombogenese werden dabei wesentlich durch die Beschaffenheit der mit dem Blut in Kontakt stehenden Oberflächen bestimmt.

Die Behandlung von PUR durch Ionenbestrahlung führt zu einer deutlichen Veränderung der Oberfläche.

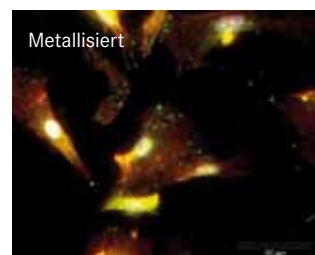
Wie mit verschiedenen spektroskopischen Verfahren gezeigt wurde, entstand eine spezifische Ionen-induzierte hydrogenisierte amorphe Kohlenstoff-Phase, die dafür verantwortlich ist, dass die PUR-Oberfläche zytokompatibler wurde.



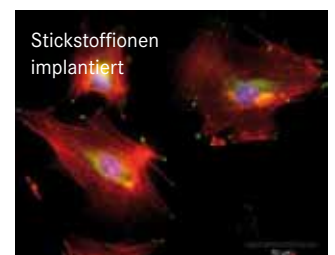
Sauerstoffionen
implantiert



Unbehandelt



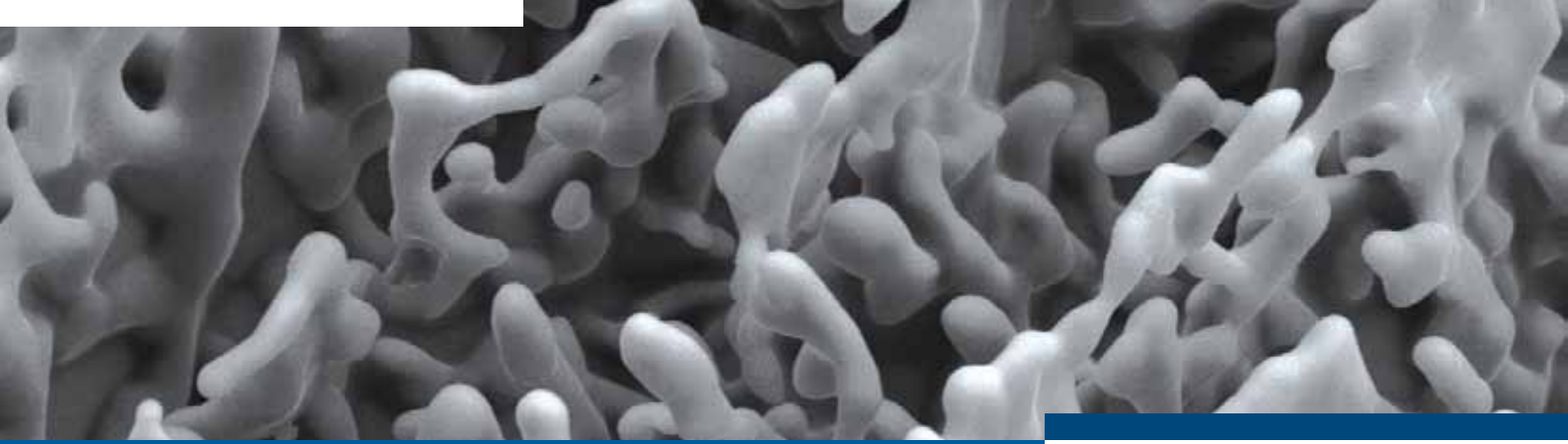
Metallisiert



Stickstoffionen
implantiert

Adhäsion (24 h) von HUVEC auf unbehandeltem (uPUR) bzw. mit verschiedenen Ionen implantierten (1×10^{14} Ionen/cm² bei 0,3 keV) Ester-PUR.

Aktinzytoskelett (rot), fokale Kontakte (Vinculin, grün), Zellkern (DAPI, blau)



ANWENDUNG VON IONENSTRAHLEN

Nanoporöse Edelstahloberfläche eines „drug eluting stent“ mittels PBII mit Edelgasionen

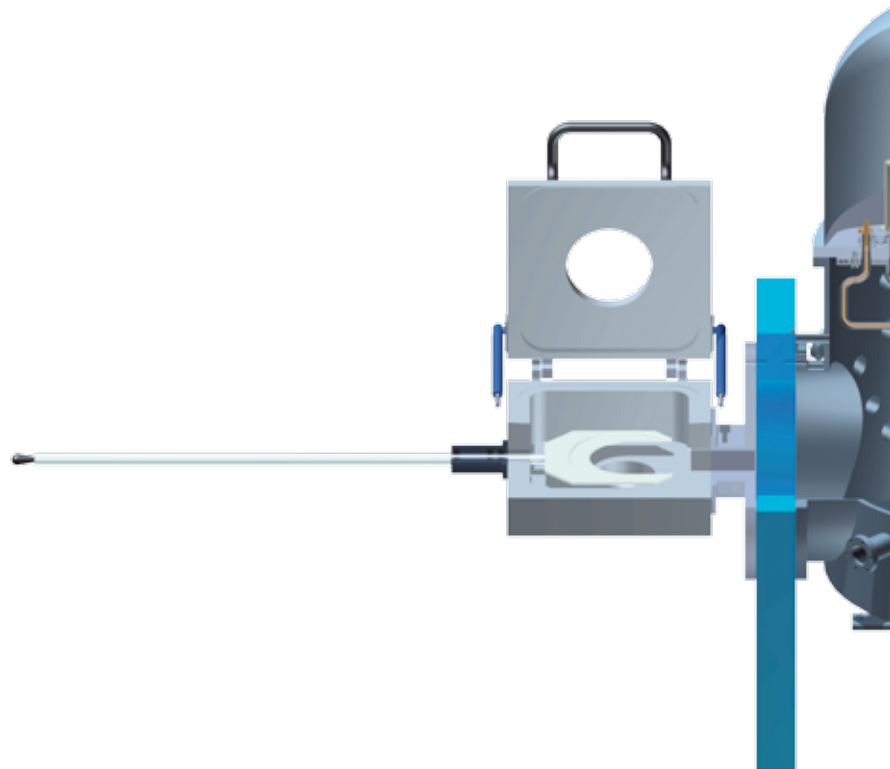
Nanostrukturierte Metalloberflächen durch PBII

Die verschiedenen Gefäßsysteme des Menschen wie Arterien oder andere Blutgefäße sind im Alter oder durch Krankheiten oft geschwächt und häufig schmerzhaft (z.B. Tumore, Aneurysma o.ä.). Ein solches Gefäß kann jedoch durch entsprechende Maßnahmen mit medizinischen Endoprothesen wie Stents gestärkt und ersetzt werden. Für reine Metallstents ist die Restenose (Verengung, Wucherung) oft ein ernstes Problem für die Patienten. Die entsprechenden Hersteller der Stents sind deshalb seit Jahren auf der Suche nach Möglichkeiten der Verhinderung der Restenose. Eine interessante neue Möglichkeit der sogenannten „drug eluting stents“ wurde dabei mit der Anwendung der PBII (plasma based ion implantation) für die Erzeugung nanoporöser Metalloberflächen gefunden.

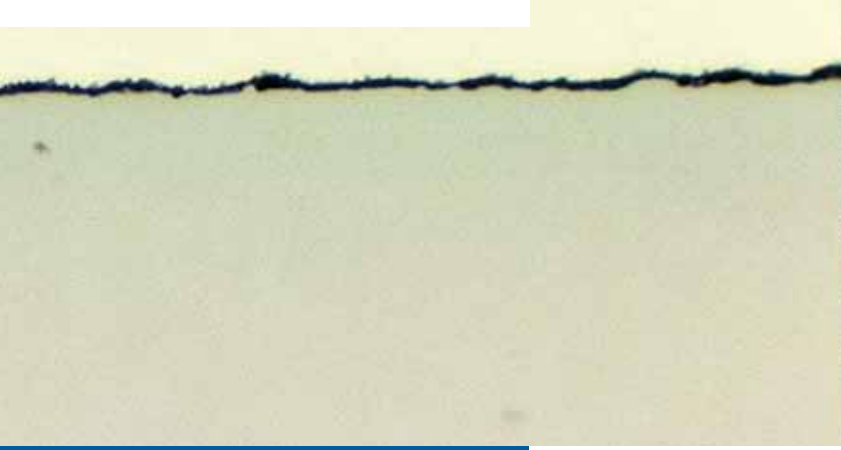
Die PBII von Edelgasen in Metalloberflächen erzeugt nach Übersättigung der implantierten Dosis bei bestimmten Temperaturen vergrabene Nano- und Mikrobälchen hoher Konzentration, deren Zahl und Größe sehr einfach steuerbar über die Temperatur, Dosis und Ionenenergie ist. Nach Zerstäubung der Deckschicht mit den gleichen Ionen, aber entsprechend niedrigerer Energie wird die so entstandene Struktur frei gelegt und man erhält eine nanoporöse Metalloberfläche, die für viele Anwendungen, u.a. zur Wirkstoffdeposition in einem medizinischen Implantat, zur Verbesserung des biokompatiblen Verhaltens von Oberflächen geeignet ist. Die so entstandene Oberfläche ist ebenso eine hervorragende Unterlage für bestimmte gut haftende oder biologische Schichten.

Vorteile der nanostrukturierten Me-Oberflächen

- Speicherung von therapeutischen Wirkstoffen in der Oberfläche
- hohe Biokompatibilität
- ausgezeichnetes Substrat für Beschichtungen hoher Haftfestigkeit



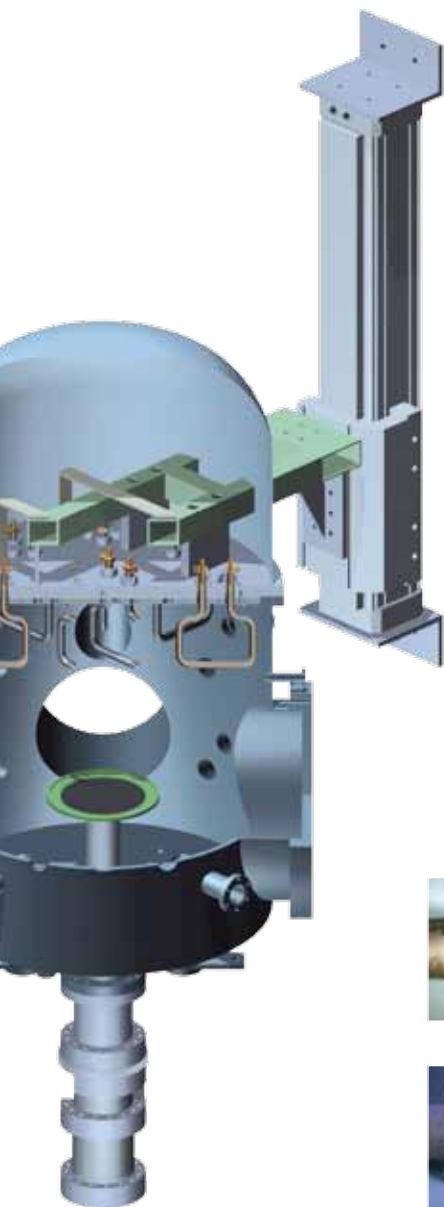
PBII-Maschine der Fa. DTF mit modularem Aufbau zur Kombination von Implantation und Beschichtung



ANWENDUNG VON IONENSTRAHLEN

Effizienter Oxydationsschutz von TiAl-Legierungen mittels Halogen-PBII

Metallografische Schläffe von unimplantierten (rechts) und allseitige F-implantierten (links) -TiAl Proben. Isothermische Oxydation bei 900 °C für 120 h in Luft.



Typische Parameter

- Ionenstromdichte: 1 – 10 mA/cm²
- Energieeintrag in die Oberfläche: bis zu einige 100 W/cm²
- Oberflächentemperatur: bis zu einige 100 K
- Pulsängen: 5...100 µs
- Pulsfrequenz: einige Hz....einige kHz

Vorteile des Verfahrens

- hohe Ionenstromdichten erlauben eine schnelle Ionenimplantation
- Implantation von 3D-Objekten
- kein Wobbelprozess erforderlich
- Implantationszeit ist geometrie- und größenunabhängig
- Anlagen sind preiswert

γ-TiAl (48 – 56 at% Al) mit einer Dichte < 4g/cm², hohem Schmelzpunkt von 1500 °C, guten mechanischen Eigenschaften und einem exzellenten Festigkeit-zu-Masse-Verhältnis ist ein attraktives Leichtmaterial für

- Luftfahrtindustrie
- Automobilindustrie
- Energieerzeugung

Problem

Schlechte Oxydationsbeständigkeit bei Temperaturen oberhalb 700 °C

Lösung:

Implantation von Halogenionen (Cl oder F) mittels PBII

Effekt

Durch Ionenimplantation von Chlor oder Fluor modifizierte TiAl-Legierungen sind stabil, gut haftend und widerstandsfähig gegen oxidative Umwelteinflüsse bei gleichzeitigem Erhalt der herausragenden Materialeigenschaften des Ausgangsmaterials



Turbolader-Rotor-Oxydation: unimplantiert und F-implantiert



ANWENDUNG VON IONENSTRAHLEN

MBE-Anlage zur
Abscheidung

Synthese von Nanostrukturen mittels Ionenstrahlen

Nanostrukturen von wenigen nm bis μm Größe können in Festkörperoberflächen mittels energetischen Ionen erzeugt werden. Typische Beispiele sind CoSi_2 in Si und Au, Ge, Si in SiO_2 .

Die Ionenstrahlsynthese von Nanophasen wird zur Bildung von Kristallensembles, spinodalen Mustern und Profilen oder vergrabenen Schichten benutzt. Durch spezielle Technologien wie dem fokussierten Ionenstrahl oder die Implantation durch Masken werden Strukturen von Nanophasen wie Nanodrähte oder regelmäßige Anordnungen von Nanokristallen ermöglicht. Die Bildung solcher Strukturen kann dabei durch Selbstorganisation mittels thermischer Behandlung unterstützt werden. Die einfache Strukturierung großer Flächen in Kombination mit der Tatsache, dass die Periode der Strukturen über die Ionenenergie im Bereich von unter zwanzig bis zu mehreren hundert Nanometern eingestellt werden kann, macht diese Methode sehr attraktiv für Anwendungen in der Dünnschichttechnik.

Selbstorganisierte Nanostrukturen durch Ionenerosion

Unter senkrechtem Ioneneinschuss oder durch gleichzeitige Rotation der zu bestrahlenden Oberfläche entstehen:

Punktmuster

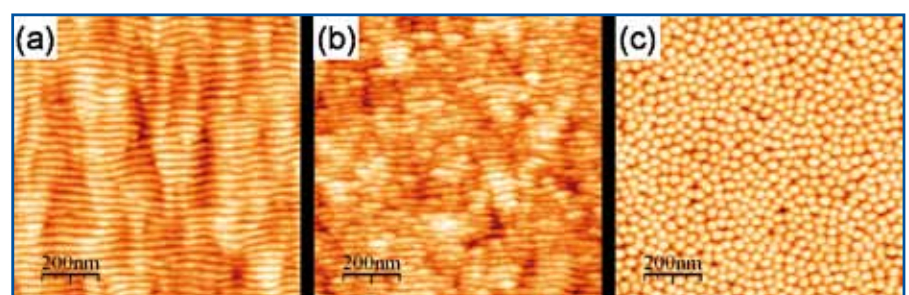
- einheitlich geformte Punktstrukturen
- geordnet in hexagonalen Domänen
- Punktgröße: 10 – 100 nm in Abhängigkeit von der Ionenenergie
- bisher generiert in GaSb, InSb, InP, GaP, Si, Ge...

oder Wellenmuster

- periodische Wellenstrukturen
- parallel oder rechtwinklig zur Ioneneinschussrichtung
- Periodizität: 10 – 1000 nm
- bisher beobachtet in Metallen, Si, SiO_2

Magnetische Nanostrukturen und exotische magnetische Nanopartikel

Die Nutzung von Ionenstrahlen zur Erzeugung von lokalen Nanostrukturen ist z.B. auch für neue magnetische Speichertechnologien interessant. Die Magnetisierungs-Änderung in ferromagnetischen Materialien zur Informationsspeicherung kann durch superflache Nano-Magnete in Legierungen aus Eisen und Aluminium realisiert werden, indem die Materialoberfläche mit Fremdionen aus einem fokussierten Ionenstrahl so behandelt wurden, dass nur die bestrahlten Bereiche des Materials ferromagnetisch wurden; die unbestrahlten Bereiche blieben unmagnetisch. Der Ionenstrahl kann auf eine Fläche von wenigen Nanometern gebündelt werden, was die eingebetteten Nano-Magnete mit einer Größe von deutlich unter 100 Nanometern überhaupt erst möglich macht.



Rasterkraftmikroskopieaufnahme von Nanomustern auf (a) Si, (b) SiO_2 und (c) GaSb.



ANWENDUNG VON IONENSTRAHLEN

Hartstoffe

Funktionalisierung von Oberflächen durch Ionenimplantation

Durch Ionenimplantation lässt sich die Standzeit von Werkzeugen, Maschinenkomponenten für die Verarbeitung von Polymeren, Holz, Papier, Lebensmittel, Metalllegierungen, Keramiken usw. z.T. drastisch verbessern.

Vorteile der Ionenimplantation

- höhere Härte der Oberfläche,
- besseres Abriebverhalten,
- Verschleiß- und Ermüdungsreduzierung
- Ausschluß von Lochfraßkorrosion
- Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit
- Niedertemperaturprozess
- keine Veränderung der Maßhaltigkeit, der Form und Kernmaterialeigenschaften

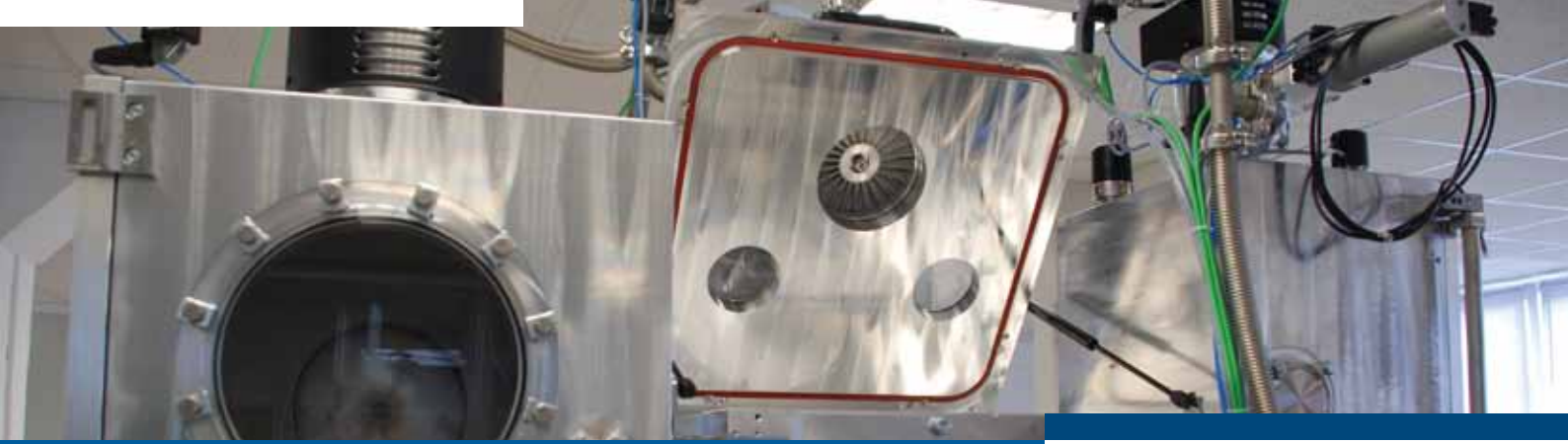
Ionengestützte Abscheideprozesse

Die Kombination von Vakuum-Dünnschichtabscheidungen mit zusätzlichem Beschuß reaktiver oder nichtreaktiver energetischer Ionen erschließt die Synthese von dünnen Schichten metastabiler Phasen, amorpher Strukturen oder spezieller kristalliner Zusammensetzungen und Orientierungen für optische oder elektronische Anwendungen oder als tribologische Schutzschichten. Die Dichte, Zusammensetzung, Stöchiometrie, Porosität, Mikrostruktur, Reinheit, mechanische Verspannung und viele anderen Eigenschaften der Schicht können beeinflusst werden.

Vorteile der ionengestützten Abscheideprozesse

- Verbesserung der Schichthaftung
- hohe Schichtdichten erzielbar
- geringe Porosität
- niedrige Substrattemperatur
- Texturkontrolle
- Synthese von superharten Materialien
- reactive und nichtreaktive Ionenunterstützung möglich





ANWENDUNG VON IONENSTRAHLEN

Elektronen- und Ionenstrahlen für Defect Engineering in Leistungshalbleitern

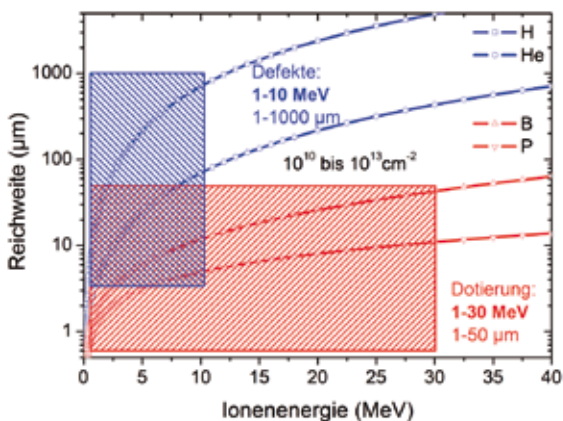
Die Hochenergie-Ionenimplantation hat in der Fertigungstechnologie einer Reihe von Halbleiter-Bauelementen bereits große Verbreitung gefunden. Genutzt werden die bekannten Vorteile der Ionenimplantation bei der gezielten Einbringung von Dotier-Atomen, der Erzeugung von Defekten oder der Kombination beider Wirkungen.

Die hohe Ionenenergie von typischerweise einigen Mega-Elektronenvolt (MeV) bewirkt eine große Eindringtiefe der Ionen im Material. Dadurch lassen sich u.a. vergrabene Dotanden- und Defektprofile erzeugen, was durch kein anderes Verfahren möglich ist.

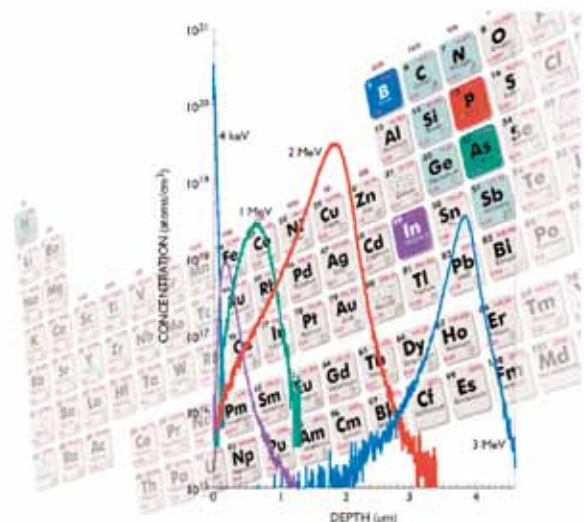
Die geringen Dosiswerte ($10^{10} - 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) der Implantation machen das Verfahren auch wirtschaftlich attraktiv.

Typische Anwendungsgebiete der Hochenergie-Ionenimplantation sind:

- Implantation leichter Ionen (H, He) in Halbleiter-Bauelemente der Leistungselektronik (Leistungsdioden, Thyristoren oder Power-MOSFETs zur Verbesserung des Schaltverhaltens,
- Implantation dotierender Elemente (H, B, P, As etc.) zur Beeinflussung der Feldstärkeverteilung in Fotodioden, Teilchendetektoren oder Hochspannungs-Bauelementen,
- Implantation schwerer Ionen zur Verbesserung der Emissionscharakteristik von Laserdioden



Energie-Reichweite-Beziehung ausgewählter Ionen mit der Darstellung typischer Einsatzgebiete



Tiefenprofile bei der Hochenergie- Ionenimplantation



ANWENDUNG VON IONENSTRAHLEN

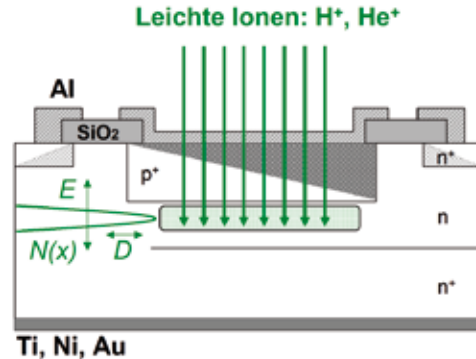
Elektronen- und Ionenstrahlen für Defect Engineering in Leistungshalbleitern

Implantations-Parameter

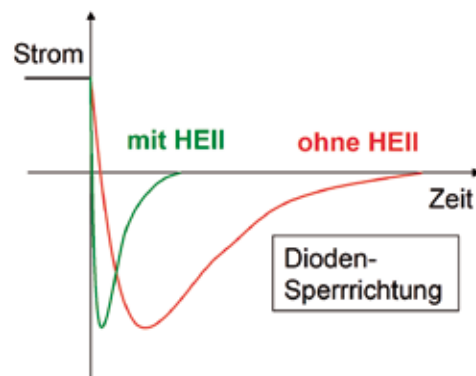
Ionen:	H, He
Energie:	2 – 10 MeV
Dosis:	$10^{10} - 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

Prinzip

Bei der Hochenergie-Ionenimplantation werden durch atomare Stoßprozesse der Ionen mit den Targetatomen Defekte generiert, die zu einer lokalen Verringerung der Minoritätsträger-Lebensdauer führen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Erzeugung von Si-Doppel-Leerstellen, die bis über 300°C temperaturstabil sind. Durch Verbindung von Elektronen- und Ionenbestrahlung wird ein komplexes Schadensprofil erzeugt, das das Schaltverhalten von Leistungshalbleiter-Bauelementen (Leistungsdioden, Thyristoren, MOSFET's) signifikant verbessert. Dazu zählen insbesondere die Erhöhung der Schaltfrequenz und die Verringerung der Verlustleistung.



Hochenergie-Ionenbestrahlung einer Leistungsdiode



Effekte der Ionenbestrahlung auf die Diodenkennlinie (schematisch), HEIL = Hochenergie-Ionenimplantation

Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V.
Applikationslabor Elektronentechnologie
Dr. Uwe Gohs

Hohe Straße 6
D-01069 Dresden

Tel.: +49 351 4658 - 239
Fax: +49 351 4658 - 290
E-Mail: gohs@ipfdd.de
www: <http://www.ipfdd.de>

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.
Applikationslabor Ionentechnologie
Prof. Dr. Andreas Kolitsch

Bautzner Landstraße 400
D-01328 Dresden

Tel.: +49 351 260 3348
Fax: +49 351 260 2703
E-Mail: a.kolitsch@hzdr.de
www: <http://www.hzdr.de>

HZDR

 Leibniz-Institut
für Polymerforschung
Dresden e. V.

 **HELMHOLTZ**
| ZENTRUM DRESDEN
| ROSSENDORF