

Raumfahrttechnologie auf der Erde angewandt

Ionenstrahlgerät „RIM“ zur Materialbehandlung

Von Horst Löb

Auf der Hannover-Messe 1986, wo die Hessischen Hochschulen erstmals mit einem eigenen Stand vertreten waren, stellte das I. Physikalische Institut der JLU ein Ionentriebwerk zur Bahnstabilisierung von Nachrichtensatelliten aus. Dieses 10-cm-Aggregat „RIT 10“ (Abb. 1) steht jetzt vor der Raumerprobung auf zwei Satelliten, „EURECA“ und „SAT II“. Auf der diesjährigen Hannover-Messe, also drei Jahre später, war das I. Physikalische Institut wiederum mit einer 10-cm-Ionenstrahlquelle „RIM 10“ vertreten, die nun aber zur Materialbearbeitung eingesetzt wird. Dies zeigt einmal, wie die in vielen Jahren gesammelten Forschungs-, Entwicklungs- und Qualifikationserfahrungen auf einem Hochtechnologiegebiet der Raumfahrt auch auf der Erde nutzbringend angewandt werden können. Zum anderen hat sich gerade die Materialforschung in den letzten Jahren zu einem wichtigen, national und international geförderten, interdisziplinären Wissenszweig entwickelt. Auch an der JLU Gießen gibt es das Schwerpunktprogramm „Materialforschung“.

Der Anstoß, die Gießener Ionentriebwerke zur Vergütung von Festkörperoberflächen und zur Herstellung dünner Schichten einzusetzen, kam vor drei Jahren aus der Industrie. In der Folgezeit bauten wir für einige Institute und Firmen „RIM 10“-Quellen zur Materialbearbeitung. Als die Nachfrage die Belastungsgrenze eines Institutes überschritt, wurde eine Zusammenarbeit mit der Firma Arthur Pfeiffer Vakuumtechnik, Wetzlar, einer Tochter der Balzersgruppe, vereinbart; sie sieht den Bau und Vertrieb der Quellen durch die Industrie, die Ent-

wicklung, Qualifikation und Abnahmetests durch die JLU vor (Abb. 2).

Parallel hierzu wurden am I. Physikalischen Institut frühere Experimente zur Materialbearbeitung mit neuen, eigenen Strahlquellen wieder aufgenommen und intensiviert.

Materialbehandlung mit Ionenstrahlen

Ein wichtiges Gebiet der Materialforschung und -gewinnung ist die gezielte Behandlung

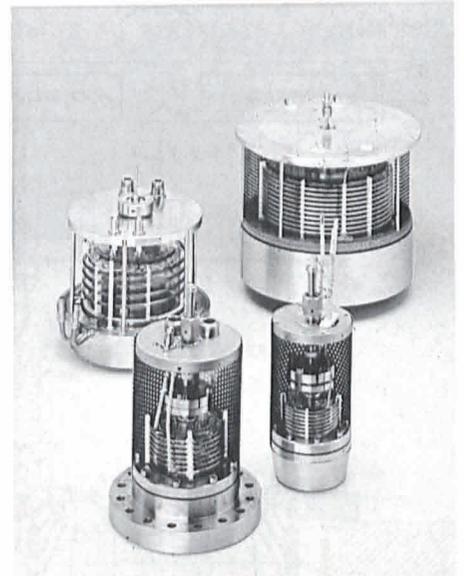


Abb. 2: Aufnahmen der RIM-Familie: Radiofrequenz-Ionenstrahlquellen zur Materialbearbeitung mit 4 cm und 6 cm (Firma Pfeiffer, Wetzlar) sowie 10 cm und 15 cm (JLU Gießen) Ionisator Durchmesser. (Die große 35-cm-Quelle ist nicht mit abgebildet).

der Festkörperoberflächen und die Herstellung qualitativ hochwertiger Dünnschichten mit verschiedensten Eigenschaften. Der Einsatz von Ionenstrahlen für diese Zwecke (Abb. 3) hat in den letzten Jahren sprunghaft an Bedeutung gewonnen. Die Verwendung von Ionenstrahlen in der Oberflächen- und Dünnschichttechnologie hat zwar den Nachteil eines größeren apparativen Aufwandes – verglichen mit den relativ einfachen Aufdampfanlagen oder auch mit den plasmachemischen Reaktoren, bei denen sich das Substrat direkt in einer Entladungskammer befindet.

Die Ionenstrahlbehandlung zeichnet sich aber durch ihre große Variationsmöglichkeit hinsichtlich des Strahlstroms und der Strahlenergie aus sowie durch die sehr sauberen und definierten Prozeßbedingungen, wie Hochvakuum, geringe Substraterwärmung, exakte Strahlführung, minimale Energieunschärfen usw.

Je nach der Ionenenergie lassen sich unterschiedliche Oberflächenprozesse ausführen: Bei sehr niedrigen Strahlspannungen (10 bis 100 V, entsprechend Ionenenergien von 10 bis 100 eV) bleiben die Ionen durch Adsorption direkt auf der beschossenen Unterlage haften und bauen so eine Schicht auf. Ionen reaktiver Substanzen können die Oberfläche zudem noch chemisch verändern. Bei dieser „Ionenstrahlbeschichtung“ kann man das Substrat einer „Breitbanddusche“ aussetzen oder z.B. mit Hilfe von Masken strukturieren.

In einem anderen Verfahren, dem „ionenstrahlunterstützten Bedampfen“, wird das

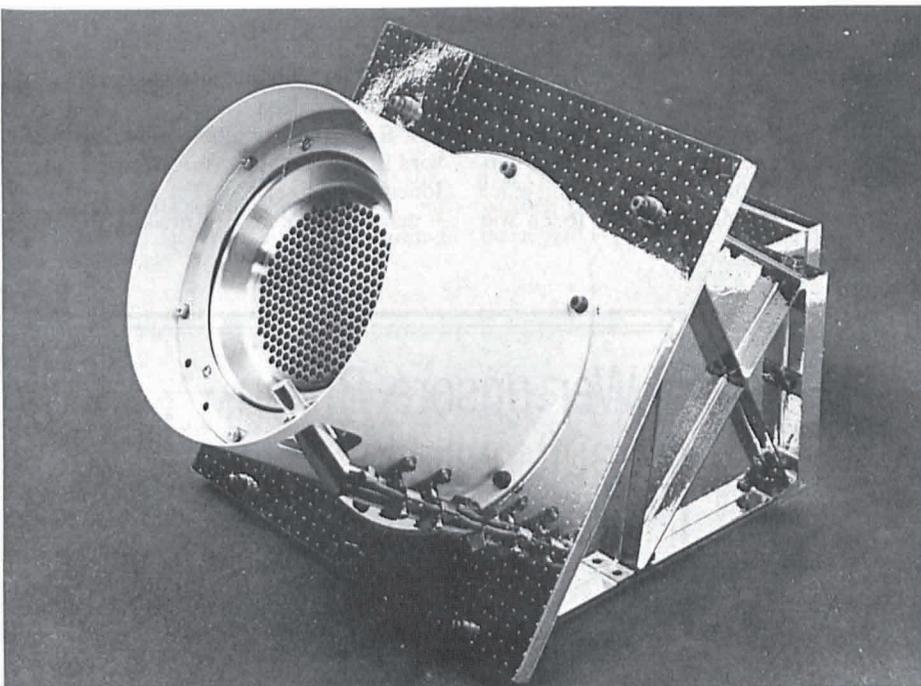


Abb. 1: Radiofrequenz-Ionentriebwerk „RIT 10“ zur Satellitenkontrolle; das Aggregat wurde an der JLU entwickelt, von der DFVLR Stuttgart bodenqualifiziert und als Flugversion von der Firma MBB, München, gebaut.

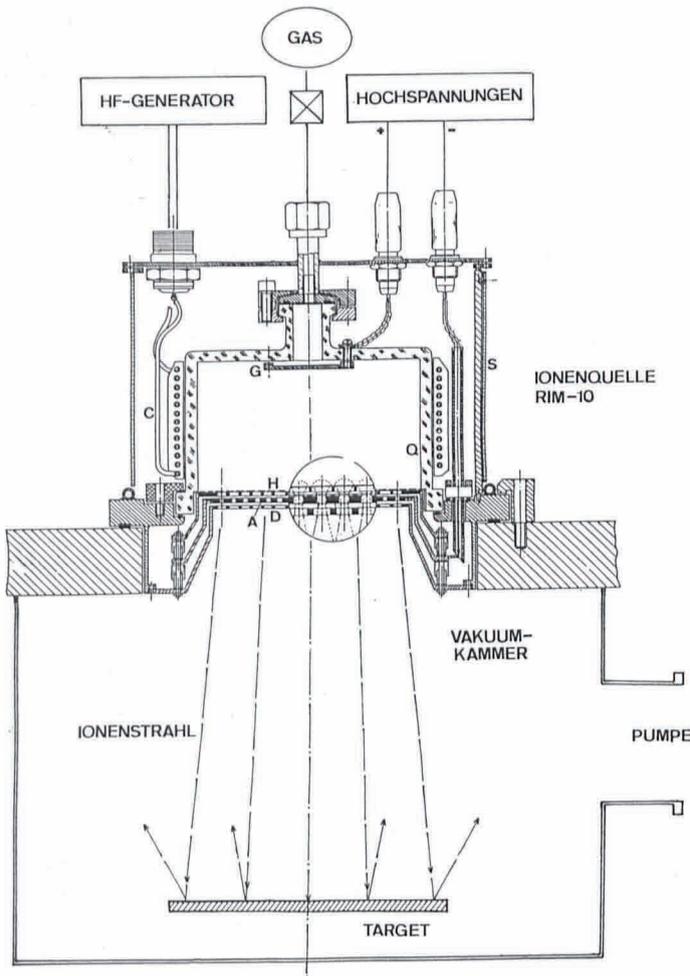


Abb. 3: Maßstäbliche Funktionszeichnung der Gießener RIM 10-Ionenquelle mit (schematisch eingezeichneten) Versorgungssystemen, evakuiertem Bestrahlungsraum und Target, d.h. bestrahltem Substrat.

eigentliche Beschichtungsmaterial in einem Verdampfer (oder durch Zerstäubung, s. u.) als Atomstrahl erzeugt und dann auf dem Substrat durch Ionenbombardement (100 bis über 1000 eV) „festgeschossen“; hierbei kann die oberflächennahe Zone durch Erzeugung von Gitterdefekten aktiviert und

schossene Festkörperoberfläche zerstäubt, also abgetragen. Dieses „Ionenstrahlätzen“ setzt man zur Oberflächenreinigung ein, u. a. auch vor einem sich anschließenden Beschichtungsprozeß. In der Halbleiterherstellung bedeckt man das Substrat mit einer Maske und verwendet reaktive Ionen wie

das Kondensat mit dem Substrat verzahnt werden.

In beiden Fällen lassen sich Schichten mit vielfältigen Eigenschaften herstellen, z. B. besonders harte, haftfähige und abriebfeste Schichten mit hoher chemischer bzw. thermischer Beständigkeit, etwa für Werkzeugstähle, für den Motoren- und Maschinenbau, für Biomaterialien usw. In der Optik wird die Dünnschichttechnik zur Herstellung vergüteter Gläser, amorpher Solarzellen, hochbelastbarer Laserspiegel etc. angewandt, während in der Elektronik und Mikroelektronik hochwertige Dielektrika, Kontaktierungen, Magnetschichten, Supraleiter usw. gefertigt werden können.

Bei Ionenstrahlspannungen zwischen 300 und 3000 V wird die be-

Fluor zum „chemisch-physikalischen Ätzen“.

Kondensiert das durch Ionenbombardement zerstäubte Material auf einem Substrat außerhalb des Strahls, so spricht man von „sekundärer Ionenstrahlbeschichtung“. Eine weitere Anwendung stellt die „Texturierung“, d. h. mikroskopische Aufrauhung von Katalysatoren, Emittierelektroden, Superisolatoren oder von medizinischen Implantaten, zur besseren Gewebhaftung dar. Hierbei wird die zu behandelnde Oberfläche zusammen mit einem Impfmateriale dem Ionenstrahl ausgesetzt.

Bei sehr hohen Strahlspannungen (10 kV bis einige 100 kV) dringen schließlich die Ionen bis zu einer relativ genau bestimmbar Tiefe in das Substrat ein. Mit Hilfe einer solchen „Ionenimplantation“ lassen sich z. B. Halbleiterbauelemente exakt dotieren.

Ionenstrahlquellen „RIM“

Seit Anfang der sechziger Jahre wird am I. Physikalischen Institut Gießen an der Erforschung und Entwicklung von Hochfrequenz-Breitstrahl-Ionenquellen gearbeitet. Abbildung 3 veranschaulicht die Funktionsweise: Das Arbeitsgas strömt durch einen Gasverteilerkopf G in das Quarzgefäß Q ein, das von der Schwingkreisspule C eines Hochfrequenzgenerators umgeben ist. Durch Induktion entsteht im Gefäßinneren ein elektrisches Wirbelfeld, durch welches das Arbeitsgas ionisiert, d. h. in positive Ionen und Elektronen zerlegt wird. Die erzeugten Gasionen werden durch ein auf Hochspannung liegendes, aus drei vielfach gelochten Scheiben (H, A, D) bestehendes Elektrodensystem aus dem Ionisatorgefäß G extrahiert, beschleunigt und zum Strahl gebündelt.

Der Rückstoß der schnellen Ionenstrahlen wird in einer Familie von 5 Radiofrequenz-Ionentriebwerken („RIT“) genutzt, wovon – neben dem eingangs erwähnten 10-cm-

	RIM 4	RIM 6	RIM 10	RIM 15	RIM 35
Durchmesser/Länge des Quarzionisators (in cm)	4/3	6/4	10/6	15/7,5	35/10
Zahl der Extraktionsbohrungen im Beschleuniger	7	31	241	571	4270
Frequenz des Hf-Generators (in MHz)	≥ 9	4	2,5	$\sim 1,5$	0,75
Entladungsdruck im Ionisator (in mbar)	$\sim 2,0 \cdot 10^{-1}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$\sim 1,5 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$
Maximaler Leistungsverbrauch des Radiofrequenzgenerators (in Watt)	120	200	300	~ 420	1150
Gasverbrauch (in sccm = Standardkubikzentimeter pro Minute)	$\sim 5,9$	6,5	7,5	$\sim 11,0$	43
Maximaler Strahlstrom (in mA)	$\sim 17,5$	75	300	~ 525	2500
Maximale Strahlstromdichte am Quellenausgang (in mA/cm ²)	~ 11	10,6	5,3	$\sim 4,0$	2,6
Ionenausbeute, Strahlstromstärke pro Hf-Leistung (in mA/W)	$\sim 0,15$	0,375	1,0	$\sim 1,25$	2,17
Gasökonomie, Strahlstromstärke pro Gasverbrauch (in mA/sccm)	$\sim 3,0$	11,5	40,0	~ 48	58,1

Abb. 4: Charakteristische Leistungswerte der Gießener Ionenstrahlquellen zur Materialbearbeitung („RIM-Familie“) für den Betrieb mit Argon.

Steueraggregat – auch das große Gießener interplanetare Marschtriebwerk „RIT 35“ ins ESA-Programm aufgenommen wurde. Diese Hochtechnologie mit ihren typischen Weltraum-Spezifikationen, wie extrem hohe Zuverlässigkeit, lange Lebensdauer, Leichtbauweise und maximale Wirkungsgrade, kommt auch allen terrestrischen Anwendungen zugute:

Seit 1977 wurde eine Familie von 6 Radiofrequenz-Injektorgeräten („RIG“) zur Aufheizung von Fusionsplasmen entwickelt, wobei die Hauptqualifikationsmerkmale nun extrem hohe Strahldichten und optimale Strahlqualitäten, wie minimale Divergenzen und geringste Verunreinigungen, waren. Eine 50 cm RIG-Quelle konnte inzwischen an das Fusionszentrum von Garching zum dortigen Einsatz ausgeliefert werden.

Nachdem bereits seit 1978 einige RIT- und RIG-Quellen zur Oberflächenbehandlung

untersucht und angewandt worden waren, wurde ab 1986 eine eigene Familie von Radiofrequenz-Ionenstrahlquellen zur Materialbearbeitung („RIM“) entwickelt (s. Abb. 2); diese Geräte sind aus der RIT-Typenreihe direkt abgeleitet und schließen auch alle mit den RIG-Geräten gewonnenen Erfahrungen ein.

Gegenüber anderen, auf dem Markt befindlichen Ionenstrahlern zur Materialbearbeitung besitzen die RIM-Quellen folgende konzeptionellen Vorteile:

1. universelle Verwendbarkeit, auch für reaktive Gase;
2. Betriebssicherheit, lange Lebensdauer und hohe Strahlqualitäten;
3. einfacher und robuster Aufbau sowie vergleichsweise geringer Elektronik- und Regelaufwand.

Die Gießener Radiofrequenz-Ionenquellen wurden bisher mit folgenden Arbeitsgasen betrieben: Hg; Xe, Kr, Ar, Ne, He; O₂, N₂,

H₂; CO, CO₂, C₄H₈, CF₂Cl₂, CBrF₃, SF₆; TiCl₄.

Die erzielten Ionenstromstärken hängen – außer von der Hf-Generatorleistung und dem Gasdurchsatz – vor allem vom Durchmesser des Quarzionisators ab (s. Tabelle; der maximale Strahldurchmesser ist geringfügig kleiner). Die gemessenen Strahlströme reichen von einigen Milliampere (beim RIM 4) bis zu 2,5 A (beim RIM 35 mit über 4000 Einzelbohrungen in den drei Beschleunigungselektroden).

Die Strahlspannung läßt sich durch entsprechende Einstellung der positiven Hochspannung über mehr als eine Zehnerpotenz variieren. Die Realisierung besonders niedriger oder sehr hoher Ionenenergien erfordert aber eine spezielle Modifikation des Beschleunigungssystems. Die bisher erzielten Strahlspannungen reichen von 25 V (beim RIM 10 mit Glühdraht-Strahlneutralisator) bis über 30 kV (bei den großen RIG-Injektoren).

Zum Autor:

Prof. Dr. Horst Löb, Jahrgang 1932, leitet seit 1970 die Abteilung für Plasma-physik am I. Physikalischen Institut der Universität Gießen. Nach dem Physikstudium in Gießen, das er 1957 mit dem Diplom abschloß, wurde er 1960 promoviert und habilitierte sich 1967. Seit zwölf Jahren ist er Mitglied des Vorstandsrats der „Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt“ und seit 16 Jahren Vorsitzender des Kuratoriums der astronautischen „Hermann-Oberth-Gesellschaft“. Unter seinen rund 150 Publikationen sind auch zwei Monographien über Raketentechnik.

