Anwendung der FIB für Materialwissenschaft und Fehleranalyse

Using FIB for Materials Science and Failure Analysis

Urs Sennhauser, Peter Jacob, Philippe Gasser

Korrespondenzanschrift/Correspondence address:

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf

E-mail: urs.sennhauser@empa.ch

Eingegangen: 30. September 2003

Angenommen: 30. September 2003

Received: September 30, 2003

Accepted: September 30, 2003

Translation: J. Fritsche

Kurzfassung

In der Entwicklung, Fertigung und Fehleranalyse von Mikroelektronik wurde die Focused Ion Beam (FIB) Technologie in den letzten Jahren zu einem unerlässlichen Werkzeug. Da mit dem Ionenstrahl je nach der Verwendung von Reaktionsgasen leitende oder isolierende Strukturen von etwa 20 nm bis 100 nm effizient hergestellt, modifiziert oder abgetragen werden können, eröffnen FIBs neue Möglichkeiten in der Materialwissenschaft, insbesondere auch die in der Mikro- und Nanotechnik unerlässliche Zielpräparation von TEM-Lamellen. Dabei können auch Proben mit Phasen extrem unterschiedlicher Härte ohne Verschmierung oder Erzeugung von Artefakten präpariert werden, wobei die Amorphisierung einiger Atomlagen durch den Ionenstrahl beachtet werden muss. Mit der Kombination einer Elektronen- und Ionensäule in einem modernen Dual-Beam-FIB werden eventuelle Störungen minimiert. Nach einer Beschreibung der speziellen Eigenschaften des Ionenstrahls und des FIB-Aufbaus berichten wir über eine Auswahl von Anwendungen in der Material- und Biowissenschaft sowie der Mikro- und Nanoelektronik.

Abstract

The Focused Ion Beam (FIB) technology has become an indispensable tool in the development, manufacture, and failure analysis of microelectronic devices in recent years. Since the ion beam allows to manufacture, modify or etch conducting or insulating structures of about 20 nm to 100 nm in an efficient way, depending on the use of reaction gases, FIB's open up new prospects in materials science and, in particular, the target preparation of TEM lamellae which is indispensable in the micro- and nanotechnologies. In this context, FIB technology also makes it possible to prepare samples with phases of extremely different hardnesses without smearing or producing artifacts, but it has to be noted that the ion beam amorphizes some atomic layers at the surface. A combination of an electron column and an ion column within an advanced dual beam FIB will minimize possible defects. We first provide a description of the specific properties of the ion beam and the FIB set-up and will then report about a range of applications in materials- and bio-science as well as in micro- and nanoelectronics.

Einleitung

FIBs haben sich in den letzten Jahren als wichtiges Werkzeug bei der Entwicklung und Prozesskontrolle von Halbleiterbauelementen etabliert. Zur Behebung von Designfehlern kann auf zeit-

Introduction

FIB's have become very useful as an important tool in the development and process control of semiconductor components in recent years. Time-consuming iterative photolithographic

raubende, iterative, photolithographische Verfahren verzichtet werden und in der Fehleranalyse erlaubt eine gezielte Separierung und Kontaktierung von Schaltungsteilen die Fehlerortung zum Beispiel mittels Spannungs- und örtlicher Depassivierung [1]. Innerhalb von wenigen Stunden können Leiterbahnen durchtrennt und durch Metallabscheidung neu verlegt, Passivierungen und Isolationsschichten entfernt und wieder aufgebracht werden. Diese gegensätzlichen Prozesse werden durch unterschiedliche Reaktionsgase, welche über die Oberfläche der Proben geführt und durch den gerasterten Ionenstrahl auf wenige Nanometer lokalisiert aktiviert werden, ausgelöst [2]. Die selektive Bearbeitung von Strukturen im Bereich von etwa 20 nm bis 100 nm eignet sich besonders gut für die Probenpräparation von TEM-Lamellen [3,4], wobei die Amorphisierung und Dotierung einer oberflächenschicht von einigen Nanometern Dicke durch die Gallium-Ionen des FIBs berücksichtigt werden muss. Die Beobachtung der Sekundärelektronen und Ionen im FIB erlaubt die topographische Abbildung der Proben, wobei Kontraste wegen Channeling Effekten bei polykristallinen Materialien besonders ausgeprägt sind [5]. Die Verfügbarkeit von sogenannten Dual-Beam-FIBs, welche im selben Gerät neben einer Gallium-Ionen- auch eine Elektronensäule enthalten, erleichtert die Genauigkeit der Zielpräparation bei TEM-Lamellen und Nanostrukturen entscheidend und eröffnet neue Anwendungsfelder in der Materialforschung. Im Kapitel 4 wird eine Auswahl dargestellt.

Eigenschaften von Ionensonden

Da die Ionen einige zehntausend mal schwerer sind als Elektronen, sind bei gleicher Energie die Wirkungsquerschnitte für die Wechselwirkung mit dem Probenmaterial und den Reaktionsgasen stark verschieden (Bild 1). Die Reichweite der Ionen in den Materialproben ist auf wenige Nanometer beschränkt. Durch diese stark lokalisierte Abbremsung entstehen Schäden in den Kristallgittern, was zu einer Amorphisierung und zur Kontamination mit Ga-Ionen führt. Jede Abbildung der Probe mit Ionen ist deshalb mit einer Veränderung der obersten Atomlagen verbun-

den. Diese Eigenschaft eröffnet aber auch die Möglichkeit, bei erhöhtem Strahlstrom und mit der Unterstützung von Reaktionsgasen, Material effizient auf- oder abzutragen. Durch die Kombination eines Ionen- und eines Elektronenstrahls in einem Dual-Beam-FIB können die anwendungsspezifischen Vorteile optimal genutzt werden.

methods can be avoided when correcting design errors and a purposive separation and re-connection of circuit elements allows to localize faults, e.g. by means of voltage contrast or local depassivation in failure analyses [1]. It is within a few hours that conductor lines can be cut and re-installed by metal deposition and passivation and dielectric layers can be removed and re-applied. These contrary processes are initiated by different reaction gases which are passed over the surfaces of the samples and are activated by the scanning ion beam which is localized to a few nanometers [2]. Selective processing of structures within a range of about 20 nm to 100 nm is particularly useful for preparing samples of TEM lamellae [3, 4]; it is to be noted, however, that the gallium ions of the FIB will amorphize and contaminate a surface layer of some nanometers in thickness. An observation of the secondary electrons and ions in the FIB allows to image the samples topographically with contrasts being particularly pronounced because of channeling effects in polycrystalline materials [5]. Since so-called dual-beam FIB's are available which also contain an electron column, in addition to a gallium ion column, in the same apparatus it becomes significantly easier to prepare TEM lamellae and samples of nanostructures more accurately and at a well defined location which is opening up new fields of application in materials research. Para 4 gives a selection thereof.

Properties of Ion Probes

Since ions are some ten thousand times heavier than are electrons the effective cross-sections at a given energy are very different for an interaction with the sample material and the reaction gases (Fig. 1). The range of the ions in the material samples is limited to a few nanometers. This very localized stopping strongly damages the crystal lattices, which causes amorphization and contamination with Ga ions. This is why each imaging of the sample using ions involves a modification to the surface atomic layers. However, this property also provides the possibility of de-

Bild 1. Wechselwirkung des FIB-Gallium-Ionenstrahls mit der Probe

Fig. 1. Interaction of the FIB gallium ion beam with the sample

Bild 2. FIB-Aufbau, FEI Strata 235

Fig. 2. FIB set-up, FEI Strata 235

FIB-Aufbau

Ein FIB ist im Prinzip wie ein Rasterelektronenmikroskop aufgebaut (Bild 2). Der fokussierte Ionenstrahl wird über die Probe gerastert und die Emissionsrate der Sekundärelektronen oder der Ionen detektiert. Wegen des tiefen Schmelzpunktes und der Bildung einer Taylor Spitze wird in der Ionenquelle vorzugsweise Gallium verwendet. Die Ionen werden über eine Spannung von 30 bis 50 kV beschleunigt, kollimiert und fokussiert (Bild 3). Bei starker Kollimierung und einem Strahlstrom von einigen Picoampere, wie für die Bildgebung und Feinbearbeitung verwendet, wird eine Ortsauflösung von etwa 10 nm erreicht. Als Detektion der Ionen sowie der Rückstreu- und Sekundärelektronen kommen ver-

FIB Set-Up

Generally, an FIB operates like a scanning electron microscope (Fig. 2). The focused ion beam scans over the sample and the emission rate of the emitted secondary electrons or ions is detected. The ion source preferably uses gallium because of the low melting point and the formation of a Taylor tip. Ions are accelerated via a voltage of 30 to 50 kV, are collimated and focused (Fig. 3). When collimation is strong and there is a beam current of some picoamperes as is employed for imaging and precise processing the spatial resolution achieved is about 10 nm. Various detectors are in use for a detection of the ions as well as backscattered and secondary electrons. The beam current can be increased to

Bild 3. Ionen Säule mit Ga-Quelle, Taylor-Spitze

Fig. 3. Ion column with a Ga source and Taylor tip

schiedene Detektortypen zum Einsatz. Zur schnellen Materialabtragung und Abscheidung im mm-Bereich kann der Strahlstrom auf 20-30 nA erhöht werden. Je nach Probenmaterial wird dies durch Reaktionsgase unterstützt, welche mit Nadeln auf minimal etwa 100-200 µm Abstand zur Probenoberfläche geführt und durch diese über der Probe eingeleitet werden (Bild 4). Bei Proben mit starken Topografien, die solche Abstände nicht zulassen, kann auch mit einem Abstand bis zu maximal 5 mm gearbeitet werden; die Wirkung des jeweiligen Gases wird dann allerdings entsprechend reduziert. Übliche Gase sind dabei Jod- oder Chlorverbindungen zum Metallätzen, Fluorverbindungen zum Ätzen von Dielektrika und Wasserdampf für selektives Kohlenstoffätzen, sowie Platin- und Wolframverbindungen zur Metallabscheidung und Siloxan mit Wasserdampf zur Abscheidung von Dielektrika. Ein optisches Mikroskop oder eine Videokamera erleichtert die Vor-Positionierung der Probe, welche auf einem fünfachsig verschiebbaren Tisch (x,y,z,Kippwinkel, Rotation) montiert ist. Zum ef-

Bild 4. Darstellung eines Dual-Beam-FIBs mit Ionensäule (grün), der Elektronensäule (rot), Gasnadeln (gelb) und einem Sekundär-Elektronendetektor (grau)

Fig. 4. Representation of a Dual Beam FIB with an ion column (green), the electron column (red), gas syringes (yellow), and a secondary electron detector (grey)

20 – 30 nA to speed up material etching and deposition within the µm range. These processes are supported by reaction gases selected in dependence of the sample material. Using syringes, the gases are guided to the sample to a distance of about 100 – 200 µm and then blown along its surface (Fig. 4). If there are samples with topographies with restricted access it is possible to pull back the syringe to a maximum distance of about 5 mm; however, the action of the respective gas will then be reduced accordingly. Common gases used here are iodine and chlorine compounds for etching metals, fluorine compounds for etching dielectrics, and water vapour for selectively etching carbon as well as platinum and tungsten compounds for metal deposition and siloxane with water vapour for depositing dielectrics. An optical microscope or video camera makes it easier to pre-position the sample which is mounted on a table movable along five axes (x, y, z, tilting angle, rotation). For efficient work, software packages are available for specific applications, as e.g. the automatic rough shaping of

I-Beam	pA	Mag	Det	FWD	Scan	HFV	
30.0 kV	34.0	10.0 kX	CDM-E	16.5	H 11.77 s	30.4 µm	5 µm

Bild 5. Stahlprobe, FIB-Bild mit CDM-E-Detektor, TiN beschichtet, Korngrenzen aufgrund von Channeling und Z-Kontrast sind überlagert. Die TEM-Lamelle weist in diesem Stadium eine Dicke von ca. 500 nm auf, und ist noch nicht freigeschnitten

Fig. 5. Steel sample, FIB image with a CDM-E detector, TiN coated, with grain boundaries overlapping each other because of channeling and Z contrast. The TEM lamella is of a thickness of about 500 nm at this stage and was not cut free yet

fizienten Arbeiten steht eine Auswahl an Softwarepaketen für spezielle Anwendungen zur Verfügung. Beispiele sind etwa das automatische Grobformen von TEM-Lamellen, die Abfolge vorprogrammierter Arbeitsschritte oder -pattern und die Chipnavigation zur Orientierung auf Mikrochips bei Designkorrekturen.

Anwendungen

Das FIB hat ein breites Anwendungsspektrum in Mikrostruktur- und Partikelanalyse, Herstellung und Anpassung von Mikrostrukturen (MEMS) sowie in der Mikroelektronik für Fehleranalyse und Chip-Modifikation. Besonders effizient ist zudem die Herstellung von Proben für das Transmissionselektronenmikroskop (TEM-Lamellen). Mit den immer kleineren funktionalen Strukturen ist oft eine Zielpräparation von weniger als 100 nm erforderlich, wobei im Präparationsprozess

Bild 6. Korngrenzen im FIB. Querschnitt durch eine Transponder-Spule

Fig. 6. Grain boundaries in a FIB; cross-section through a transponder coil

TEM lamellae, the sequencing of pre-programmed processing steps or patterning, and chip navigation for exact localization on microchips for design corrections.

Applications

The FIB has a wide range of application in the microstructure and particle analyses, manufacture and adaptation of microstructures (MEMS), and microelectronics for failure analyses and chip modification. Moreover, it is particularly efficient for the manufacture of samples for transmission electron microscopy (TEM lamellae). Since the functional structures become smaller and smaller it is often necessary to achieve positioning accuracies of less than 100 nm in target prepara-

Bild 7. Zement, SEM-Bild mit CDM-E-Detektor, Z-Kontraste. Pt-Abdeckung am oberen Lamellenrand. Die Lamelle ist bereits freigeschnitten und muss noch fertig gedünnt werden.

Fig. 7. Cement, SEM image with a CDM-E detector, Z contrasts. Pt cover at the upper lamella edge. The lamella was cut free already and still needs to be thinned.

keine Artefakte entstehen dürfen. Im FIB können zudem auch Schichtverbunde mit extrem unterschiedlichen Härtegraden sauber geschnitten werden. Demgegenüber muss bei der Analyse der Proben die schon oben erwähnte Amorphisierung und Verunreinigung mit Gallium-Ionen einiger Atomlagen beachtet werden. Wir zeigen hier einige Beispiele für FIB-Anwendungen.

In der Mikrostrukturanalyse erhält man in der Regel erhöhte Kontraste wegen des Ion-Channeling in polykristallinen Materialien: Die Ionen dringen in Abhängigkeit der Ausrichtung der Gitterebenen unterschiedlich tief ein und erzeugen dementsprechend mehr oder weniger Sekundärelektronen bzw. -ionen[5]. Bild 5 zeigt ein Ionenbild einer vorpräparierten TEM-Lamellen, wobei die homogene Schicht oben auf der Lamelle Platin, welches jeweils zum Schutz der darunterliegenden Schichten gegen Kantenverrundung aufgebracht wird, darstellt. Die Korngrenzen einer topographisch flachen, mit TiN beschichteten Stahlprobe sind gut sichtbar. In Materialien mit lokal unterschiedlichen Elementanteilen wie z.B. einer Transponderspule dient

Bild 8. Mikroindentation einer ZrCuNiAlTi-Beschichtung. Die Indentation ist durch eine Pt-Schicht abgedeckt und geschützt.

Fig. 8. Microindentation in a ZrCuNiAlTi coating. The indentation is hidden and protected by a Pt layer.

tion, without producing artifacts from the preparation process. Furthermore, the FIB allows to cleanly cut layered composite structures with extremely different hardness. In contrast, when samples are analyzed it is necessary to note the amorphization and contamination of a few atomic layers by gallium ions as already mentioned earlier. We will show some examples of FIB applications in the following.

As a rule, enhanced contrasts are obtained in microstructure analyses because of the ion channeling in polycrystalline materials: The ions penetrate into different depths in dependence on the orientation of lattice planes and, accordingly, produce more or less secondary electrons and ions [5]. Fig. 5 shows an ion image of a pre-prepared TEM lamella where the homogeneous layer on top of the lamella consists of platinum which is usually applied to protect the underlying layers against rounding effects on their edges. The grain boundaries of a steel sample which is flat topographically and is coated with TiN can be identified well. In the case of materials in which the elemental composition varies locally, it is not only channeling, but also the Z contrast of the

Bild 9. Luftschadstoffpartikel auf Polycarbonatfilter. Pt-Abdeckung über dem Partikel zum Schutz und der Fixierung. Das Partikel könnte unbearbeitet nicht im TEM durchstrahlt werden. Durch die FIB Präparation können Morphologie und Analytik aufgeschlossen werden.

Fig. 9. An air polluting particle on a polycarbonate filter. Pt cover above the particle for protection and fixing it. The particle, when not processed, could not be investigated in the TEM. The FIB preparation allows to reveal morphology and composition.

neben Channeling auch der Z-Kontrast der Rückstreuungselektronen der Unterscheidung der verschiedenen Phasen (Bild 6). Letzterer ist auch mit der Elektronenprobe sichtbar, was in Bild 7 für eine Zementprobe gezeigt ist. Mit Zielpreparation einer TEM-Lamelle konnte gezeigt werden, dass mit Mikroindentation einer ZrCuNiAlTi-Beschichtung (Bild 8) keine nanokristalline Phase entsteht, dies im Gegensatz zu Vermutungen in der Literatur [6].

Die Partikelanalyse mit FIB eröffnet völlig neue Möglichkeiten, da Phasen stark unterschiedlicher Härte bei der Probenpräparation nicht zerstört werden. Bild 9 zeigt den FIB-Schnitt eines Aerosol-Partikels angelagert auf ein Filter und Bild 10 zeigt einen FIB-Mikroschnitt eines Aerosol-Partikels in einer Aluminiummatrix. Besondere Möglichkeiten ergeben sich mit biologischen Materialien, indem z.B. durch einen FIB-

Bild 10. Diamant eingebettet in AgInCuTi-Legierung. Der Diamant ist in der linken Bildhälfte sichtbar. Das TEM-Präparat kann wegen der unterschiedlichen Härten von Diamant und Aluminium nicht konventionell präpariert werden.

Fig. 10. Diamond as embedded in an AgInCuTi alloy. The diamond can be seen in the left-hand side of the image. The TEM preparation cannot be made conventionally because of the different hardnesses of diamond and aluminium.

backscattered electrons which serves for discriminating the different phases, e.g. in a transponder coil (Fig. 6). The Z-contrast can also be made visible by the electron probe, which is shown for a cement sample in Fig. 7. A target preparation of a TEM lamella successfully showed that a nanocrystalline phase is not formed by a micro-indentation of a ZrCuNiAlTi coating (Fig. 8), which is contrary to assumptions made in the reference literature [6].

Particle analyses using FIB provide completely new opportunities as it does not destroy phases of very different hardness during sample preparation. Fig. 9 shows the FIB microsection of an aerosol particle as attached to a filter and Fig. 10 shows a diamond particle in an aluminium matrix. New insights result from biological materials, e.g. by making an FIB microsection to visualize the

Bild 11. Blaualge (Synechococcus) mit CaCO_3 -Kristallen. Erste Abdeckung aus Pt mit E-Beam aufgebracht (dunkle Phase)

Fig. 11. Blue-green alga (Synechococcus) with CaCO_3 crystals. First cover of Pt applied by electron beam (dark phase)

Schnitt die Anlagerung von CaCO_3 -Kristallen an die Innenseite der Zellwand eines Einzellers sichtbar gemacht werden kann (Bild 11).

Mit dem FIB gibt es viele Möglichkeiten, Mikrostrukturen wie MEMS, NEMS, MOEMS etc. zu modifizieren oder Herstellungsprozesse zu unterstützen. Als Beispiele sind die Öffnung einer AFM-Spitze zur Dispersion von Flüssigkeiten (Bild 12) und einer optischen Antenne (Bild 13) gezeigt.

FIBs werden schon seit mehreren Jahren in der Elektronikindustrie bei der Entwicklung und Qualitätssicherung von ICs eingesetzt. Bei der mitunter iterativen Modifizierung fehlerhafter Prototypen wird der früher mehrfache zeit- und kostenintensive Umweg über Photolithographie vermieden. Ein Beispiel über den Ablauf einer Chip-Modifikation ist in Bild 14 gezeigt. FIBs sind in der Fehleranalyse von Mikroelektronik nicht mehr wegzudenken. So kann zum Beispiel mittels gezielter, ortsgenauer Schnitte präzise sichtbar gemacht werden, ob ein Ausfall auf einen Waferprozess (Bilder 15 und 16), auf die Weiterverarbeitung im Packaging oder einen Anwendungsfehler zurückzuführen ist. Nachdem die

Bild 12. Modifizierte AFM Spitze, die Spitze ist durchbohrt, die Au Beschichtung teilweise entfernt

Fig. 12. Modified AFM tip with the tip perforated and the Au coating partially removed

deposition of CaCO_3 crystals to the inside of a cell wall of a protist (Fig. 11).

The FIB provides efficient means of modifying microstructures, e.g. MEMS, NEMS, MOEMS, etc. or supporting manufacturing processes. The examples shown are the opening of an AFM tip to disperse liquids (Fig. 12) and an optical antenna (Fig. 13).

FIB's have been in use for several years for the development and quality assurance of IC's in the electronics industry. For a modification of faulty prototypes, which is iterative sometimes, this avoids taking the roundabout way via photolithography, which formerly was repeatedly necessary, was time-consuming, and involved a lot of cost. An example of the sequence of a chip modification is shown in Fig. 14. Today FIB's are indispensable in failure analyses of microelectronic devices. Thus, for example, well-defined locally accurate microsections help in precisely visualizing whether a failure is due to a wafer process (Figs 15 and 16), to packaging or to an application error. Now that the gate length for

Bild 13. Antennenstruktur aus Au auf ITO beschichtetem Glas. Die Länge des Dipols ist ca. 350 nm

Fig. 13. Antenna structure of Au on ITO coated glass. The dipole is about 350 nm in length

Gate-Länge für CMOS FETs 100 nm in vielen Fällen schon unterschreitet, finden bei entsprechender Zielpräparation ganze Transistoren in TEM-Lamellen Platz (Bild 17), wodurch die Ausfallmechanismen ohne die vorherige Kenntnis des genauen Ortes innerhalb etwa eines Gates untersucht werden können. Dieses Thema ist besonders aktuell, da Gate-Oxide mit wenigen Nanometern Dicke bereits Eingang in erste Serienfertigungen finden und neue, teils zuverlässigkeitsrelevante Ausfallmechanismen, wie etwa der sogenannte Soft-Break-Down, auftreten, welche mit klassischen Modellen noch nicht hinreichend erklärt werden können.

Schlussfolgerungen

Das FIB hat sich zum unerlässlichen Werkzeug in der Materialwissenschaft und der Fehleranalyse in Mikro- und Nanostrukturen entwickelt. Der fokussierte Ionenstrahl erschließt neue Möglichkeiten in der Mikro- und Nanotechnik, indem entsprechende Strukturen hergestellt, modifiziert und charakterisiert werden können. FIBs haben sich neben der Entwicklung und Fehleranalyse in der Mikroelektronik auch in der Probenpräpara-

Bild 14. Chip Modifikation, zwei vorbereitete Schnitte, zwei neue Verbindungen

Fig. 14. Chip modification, two sections prepared and two new connections deposited

CMOS FET's is less than 100 nm already in many cases complete transistors can be accommodated in TEM lamellae provided that target preparation is adequately made (Fig. 17). This allows to study the failure mechanisms without previously knowing the exact location, e.g. within a gate. This topic is particularly actual since gate oxides of a few nanometers in thickness have found their way into first series productions already and new failure mechanisms occur which are relevant for their reliability, e.g. the so-called Soft-Break-Down, which cannot be explained yet sufficiently well by classical models.

Conclusions

The FIB has grown into an indispensable tool in material science and failure analyses of micro- and nanostructures. The ion beam, when focused, opens up new opportunities in the micro and nanotechnologies as appropriate structures can be prepared, modified, and characterized. FIB's, apart from being used in development and in analyzing failures in microelectronics, also become established in sample preparation, specifically for

Bild 15. Latente Defekte in Al Schicht. Abdeckung aus Au und Pt

Fig. 15. Latent defects in an Al layer. The cover is made of Au and Pt

Bild 16. Gate-Oxid-Durchbruch

Fig. 16. Gate oxide breakdown

Bild 17. TEM-Probenpräparation mit FIB

Fig. 17. TEM sample preparation with FIB

tion speziell für TEM-Lamellen etabliert, da sie im Gegensatz zu anderen Methoden und vor allem mit kombiniertem Ionen- und Elektronenstrahl im selben Gerät (dual beam) eine hochgenaue und lokalisierte Zielpräparation ermöglichen. In vielen Fällen ist diese Probenpräparation sogar quasi-zerstörungsfrei, d.h. die Probe wird dabei im Gegensatz etwa zu chemischen und/oder metallografischen Methoden makroskopisch nicht zerstört. Die Amorphisierung und Kontamination einiger Atomlagen muss aber beachtet werden und bedarf noch einiger Verfahrensentwicklung. Da auch Materialien mit sehr unterschiedlicher

TEM lamellae because they enable a highly precise and localized target preparation, which is in contrast to other methods and, above all, they use a combined ion and electron beam (dual beam) in the same apparatus. Such sample preparation is quasi-nondestructive in many cases, i.e. the sample is not destroyed macroscopically unlike in chemical and/or metallographic methods. However, account should be taken of an amorphization and contamination of some atomic layers still requiring process development. Since the FIB's also allow to cut and investigate materials of very different hardness-

Härte untersucht werden können, sind FIBs neben den Mikro-, Nano- und Material- auch in den Biowissenschaften vielversprechende neue Werkzeuge.

Danksagung

Die Autoren danken H.R. Elsener, L. Holzer, R. Kägi, J. Michler, J. Reiner (EMPA), D. Mavrokordatos (EAWAG) und P. Muehlschlegel (Physikinstitut der Uni Basel) für die Erlaubnis, Bilder ihrer an der EMPA bearbeiteten Proben zu verwenden. Unser Dank geht auch an FEI für die Erlaubnis, die Bilder 3 und 4 zu verwenden.

es they are very promising new tools not only in the micro, nano, and material sciences, but also the bio-sciences.

Acknowledgement

The authors are grateful to H.R. Elsener, L. Holzer, R. Kägi, J. Michler, J. Reiner (EMPA), D. Mavrokordatos (EAWAG), and P. Muehlschlegel (Institute of Physics of the University of Basle) who allowed them to use pictures of their samples processed at the EMPA. We also convey our gratefulness to FEI for their permission to use Figs. 3 and 4.

Literatur/References

- [1] Jacob, J.P.; Doering, E.: FIB-voltage-contrast-localisation and analysis of contact-via-chains, SPIE 3743(1999)273-279
- [2] Lipp, S.: Untersuchungen von Ätz- und Abscheideprozessen im fokussierten Ionenstrahl, Erlanger Berichte Mikroelektronik Vol. 98/1(1998), ISBN 3-8265-3991-5
- [3] Engelmann, H.J.; Saage, H.; Zschech, C.: Application of analytical TEM for failure analysis of semiconductor device structures, Microelectronics Reliability 40 (2000)1747-1751
- [4] Gasser, Ph.; Klotz, U.E.; Khalid, F.A.; Beffort, O.: Site specific specimen preparation by focused ion beam (FIB) milling for transmission electron microscopy (TEM) of metal matrix composites, Microscopy and Microanalysis (accepted for publication 2003)
- [5] Jacob, J.P.; Grossmann, G.; Schertel, A.; Thiemann, U.: Wire-ball-bonding process evaluation by using focused ion beam bondball characterization, SPIE 4406(2001)62-70
- [6] Kim JJ, Y. Choi, S. Suresh, Nanocrystallization during nanoindentation of a bulk amorphous metal alloy at room temperature, Science 295(2002) 654-657