

CONTACT ELECTRIFICATION OF SOLIDS

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Bernhard Andreas Kwetkus
Dipl.-Ing. (TH), University of Karlsruhe/Germany
born May 20, 1964
German citizen

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H.C. Siegmann, examiner

Prof. Dr. K. Sattler, co - examiner

1992



CatE

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt als Thema die Kontaktaufladung von Festkörpern. Grundlegende wie auch angewandte Aspekte werden diskutiert. Ein neu entwickelter Versuchsstand wurde installiert. Mit diesem wurden Kontaktaufladungskurven gemessen, d.h. die elektrische Ladung auf einem Festkörper aufgrund wiederholtem Kontaktes mit einem anderen Material. Diese Experimente waren gut reproduzierbar und demonstrierten klar den entscheidenden Einfluss der Oberflächeneigenschaften auf das Kontaktaufladungsverhalten. Methoden der Oberflächenphysik, wie z.B. Rastertunnelmikroskopie und -spektroskopie (STM/STS), Röntgen- und UV-Photoelektronenspektroskopie (XPS/UPS) halfen bei der genauen Charakterisierung der Oberflächen.

Oxydierte Metallpulver zeigten eine sofortige Ladungssättigung. Der Grund hierfür ist das schnelle Erreichen eines Gleichgewichtszustands, d.h. Angleichen der metallischen Fermi-Energieniveaus und Verteilung der elektrischen Ladungen auf der Partikeloberfläche. Das Vorzeichen und die Höhe der Aufladung hing in diesem Fall linear von der Differenz der Elektronenaustrittsarbeiten ab. Die Oberflächen der Metallpulver wurden mit STM/STS und XPS genau studiert. Alle Metallpulver ausser Silber waren von einer dicken Oxidschicht bedeckt. Die oxidierten Pulver zeigten dementsprechend Gleichrichterverhalten in der Strom-Spannungskurve der Tunnelspektroskopie. Bei Silber trat eine lineare Strom-Spannungsscharakteristik auf. Das Tunneln von Elektronen durch die Oxidschicht oder in Oberflächenzustände kann zur Beschreibung des Ladungstransfers bei der Kontaktaufladung dienen.

Die Kontaktaufladung von Isolatoren zeigte sich grundlegend verschieden von der oxidierten Metalle. Akkumulation von elektrischen Ladungen bei wiederholten Kontakten mit einer Metallplatte wurde beobachtet. Die Ladungsdichten auf Epoxidharz erreichten die Grenze für Elektronenemission in das Vakuum. Diese Aussage konnte anhand der Kontaktaufladungskurven gewonnen werden und wurde durch optische Detektion der Entladungen bestätigt. Eine detaillierte Untersuchung zeigte, dass die Kontaktaufladung von Isolatoren bei höheren Gasdrücken von Gasentladungen bei der Separation der Kontaktpartner limitiert wird. Dies konnte wiederum anhand der Kontakt-

aufladungskurven gezeigt werden. Die maximale Oberflächenladungsdichte der Materialien folgt der Paschen-Regel unter diesen Bedingungen. Zusätzlich wurden Photographien der Entladungen gemacht. Die experimentellen Resultate werden mit verschiedenen Theorien verglichen. Diese betrachten Tunneln von Elektronen entweder in innere Elektronenzustände oder Oberflächenzustände als Mechanismus des Ladungstransfers.

Abschliessend wurde die Kontaktaufladung von Kohle und Mineralien untersucht, zwei Materialklassen von technischer Bedeutung. Der Einfluss verschiedener Parameter, wie z.B. Gasdruck, Temperatur und relative Luftfeuchte auf die Kontaktaufladung wurde studiert. Die chemischen und elektronischen Oberflächeneigenschaften von Kohle- und Pyritproben wurden mit XPS und UPS bestimmt. Die elektrische Leitfähigkeit zeigte sich als wichtigster Parameter für die Kontaktaufladung dieser Materialien. Anhand von Kalzit-Proben konnte erkannt werden, dass chemische Veränderungen der Oberfläche während der Kontaktaufladung nachhaltig das Aufladungsverhalten beeinflussen.

Abstract

This work presents an investigation of the contact electrification of solids. Fundamental as well as applied aspects are addressed. A newly developed experimental set-up was assembled. It is capable of determining contact electrification curves, i.e. the electrical charge transferred to a solid upon repeated contact and separation with a dissimilar material. The electrification curves were well reproducible. The experiments clearly demonstrate the decisive influence of the surface properties on the contact charging behavior. Highly sophisticated analysis tools, such as Scanning Tunneling Microscopy (STM), Scanning Tunneling Spectroscopy (STS), X-ray and Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy (XPS/UPS), have been used to characterize the surfaces.

Oxidized metal powders showed an instant charge saturation. This is due to a fast adjustment of the metal Fermi-levels and rapid distribution of the electrical charges on the powder surface. The polarity and magnitude of the contact charge in this case depends linearly on the surface work function of the materials. The surfaces of the metal powders have been studied intensively by means of STM/STS and XPS. All metal powders except silver were found to be covered by a thick oxide layer. The oxidized powders revealed rectifying current-voltage characteristics of the tunnel junction in STS whereas silver showed linear characteristics. Tunneling of electrons through the oxide layer or into surface states of the oxide can describe the contact charge transfer mechanism.

The contact electrification of insulators turned out to be fundamentally different from the one of oxidized metals. An accumulation of the contact charge with repeated contacts against a metal plate was observed. The charge density on an epoxy resin sample reached the limit for electron emission into vacuum. This could be seen from the contact electrification curves and was verified with an optical detection system. A detailed investigation showed that the contact electrification of insulators at higher gas pressures is limited by gas breakdown upon separation of the contact partners. Again, this could be seen directly from the contact electrification curves. The maximum surface charge density on the materials follows Paschen's law under these conditions. Pictures from the gas discharges were also been taken to confirm the experimental findings. The experimental results are compared to different theories which consider electron

VI

tunneling either into bulk- or surface states of the insulator as the charge transfer mechanism.

Finally the contact electrification of coal and minerals, two material species of importance for industrial applications, has been studied. The influence of different parameters, such as gas pressure, temperature and relative air humidity was evaluated. The surface chemical and electronical properties of coal and pyrite samples were examined by XPS and UPS. The electrical conductivity was found to be the most important parameter for the contact electrification of these materials. Calcite powder demonstrated that chemical changes on the surface during contact of the solids can substantially alter the contact electrification behavior.