

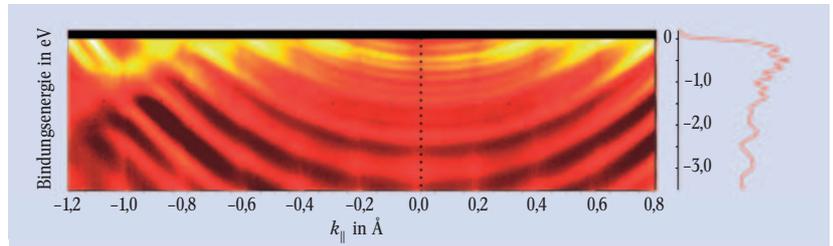
# Landkarten von elektronischen Strukturen

## Quantentopfniveaus in Aluminium-Schichten aus graphitisiertem Siliziumkarbid

Jan Hugo Dil, Th. Kampen, Karsten Horn und Thomas Seyller

Der fortschreitende Trend zur Miniaturisierung in elektronischen Bauteilen führt die Technologie zunehmend in Bereiche, in denen das „Confinement“ von Elektronen in einem Potentialtopf eine wichtige Rolle spielt. Ein dünner Metallfilm kann als solch ein Potentialtopf betrachtet werden. In der Richtung senkrecht zum Film ist das Elektron zwischen dem Vakuum auf der einen und dem Substrat auf der anderen Seite eingefangen. Derartige Filme dienen als Modellsysteme zur Aufklärung einer Vielzahl von festkörperphysikalischen Phänomenen [1]. Mittels Photoelektronen-Spektroskopie kann man die elektronische Struktur (Quantentopfniveaus) genau verfolgen und die zweidimensionale (2D) Bandstruktur als Funktion der Parallelkomponente des Wellenvektors  $k_{\parallel}$  und der Bindungsenergie  $E(k_{\parallel})$  messen. Die Abbildung zeigt die (winkel aufgelöste) Photoemissions-Intensität als Funktion von  $k_{\parallel}$  und  $E(k_{\parallel})$ . Dabei stammen die parabelförmigen Linien von einer epitaktischen Aluminium-Schicht auf einkristallinem Graphit, welches sich auf einer SiC(0001)-Oberfläche in hoher struktureller Qualität erzeugen lässt [2, 3]. Die Messungen wurden mit einer Photonenenergie von 15 eV an der Synchrotronstrahlungsquelle BESSY

Dipl.-Phys. Jan Hugo Dil, Dr. Thorsten Kampen, Prof. Dr. Karsten Horn, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin; Dr. Thomas Seyller, Lehrstuhl für Technische Physik, Universität Erlangen-Nürnberg



Photoemissions-Intensitätsverteilung als Funktion von Bindungsenergie und paralleler Komponente des Wellenvektors (links) sowie projiziertes Valenzbandspektrum (rechts) einer

nominal neun Monolagen dicken Al-Schicht auf einer einkristallinen Graphit-Schicht erzeugt auf SiC(0001).

mit einem Analysator PHOIBOS 100 2D-CCD der Firma SPECS durchgeführt.

Im Zentrum der 2D-Brillouin-Zone von Graphit existieren bis zu einer Bindungsenergie von 4 eV unterhalb der Fermi-Kante  $E_F$  keine Substratbänder, sodass die elektronischen Zustände der Al-Schicht ohne Interferenz mit dem Substrat untersucht werden können. Bisher wurden solche Daten aus Einzelspektren gewonnen, die mit einkanalen Spektrometern aufgenommen wurden. Durch die Nutzung von 2D-Analysatoren wird nun die gesamte Information mit sehr hoher Winkelauflösung innerhalb einer Messung zugänglich, und man kann die elektronische Struktur in einem großen Bereich als „Karten“ vermessen. Der Einsatz von 2D-Elektronen-Spektrometern hat das Feld der Valenzbandphotoemission daher revolutioniert.

Die „Linien“ in der Abbildung resultieren von einzelnen Quantentopf-Zuständen; die Al-Schicht liegt als Inseln unterschiedlicher Schichtdicke vor, sodass eine Mischung unterschiedlicher Niveaus beobachtet wird. Aufgrund der relativ großen lateralen Ausdehnung der Inseln und ihres Ursprungs aus einem einfachen s-p-Band des Al zeigen die Zustände das Verhalten fast freier Elektronen parallel zur Schicht, d. h. eine parabelförmige Dispersion mit einer effektiven Masse nahe der des freien Elektrons. Bei höheren Werten von  $k_{\parallel}$  interferieren die Zustände mit einem Dispersionszweig, der von niedrigeren Bindungsenergien abwärts verläuft.

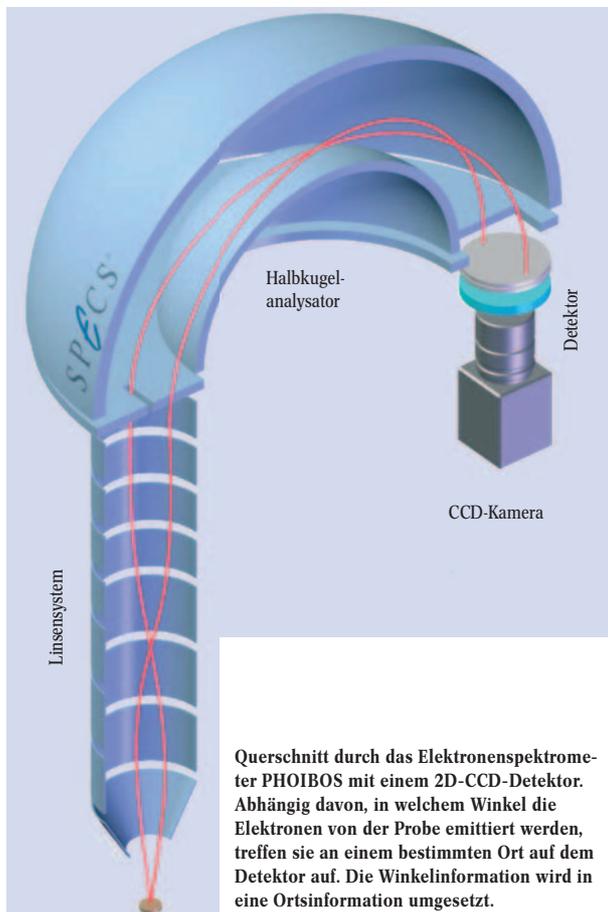
Aus derartigen Karten lassen sich natürlich auch die üblichen Valenzbandspektren herausprojizieren (rechte Seite der Abbildung). Hier zeigt sich noch klarer, dass die einzelnen Linien aufgrund der Mischung von Zuständen aus unterschiedlich hohen Inseln irregulär verteilt sind. Allerdings sind sie klar voneinander getrennt, was auf eine Bevorzugung von ganz spezifischen Inselhöhen hindeutet. Dieses Phänomen ist schon mehrfach beobachtet worden und beruht auf der Tatsache, dass aufgrund der Energie-Minimierung bevorzugt diejenigen Schichtdicken entstehen, in welchen der oberste Quantentopfzustand am weitesten von der Fermi-Energie

entfernt ist („electronic growth“) [4]. Andere wichtige Aspekte der Untersuchung von Quantentopf-Niveaus sind die absolute Bestimmung von Bandstrukturen, die Charakterisierung der Elektron-Phonon-Kopplung, der Mechanismus der Kopplung in magnetischen Schichtstrukturen und vieles mehr.

- [1] T. C. Chiang, Surf. Sci. Rep. **39**, 181 (2000)
- [2] I. Forbeaux, J.-M. Themlin, J.-M. Debever, Phys. Rev. B **58**, 16396 (1998)
- [3] T. Seyller et al., Surf. Sci., im Druck.
- [4] J. H. Dil et al., Phys. Rev. B **70**, 045405 (2004) und Zitate darin

### Energie- und Richtungsanalyse von Elektronen zur Bestimmung der Bandstrukturen

Ein Elektronenspektrometer besteht in der Regel aus einem Linsensystem, Analysator und Detektor. Die Elektronen werden vom Linsensystem auf die Durchlassenergie (pass energy) des Analysators abgebremst bzw. beschleunigt. Ferner definiert das Linsensystem den Akzeptanzwinkel des Spektrometers. Eine Festkörperoberfläche



Querschnitt durch das Elektronenspektrometer PHOIBOS mit einem 2D-CCD-Detektor. Abhängig davon, in welchem Winkel die Elektronen von der Probe emittiert werden, treffen sie an einem bestimmten Ort auf dem Detektor auf. Die Winkelinformation wird in eine Ortsinformation umgesetzt.



Elektronenspektrometer PHOIBOS 100/150 (SPECS, Berlin)

wird mit Ultraviolett- oder Röntgen-Photonen bekannter Energie und Polarisation bestrahlt. Das Elektronenspektrometer erlaubt es, von den dabei austretenden Photoelektronen die Austrittsrichtung und die kinetische Energie zu messen.

Die elektronische Struktur von Oberflächen untersucht man mit der winkelaufgelösten Ultraviolett-Photoelektronenspektroskopie (ARUPS). Aus der Richtung, genauer dem Winkel der emittierten Elektronen zur Oberfläche, ergibt sich der Impulsbetrag des Zustandes, in dem sich das Elektron vor der Anregung befand. Mit Kenntnis des Winkels und der Photonenenergie lässt sich der Quasiimpuls des Elektrons im Kristall berechnen. Aus der Photonenenergie und der kinetischen Energie des Photoelektrons kann die Bindungsenergie des Ausgangszustandes ermittelt werden. Die Energie-Impuls-Beziehung, die aus den Messergebnissen für die Bindungszustände der Elektronen zusammengesetzt wird, nennt man Bandstruktur der Oberfläche (siehe Abb.).

In modernen Elektronenspektrometern wie dem PHOIBOS-Analysator von SPECS kommt als dispersives Element ein Halbkugelanalysator zum Einsatz und zur ortsauf-

lösenden Detektion werden 2D-Elektronendetektoren verwendet. Diese bestehen aus einer Mikrokanalplatte (*micro channel plate*, MCP) und einem Fluoreszenzschirm. Das Bild des Spektrums auf dem Schirm wird mit einer digitalen CCD-Kamera aufgenommen. Bei der winkelaufgelösten Spektroskopie bildet das Linsensystem die Winkelverteilung der Elektronen auf den Eintrittspalt des Analysators ab. Der Halbkugelanalysator ist in der nicht-dispersiven Richtung ebenfalls abbildend, sodass die Winkelinformation der Elektronenverteilung in dieser Richtung erhalten bleibt. Auf dem Detektor sieht man deshalb ein zweidimensionales Bild der Elektronenverteilung in Abhängigkeit des Winkels und der Energie.

Mit einem solchen Analysator lässt sich ein Winkelsegment von bis zu 30° mit einer Winkelauflösung von ca. 0,4° parallel detektieren. Bei Winkelsegmenten von 14° erreichen Hochleistungs-Analysatoren wie der PHOIBOS sogar eine Winkelauflösung von unter 0,1°. Eine so genaue Bestimmung der Elektronenwinkel erlaubt sehr präzise Aussagen über die Bandstruktur der Probe.

SVEN MÄHL



Moderner 2D-CCD-Detektor für die winkelaufgelöste Spektroskopie (SPECS, Berlin)

Dr. Sven Mähl,  
Specs Berlin

**soliton**  
IMMER EINE WELLENLÄNGE VORAUSS

**ACCESS LASER CO.**  
Durchstimmbare CO<sub>2</sub>-Laser  
von 9,2 - 10,8 μm

Soliton • Laser- und Messtechnik GmbH  
Tel: 08105-7792-0 • Fax: 08105-7792-77  
info@soliton-gmbh.de • www.soliton-gmbh.de

Massenspektrometer

**Gasanalyse im UHV**  
im Bereich ionisierender Strahlung  
+  
UHV Ionenquelle  
+  
Integration in externe Steuerungen  
**= MicrovisionIP**

**mks**

MKS Instruments Deutschland GmbH  
Schatzbogen 43, 81829 München, Tel 089-4200080, Fax 089-424106  
http:// www.mksinst.com, e-mail: mks-germany@mksinst.com