
Kurzzusammenfassung

Auf dem langen Weg zur Etablierung spintronischer Bauelemente steht die Identifikation geeigneter Materialien an erster Stelle. Die Methoden der Oberflächenphysik erlauben die gezielte Herstellung und Charakterisierung nanoskaliger metallischer Strukturen auf wohlgeordneten halbleitenden Substraten. Starke Korrelationen zwischen atomarer und elektronischer Struktur als auch mit dem orbitalen Charakter und dem Spin-Freiheitsgrad der beteiligten Leitungselektronen des Metalls führen zu einer Vielzahl physikalisch interessanter Effekte.

In dieser Arbeit wurden niedrigdimensionale, atomar dünne Bleifilme auf flachen Si(111)- und gestuften Si(557)-Substraten durch Selbstorganisation erzeugt und ihre Strukturen mittels Elektronenbeugung und Rastertunnelmikroskopie untersucht. Die unter Einfluss starker Spin-Bahn-Kopplung stehende elektronische Struktur in den Filmen wurde bei tiefen Temperaturen mittels Leitfähigkeits- und Magnetotransportmessungen, sowie mit Spin- und winkelaufgelöster Photoelektronenspektroskopie evaluiert.

Im Fall der Si(557)-Oberfläche mit 1,31 Monolagen Blei konnte mit diesen Methoden ein neuer hoch korrelierter Quantenzustand der Materie – eine sogenannte Spin-Bahn-Dichtewelle – in einem quasi-eindimensionalen System nachgewiesen und charakterisiert werden. Durch *Fermi-Nesting* der elektronischen Bänder mit maximaler Spin-Aufspaltung öffnet sich unterhalb von 78 K eine unidirektionale Energielücke, während die Bleidrähte in der zweiten Dimension metallisch bleiben. Das einzigartige Zusammenspiel der atomaren Struktur dieses Systems mit seinen elektronischen und Spin-Korrelationen wird durch die starke Spin-Bahn-Kopplung der Bleiatome hervorgerufen. Äußere Störeinflüsse wie die Adsorption zusätzlicher Bleiatome oder Magnetfelder schirmen das Coulomb-Potential ab und schwächen dadurch die langreichweitigen elektronischen Korrelationen und die ausgeprägte antiferromagnetische Spin-Textur der Zustände am Fermi-Niveau bis zum Zusammenbruch des Quantenzustands.

Die atomaren Strukturen von Si(111) mit etwa einer Monolage Blei sind typischerweise zweidimensionaler Natur wie zum Beispiel bei der *Striped Incommensurate*-Phase. Details in der lokalen Adsorptionsgeometrie können die Translations- und Rotationssymmetrie jedoch brechen. So bilden die $(\sqrt{7} \times \sqrt{3})$ -Rekonstruktion und die „Devil’s Staircase“-Phase anisotrope, langreichweitig geordnete, kettenartige Strukturen mit Elementen quasi-eindimensionalen und -zweidimensionalen Charakters in der elektronischen Struktur. *Fermi-Nesting* der Spinpolarisierten Oberflächenzustände der „Devil’s Staircase“-Phase deutet auf ähnliche Korrelationseffekte wie im Pb/Si(557)-System hin, deren eindeutiger Nachweis jedoch noch aussteht. Bei der *Striped Incommensurate*-Phase wird die elektronische Struktur aufgrund der gebrochenen Symmetrie und der damit einhergehenden kurzreichweitigen Ordnung von der lokalen $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$ -Rekonstruktion dominiert. Die Spin-Bahn-Kopplung führt in diesem System nicht nur zu einer starken nichtlinearen Rashba-Aufspaltung der Bänder, sondern auch zu einem Zeeman-artigen Zustand mit zyklodal rotierender Spin-Textur. Transportmessungen am Pb/Si(111)-System bestätigen nicht nur den starken Einfluss von Spin-Bahn-Streuung auf die elektrische Leitfähigkeit, sondern zeigen auch, dass aktivierter Transport in diesen niedrigdimensionalen Metallfilmen eine große Rolle spielt. Zudem werden die oberflächennahen Quantentrogzustände im Silizium-Valenzband durch die Blei-Adsorption modifiziert.

Abstract

On the long track to the establishment of spintronic devices, the identification of suitable materials is the first priority. Surface science methods allow the targeted fabrication and characterization of nanoscale metallic structures on well-ordered semiconducting substrates. Strong correlations between atomic and electronic structure as well as with the orbital character and spin degree of freedom of the involved conduction electrons of the metal lead to a variety of physically interesting effects.

In this work, low-dimensional atomically thin lead films on flat Si(111) and stepped Si(557) substrates were grown by self-assembly and their structures were investigated by electron diffraction and scanning tunneling microscopy. The electronic structure, influenced by strong spin-orbit coupling, of the films was evaluated at low temperatures using conductivity and magnetotransport measurements, as well as spin- and angle-resolved photoelectron spectroscopy.

In the case of the Si(557) surface with 1,31 monolayers of Pb these methods allowed us to detect and characterize a new highly correlated quantum state of matter – a so-called spin-orbit density wave – in a quasi-one-dimensional system. Fermi-*nesting* of the electronic bands with maximum spin splitting opens a unidirectional energy gap below 78 K, while the lead wires remain metallic in the second dimension. The unique interplay of the atomic structure of this system with its electronic and spin correlations is caused by the strong spin-orbit coupling of the lead atoms. External perturbations such as the adsorption of additional lead atoms or magnetic fields screen the Coulomb potential and thereby weaken the long-range electronic correlations and the pronounced antiferromagnetic spin texture of the states at the Fermi level until the collapse of the quantum state occurs.

The atomic structures of Si(111) around one monolayer Pb coverage are typically of two-dimensional nature, such as in the *Striped Incommensurate* phase. However, details in the local adsorption geometry can break the translational and rotational symmetry. Thus, the $(\sqrt{7} \times \sqrt{3})$ reconstruction and the ‘Devil’s Staircase’ phase form anisotropic, long-range ordered, chain-like structures with elements of quasi-one-dimensional and -two-dimensional character in the electronic structure. Fermi-*nesting* of the spin-polarized surface states of the ‘Devil’s Staircase’ phase suggests similar correlation effects as in the Pb/Si(557) system, but their unequivocal demonstration is still pending. In the *striped incommensurate* phase, the electronic structure is dominated by the local $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$ reconstruction due to broken symmetry and the associated short-range order. In this system, the spin-orbit coupling leads not only to a strong nonlinear Rashba splitting of the bands, but also to a Zeeman-like state with cycloidally rotating spin texture. Transport measurements on the Pb/Si(111) system not only confirm the strong influence of spin-orbit scattering on the electrical conductivity, but also show that activated transport plays a major role in these low-dimensional metal films. In addition, the surface near quantum well states in the silicon valence band are modified by lead adsorption.