

Kapitel 5

Kelvinsondenkraftmikroskopie an *in situ* präparierten Oberflächen

In diesem Kapitel werden lateral aufgelöste Austrittsarbemessungen auf verschiedenen, im UHV präparierten Metall- und Halbleiteroberflächen vorgestellt. Neben grundlegenden Untersuchungen zu materialspezifischen Fragestellungen erlauben diese Messungen, die Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen der Kelvinsondenkraftmikroskopie im UHV zur Bestimmung der lokalen Austrittsarbeit aufzuzeigen.

Die Cantilever- und Probenpräparation im UHV ist im Anhang A beschrieben. Alle Austrittsarbemessungen wurden mit der in Abschnitt 3.4.2.2 beschriebenen Amplitudenmodulations-Detektion durchgeführt, während die Topographieaufnahmen mit der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Frequenzmodulations-Detektion erfolgten. Für die Messungen wurden unbeschichtete Silizium-Cantilevern (PSI) verwendet. Der in den Abbildungen angegebene Absolutwert der Austrittsarbeit der Probe wurde mit der für diese Cantilever in Abschnitt 4.3 bestimmten Austrittsarbeit von $\Phi = 4.7$ eV berechnet. Die laterale Variation der Austrittsarbeit wird als Grauskala ΔCPD angegeben.

5.1 Austrittsarbemvariationen an Stufen von HOPG

Bei Metallen läßt sich die Austrittsarbeit der Probe in einen Volumenteil und einen Oberflächenanteil aufteilen, wobei letzterer von der Orientierung und Terminierung der Oberfläche abhängt. So findet man Variationen in der Austrittsarbeit von bis zu 1 eV auf Oberflächen von Proben des gleichen Materials aber unterschiedlicher Kristallorientierung (z.B. $\Phi(W(111))=4.5$ eV, $\Phi(W(110))=5.3$ eV [62]). Diese Beobachtungen werden in einem klassischem Modell mit dem Smoluchowski-Effekt [156] erklärt, welcher die Abhängigkeit der Austrittsarbeit von der Kristallorientierung durch einen für jede Oberfläche spezifischen elektrischen Dipol beschreibt. Für eine atomar glatte Oberfläche sollte dieser Oberflächendipol einen lateral homogenen Beitrag zur Austrittsarbeit liefern, wohingegen auf gestuften Oberflächen eine laterale Variation der Dipoldichte aufgrund der an der Stufe gestörten Oberflächentopographie erwartet wird [174]. Die Kelvinsondenkraftmikroskopie ermöglicht es nun, laterale Variationen in der Austrittsarbeit mit einer hohen energetischen Auflösung zu untersuchen.

Abb. 5.1(a) zeigt eine AFM-Topographieaufnahme in der Umgebung einer 2-Monolagen-Stufe auf HOPG. In der simultan durchgeführten Messung der Kontaktpotentialdifferenz (Abb. 5.1(b)) erkennt man, daß die Austrittsarbeit an der Stufe gegenüber der atomar glatten Oberfläche um ca. 20 meV reduziert ist. In Übereinstimmung mit den lateral aufgelösten Messungen in dem vorhergehenden Kapitel kann die laterale Auflösung in dem Bild der Kontaktpotentialdifferenz anhand des Querschnitts auf 20 nm abgeschätzt werden. Die laterale Variation der

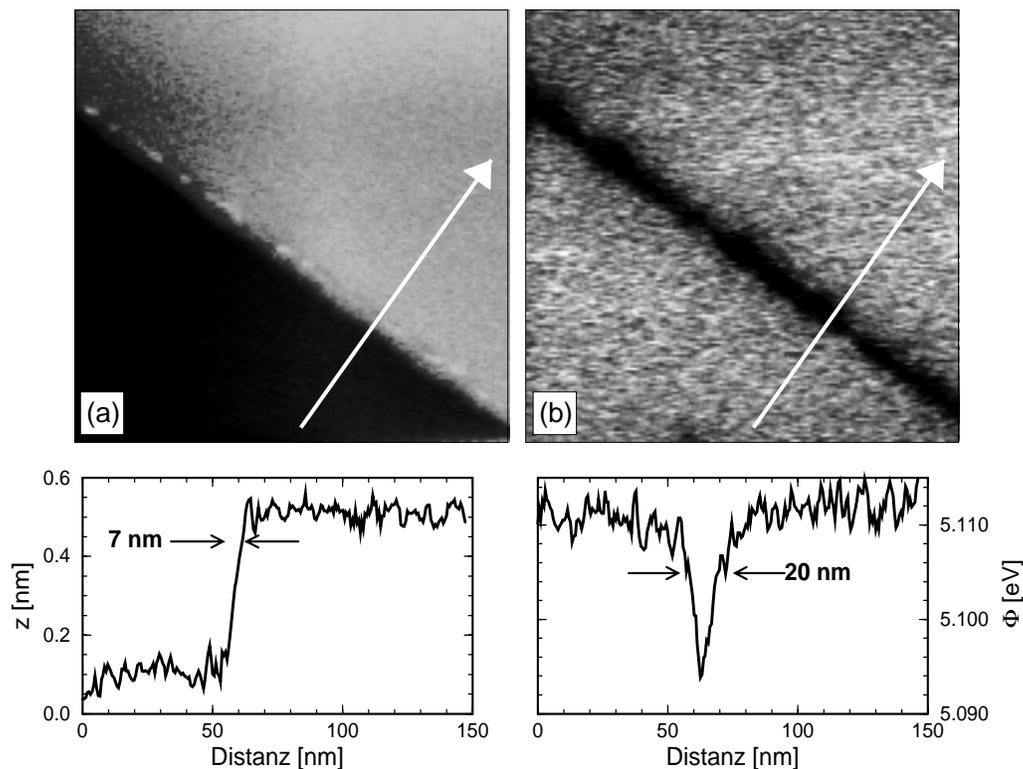


Abbildung 5.1: 2-Monolagenstufe auf HOPG (xy : $200 \times 200 \text{ nm}^2$). Die Querschnitte entsprechen den eingezeichneten Linien. (a) Topographie; (b) Austrittsarbeit.

Austrittsarbeit auf wenigen Å kann deshalb nicht quantitativ sondern nur qualitativ bestimmt werden.

Ein Zusammenhang zwischen makroskopischer Austrittsarbeitsverminderung und Stufendichte wurde erstmals 1977 von Wagner und Mitarbeitern in Austrittsarbeitsmessungen auf unterschiedlich fehlorientierten Metalloberflächen bei Au-, Pt- und W-Einkristallen beobachtet [12,90,174]. In Analogie zum Smoluchowski-Effekt für unterschiedlich orientierte Oberflächen wurde als Erklärung eine Variation der elektrischen Dipoldichte in der Umgebung der Stufe gegeben. Für eine gestufte Oberfläche ist dieser Effekt schematisch in Abb. 5.2 dargestellt. Durch die fehlende Wechselwirkung mit einem nächsten Nachbarn reicht an der Stufe die negative Ladung der freien Elektronen über die Stufenkante hinaus, welche durch die positive Ladung der Kernrümpfe festgelegt wird. Daraus resultiert ein effektives elektrisches Dipolmoment senkrecht zur Oberfläche, so daß lokal das elektrostatische Potential und somit die Austrittsarbeit über der Stufe reduziert wird. Die in Abb. 5.1(b) beobachtete Austrittsarbeitsverringering in der Umgebung der Stufe auf HOPG kann ebenfalls mit diesem Modell erklärt werden.

In jüngeren Publikationen wurde dieses Modell vor allem durch PAX (*Photoemission of Adsorbed Xenon*)-Experimente bestätigt. Messungen an Stufen der Pt(111)- und Cu(111)-

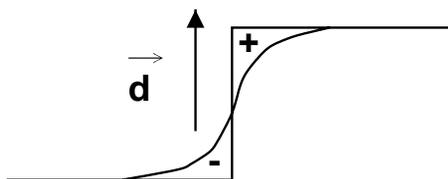


Abbildung 5.2: Skizze der Ladungsverteilung an einer Stufe und resultierender effektiver elektrischer Dipol senkrecht zur Kristalloberfläche.

Oberfläche ergaben eine lokale Austrittsarbeitverringerung von ca. 1.0 eV und 0.15 eV [175]. Weiterhin wurden von Jia et al. [77] orts aufgelöste Messungen der Tunnelbarriere mit dem STM durchgeführt, womit auf eine lokale Verringerung der Austrittsarbeit an Stufen von Au(111) geschlossen wurde. Die Bestimmung der Austrittsarbeit aus der Tunnelbarriere ist jedoch eine sehr indirekte Methode, da die gemessene Barrierenhöhe u.a. durch die endliche Tunnelspannung, die spitzeninduzierte Bandverbiegung auf Halbleiteroberflächen, sowie die atomare Konfiguration der Tunnelspitze signifikant beeinflusst werden kann [145].

Die Kelvinsondenkraftmikroskopie erlaubt dagegen prinzipiell eine direkte Bestimmung der lokalen Austrittsarbeit mit einer hohen energetischen Auflösung von wenigen meV. Aufgrund der langreichweitigen elektrostatischen Wechselwirkung bleibt die laterale Auflösung bei einer quantitativen Auswertung jedoch gegenüber der nahezu atomaren Auflösung bei PAX- und STM-Messungen auf den effektiven Spitzenradius von ca. 20 nm beschränkt.¹ Vorteil dieser Methode gegenüber PAX-Messungen ist jedoch, daß relative Änderungen der Austrittsarbeit, z.B. an Stufen unterschiedlicher Orientierung und Höhe, direkt mit der entsprechenden Topographieaufnahme korreliert werden können. Außerdem ist nicht für jedes Materialsystem ersichtlich, wie eine preferentielle Adsorption von Xenon erreicht bzw. nachgewiesen werden kann. In diesem Zusammenhang sollte die Kelvinsondenmikroskopie im UHV als ergänzende und erweiternde Methode zu den Austrittsarbeitbestimmungen mit Photoemissionsmessungen angesehen werden.

5.2 Lokalisierte Defektzustände an Stufen von III-V-Halbleitern

Ein Vergleich der Topographieaufnahme in Abb. 5.1(a) mit der Messung der Kontaktpotentialdifferenz in Abb. 5.1(b) legt die Frage nahe, inwieweit die Variation in der Austrittsarbeit tatsächlich von der Probe herrührt und nicht durch Artefakte der AFM-Aufnahme hervorgerufen wird. Da die Kelvinsondenkraftmikroskopie nur eine relative Bestimmung der Austrittsarbeit gegenüber der Spitze erlaubt, ist es z.B. denkbar, daß durch eine inhomogene Austrittsarbeit der Spitze in der Umgebung der Stufe nicht die Austrittsarbeit der Probe, sondern der Referenzwert der Spitze sich ändert (Abb. 5.3). Bei der Diskussion der Abstandsabhängigkeit der Kontaktpotentialdifferenz in Abb. 4.3 wurde bereits festgestellt, daß die Silizium-Cantilever tatsächlich Inhomogenitäten in der Austrittsarbeit aufweisen. Bei einer Stufenhöhe von 0.6 nm und einem Spitzen-Probenabstand von $z_{min} \approx 3$ nm dürften diese Inhomogenitäten jedoch nur eine unbedeutende Rolle spielen. Auf Metalloberflächen läßt sich der Einfluß von Spitze und Probe jedoch nur schwer unterscheiden, da dort aufgrund des Smoluchowski-Effekts stets mit einer Erniedrigung der Austrittsarbeit an Stufen gerechnet werden muß. Dagegen erlauben Messungen auf halbleitenden Proben unterschiedlicher Dotierung den Einfluß solcher Meßartefakte gezielter zu untersuchen.

¹Für eine wohldefinierte Spitze könnte mittels einer 3-dimensionalen Simulation der elektrische Feldverteilung [11,73] der Mittelungseffekt numerisch korrigiert werden.

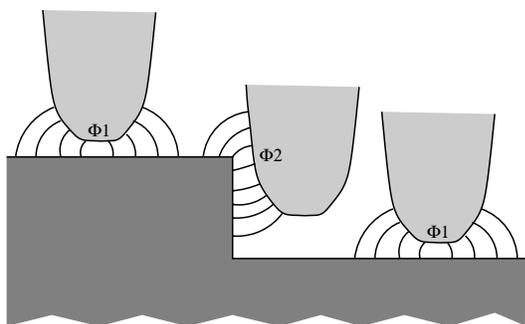


Abbildung 5.3: Skizze der elektrostatischen Wechselwirkung einer Cantileverspitze mit inhomogener Austrittsarbeit ($\Phi_1 \neq \Phi_2$) mit der atomar glatten Oberfläche und einer Stufe.

Bei Halbleitern setzt sich die Austrittsarbeit aus der Elektronenaffinität χ , d.h. dem Abstand von der Leitungsbandunterkante zum Vakuumniveau, und der Position des Fermi-niveaus innerhalb der Bandlücke zusammen (Abb. 5.5). Während die Elektronenaffinität ebenfalls durch elektrische Dipole an der Oberfläche mitbestimmt wird, ergibt sich an der Oberfläche die Differenz von Fermi-niveau zu Leitungsbandunterkante und somit auch die Austrittsarbeit sowohl aus der Dotierung im Volumen als auch aus der Verteilung der Oberflächenzustände innerhalb der Bandlücke. Austrittsarbeymessungen an Stufen der GaAs(110)-Oberfläche sind in Abb. 5.4 dargestellt. Für eine n-dotierte Probe erscheint in Abb. 5.4(b) die Austrittsarbeit in der Umgebung der beiden 2-Monolagenstufen erhöht gegenüber der glatten (110)-Oberfläche. Dagegen ist an der 12-Monolagenstufe auf dem p-dotierten Kristall in Abb. 5.4(d) eine Erniedrigung der Austrittsarbeit zu beobachten. Zusammen mit Abb. 5.1 verdeutlichen diese Messungen, daß die Kontaktpotentialdifferenz in der Umgebung der Stufen tatsächlich durch eine probenspezifische Variation der Austrittsarbeit hervorgerufen wird. Artefakte aufgrund einer Cantileverspitze mit inhomogener Austrittsarbeit können somit weitgehend ausgeschlossen werden.

Die Ursache der Austrittsarbeyvariation an Stufen von GaAs(110) kann anhand des sche-

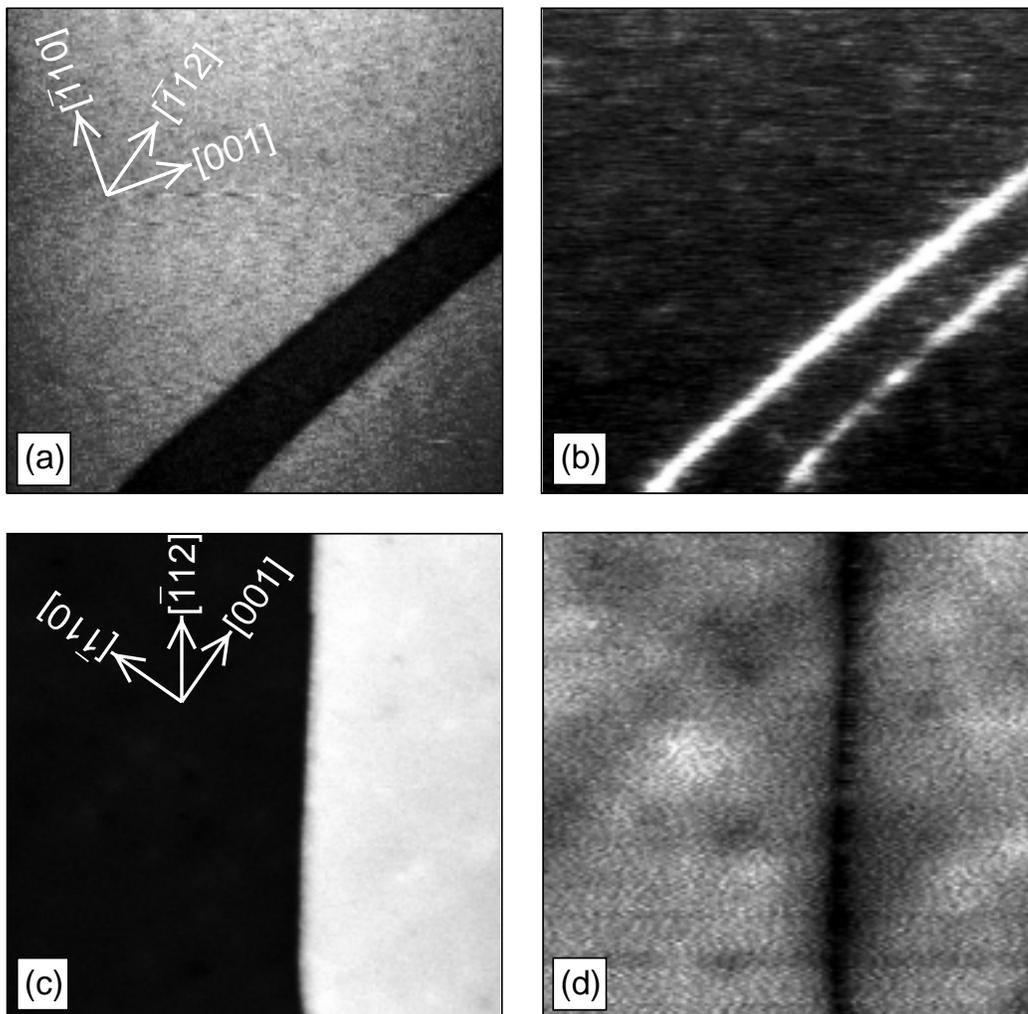


Abbildung 5.4: Stufen auf GaAs(110). (a) n-GaAs(110): Topographie ($xy: 400 \times 400 \text{ nm}^2$, $\Delta z = 0.45 \text{ nm}$); (b) n-GaAs(110): Austrittsarbeit ($\Phi = 4.2 \text{ eV}$, Grauskala: $\Delta CPD = 40 \text{ mV}$). (c) p-GaAs(110): Topographie ($xy: 300 \times 300 \text{ nm}^2$, $\Delta z = 3.0 \text{ nm}$); (b) p-GaAs(110): Austrittsarbeit ($\Phi = 5.5 \text{ eV}$, Grauskala: $\Delta CPD = 50 \text{ mV}$).

matischen Energieniveaudiagramms in Abb. 5.5 diskutiert werden. Aufgrund einer Relaxation der Ga-Atome an der Oberfläche zum Probeninnern existieren keine Oberflächenzustände in der Bandlücke sondern Oberflächenresonanzen im Valenz(VB)- und Leitungsband(CB) [48,67,69]. Dies bedeutet, daß die Lage des Fermi-niveaus an der Oberfläche durch die Volumendotierung bestimmt wird (Abb. 5.5(a)). Dagegen treten an der Stufe zusätzliche unabgesättigte Bindungen (*dangling bonds*) auf, wodurch neue Defektzustände innerhalb der Bandlücke entstehen können. Aufgrund der lokalisierten Ladung in diesen Defektzuständen entsteht eine Bandverbiegung, welche, wie in Abb. 5.5(b) dargestellt, bei einem n-dotierten Material die Austrittsarbeit vergrößert. Auf p-dotiertem Material wird dagegen, in Übereinstimmung mit der Messung in Abb. 5.4(d), die Austrittsarbeit an der Stufe verringert. Nach Laar et al. [68] könnte dieser Effekt vor allem auf einem Defektzustand in der Nähe des Leitungsbandes beruhen. Somit sollte die Bandverbiegung für n-leitendes Material sensibler auf diese Defektzustände sein. Dies wird qualitativ durch die Messungen in Abb. 5.4 bestätigt: Auf der n-leitenden Probe wird bei einer 2-Monolagenstufe eine vergleichbare Verringerung der Kontaktpotentialdifferenz beobachtet wie bei der 12-Monolagen hohen Stufe auf p-GaAs. Bei Stufen von 2-Monolagen Höhe wurde auf p-GaAs im Rahmen der energetischen Auflösung von 3 meV nur noch ein sehr schwacher Kontrast gemessen.

STM-Messungen zur Leerstellenkonzentration in der Umgebung von unterschiedlich orientierten Stufen auf p-InAs(110) [54], sowie erste theoretische Untersuchungen für GaAs(110) [155], deuten darauf hin, daß der Ladungszustand und die Zustandsdichte der Defektzustände darüber hinaus von der Terminierung und somit von der Orientierung der Stufe abhängt. Je stärker die Stufenrichtung von den gleichmäßig mit Ga- und As-terminierten Stufen entlang der [001]-Richtung abweicht, desto größere Unterschiede im Ladungszustand sind für nominell gleichorientierte aber unterschiedlich terminierte Stufen zu erwarten. Einen ersten Hinweis für einen solchen Effekt auf n-GaAs(110) liefert möglicherweise der unterschiedliche Kontrast der parallelen Stufen in Abb. 5.4(b).

Mit der Ausnahme von n-GaP sollten nach der neueren Literatur alle (110)-Oberflächen der III-V-Halbleiter frei von Oberflächenzuständen innerhalb der Bandlücke sein [48,115]. Die in den 70er-Jahren geführte Diskussion über Oberflächenzustände der III-V-Halbleiter konnte letztlich durch die Präparation von Spaltflächen hoher Qualität, d.h. niedriger Stufendichte geklärt werden [68]. Bei unzureichend präparierten Oberflächen geht die lokale Bandverbiegung entlang den Stufen in die makroskopisch und damit gemittelt gemessene Kontaktpotentialdifferenz ein, wogegen bei niedriger Stufendichte tatsächlich die Eigenschaften der atomar glatten Oberfläche dominieren.

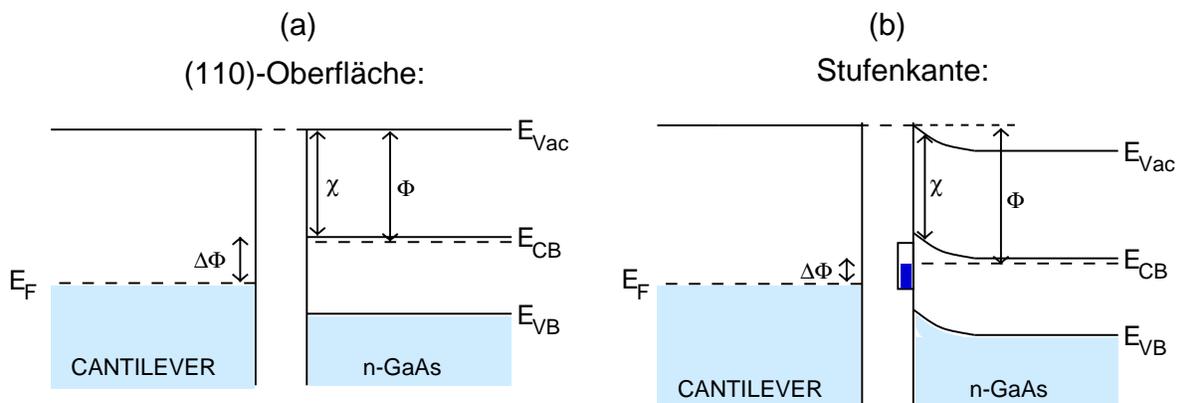


Abbildung 5.5: Schematisches Energieniveaudiagramm auf der idealen GaAs(110)-Oberfläche sowie im Bereich einer Stufe mit geladenen Defektzuständen innerhalb der Bandlücke.

Auf halbleitenden Oberflächen geringer Oberflächenzustandsdichte ($< 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ [115]) können laterale Potentialvariationen auch aufgrund von lokalisierten Ladungen an ionisierten Dotierstellen und geladenen Defekten auftreten. Die CPD-Bilder in Abb. 5.4(b) und (d) zeigen tatsächlich auch Variationen in der Kontaktpotentialdifferenz auf der ansonsten atomar glatten Oberfläche. Aufgrund der endlichen lateralen Auflösung des Kelvinsondenkraftmikroskops konnte der Ursprung dieser Potentialvariation auf der GaAs(110)-Oberfläche bisher nicht eindeutig geklärt werden. Zusätzlich zu ionisierten Dotierstellen im Volumen des Halbleiters können geladene Defektzustände von spaltinduzierter Störstellen oder Adsorbate während des UHV-Transfers den beobachteten Kontrast verursachen.

Messungen auf dem Schichtgitterhalbleiter WSe_2 , welche im folgenden Abschnitt vorgestellt werden, erlauben dagegen eine eindeutige Korrelation von Kontaktpotentialvariation und geladenen Dotierstellen.

5.3 Dotanden in p- WSe_2

Mittels Rastertunnelmikroskopie wurden in der Literatur zahlreiche Untersuchungen zum Einfluß von geladenen Punktdefekten auf die STM-Topographie der (110)-Oberfläche von III-V-Halbleiter durchgeführt. Eine Zusammenstellung an Veröffentlichungen zu diesem Thema ist in Ref. [29] zu finden. Die Halbleiter der Übergangsmetalldichalkogenide MX_2 ($\text{M}=\text{Mo}, \text{W}$ und $\text{X}=\text{S}, \text{Se}$) eignen sich besonders gut für diese Messungen [108,161]. Aufgrund der schichtartigen Kristallstruktur ist die (0001)-van der Waals-Oberfläche frei von intrinsischen Oberflächenzuständen und chemisch inert. Atomar glatte Oberflächen, frei von Adsorbaten und spaltinduzierte Punktdefekten erhält man durch Spalten im UHV. Die in STM-Experimenten beobachteten lokalisierten Ladungen können somit schon unter Hochvakuumbedingungen von 10^{-6} mbar eindeutig auf die Dotierung des Volumenmaterials zurückgeführt werden [109].

Abbildung 5.6 zeigt STM-Aufnahmen von 2 unterschiedlich dotierten WSe_2 -Kristallen. Im Falle des hochdotierten Kristalls ($p \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, Abb. 5.6(a)) erkennt man topographische Vertiefungen, welche dem atomaren Gitter überlagert sind. Für den schwächer dotierten Kristall ($p \approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, Abb. 5.6(b)) sind diese Effekte auf einer größeren Skala ebenfalls zu beobachten. In einem semiklassischen Modell kann dieser Kontrast mit dem Einfluß einer ionisierten

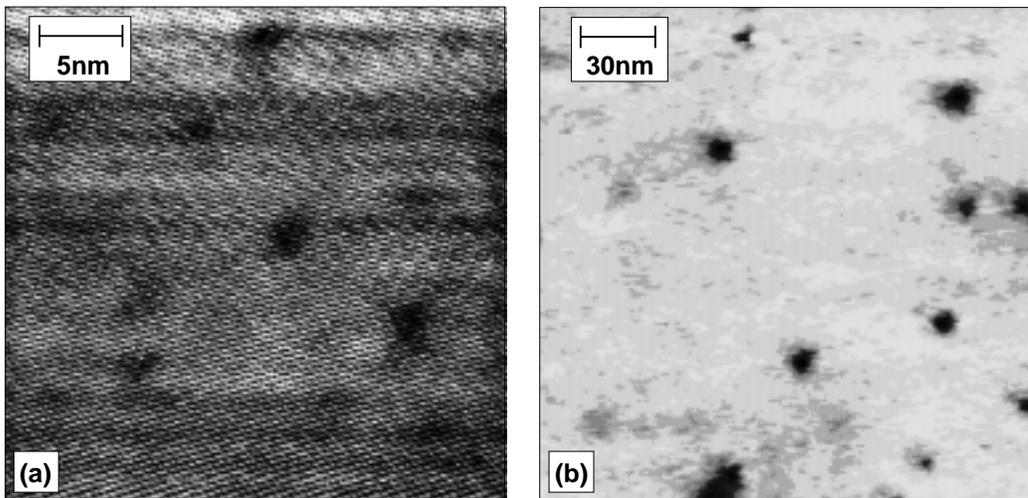


Abbildung 5.6: STM-Topographie auf p- $\text{WSe}_2(0001)$. (a) Ladungsträgerkonzentration $p \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ($xy: 30 \times 30 \text{ nm}^2$, $\Delta z = 0.27 \text{ nm}$). (b) Ladungsträgerkonzentration $p \approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ($xy: 200 \times 200 \text{ nm}^2$, $\Delta z = 0.35 \text{ nm}$).

Störstelle auf die Bandverbiegung und somit auf den Tunnelstrom erklärt werden [108,160,161]. Das Potential dieser Dotanden läßt sich als abgeschirmtes Coulombpotential

$$V(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_s r} e^{-\frac{r}{R_s}} \quad (5.1)$$

beschreiben, wobei die Abschirmlänge R_s für einen nichtentarteten Halbleiter durch die Debye-Länge L_D angenähert werden kann [26]. Die Abschirmlänge ist somit umgekehrt proportional zur Wurzel der Ladungsträgerkonzentration, was die unterschiedlichen Längenskalen in Abb. 5.6(a) und (b) erklärt ($R_s \approx 3$ nm bei $p = 10^{18}$ cm⁻³ und $R_s \approx 30$ nm bei $p \approx 10^{16}$ cm⁻³ für $\epsilon_s = 10$).

Zur stabilen Abbildung eines p-dotierten Halbleiters geringer Oberflächenzustandsdichte ist eine positive Probenspannung notwendig, so daß sich die Halbleiteroberfläche lokal in der Anreicherung befindet. Dadurch können Elektronen von der Spitze in unbesetzte Zustände des Valenzbandes (J_{VB}) und des Leitungsbandes (J_{CB}) tunneln (Abb. 5.7). In der Umgebung der negativen Ladung eines ionisierten Akzeptors ist die Löcherkonzentration erhöht, was in dem Energieniveauschema in Abb. 5.7 einer lokalen Erhöhung der Bandverbiegung entspricht. Dadurch wird der Strom ins Valenzband J_{VB} erhöht, während der Tunnelstrom J_{CB} erniedrigt wird. Aufgrund dieser konkurrierender Tunnelpfade im Valenz- und Leitungsband verändert sich der beobachtete Kontrast in Konstantstrom-STM-Bildern stark mit der Dotierung, der angelegten Tunnelspannung und bei Modifikationen der Tunnelspitze. So werden Akzeptoren auf p-GaAs(110) als Erhöhung beobachtet, während auf den Schichtgitterhalbleitern diese in der Regel als Vertiefung zu sehen sind. Aber auch laterale Oszillation im Tunnelstrombild sowie eine spannungsabhängige Kontrastumkehr können beobachtet und im Rahmen dieses semiklassischen Modells konkurrierender Tunnelpfade erklärt werden [28,29,108,159,161]. Die eindeutige Bestimmung des Coulombpotentials ist aus solchen STM-Aufnahmen daher im Allgemeinen kaum möglich.

Mit dem Kelvinsondekraftmikroskop ist dagegen innerhalb der limitierten lateralen Auflösung das elektrostatische Potential direkt abbildbar. Ein weiterer Vorteil gegenüber der Tunnelmikroskopie ist, daß sich bei dieser stromlosen Messung der Halbleiter unter der Spitze aufgrund des Nullabgleichs der elektrostatischen Wechselwirkung nicht in Anreicherung, sondern in Flachbandsituation befindet. Wie in Abschnitt 4.3.2 diskutiert wurde, kann mit dem realisierten Aufbau der Einfluß einer Bandverbiegung durch die angelegte Wechselspannung ebenfalls weitgehend vermieden werden. Abb. 5.8(b) zeigt die Austrittsarbeit auf dem niederdotierten p-WSe₂ Kristall. Es können eindeutig isolierte helle und dunkle Bereiche aufgelöst werden. Die Potentialvariationen liegen im Bereich von wenigen meV. Ein Vergleich mit Abb. 5.6(b) zeigt, daß es sich hierbei um einzelne Dotierstellen handelt. Befinden sich die Dotierstellen jedoch in einem Abstand von weniger als 30 nm, so können diese aufgrund der langreichweitigen elektrostatischen Wechselwirkung und der damit verbundenen endlichen lateralen Auflösung des

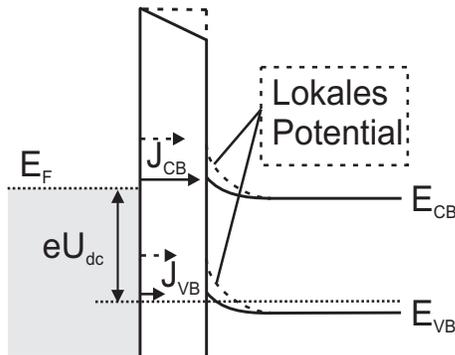


Abbildung 5.7: Energieniveauschema und Einfluß des abgeschirmten Coulombpotentials eines ionisierten Akzeptors (gestrichelte Linien) auf den Tunnelstrom bei STM Messungen mit positiver Probenspannung U_{dc} .

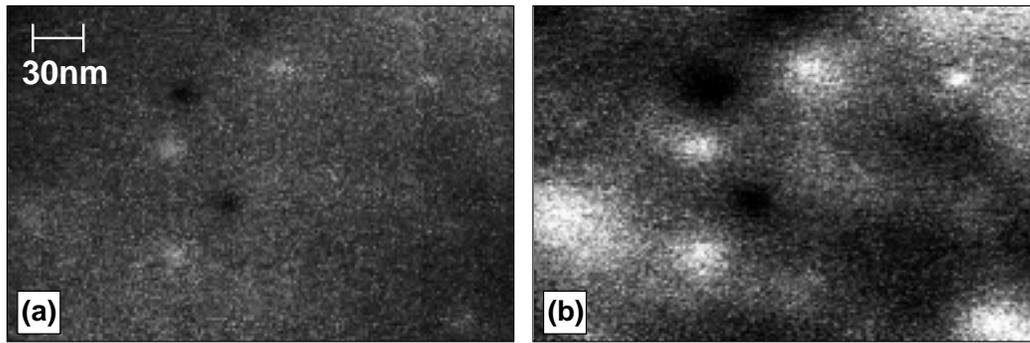


Abbildung 5.8: Geladene Dotierstellen in p- $\text{WSe}_2(0001)$ ($xy: 300 \times 200 \text{ nm}^2$). (a) Topographie ($\Delta z = 0.2 \text{ nm}$); (b) Austrittsarbeit ($\Phi = 5.65 \text{ eV}$, Grauskala: $\Delta CPD = 12 \text{ mV}$).

Kelvinsondenkraftmikroskops nicht mehr getrennt beobachtet werden. Entsprechend konnten die Dotierstellen für den Kristall aus Abb. 5.6(a) nicht mehr einzeln aufgelöst werden.

Eine genaue Betrachtung von Abb. 5.8(a) zeigt, daß auch in der Topographieaufnahme ein zu den Dotierstellen korrelierter Kontrast auftritt. Neben einer tatsächlich vorhandenen Korrugation, kann dieser Effekt auch mit der unterschiedlichen Reichweite der gemessenen Wechselwirkung bei der in Abb. 5.8(a) verwendeten Frequenzmodulations-Detektion und der in Abb. 5.8(b) verwendeten Amplitudenmodulations-Detektion erklärt werden. So lag die mit der Frequenzmodulations-Detektion gemessene Kontaktpotentialdifferenz ca. 80 mV über dem in Abb. 5.8(b) gemessenen Wert. Dies kann mit einer inhomogenen Austrittsarbeit der Cantileverspitze (siehe Abb. 4.3) und der unterschiedlichen Reichweite der gemessenen Wechselwirkung in der Frequenz- und Amplitudenmodulations-Detektion erklärt werden. Bei der in Abb. 5.8(b) verwendeten Amplitudenmodulations-Detektion wird die effektive elektrostatische Wechselwirkung zwischen Probe und einem ausgedehnten Bereich der Spitze kompensiert. Dadurch können elektrostatische Wechselwirkungen mit dem vordersten Spitzenbereich noch vorhanden sein und zum Kontrast der mit Frequenzmodulation-Detektion gemessenen Topographie in Abb. 5.8(a) beitragen.

Im Gegensatz zu den STM Messungen erlaubt die Kelvinsondenkraftmikroskopie die Ladung der Dotierstellen direkt zu bestimmen. Ein heller Kontrast in Abb. 5.8(b) entspricht einer negativen Ladung und somit einem ionisierten Akzeptor, während der dunkle Kontrast der positiven Ladung eines kompensierenden Donators entspricht. Das Auftreten beider Typen von Dotanden ist in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus makroskopischen Hall-Messungen. An Proben aus derselben Kristallzucht ergaben diese Messungen einen Kompensationsgrad von $N_A/N_D \approx 4$.

Aufgrund der endlichen lateralen Auflösung des Kelvinsondenkraftmikroskops ist aus Abb. 5.8(b) nur eine qualitative Bestimmung des Coulombpotentials möglich. Nimmt man zur Abschätzung der nach Gleichung (5.1) zu erwartenden Potentialdifferenz für r einen effektiven Spitzen-Probenabstand von 5 nm an, was im Bereich der lateralen Auflösung des Kelvinsondenkraftmikroskops liegt, so erhält man für $R_s = 30 \text{ nm}$ ein Coulombpotential von $V \approx 25 \text{ meV}$. Die in Abb. 5.8 gemessenen Potentialvariationen von 10 mV liegen somit durchaus in der zu erwartenden Größenordnung. Mit diesen Messungen wurde erstmals demonstriert, daß die Kelvinsondenkraftmikroskopie im UHV sensitiv genug ist, das abgeschirmte Coulombpotential eines einzelnen Dotanden lateral aufzulösen.

5.4 Zusammenfassung und Diskussion

Kelvinsondenkraftmikroskopie-Messungen auf Proben, welche durch Spalten im UHV präpariert worden sind, demonstrieren das breite Anwendungspotential dieser Methode im UHV. Neben dem bereits in Kapitel 4 an heteroepitaktischen $C_{59}N/HOPG$ -Proben diskutierten materialspezifischen, chemischen Kontrast, konnte auch auf nominell homogenen Substraten in der Umgebung von Stufen eine laterale Variation in der Austrittsarbeit festgestellt werden. Die beobachtete Austrittsarbeitsverminderung entlang Monolagen-Stufen von HOPG wurde mit dem Smoluchowski-Effekt, d.h. einem an der Stufe lokalisierten elektrischen Dipol erklärt. Dagegen wird bei Stufen auf der GaAs(110)-Oberfläche je nach Art der Dotierung eine lokale Erhöhung oder Erniedrigung der Austrittsarbeit beobachtet, was mit lokalen geladenen Defektzustände innerhalb der Bandlücke erklärt werden konnte.

Weiterhin zeigten Messungen auf der van der Waals-Oberfläche des Schichtgitterhalbleiters WSe_2 , daß mit dem Kelvinsondenkraftmikroskop das abgeschirmte Coulombpotential eines ionisierten Dotanden, d.h. die Veränderung der elektrostatischen Wechselwirkung von Cantileverspitze und Probe in der Umgebung einer Elementarladung, lateral aufgelöst werden kann.

Die erreichte laterale Auflösung liegt bei allen Messungen im Bereich von 20 nm. Damit bietet sich die Kelvinsondenkraftmikroskopie als Charakterisierungsmethode für verschiedenste Systeme an. Neben den in diesem Kapitel aufgezeigten Möglichkeiten, ist vor allem in der Mikroelektronik für Bauelemente im sub-100 nm Bereich großer Bedarf an quantitativen Analysemethoden auf der Nanometer-Skala. Bezüglich einer quantitativen Auswertung mit einer noch höheren Ortsauflösung, welche z.B. in der Analyse des elektrostatischen Potentials in Quantenstrukturen von wenigen atomaren Monolagen benötigt wird, ist analog zur Rasterkapazitätsspektroskopie ein weiterer Fortschritt durch die numerische Simulation der elektrostatischen Wechselwirkung zwischen Probe- und Spitze zu erwarten.

