

Antimon-Tetramere

Kristalline Strukturen aus Sb₄-Molekülen in dünnen Antimonfilmen**

Thorsten M. Bernhardt, Bert Stegemann,
Bernhard Kaiser* und Klaus Rademann

Das Element Antimon kommt als Festkörper sowohl in metallischer als auch in amorpher Form vor.^[1] In der Gasphase findet man über einen weiten Temperaturbereich fast ausschließlich tetramere Moleküle;^[2] eine dem weißen Phosphor und gelben Arsen entsprechende, aus Sb₄-Molekülen bestehende feste Modifikation des Antimons ist jedoch bisher nicht bekannt. Als Grund hierfür wird angegeben, dass das Sb₄-Molekül so instabil ist, dass selbst beim Abschrecken mit flüssiger Luft eine Umwandlung in die polymere amorphe Phase erfolgt.^[3]

Wir zeigen in dieser Arbeit, dass es mit der Rastertunnelmikroskopie (RTM) gelingt, in dünnen Antimonschichten, die aus Sb₄-Molekülen präpariert wurden, unerwartete, kristallin geordnete Bereiche mit nahezu kubischer Symmetrie zu identifizieren. Die Gitterkonstanten dieser Strukturen unterscheiden sich klar von den Gitterparametern des metallischen α -Antimons und sind in Übereinstimmung mit den bekannten Strukturdaten der tetraedrischen Sb₄-Moleküle.^[4-6] Die Symmetrie der geordneten Bereiche in den Antimonfilmen ist auch im Einklang mit den Strukturen der ebenfalls aus tetrameren Einheiten aufgebauten Modifikationen der leichteren homologen Elemente Arsen und Phosphor (As₄ und P₄). Die vorliegenden RTM-Daten weisen somit darauf hin, dass auf der Nanometerskala eine neue allotrope Festkörpermodifikation des Antimons, bestehend aus Sb₄-Molekülen, existiert. Substratoberflächen, auf denen die Beobachtung derartig geordneter Antimonstrukturen gelingt, sind die (0001)-Basalfläche von MoS₂ und die (100)-Fläche der Oberflächenlegierung AuSb₂. Atomar aufgelöste RTM-Aufnahmen beider Substrate sind in Abbildung 1 dargestellt.

Dünne Antimonschichten auf verschiedenen Oberflächen und ihre amorphe, nichtmetallische Struktur wurden in der Literatur vielfach beschrieben.^[7,8] Auch auf der MoS₂(0001)-Oberfläche resultiert die Kondensation von Sb₄ bei einer Substrattemperatur von -190°C in makroskopisch amorphen

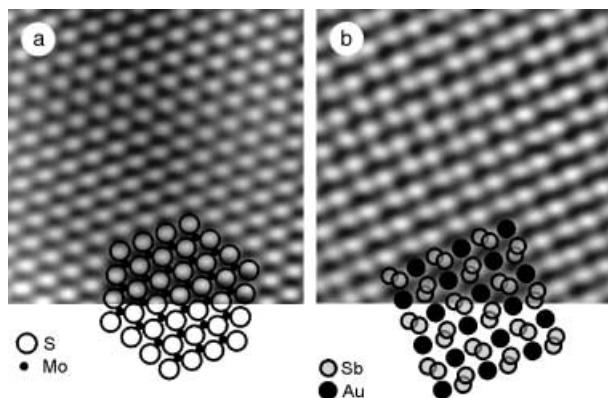


Abbildung 1. RTM-Aufnahmen der Substratoberflächen ($39 \times 39 \text{ \AA}^2$), auf denen nach Aufdampfen von 1–2 Monolagen (ML) Antimon die lokal kristallinen Bereiche beobachtet werden können. a) MoS₂(0001) mit hexagonaler Struktur. Tunnelparameter: $-0.1 \text{ V}, 2.8 \text{ nA}$. b) AuSb₂(100) mit quadratischer Oberflächenstruktur. Tunnelparameter: $0.5 \text{ V}, 2.0 \text{ nA}$. Beide Aufnahmen wurden mit einem Hochfrequenzfilter behandelt, um störende Rauschsignale zu minimieren. Die schematischen Zeichnungen der Gitterstrukturen ermöglichen die Zuordnung der hell erscheinenden Maxima der lokalen elektronischen Zustandsdichte in den RTM-Bildern: In (a) ist die hexagonale Anordnung der S-Atome in der obersten Lage zu erkennen,^[13] in (b) die jeweils quadratischen Untergitter der Au-Atome und der Sb-Dimere, wobei das Rastertunnelmikroskop eine Superposition der beiden Atome der Sb-Dimere abbildet.^[15]

Antimonfilmen ohne erkennbare strukturelle Ordnung. Dies ist in Abbildung 2a am Beispiel eines 2 Monolagen (ML) dicken Filmes zu sehen. Wird ein solcher Film mit höchster Auflösung untersucht, können jedoch bei Bedeckungen von 1–2 ML lokale, geordnete Bereiche identifiziert werden, die in Abbildung 2b durch Pfeile markiert sind. Diese lokalen Strukturen weisen in jedem Fall eine einfache, rechtwinklige Symmetrie auf. Im Allgemeinen kann keine epitaktische Ausrichtung zwischen Film und Substrat festgestellt werden. Abbildung 2c stellt die mit A und B gekennzeichneten Bereiche im Ausschnitt dar. Eine Korngrenze, durch die beiden Pfeile markiert, trennt Struktur A von Struktur B. Die Gitterorientierungen in den beiden Bereichen (weiße Linien) sind relativ zueinander um $59 \pm 1^{\circ}$ verdreht. Dies könnte jedoch auf eine mögliche Ausrichtung der Bereiche gemäß der hexagonalen Substratsymmetrie hindeuten (siehe Abbildung 1a).

In Abbildung 2d ist eine weitere Vergrößerung der Struktur A dargestellt. Bei näherer Analyse dieser Abbildung zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den senkrecht aufeinander stehenden Gittervektoren a_1 und a_2 . Die statistische Auswertung der gemessenen Gitterabstände von 14 untersuchten, lokal geordneten Bereichen (wiedergegeben in Abbildung 3a) verdeutlicht diese Beobachtung. Es ergeben sich mittlere Gitterparameter von $a_1 = 5.06 \pm 0.13 \text{ \AA}$ und $a_2 = 4.51 \pm 0.16 \text{ \AA}$ für die kristallinen Antimonstrukturen auf MoS₂(0001).

Auf einem Au(111)-Substrat, bedeckt mit der Oberflächenlegierung AuSb₂, können sogar bei Raumtemperatur geordnete Bereiche beobachtet werden. In Abbildung 4a ist die generell amorphe Struktur eines 2 ML dicken Antimonfilms auf diesem Substrat zu erkennen. Bei zunehmender

[*] Priv.-Doz. Dr. B. Kaiser, Dipl.-Phys. B. Stegemann, Prof. Dr. K. Rademann
Institut für Chemie
Humboldt-Universität zu Berlin
Brook-Taylor-Straße 2, 12489 Berlin (Deutschland)
Fax: (+49) 30-2093-5559
E-mail: bernhard.kaiser@rz.hu-berlin.de
Dr. T. M. Bernhardt
Institut für Experimentalphysik
Freie Universität Berlin
Arnimallee 14, 14195 Berlin (Deutschland)

[**] Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt. Die Autoren danken S. Rogaschewski und A. Laws für die Präparation der Goldfilme.

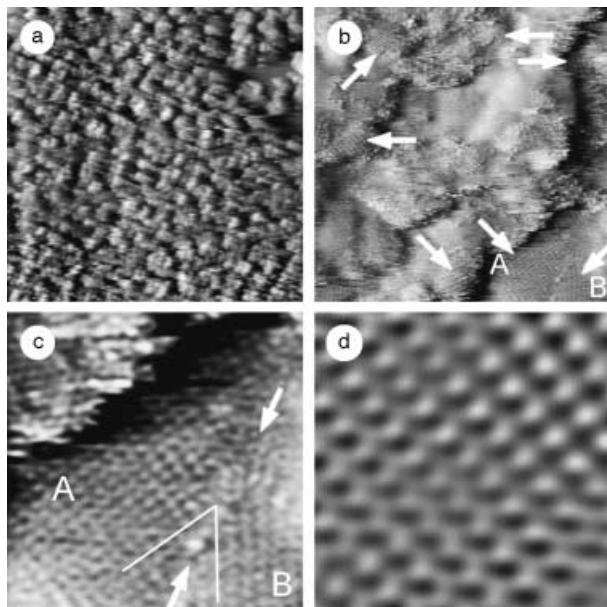


Abbildung 2. RTM-Aufnahmen eines 2 ML dicken Antimonfilms auf MoS_2 in verschiedener Vergrößerung. a) Der $2480 \times 2480 \text{ \AA}^2$ große Ausschnitt zeigt die generell amorphe Struktur der Filme. b) Die mit Pfeilen markierten Bereiche der $310 \times 310 \text{ \AA}^2$ großen Aufnahme weisen eine geordnete Struktur auf. c) $100 \times 100 \text{ \AA}^2$ -Vergrößerung der Strukturen A und B in (b). Entlang der durch die Pfeile markierten Strecke ist eine Korngrenze zwischen zwei benachbarten geordneten Bereichen erkennbar, deren Orientierungen um $59 \pm 1^\circ$ gegeneinander verdreht sind. In (d) ist ein $39 \times 39 \text{ \AA}^2$ großer Ausschnitt des Bereiches A gezeigt. Die Aufnahme wurde mit einem Hochfrequenzfilter behandelt, um die geordnete Struktur besser hervorzuheben. Tunnelparameter aller Bilder: 0.6 V, 1.0 nA.

Vergrößerung werden wiederum lokale, geordnete Strukturen mit rechtwinkliger Symmetrie sichtbar. Diese sind in Abbildung 4b durch Pfeile markiert. Eine bevorzugte Ausrichtung der Gitterorientierung in diesen Bereichen zur quadratischen Symmetrie des $\text{AuSb}_2(100)$ -Substrates ist nicht zu erkennen. Eine weitere Vergrößerung der Struktur im Bereich A ist in Abbildung 4c zu sehen. Gut aufgelöst sind die Kanten und Ecken der obersten Lage der geordneten Struktur. Abbildung 4d zeigt in gleicher Vergrößerung wie Abbildung 2d die hochauflöste Korrugation des kristallinen Bereiches in Abbildung 4c. Auch bei den Antimonstrukturen auf AuSb_2 wird bei genauerer Betrachtung die eindeutig rechteckige Symmetrie deutlich. Insgesamt wurden 31 lokale, kristalline Bereiche von Antimon auf AuSb_2 untersucht. Die statistische Auswertung findet sich in Abbildung 3b. Die mittleren Gitterkonstanten betragen hier $a_1 = 4.65 \pm 0.13$ und $a_2 = 4.27 \pm 0.16 \text{ \AA}$. Diese Werte sind etwas kleiner als im Fall der MoS_2 -Oberfläche. Übereinstimmend stehen jedoch die Gitterparameter a_1 und a_2 der Antimonstrukturen auf beiden Substraten im Verhältnis 10:9 zueinander. Der Vergleich der Größen der lokal geordneten Bereiche auf beiden Substraten in Abbildung 3c zeigt, dass die mittlere Größe der Nanostrukturen auf MoS_2 geringer (Maximum bei $0-39 \text{ nm}^2$) als auf AuSb_2 ist (Maximum bei $40-79 \text{ nm}^2$). Außerdem ist die Größenverteilung auf AuSb_2 deutlich breiter als auf MoS_2 .

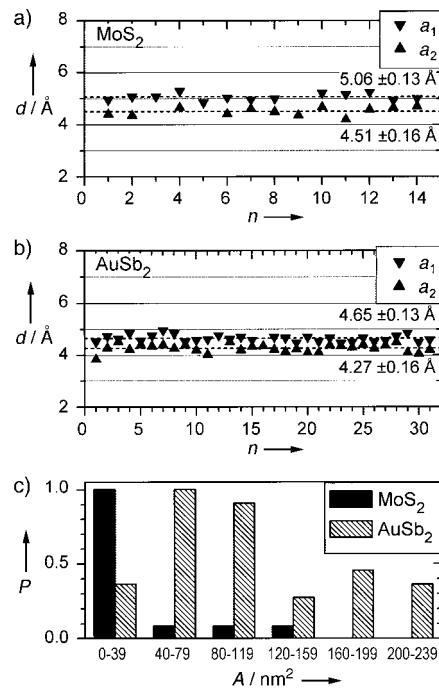


Abbildung 3. Statistische Analyse der Gitterabstände und Größen der kristallinen geordneten Bereiche. Dargestellt sind die Gitterparameter a_1 (▼) und a_2 (▲) aller untersuchten Strukturen n auf a) MoS_2 und b) AuSb_2 . Angegeben sind die Mittelwerte der Messdaten (markiert durch die gestrichelten Linien) und ihre Standardabweichungen. c) Größenverteilung der kristallinen, geordneten Bereiche auf den beiden Substraten MoS_2 und AuSb_2 . Aufgetragen ist die relative Häufigkeit P gegen die Größe A der kristallinen Bereiche.

Die lokalen kristallinen Bereiche weisen eine dreidimensionale Struktur auf. Obwohl auf die Substrate in beiden Fällen nominell 2 ML Antimon aufgebracht wurden, bildet sich kein idealer zweidimensionaler, sondern ein stark strukturierter Film (siehe Abbildung 2a und 4a). Die beobachteten kristallinen geordneten Bereiche weisen daher in der Regel eine Höhe von mehreren Monolagen auf, wie in Abbildung 5 zu erkennen ist. Diese Bilder wurden zum Zweck der Höhenmessung ohne elektronischen Differenzfilter aufgenommen. Zu erkennen sind mehrere Lagen einer Struktur auf MoS_2 (Abbildung 5a) sowie auf AuSb_2 (Abbildung 5c), die durch Stufen voneinander getrennt sind. Besonders gut ist die rechtwinklige Symmetrie mehrerer aufeinander folgender Lagen der Antimonstrukturen in Abbildung 5c aufgelöst. Höhenprofile entlang der eingezeichneten Linien sind unterhalb der entsprechenden RTM-Aufnahmen abgebildet (Abbildung 5b und d). Mit A und B sind jeweils zwei ausgewählte Stufen markiert worden. Die gemessenen Stufenhöhen auf den beiden Substraten betragen zwischen 4.5 und 5.0 Å und liegen somit im Bereich der Gitterabstände in den Lagen. Basierend auf diesen Messergebnissen soll im Folgenden die atomare Anordnung in den lokalen, geordneten Bereichen diskutiert werden.

Metallisches α -Antimon hat eine rhomboedrische Struktur (Raumgruppe $R\bar{3}m$). Jedes Sb-Atom einer Gitterschicht hat drei nächste Nachbarn im Abstand von 2.908 Å. Der kleinste interatomare Abstand zwischen den Gitterebenen

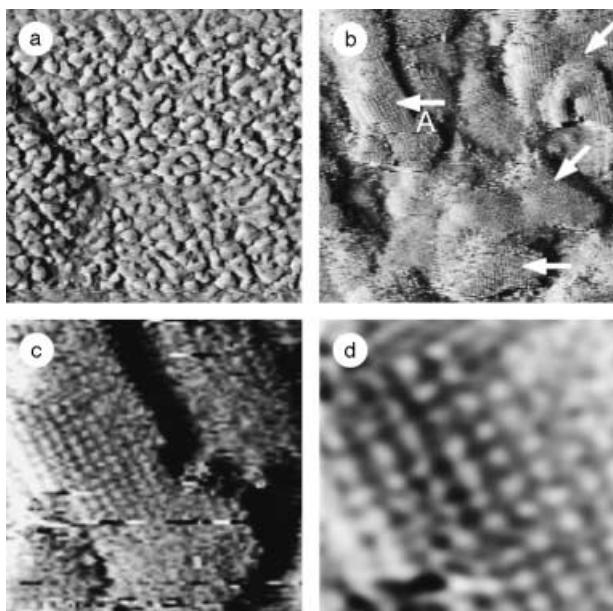


Abbildung 4. RTM-Aufnahmen eines 2 ML dicken Antimonfilms auf einer mit der Oberflächenlegierung AuSb_2 bedeckten $\text{Au}(111)$ -Fläche: a) $2480 \times 2480 \text{ \AA}^2$ große Übersicht über die generell amorphe Struktur des Films. Tunnelparameter: 0.8 V, 1.8 nA. b) Die $310 \times 310 \text{ \AA}^2$ -RTM-Aufnahme zeigt geordnete Bereiche im Film an den mit Pfeilen gekennzeichneten Stellen. Tunnelparameter: -0.96 V, 1.7 nA. c) Vergrößerung des Bereiches A in (b) ($100 \times 100 \text{ \AA}^2$). In (d) ist eine nochmals vergrößerte Darstellung des Bereiches A gezeigt ($39 \times 39 \text{ \AA}^2$). Die Aufnahme wurde mit einem Hochfrequenzfilter behandelt, um die geordnete Struktur besser hervorzuheben.

beträgt 3.355 \AA .^[1] Die deutlich größeren gemessenen Abstände sowie die unterschiedliche Symmetrie der lokalen, kristallinen Bereiche auf beiden Substraten zeigen, dass es sich bei den Korrulationsmaxima in den RTM-Bildern nicht um einzelne Antimonatome einer Gitterebene des α -Antimons handelt. Das Vorliegen von Nanokristalliten metallischen Antimons kann daher ausgeschlossen werden.

Die gemessenen Gitterabstände passen jedoch gut zu den bekannten Dimensionen der aus der Gasphase aufgebrachten Sb_4 -Moleküle. Ein kollisionsinduzierter Zerfall der Sb_4 -Moleküle beim Auftreffen auf die Oberfläche kann bei thermischer Deposition ausgeschlossen werden.^[9] Eine aus Sb_4 -Molekülen bestehende Festkörpermodifikation des Antimons ist bisher, wie schon erwähnt, nicht beschrieben worden. Jedoch deuten mittels Röntgenstreuung erhaltene Daten auf die Existenz von Tetraederketten und -schichten in dünnen Antimonfilmen hin.^[8] In flüssigem Antimon konnte Sb_4 durch Neutronenbeugung nachgewiesen werden,^[10] und auf einer Si(001)-Oberfläche wurden einzelne Sb_4 -Moleküle durch RTM beobachtet.^[6] Sb_4 hat die Struktur eines regelmäßigen Tetraeders.^[4] Ab-initio-Rechnungen ergeben eine Bindungslänge im Tetraeder von 2.687 \AA .^[5]

Ausgehend von den gemessenen Abständen zwischen den Korrulationsmaxima in den lokalen, geordneten Bereichen der dünnen Antimonfilme und unter Zugrundelegung eines Atomradius entsprechend der halben Bindungslänge (1.34 \AA) gelangt man zu der in Abbildung 6 dargestellten molekularen Gitteranordnung. Andere Anordnungen im Einklang mit der

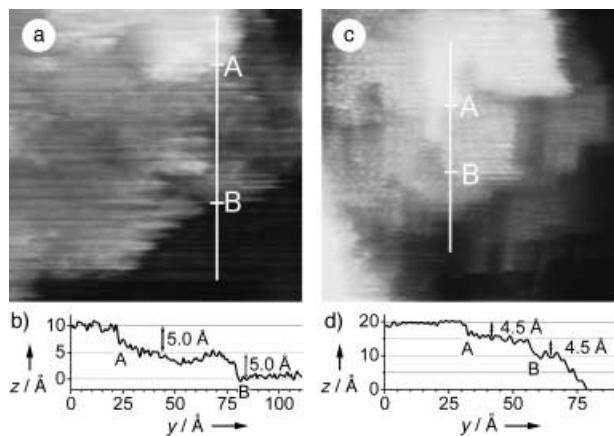


Abbildung 5. RTM-Aufnahmen ($120 \times 120 \text{ \AA}^2$) der dreidimensionalen Struktur der geordneten Bereiche auf a) MoS_2 (Tunnelparameter: 0.6 V, 1.0 nA) und c) AuSb_2 (Tunnelparameter: -0.25 V, 7.9 nA). Die Aufnahmen entstanden ohne elektronischen Differenzfilter, sodass die Grauwerte die absolute Höhenskala reflektieren. Höhenprofile (z-Richtung) entlang der eingezzeichneten Linien (y-Richtung) sind unterhalb der zu gehörigen RTM-Aufnahmen in (b) und (d) aufgetragen. Angegeben ist jeweils die Höhe der monomolekularen Stufen, deren Positionen mit A und B gekennzeichnet sind.

beobachteten Symmetrie sind auf beiden Substraten nicht möglich. Die beobachteten kristallin geordneten Antimonstrukturen lassen sich also erklären, wenn man jede durch RTM gemessene Erhebung, d.h. die Maxima der lokalen elektronischen Zustandsdichte, einem undissoziierten Sb_4 -Tetraedermolekül zuordnet. Diese Zuordnung der beobachteten Korrulation wird zusätzlich durch RTM-Messungen an einzelnen Sb_4 -Molekülen auf Si(001) unterstützt, die einen Sb_4 -Durchmesser von etwa 5 \AA ergeben.^[6] Unter Berücksichtigung des Faltungseffektes mit der RTM-Spitze stellt dieser Wert eine Obergrenze für die laterale Größe von Sb_4 dar und stimmt somit sehr gut mit den gemessenen Abständen überein.

Obwohl die detaillierten Strukturen des gelben Arsens wie auch des weißen Phosphors, welche aus As_4 - bzw. P_4 -Molekülen aufgebaut sind, noch nicht aufgeklärt sind, konnten Kristalle dieser Modifikationen mit kubischer Sym-

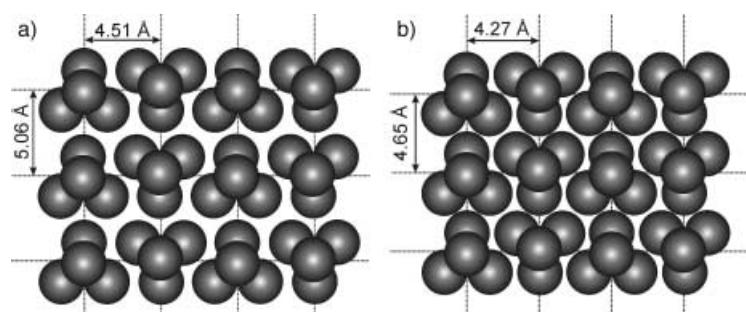


Abbildung 6. Strukturmodell für die Anordnung der Sb_4 -Tetraeder in der obersten Lage der Sb_4 -Antimonmodifikation auf a) dem MoS_2 - und b) dem AuSb_2 -Substrat entsprechend der beobachteten Symmetrie und Gitterabstände. Das Rastertunnelmikroskop bildet eine Superposition der vier Atome des Tetraeders ab, sodass diese Anordnungen als einzige Varianten rechteckige Gitter mit den gefundenen Abständen ergeben.

metrie erhalten werden.^[1,11] Die Stufenhöhen der beobachteten Antimonmodifikation sind den Abständen der Sb₄-Moleküle in den Gitterlagen vergleichbar (Abbildung 5) und zeigen somit den dreidimensionalen Charakter der kristallinen Strukturen. Es liegt daher nahe, dass auch die hier vorgestellte Antimonmodifikation eine nahezu kubische Gitterstruktur aufweist.

Dabei zeigen die geordneten Bereiche auf AuSb₂ generell neben der lateralen auch eine stärkere vertikale Ausdehnung. Da bei größeren Bedeckungen (über 3 ML) keine geordneten Sb₄-Bereiche mehr identifiziert werden können, könnten die geringeren Abstände zwischen den Sb₄-Molekülen auf AuSb₂ darauf hinweisen, dass sich die im Vergleich zu MoS₂ ausgedehnteren Strukturen näher an der kritischen Größe befinden, ab der die Umwandlung in die amorphe Phase stattfindet.^[12] Eine weitere mögliche Erklärung der unterschiedlichen intermolekularen Abstände auf den beiden Substraten mag in einer unterschiedlichen Wechselwirkung von Sb₄ mit MoS₂ und AuSb₂ liegen. Zukünftige Experimente und eine detaillierte theoretische Modellierung der Sb₄-Strukturen auf den Substraten könnten über diese Frage weiteren Aufschluss geben.

Experimentelles

Die Herstellung der dünnen Antimonfilme erfolgt im Ultrahochvakuum (Basisdruck: 4×10^{-11} mbar) durch Aufdampfen von Sb₄-Molekülen aus einem effusiven, widerstandsgeheizten Ofen (Temperatur: 330 °C; Aufdampfen mit 0.1 nm s⁻¹; Sb: 99.9999 %, Johnson-Matthey). Die Schichtdicke wird in Monolagen (ML) von Sb-Atomen angegeben. Die Präparation der MoS₂-Substrate erfolgt durch Spalten entsprechend Literaturangaben.^[13] Bei der Herstellung der AuSb₂-Oberflächenlegierung wird von einem Au(111)-Substrat ausgängen.^[14] Darauf bildet sich bei Abscheidung von weniger als 1 ML Antimon bei Raumtemperatur selbstständig die Oberflächenlegierung AuSb₂ mit der Ausrichtung (100) aus.^[15] Das RTM vom Beetle-Typ^[16] befindet sich in einer direkt an die Präparationskammer angeschlossenen Analysenkammer.^[17] Zur Erhöhung des Bildkontrastes werden die RTM-Daten bei der Aufnahme direkt elektronisch differenziert. Dies lässt die RTM-Bilder so erscheinen, als ob sie von der Seite her beleuchtet werdenen.

Eingegangen am 8. April 2002,
veränderte Fassung am 11. Oktober 2002 [Z19057]

- [1] J. Donohue, *The Structures of the Elements*, Wiley-Interscience, New York, 1974.
- [2] J. Mühlbach, P. Pfau, E. Recknagel, K. Sattler, *Surf. Sci.* **1981**, 106, 18.
- [3] A. F. Hollemann, N. Wiberg, *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*, 101. Aufl., Walter de Gruyter, Berlin, 1995.
- [4] H. Sontag, R. Weber, *Chem. Phys.* **1982**, 70, 23.
- [5] V. Kumar, *Phys. Rev. B* **1993**, 48, 8470.
- [6] Y. W. Mo, *Phys. Rev. Lett.* **1992**, 69, 3643.
- [7] J. Cohen, *J. Appl. Phys.* **1954**, 25, 798; M. Hashimoto, K. Umezawa, R. Murayama, *Thin Solid Films* **1990**, 188, 95; A. Hoareau, J. X. Hu, P. Jensen, P. Melinon, M. Treilleux, B. Cabaud, *Thin Solid Films* **1992**, 209, 161; H. Murmann, *Z. Phys.* **1929**, 54, 741; J. A. Prins, *Nature* **1933**, 131, 760; H. Levinstein, *J. Appl. Phys.* **1949**, 20, 306.
- [8] H. Richter, H. Berckhemer, G. Breitling, *Z. Naturforsch. A* **1952**, 9, 236.

- [9] B. Kaiser, T. M. Bernhardt, B. Stegemann, J. Opitz, K. Rademann, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **1999**, 157, 155; T. M. Bernhardt, B. Kaiser, K. Rademann, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2002**, 4, 1192.
- [10] P. Lamarter, S. Steeb, W. Knoll, *Z. Naturforsch. A* **1976**, 31, 90.
- [11] J. Eiduss, R. Kalendarev, A. Rodionov, A. Sazonov, G. Chikvaidze, *Phys. Status Solidi B* **1996**, 193, 3.
- [12] G. Fuchs, P. Melinon, F. Santos Aires, M. Treilleux, B. Cabaud, A. Hoareau, *Phys. Rev. B* **1991**, 44, 3926.
- [13] J. G. Kushmerick, S. A. Kandel, P. Han, J. A. Johnson, P. S. Weiss, *J. Phys. Chem. B* **2000**, 104, 2980.
- [14] J. A. DeRose, T. Thundat, L. A. Nagahara, S. M. Lindsay, *Surf. Sci.* **1991**, 256, 102.
- [15] B. Stegemann, T. M. Bernhardt, B. Kaiser, K. Rademann, *Surf. Sci.* **2002**, 511, 153.
- [16] K. Besocke, *Surf. Sci.* **1987**, 181, 145.
- [17] B. Kaiser, T. M. Bernhardt, K. Rademann, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **1997**, 125, 223; T. M. Bernhardt, Dissertation, Humboldt-Universität, Berlin, 1997.

Konformativ eingeschränkte Peptide

Neuropeptid-Y-Analoga mit β-Aminocyclopropancarbonsäure-Einheiten sind die kürzesten linearen und selektiven Peptide am Y₁-Rezeptor**

Norman Koglin, Chiara Zorn, Raphael Beumer, Chiara Cabrele, Christian Bubert, Norbert Sewald, Oliver Reiser* und Annette G. Beck-Sickinger*

Professor Peter Welzel zum 65. Geburtstag gewidmet

Neuropeptid Y (NPY) ist das häufigste Neuropeptid im zentralen Nervensystem der Säuger; es besteht aus 36 Aminosäuren und ist C-terminal amidiert. NPY ist als bis heute stärkstes Stimulans der Nahrungsaufnahme in Ratten-

[*] Prof. Dr. O. Reiser, Dr. C. Zorn, Dr. R. Beumer, Dr. C. Bubert
Institut für Organische Chemie
Universität Regensburg
Universitätsstraße 31, 93040 Regensburg (Deutschland)
Fax: (+49) 941-9434-121
E-mail: oliver.reiser@chemie.uni-regensburg.de
Prof. Dr. A. G. Beck-Sickinger, Dipl.-Biochem. N. Koglin,
Dr. C. Cabrele
Institut für Biochemie
Universität Leipzig
Talstraße 33, 04103 Leipzig (Deutschland)
Fax: (+49) 341-9736-998
E-mail: beck-sickinger@uni-leipzig.de
Prof. Dr. N. Sewald
Institut für Organische und Bioorganische Chemie
Universität Bielefeld
Postfach 100131, 33501 Bielefeld (Deutschland)

[**] Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (BE1264/3-1 und RE948-4/1) und dem Fonds der Chemischen Industrie gefördert. Wir danken der BASF AG, der Bayer AG und der Degussa AG für die großzügige Spende von Chemikalien.