

4.5 Analyse dünner Manganschichten auf mit Bismut beschichteten Silizium(100)-Oberflächen

Das nächste Kapitel befasst sich mit Wachstumsstudien von Mangan auf mit Bismut beschichteten Si(100)- und 4° fehlorientierten Si(100)-Substraten. Ziel dieser Versuchsreihe war, festzustellen, ob eine dünne Bismutschicht ausreicht um die Formierung von Mangansiliziden zu unterdrücken und so das Wachstum von Manganschichten zu ermöglichen. Das wäre eine Voraussetzung zum Herstellen von MnBi-Schichtsystemen. Im ersten Unterkapitel wird das Wachstum auf glatten, im zweiten Unterkapitel auf 4° fehlorientierten Si(100)-Substraten untersucht.

4.5.1 Beobachtungen an dünnen Manganschichten auf mit Bismut beschichteten Si(100)-Substraten.

Es wurden, wie im Kapitel zuvor, sowohl Proben im Bereich von Submonolagen als auch im Bereich weniger Monolagen untersucht. Problematisch erwiesen sich Schwankungen in der Verdampfungsrate des Bismutverdampfers. Das hat zur Folge, dass für die meisten Proben eine Bestimmung der Dicke der Bismutschicht mit dem Auger-Elektronenspektrometer überprüft werden musste. Für die ersten Messungen existieren jedoch keine Augerspektren, so dass die STM-Aufnahmen des mit Bismut beschichteten Substrats zur Einschätzung verwendet wurden, ob die Substratoberfläche mit Bismut bedeckt ist. Das ist unter anderem für die in Abbildung 4.5.1.1 gezeigte Probe der Fall. Bei dieser Probe handelt es sich um ein Si(100)-(2×1)-Substrat, das zuerst mit etwas mehr als einer ML Bismut und dann mit dem Mangan beschichtet wurde. In Abb. 4.5.1.1 a) sind trotz der geringen Manganbedeckung keine Bereiche sichtbar, in denen die Bismutschicht oder das Substrat frei ist. Das wird auf elektronische Effekte der deponierten Manganschicht zurückgeführt. In b) wird die selbe Probe nach dem Erwärmen auf 450°C gezeigt. Im Unterschied zu a) sind hier wieder die, für die Bismut bedeckte Si(100)-Oberfläche, bekannten Strukturen sichtbar. Das Mangan ist zu Clustern zusammengelaufen, die keine atomaren Strukturen zeigen. Auch nach dem Erwärmen auf 490°C finden sich in 5.5.1.1 c) noch die typischen Strukturen der mit Bismut rekonstruierten Siliziumoberfläche. Das Mangan liegt noch immer in Clustern auf der Oberfläche vor. Diese sind grob an den 90°-Strukturen des Substrates orientiert. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass in diesen Clustern bereits Mangansilizide vorhanden sind, die Strukturen sprechen jedoch dagegen. Die Beobachtungen an dieser Probe legen nahe, dass das Grundprinzip der Verhinderung von Silizidbildung durch eine

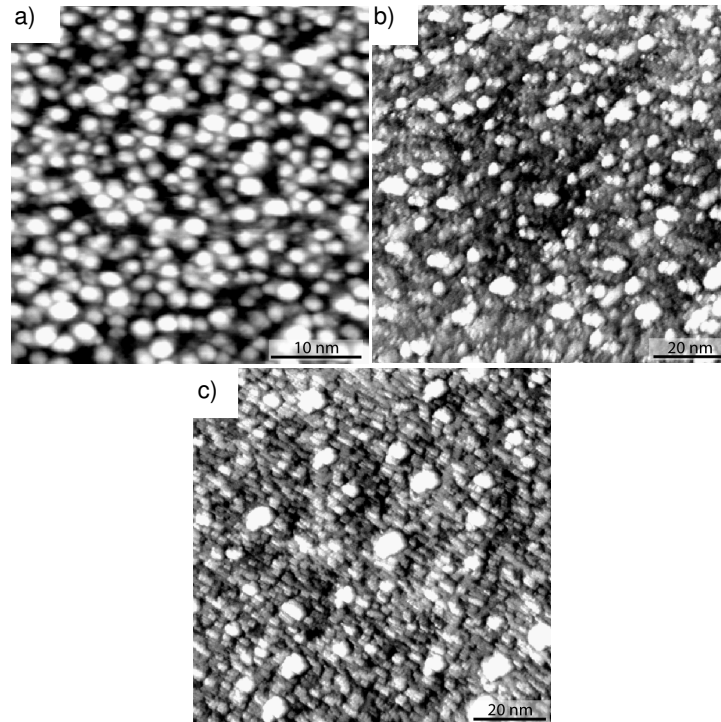


Abb. 4.5.1.1

Serie von STM-Bildern einer mit 1 ML Bi und anschließend 0,5 ML Mn beschichteten Si(100)-Probe.

- a) Direkt nach dem Beschichten mit Mangan.
- b) Nach dem Heizen auf 450 °C.
- c) Nach dem Heizen auf 490 °C

Bismutzwischenschicht funktioniert. Um zu kontrollieren, ob eine Formierung einer geschlossenen Manganschicht bei den hier verwendeten Temperaturen möglich ist, wurden Proben hergestellt, bei denen mehr Mangan auf die Oberfläche aufgebracht wurde.

Im Folgenden werden die Proben nicht der Reihenfolge nach erläutert, sondern ausgewählte Beispiele sortiert nach den Probeneigenschaften und den Ausheiltemperaturen vorgestellt. In Abb. 4.5.1.2 sind zwei verschiedenen Proben dargestellt, die auf 480 °C geheizt wurden. Beide bestehen aus einer 1,3 ML dicken Bismutzwischenschicht, auf die 1,5 ML Mangan aufgedampft wurden. Das unterschiedliche Aussehen der Oberflächen kann nur bedingt auf die Scannparameter zurückgeführt werden. Die Tunnelspannung war für beide Fälle nahezu identisch (-1,51 V und -1,55 V). Einzig der Tunnelstrom, auf den geregelt wurde, war im Fall der Abb. 4.5.1.2 b) um 0,108 nA höher als bei a) (0,078 nA). Bei genauerer Betrachtung der Clustergröße findet man, dass die bedeckten Flächen 50% für a) und 48% für b) nahezu gleich sind. Die beiden Proben stehen also nicht im Widerspruch zu einander. Ob die strukturellen Unterschiede nun durch den Tunnelstrom oder durch minimale Unterschiede in der Ausheiltemperatur (± 3 K) bedingt sind kann nicht gesagt werden. Auf beiden Proben finden sich aber definitiv keine der bisher dem MnSi oder anderen Mangansiliziden zugeordneten Strukturen. Das heißt, dass auch hier die Silizidbildung durch die Anwesenheit des Bismut auf der Si(100)-Oberfläche verhindert wird. Die erwünschte Bildung von glatten Manganschichten wird allerdings nicht beobachtet. Das Substrat oder die Bismutschicht ist in

4.5 Analyse dünner Manganschichten auf mit Bismut beschichteten Silizium(100)-Oberflächen

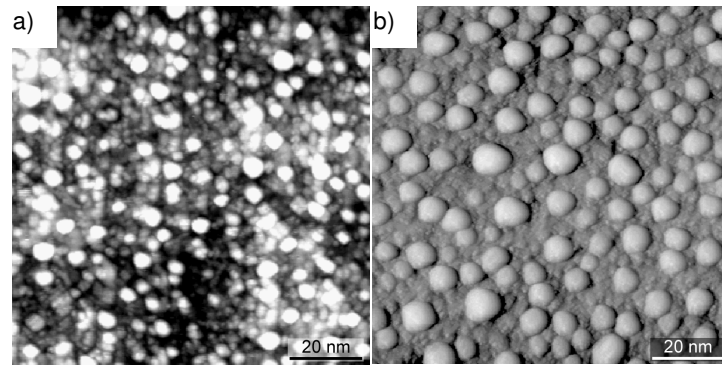


Abb. 4.5.1.2

- a) STM-Aufnahme einer 1,5 ML Mn/1,3 ML Bi/Si(100)-(2x1) Probe, die 5 min bei 480°C ausgeheilt wurde. Zu sehen sind größere Cluster, die aus Mangan bestehen. Zwischen diesen Clustern ist weder die Bismutschicht noch das Substrat sichtbar.
- b) STM-Aufnahme einer 1,5 ML Mn/1,3 ML Bi/Si(100)-(2x1) Probe, die 5 min bei 480°C ausgeheilt wurde. Gemischt aus z-Bild und der Ableitung. Auch hier ist weder das Bismut noch das Substrat zu erkennen.

beiden Fällen nicht sichtbar. Da sich bei dem fünfminütigen Ausheilen der Probe bei 480°C keine glatte Manganschicht oder wenigstens atomar strukturierte Inseln gebildet haben, wurden längere Ausheilzeiten verwendet. Eine Erhöhung der Ausheiltemperatur wurde erst später vorgenommen, um zu verhindern, dass zuviel Bismut von der Oberfläche desorbiert. In Abbildung 4.5.1.3 sind die beiden Proben dargestellt, nachdem sie längere Zeit bei 480°C ausgeheilt wurden. Die in Abb. 4.5.1.3 dargestellte Probe ist die gleiche wie die in Abb. 4.5.1.2 a), aber nach dem Heizen auf 480°C für 15 min. Es sind klare atomare Strukturen auf der Probenoberfläche zu erkennen. Es werden vor allem zwei Bereiche

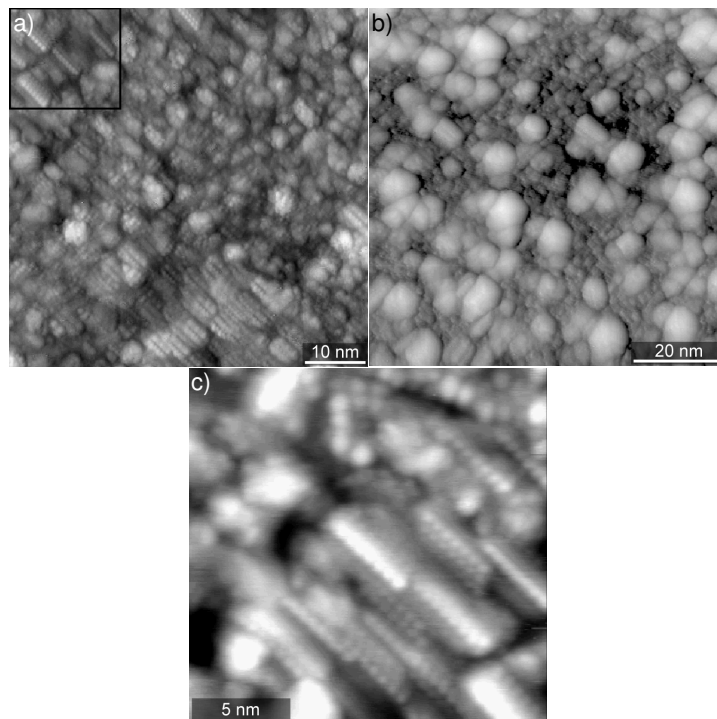


Abb. 4.5.1.3

- a) Probe aus Abb. 4.5.1.2 a) nach dem Heizen auf 480°C für 15 min. Der schwarze Kasten markiert die Lage des Ausschnittes der in c) gezeigt ist.
- b) Probe aus Abb. 4.5.1.2 b) nach dem Heizen auf 480°C für 25 min.
- c) Ausschnitt aus a).

Silizium(100)-Oberflächen

unterschieden. Erstens der mit dem schwarzen Kasten markierte, und zweitens Bereiche die zwar Strukturen zeigen, die aber weder zum MnSi, noch zum Bi, noch zum Si(100) passen. In dem vergrößerten Ausschnitt in c) ist zu sehen, dass es sich bei den zuerst genannten Strukturen um eine hexagonale Oberfläche handelt. Es ist wahrscheinlich, dass es sich bei diesen Strukturen um MnSi handelt. Die atomaren Abstände stimmen mit 0,68 nm gut mit denen einer MnSi(111)-Oberfläche überein. Eine Auswertung von AES-Daten ergibt, dass auf der Probe noch 0,98 ML Bi vorhanden sind. Dieser Wert kann durchaus die Menge an Bi unterschätzen, und zwar dann, wenn noch Bi unter dem MnSi oder Manganclustern vorhanden ist. Die Reduzierung der Bismutmenge wird auf ein Abdampfen von der Oberfläche auf Grund der hohen Ausheiltemperaturen zurückgeführt. Durch diesen Prozess wird Silizium für das Mangan erreichbar und ermöglicht eine Silizidbildung. Die in Abb. 4.5.1.3 b) dargestellte Probe wurde für 25 min auf 480°C geheizt. Es sind immer noch unstrukturierte Cluster sichtbar. Zwischen diesen Clustern sind Regionen erkennbar, die Strukturen zeigen, die auf Bismut hinweisen. Das heißt, hier ist noch nicht ausreichend Bismut von der Oberfläche desorbiert, so dass das Mangan kein Silizium aus der Substratoberfläche erreichen kann. Eine Erklärung für die Unterschiede der beiden Proben kann mit den bisherigen Daten nicht gegeben werden. Die Möglichkeit einer Abweichung der Ausheiltemperatur erscheint insofern unwahrscheinlich, da in diesem Fall zufällig die Formierungstemperatur gerade erreicht, bzw. gerade nicht erreicht wird.

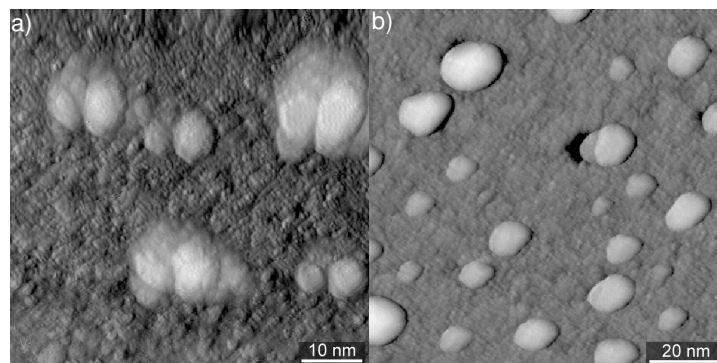


Abb. 4.5.1.4

- a) 1,5 ML Mn/1,3 ML Bi/Si(100)-(2×1) Probe, die für 25 min auf 480°C und für 5 min auf 520°C geheizt wurde. Auf den Inseln sind schwach atomare Strukturen zu erkennen, zwischen den Inseln erkennt man die Strukturen der teilweise mit Bismut bedeckten Substratoberfläche.
- b) 1,5 ML Mn/1,3 ML Bi/Si(100)-(2×1) Probe, die für 15 min auf 480°C und für 5 min auf 510°C geheizt wurde. Auf den Inseln sind sehr schwach atomare Strukturen zu erkennen. Zwischen diesen sind die Strukturen des mit Bismut bedeckten Substrats sichtbar.

Da es keine gravierenden Unterschiede zwischen den Proben gibt, zeigt die Abb. 4.5.1.4. Beide Oberflächen zeigen nach einem weiteren Heizschritt Inseln, die, zumindest andeutungsweise, atomare Strukturen zeigen. Auch wenn die Zwischenräume zwischen den Inseln jeweils auf Bismut hindeuten, so zeigen AES-Messungen, dass sich die Bismutmenge erwartungsgemäß weiter verringert hat (0,75 ML in a) und 0,63 ML in b)).

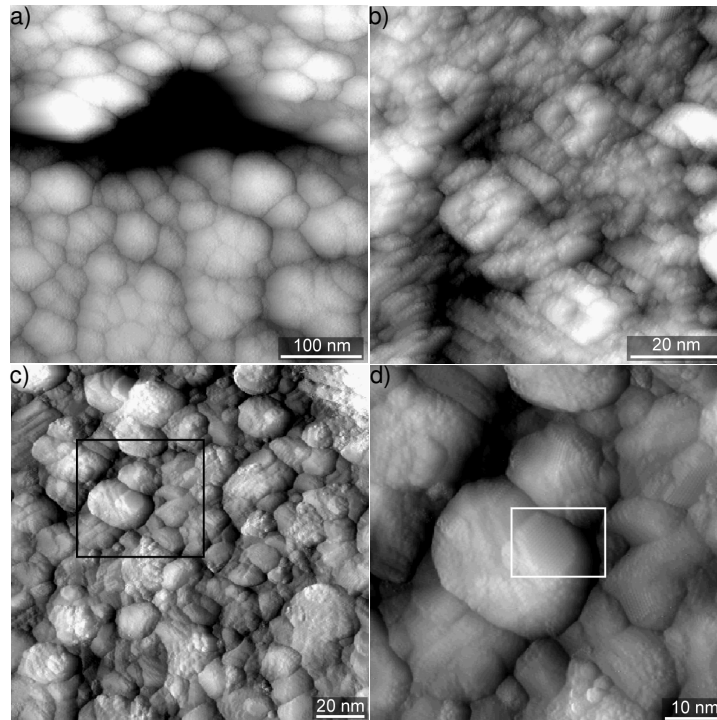


Abb. 4.5.1.5

STM-Bilder einer 5 ML Mn/1 ML Bi/Si(100)-(2x1) Probe, nach verschiedenen Heizschritten.

- Nach dem Heizen auf 450°C.
- Nach dem Heizen auf 480°C.
- Nach dem Heizen auf 530°C.
- Ausschnitt (schwarzer Kasten) aus c). Der mit dem weißen Kasten markierte Bereich wird in Abb. 4.5.1.6 a) dargestellt.

Aufschlussreicher sind die Untersuchungen an einer mit wesentlich mehr Mangan beschichteten Probe. Es wurden 5 ML Mangan auf einer mit 1 ML Bismut bedeckten Si(100)-(2x1) Oberfläche deponiert. Abbildung 4.5.1.5 zeigt die Veränderung der Probenoberfläche nach dem Heizen mit 450°C (a)), mit 480°C (b)) und mit 530°C (c) und d)) für jeweils 5 min. In a) sind große, unstrukturierte Cluster zu erkennen. Es werden keine Hinweise gefunden, ob es sich um Mangan oder ein Mangansilizid handelt. Die bisherigen Beobachtungen lassen vermuten, dass es Mangan ist. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass die Cluster einen polykristallinen Charakter haben. Nach dem Heizen auf 480°C (b)) finden sich dagegen Formationen, die atomare Strukturen zeigen, die denen von MnSi sehr ähnlich sind. Abstandsmessungen an diesen Formationen stellten sich jedoch als problematisch dar, da hauptsächlich die Inselränder strukturiert sind. Es liegt die Vermutung nahe, dass es sich bei diesen Formationen um MnSi handelt. Das heißt, dass hier bereits ausreichend Bismut von der Substratoberfläche desorbiert ist, um eine MnSi Bildung zu ermöglichen. Weiteres Heizen der Probe auf 530°C (c)) führt zu großflächigen Inselformationen, die vielfach atomar glatte Flächen besitzen. In d) ist eine solche Fläche mit einem weißen Kasten markiert, aber auch andere Bereiche, z.B. der darüber zeigen atomare Strukturen, die auf MnSi hinweisen. In Abb. 4.5.1.6 a) wird die Region im weißen Kasten vergrößert dargestellt. Die hexagonalen Strukturen weisen auf eine MnSi(111)-Oberfläche

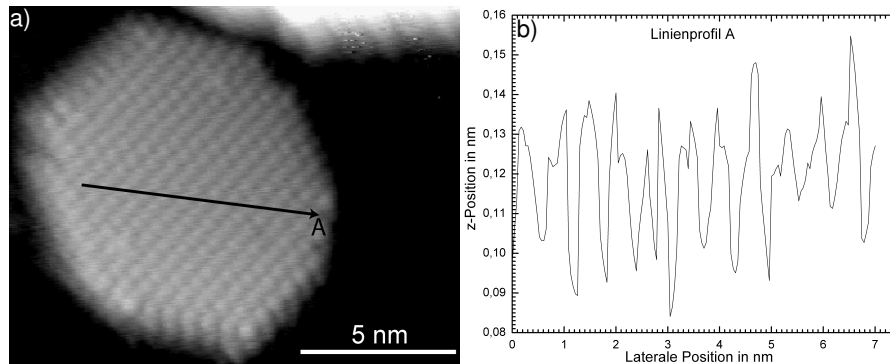


Abb. 4.5.1.6

- a) Ausschnitt aus Abb. 4.5.1.5 d). Der Pfeil markiert die Lage des Linienprofil A in b).
- b) Linienprofil A, der atomare Abstand beträgt 0,635 nm.

hin. Das Linienprofil entlang des Pfeils A unterstützt diese Vermutung. Die atomaren Abstände betragen in der Richtung des Linienprofils 0,635 nm (theor. 0,645 nm).