

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen des SFB 290 im Teilprojekt B10 entstanden und beschäftigt sich hauptsächlich mit dem Wachstum von Mangan auf unterschiedlichen Si(100)-Substraten.

Das System Mangan auf Silizium wird schon seit längerem untersucht. Bereits Mitte der 1960iger Jahre wurden die halbleitenden Eigenschaften von $\text{MnSi}_{1,73}$ entdeckt (z.B. [Samsonov1964]), allerdings unter komplett anderen Bedingungen (kein UHV). Dabei stand meistens die Verwendung in integrierten Schaltkreisen im Mittelpunkt des Interesses. In diesem Rahmen entstanden zumeist Untersuchungen von so genannten höheren Siliziden, wie z.B. an Mn_4Si_7 [Mogilatenko2003]. Eine weitere Einsatzmöglichkeit von Mangan auf Silizium zeigt sich mit der Veröffentlichung von Prinz [Prinz1998]. In dieser wird die Möglichkeit beschrieben, spinpolarisierende Eigenschaften von Materialien auszunutzen, um elektrische Bauteile zu realisieren (spin-electronics oder spintronics). Die Spinpolarisation in ferromagnetischen Materialien ist in Abbildung 1.1 skizziert. Für „spin-electronic“-

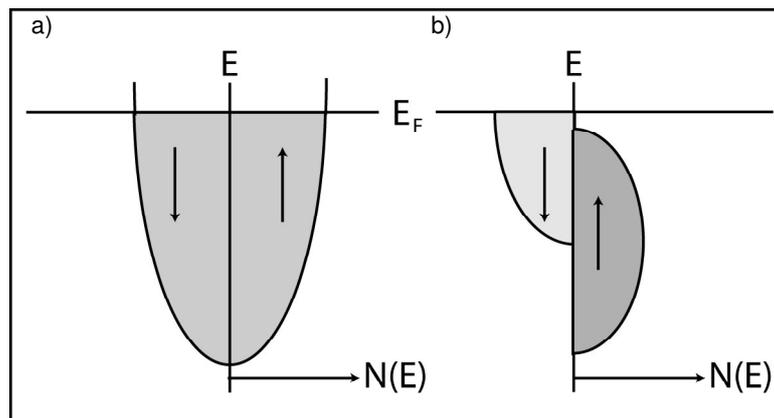


Abb. 1.1

Schematische Darstellung der Dichte der elektronischen Zustände:

- a) in einem normalen Metall und
- b) in einem ferromagnetischen Metall. Die Majoritäts-Spinzustände sind vollständig gefüllt.

Anwendungen werden spinpolarisierte Elektronen in ein halbleitendes Material injiziert und damit z.B. Spintransistoren realisiert [Datta1990]. Da es für solche „spintronics“ bereits konkrete Vorschläge für Applikationen gibt, besteht hier ein Bedarf an geeigneten Materialien. In vielen bisherigen Ansätzen entsteht das Problem von nicht angepassten Impedanzen zwischen dem magnetischen Metall und dem nicht magnetischen Halbleiter [Schmidt2001]. Diese limitieren die erreichbare Spinpolarisation in dem nichtmagnetischen Halbleiter. Ein Lösungsansatz hierfür wäre, den spinpolarisierten Elektronenstrom über eine Schottky-Barriere vom magnetischen Metall in den Halbleiter zu injizieren [Rashba2000]. An dieser Stelle entsteht ein weiteres Problem. Bei Systemen die schlecht gitterangepasst sind, reduziert eine höhere Streuwahrscheinlichkeit der Elektronen die Effizienz der Spininjektion.

Epitaktisch auf dem Silizium aufgewachsenes Mangansilizid kann diesen kritischen Punkt verhindern. Auch wenn die Curietemperatur von MnSi mit nur 29 K [Thessieu1995] zu niedrig ist für kommerzielle Anwendungen, so ist das System in erster Linie als Modellsystem interessant, um daran oberflächenphysikalische Untersuchungen durchzuführen und grundlegende Problematiken zu identifizieren.

Die Wichtigkeit und Notwendigkeit der im Rahmen dieser Arbeit angefertigten Untersuchungen zeigen sich deutlich im Interesse an dem System Mangan auf Si(100) der am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft beheimateten Theoriearbeitsgruppe um Prof. Dr. Scheffler.

In einem gemeinsamen Projekt war die Zielsetzung das System sowohl mit experimentellen als auch mit theoretischen Methoden zu studieren. Anlass hierfür war auch die mögliche Verwendung von Mangan oder MnSi auf Si(100) als „spin injector“. Da bisher nur dicke Manganschichten auf Si(100) untersucht wurden und das Si(100) auf Grund seiner einfachen Symmetrie mit theoretischen Methoden gut zu handhaben ist [Kratzer1998, Pehlke1995 und Pehlke1999], fiel die Wahl des Substrates auf Si(100) und 4° fehlorientiertes Si(100). Im Rahmen dieser Kooperation sollten experimentell die Formierungsprozesse des Mangans auf den eben genannten Substraten identifiziert werden. Erste theoretische Ergebnisse der

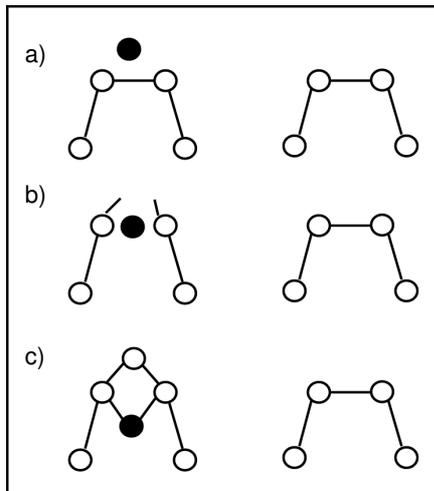


Abb. 1.2
Schematische Darstellung des Bildungsprozesses für 1 ML MnSi auf der Si(100)-Oberfläche, nach [Wu2004]. Auf der rechten Seite bleiben die Dimere unverändert.

- Das Manganatom (schwarz) trifft auf die Oberfläche.
- Ein Siliziumdimer wird unter einem Energieaufwand von 0,3 eV aufgebrochen.
- Das Manganatom sinkt auf einen Zwischengitterplatz. Dabei verringert es seine Energie.

AG Scheffler sind in [Wu2004] veröffentlicht. Sie zeigen, dass zwei Monolagen Mangansilizid auf der Si(100)-(2×1) theoretisch epitaktisch aufwachsen, dort ferromagnetisch ordnen und eine Spinpolarisation von bis zu 50% erreichen. Diese Vorhersagen bestärkten die Bemühungen, epitaktische Schichten herzustellen. Für die Bildung dieser zwei Monolagen wird ein möglicher Bildungsprozess in [Wu2004] vorgestellt. In Abb. 1.2 wird die Bildung für eine Monolage skizziert, für die zweite Monolage ist ein Ko-Verdampfen von Mangan und Silizium notwendig. Der Prozess beginnt mit einem auf die Oberfläche treffenden Manganatom, das direkt oder nach Diffusionsprozessen ein Siliziumdimer aufbricht. Für das Aufbrechen ist eine Energie von 0,3 eV notwendig. Das Manganatom sinkt dann zwischen Siliziumatomen auf einen Zwischengitterplatz, wobei seine Energie kontinuierlich sinkt.

Die Dissertation von Frau Dr. Deffke [Deffke2002] stellt einen weiteren Ausgangspunkt für das Interesse an den Manganschichten dar. Dort wurde versucht epitaktische MnBi-Schichten herzustellen, da MnBi ein aussichtsreicher Kandidat

für den Einsatz in der magnetooptischen Datenspeicherung ist. Die Problematik des Materialsystems wurde unter anderem in der Dissertation von U. Rüdiger [Rüdiger1997] und von Guo et al. [Guo1993] behandelt und besteht einerseits aus dem Auftreten eines strukturellen Phasenübergangs und andererseits aus einem anormalen Temperaturverhalten des Koerzitivfeldes. Um diese Probleme zu umgehen wurde versucht epitaktische MnBi-Schichten auf Si(111) herzustellen. Auch hier wurden Hinweise auf eine Silizidbildung gefunden [Ctistis2001, Deffke2002]. Auf dieser Grundlage wurden die Untersuchungen des Wachstums von Mangan auf Si(111)-(7×7) und Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$:R30°Bi begonnen [Schwinge2005_Dis], die eine Silizidbildung bestätigten. In der hier vorliegenden Arbeit werden die Untersuchungen zum Wachstum von Mangan auf Si(100) deshalb mit Blick auf die epitaktischen MnBi-Schichten, zusätzlich mit Bismut als Zwischenschicht oder „surfactant“ präpariert, mit dem Ziel untersucht die Silizidbildung damit zu unterdrücken.

In der Literatur finden sich nur wenige Studien zur Mangansilizidbildung und die meisten befassen sich mit dem Wachstum auf Si(111). Auf der Si(111)-Oberfläche sind Ergebnisse von [Evans1996], [Kumar2004] und [Schwinge2005] publiziert. Während die letzten beiden von MnSi und Mn₅Si₃ berichten, finden Evans *et al.* glatte Manganfilme. Ctistis *et al.* [Ctistis2002] berichten von Mn₅Si₃ auf einer Bi-rekonstruierten Si(111)-Oberfläche.

Auf der Si(100)-Oberfläche wurden Untersuchungen an dickeren Filmen (>240 nm) von Wang *et al.* [Wang1997] und Zhang *et al.* [Zhang1991] vorgenommen. Wang *et al.* präparierte seine Schichten mittels „solid phase reaction“, d.h. er deponierte Mangan auf der Oberfläche und erwärmte das System. Temperaturen um 400°C bewirkten die Bildung von MnSi. Bei 600°C wurde das Auftreten von MnSi_{1,7} beobachtet.

Zhang *et al.* deponierten Mangan auf dem Silizium bei einem Basisdruck von 10⁻⁶ mbar und erhitzen es *ex-situ* unter einer Stickstoffatmosphäre. Bei diesen Untersuchungen wurden in der sich bildenden Schicht mehrere verschiedene Silizide gefunden. Nach dem Heizen auf 380°C sind in der Schicht MnSi, Mn₅Si₃ und Mn₃Si vorhanden, während das Heizen auf 430°C zu Schichten führt, die zwar ebenfalls die zuvor genannten Silizide enthalten, nach weiterem Heizen allerdings nur noch aus MnSi bestehen.

Untersuchungen an MnSi_{1,7} auf Si(100) werden in [Lian1986], [Teichert2001] und [Mogilatenko2003] beschrieben, sie gehen aber nicht auf die Formationsprozesse oder den Wachstumsstart ein und verwenden Manganbedeckungen wesentlich größer als 2 ML.

Medeiros-Ribeiro *et al.* [Medeiros-R.1998] berichten über ein bimodales Wachstum von Germanium auf Si(100). Daran angelehnt wird in der vorliegenden Arbeit die Koexistenz von MnSi und Mn₅Si₃ auf Si(100) diskutiert.

Auch wenn in dieser Arbeit nicht weiter auf die magnetischen Eigenschaften von Mangansilizid eingegangen wird, sollen die Untersuchungen dazu hier kurz erwähnt werden. Unter anderem fanden Y. Ishikawa *et al.* eine spiralförmige Spinstruktur, bei 4,2 K

[Ishikawa1976]. Diese zeigt eine Periodizität von 180 Å in der (111)-Richtung. Für Mn-Si-C-Verbindungen fand Gajdzik *et al.* eine Curietemperatur von 360 K [Gajdzik1996].

Ein anderer Ansatz zum Erreichen einer hohen Spinpolarisation wird mit der Verwendung von MnGe-Verbindungen verfolgt, die eine höhere Curietemperatur besitzen als MnSi [Zeng2003], aber nur bedingt mit der weit verbreiteten Siliziumtechnologie kompatibel ist. Welcher der Ansätze sich durchsetzt bleibt abzuwarten.

Die Untersuchung der Temperaturabhängigkeit des Schmelzpunktes von Bi-Inseln basiert auf Vorarbeiten im Rahmen einer Diplomarbeit [Sommer2002], in der die Möglichkeit der Herstellung von glatten Bismutschichten als Template für das MnBi-Wachstum studiert wurde. Hierbei ergab sich, dass das Bismut auf der Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -R30°Bi Oberfläche Inseln mit bevorzugten Größen bildet.

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst die verschiedenen untersuchten Systeme vorgestellt (Kap.2). Die folgenden Abschnitte befassen sich mit den theoretischen Grundlagen und den experimentellen Methoden (Kap.3). Die experimentellen Ergebnisse beginnen mit den Untersuchungen der verwendeten Substrate (Kap. 4.1 und 4.2). Im Weiteren wird auf die Beobachtungen nach dem Abscheiden des Mangans und nach verschiedenen Ausheilvorgängen auf den unterschiedlichen Substraten eingegangen (Kap. 4.3 bis 5.5). Ein Vergleich der Beobachtungen sowie die Schlussfolgerungen daraus werden in Kapitel 4.6 präsentiert. Die Untersuchungen der Abhängigkeit des Schmelzpunktes von Bismutinseln von der Bismutbedeckung werden in Kapitel 4.7 vorgestellt. Den Abschluss dieser Dissertation bilden die Zusammenfassung und ein Ausblick.