

# 1. Einleitung

Die Physik dünner Schichten erfährt als wichtiges Teilgebiet der Festkörperphysik ein ungebrochen großes Interesse. Man befindet sich hier im Grenzgebiet zwischen dem ausgedehnten Kristallgitter und der Festkörperoberfläche mit der Grenze zum Vakuum, wo der Einfluss von Oberflächen- und Grenzflächeneffekten spürbar wird. Dadurch ergeben sich neuartige physikalische Effekte, die neben der Frage nach einem grundlegenden Verständnis die Dünnschichtphysik auch für technologische Anwendungen relevant werden lässt. Neuere Entwicklungen betreffen niedrigdimensionale Halbleiterstrukturen im Nanometerbereich, die neuartige Bauelemente der Optoelektronik in Aussicht stellen, wie z.B. Halbleiterlaser auf der Basis von Quantenpunkt-Strukturen [1]. Auch die in kommerziellen Speichermedien eingesetzten magnetischen Materialien werden intensiv untersucht, da in dünnen Schichten vom Volumenmaterial abweichende Magnetisierungszustände (Anisotropien) auftreten können (z.B. senkrecht zur Oberfläche stehende Magnetisierungsachsen [2, 3, 4]). Die Kombination von Halbleitern mit Ferromagnetika in epitaktischen Dünnschichtsystemen eröffnet neuartige Anwendungen in der Spintronic, wo durch Spininjektion vom ferromagnetischen Material in den Halbleiter auch die Spininformation des Elektrons als zusätzlicher Freiheitsgrad für Schaltvorgänge genutzt werden soll. Aktuelle Anwendung der Spintronic sind Informationsspeicher (MRAM's) auf der Grundlage des GMR-Effektes (engl. Giant Magnetoresistant [5]), oder das Schalten von Magnetisierungszuständen durch äußere elektrische Felder in einem Feldeffekt-Transistor [6].

Aufgrund der Gitterfehlpassung (engl. Misfit) zwischen Film und Substrat bei

heteroepitaktischem Wachstum treten sehr hohe mechanische Spannungen auf. Sie liegen ein bis zwei Größenordnungen über den Werten für die makroskopische Reißfestigkeit gewöhnlicher Materialien und können drastische Konsequenzen hinsichtlich der strukturellen Integrität der Filme bewirken. Beispielsweise wird in der Literatur argumentiert, dass der Übergang von einer 2D-Benetzungsschicht zu 3D-Inselbildung in Stranski-Krastanow-Systemen durch den Einfluss mechanischer Spannungen verursacht wird [7, 8, 9, 10]. Aber auch physikalische Eigenschaften, wie z.B. die magnetoelastische Kopplung, werden in dünnen (ferromagnetischen) Filmen durch mechanische Spannungen verändert. Dabei kommt es durch die Verzerrung der Gitterzelle zu einer drastischen Veränderung der magnetoelastischen Kopplungskonstanten, die sogar einen Vorzeichenwechsel zeigt [11, 12, 13].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die gegenseitige Wechselwirkung von mechanischen Spannungen, epitaktischem Wachstum, Interdiffusion und magnetischen Eigenschaften dünner Schichten mit einer eigens dafür entwickelten und aufgebauten Ultrahochvakuum(UHV)-Experimentieranlage untersucht. Das zentrale Instrument ist eine UHV-Biegebalkenmesseinrichtung, mit der mechanische und magnetische Kenngrößen *in situ* quantitativ untersucht werden können [14]. Zum einen kann die intrinsische Filmspannung während der Materialdeposition gemessen werden, was eine direkte Aussage bezüglich der involvierten elastischen Energie erlaubt. Andererseits lässt sich diese Methode auch als Magnetometer einsetzen, um Magnetisierung, magnetische Anisotropie und magnetoelastische Kopplung zu vermessen [15]. Seit kurzem bietet die UHV-Anlage außerdem die Möglichkeit, die Morphologie der gewachsenen Filme mit Rastertunnelmikroskopie (RTM, engl. STM — Scanning Tunneling Microscopy) *in situ* zu charakterisieren. Durch Kombination dieser Methoden konnte anhand ausgewählter Materialsysteme der Einfluss mechanischer Spannungen auf Wachstum und magnetoelastische Kopplung in heteroepitaktischen dünnen Filmen untersucht werden.

Ge/Si(001) ist ein vielstudiertes Stranski-Krastanow-System, bei dem das Wachstum einer anfänglichen Benetzungsschicht nach wenigen Monolagen (ML) von 3D-Inselbildung abgelöst wird. Dabei wird die hohe mechanische Spannung in der Benetzungsschicht als ursächlich für den beobachteten 2D-3D-Übergang angesehen, weil 3D-Inseln

die Möglichkeit zur Gitterrelaxation bieten und damit die Reduktion der involvierten elastischen Energie ermöglichen. Jüngere Untersuchungen stellen diesen thermodynamischen Erklärungsansatz in Frage, und führen den Übergang auf kinetische Einflüsse zurück [16, 17, 18]. Eine Möglichkeit für weitergehende Untersuchungen stellen  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ -Legierungsfilme auf Si(001) dar, weil hier durch Veränderung der Si-Konzentration eine Variation der Gitterfehlانpassung und damit eine kontrollierte Reduktion der elastischen Energie in den Filmen möglich ist. Man erwartet in diesem Fall beispielsweise eine Erhöhung der Dicke der Benetzungsschicht, weil spannungsabbauende Mechanismen wie 3D-Inselbildung (oder der Einbau von Versetzungen) erst später energetisch relevant werden.

Das System Fe/MgO(001) ist ein Modellsystem für den Einfluss mechanischer Spannungen auf magnetoelastische Eigenschaften von bcc Eisen. In unserer Arbeitsgruppe konnte in der Vergangenheit anhand 100 nm dicker Fe-Schichten der experimentelle Nachweis erbracht werden, dass die magnetoelastische Kopplungskonstante  $B_1$  von der Gitterverzerrung  $\epsilon$  des Eisenkristalls abhängt und bei noch relativ kleinen Verzerrungen von  $\epsilon \approx 0,3\%$  ein Vorzeichenwechsel auftritt [19]. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, diese Befunde in den Schichtdickenbereich von wenigen Nanometern auszudehnen und den Verzerrungsbereich zu erweitern. Mit einem seit kurzem unserer Arbeitsgruppe zur Verfügung stehenden Elektromagneten, der Magnetfelder bis 0,7 T liefert, können die Eisenfilme auch entlang der schweren Fe[110]-Richtung bis zur Sättigung magnetisiert werden, womit auch die zweite Kopplungskonstante  $B_2$  einer Messung zugänglich ist. Damit kann der funktionale Zusammenhang zwischen der magnetoelastischen Kopplung (unter dem Einfluss von Termen höherer Ordnung) und der Gitterverzerrung von Eisen detailliert experimentell erfasst und mit existierenden theoretischen Arbeiten [20, 21, 22] verglichen werden.

In diesem Zusammenhang ist auch das Wachstum von Eisen auf Galliumarsenid(001) interessant, weil aufgrund des Misfit von  $-1,36\%$  die Möglichkeit der Herstellung von Fe-Filmen mit negativer Gitterverzerrung besteht. Das erlaubt erstmals die Ausdehnung der Untersuchungen zur magnetoelastischen Kopplung auf den Bereich negativer Verzerrungen. Fe/GaAs(001) ist außerdem ein Modellsystem für die Integration von

Metallen mit Halbleitern (Spintronic). In den vergangenen Jahren ist dieses Materialsystem deshalb Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen gewesen, wobei wegen erhöhter Beweglichkeit der Adatome die Deposition von Eisen überwiegend bei 175°C Substrattemperatur durchgeführt wird [23, 24]. Bei dieser Temperatur kommt es aber zu einer starken Vermischung von Film- und Substratmaterial. Es bildet sich eine Interdiffusionsschicht mit einer Dicke von einigen Nanometern aus, die ein reduziertes magnetisches Moment zeigt und die Spin-Injektion in den Halbleiter stark beeinträchtigt [25, 26]. Wie sich herausgestellt hat, ist die intrinsische Spannungsmessung eine interessante und aussagekräftige Methode, um das Ausmaß der Interdiffusion — z.B. bei Raumtemperatur hergestellter Fe/GaAs-Filme — zu studieren.

Die Gliederung der vorliegenden Dissertationsschrift ist so angelegt, dass zunächst eine Einführung in Wachstum, intrinsische Spannung und magnetoelastische Kopplung epitaktischer Filme gegeben wird. Anschließend wird das Biegebalkenmessprinzip erläutert und in Kapitel 3 der experimentelle Aufbau der verwendeten Mehrkammer-Ultrahochvakuumanlage vorgestellt. Die damit gewonnenen Resultate werden in den Kapiteln 4 und 5 präsentiert, um den beiden thematischen Schwerpunkten der Arbeit — Filmwachstum und Filmmagnetismus — jeweils ein eigenes Gewicht zu geben.