

Enrico Schierle

Antiferromagnetism in Thin Films
Studied by
Resonant Magnetic Soft X-Ray Scattering



im Fachbereich Physik
der Freien Universität Berlin
eingereichte Dissertation

2006

1. Gutachter:
Prof. Dr. Dr. h.c. G. Kaindl

2. Gutachter:
Prof. Dr. P. Fumagalli

Tag der Disputation: 5. Februar 2007

Abstract

This thesis presents a study of magnetic structures in thin and ultra-thin antiferromagnetic films by resonant magnetic soft x-ray diffraction. This rather new method provides a huge magnetic sensitivity that allows to characterize the temperature-dependent magnetization of the individual atomic layers of a thin film as well as magnetic short-range correlations in films of only two layers thickness far above the ordering temperature. The present studies were carried out by means of a novel UHV-diffractometer, developed and built within the framework of this thesis. This new apparatus for soft x-ray scattering is characterized by excellent vacuum conditions and a high flexibility concerning sample environments and detectors as demonstrated in the present thesis by scattering experiments at temperatures as low as 5 K and the implementation of a novel position sensitive detector.

With excellent vacuum conditions of the setup, in-situ prepared holmium films could be studied, revealing finite-size effects on the ordering temperature as a consequence of reduced film thickness and lateral confinement of the magnetic structure.

Very detailed studies were performed on ultra-thin films of the antiferromagnetic semiconductor EuTe, a prototypical Heisenberg system. In this case, the magnetic reflection recorded at the Eu- M_2 resonance occurs at the Brewster angle, which leads to an enormous magnetic contrast with signal-to-background ratios as large as 10^5 . The contrast allows to record magnetic diffraction patterns with pronounced magnetic Laue oscillations that allow a complete reconstruction of temperature-dependent magnetization profiles, for the first time with atomic-layer resolution across an entire film. The results are in excellent agreement with 30-years-old calculations by Binder and Hohenberg and are reproduced in detail by realistic calculations for EuTe.

Even above the ordering temperature of EuTe, magnetic scattering signals of very high quality were observed. These are due to short-range magnetic correlations and could be studied for films down to a thickness of 2 monolayers, covering length scales between the macroscopic domain size of ≈ 1000 Å and the nearest-neighbor spacing. The thickness dependence of the temperature-dependent decay of the short-range correlations reveals a dimensional crossover between 4 and 3 monolayers, which is compared to that in Ho films, occurring between 16 and 11 monolayers. These results suggest a general scaling with the length of the antiferromagnetic period, which is 2 monolayers in the case of EuTe and ≈ 10 monolayers in the case of Ho.

Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation untersucht den Magnetismus dünner und ultradünner antiferromagnetischer Schichten mittels resonanter magnetischer Röntgenstreuung im weichen Röntgenbereich. Durch die Anwendung dieser jungen Methode wurden detaillierte Studien ermöglicht, die von der Bestimmung von Magnetisierungsprofilen mit atomarer Auflösung bis hin zur Beobachtung kurzreichweitiger magnetischer Korrelationen in nur wenigen atomaren Lagen weit oberhalb der Ordnungstemperaturen reichen. Für die hier vorgestellten Untersuchungen wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuartiges UHV-Diffraktometer konzipiert und fertiggestellt. Diese Apparatur zur Durchführung der besonders anspruchsvollen Streuexperimente im weichen Röntgenbereich zeichnet sich durch ihre sehr guten Vakuumbedingungen und eine hohe Flexibilität bezüglich möglicher Probenumgebungen und Detektorsysteme aus, was hier durch Experimente bei Proben Temperaturen von nur 5 K und am Beispiel eines neuartigen ortsauflösenden Detektors demonstriert wird.

Die hervorragenden Vakuumbedingungen der Apparatur erlaubten die Untersuchung der Abnahme der Ordnungstemperatur in-situ präparierter Holmiumfilme als Folge reduzierter Schichtdicke und lateraler Einschränkung der kohärenten magnetischen Struktur.

Besonders detaillierte Studien konnten an ultradünnen Schichten des antiferromagnetischen Halbleiters Europiumtellurid durchgeführt werden, der ein klassisches Heisenbergsystem darstellt. Der magnetische Beugungsreflex dieser epitaktischen Schichten erscheint an der ausgenutzten M_1 Absorptionskante praktisch untergrundfrei am Brewsterwinkel, was zu Signal zu Untergrundverhältnissen von bis zu 10^5 führt. Dieser enorme magnetische Kontrast erlaubt die Messung magnetischer Laueprofile mit deutlich ausgeprägten Nebenmaxima, was erstmalig die vollständige Rekonstruktion von magnetischen Tiefenprofilen mit atomarer Ortsauflösung über eine gesamte Probe ermöglicht. Form- und Temperaturabhängigkeit dieser Magnetisierungsprofile sind in hervorragender Übereinstimmung mit den vor mehr als 30 Jahren publizierten Rechnungen von Binder und Hohenberg und neueren realistischen Simulationen des magnetischen Verhaltens von EuTe.

Auch oberhalb der Ordnungstemperatur der untersuchten Halbleiterschichten konnten magnetische Streusignale von hoher Qualität beobachtet werden, insbesondere von nur zwei atomaren Lagen EuTe - dem kleinsten möglichen antiferromagnetischen System. Diese Streusignale, die kurzreichweitigen magnetischen Korrelationen zuzuordnen sind, ermöglichten es, den Zerfall der Bereiche korrelierter Spins von der ursprünglichen Domänengröße von ungefähr 1000 \AA bis hin zu den mikroskopischen Abständen benachbarter Ionen zu verfolgen. Die Schichtdickenabhängigkeit dieses Zerfalls offenbarte einen charakteristischen Wechsel der Temperaturabhängigkeit zwischen 4 und 3 atomaren Lagen EuTe, der einem Übergang zu zweidimensionalem Verhalten zugeordnet wird. Dieser Wechsel im kritischen Verhalten konnte in einer früheren Studie bereits für den Antiferromagneten Holmium zwischen 16 und 11 Lagen beobachtet werden. Der Vergleich beider Studien legt nahe, daß es sich dabei um ein generelles Verhalten von Antiferromagneten handelt, dessen Schichtdickenabhängigkeit von der magnetischen Periodenlänge bestimmt wird.

