

Abstract

In this thesis the spin-reorientation transition (SRT) of ultrathin $\text{Ni}_x/\text{Cu}(100)$ and $\text{Fe}_y/\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ films is investigated as a function of the film thickness x and y , respectively, at 300 K in ultrahigh vacuum (UHV). By imaging the magnetic domain microstructure by means of spin-polarized low energy electron microscopy (SPLEEM), it is shown that the SRT of ultrathin $\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ films is a phase transition of second order, i. e. the magnetization reorients *continuously* within the domains. A transition of first order, i. e. a discontinuous SRT, in which in-plane and out-of-plane magnetized stripe domains coexist, was not observed in $\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ films. The detection of the three components of the magnetization during the SRT shows, that the magnetization turns from the orientation in the film plane and parallel to the step edges of the Cu substrate to the orientation perpendicular to the film plane and perpendicular to the step edges with increasing layer thickness. The SRT occurs as a *spiral-like* motion of the magnetization. The size of the in-plane magnetized domains of some $10 \mu\text{m}$ for films of 5 – 9 monolayers (ML) thickness decreases at the SRT (9 – 11 ML) to $>1 \mu\text{m}$. The size of the perpendicularly magnetized domains (>11 ML) is about 3 – 5 μm .

Ultrathin $\text{Fe}/\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ films represent the prototype of a ferromagnetic double layer system, whose individual layers exhibit an opposite SRT. The investigation of the SRT of this double layer system is therefore of fundamental interest, and it is studied in the framework of this thesis *for the first time in detail*. The evaporation of 2.5 – 2.9 ML Fe on top of a perpendicularly magnetized $\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ film results in a reorientation of the magnetization into the film plane. The reason for this SRT is the increased shape anisotropy due to the Fe coverage and the large negative Fe-Ni-interface anisotropy. Also in $\text{Fe}/\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ films a *continuous spiral-like* reorientation of the magnetization, i. e. an SRT of second order is found, while the magnetic domains *simultaneously* break up into approx. 180 nm wide stripe domains along the Cu step edges. At the SRT a transformation of the domain walls from the Bloch mode into the Néel mode takes place.

Moreover, a UHV-SQUID-magnetometer was built up, which allows for *in situ* measurements of the magnetic stray field of an ultrathin ferromagnetic film, such as for instance $\text{Ni}/\text{Cu}(100)$. From the stray field measurement the absolute value of the magnetization of the film can be determined.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird der Spinreorientierungsübergang (SRT) von ultradünnen $\text{Ni}_x/\text{Cu}(100)$ - und $\text{Fe}_y/\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ -Filmen als Funktion der Schichtdicke x bzw. y bei 300 K im Ultrahochvakuum (UHV) untersucht. Über die Abbildung der magnetischen Domänenstruktur mittels spin-polarisierter Niederenergie-Elektronenmikroskopie (SPLEEM) wird gezeigt, dass der SRT von $\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ ein Phasenübergang *zweiter* Ordnung ist, bei dem sich die Magnetisierung *kontinuierlich* innerhalb der Domänen dreht. Ein SRT erster Ordnung, d. h. ein diskontinuierlicher Übergang, bei dem in der Filmebene und senkrecht zur Filmebene magnetisierte Streifendomänen koexistieren, wurde in $\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ -Filmen nicht beobachtet. Die Abbildung der drei Komponenten der Magnetisierung während des SRT zeigt, dass sich die Magnetisierung mit zunehmender Schichtdicke von der Orientierung in der Filmebene und parallel zu den Stufenkanten des Cu-Substrates zu der Orientierung senkrecht zur Filmebene und senkrecht zu den Substratstufen dreht. Der SRT erfolgt also *spiralförmig*. Die Größe der in der Ebene magnetisierten Domänen von einigen $10 \mu\text{m}$ für Filme der Schichtdicke 5 – 9 Monolagen (ML) nimmt am SRT (9 – 11 ML) auf $>1 \mu\text{m}$ ab. Für senkrecht magnetisierte Ni-Filme (>11 ML) beträgt die Domänengröße circa 3 – 5 μm .

Ultradünne $\text{Fe}/\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ -Filme stellen den Prototyp eines ferromagnetischen Doppelschichtsystems dar, dessen einzelne Schichten einen entgegengesetzten SRT aufweisen. Die Untersuchung des SRT dieses Doppelschichtsystems ist daher von fundamentalem Interesse und wird im Rahmen dieser Arbeit *erstmalig im Detail* untersucht. Das Aufdampfen von 2.5 – 2.9 ML Fe auf einen senkrecht magnetisierten $\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ -Film hat eine Reorientierung der Magnetisierung in die Filmebene zur Folge. Die Ursache dafür ist die durch das Fe erhöhte Formanisotropie und die große negative Fe-Ni-Grenzflächenanisotropie. Auch in $\text{Fe}/\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ Filmen wird eine *kontinuierliche spiralförmige* Reorientierung der Magnetisierung, d. h. ein SRT zweiter Ordnung beobachtet, während die Domänen *gleichzeitig* in ca. 180 nm breite Streifendomänen entlang der Stufenkanten aufbrechen. Am SRT findet eine Transformation der Domänenwände aus dem Bloch-Modus in den Néel-Modus statt.

Es wurde außerdem ein UHV-SQUID-Magnetometer aufgebaut, mit dem das magnetische Streufeld eines ultradünnen ferromagnetischen Films, wie beispielsweise $\text{Ni}/\text{Cu}(100)$, *in situ* gemessen werden kann. Aus einer solchen Messung läßt sich die Magnetisierung des Films in absoluten Einheiten bestimmen.

Acronyms and abbreviations

AES	Auger Electron Spectroscopy
AFM	Atomic Force Microscopy
bcc	Body-centered cubic
CMA	Cylindrical Mirror Analyser
d_c	Critical thickness
fcc	Face-centered cubic
fct	Face-centered tetragonal
FMR	Ferromagnetic Resonance
LEED	Low Energy Electron Diffraction
LEEM	Low Energy Electron Microscopy
LT	Low Temperature
MAE	Magnetic Anisotropy Energy
MC	Magnetic Contrast
MFM	Magnetic Force Microscopy
ML	Monolayer
MOKE	Magneto-Optical Kerr Effect
M-SNOM	Magneto-Optical Scanning Near-Field Microscopy
PND	Polarized Neutron Diffraction
QMS	Quadrupole Mass Spectrometer
RF	Radio Frequency
RT	Room Temperature
SEMPA	Secondary Electron Microscopy with Polarization Analysis
SPLEEM	Spin-Polarized Low Energy Electron Microscopy
SP-STM	Spin-Polarized Scanning Tunnelling Microscopy
SQUID	Superconducting QUantum Interference Device
SRT	Spin-Reorientation Transition
STM	Scanning Tunnelling Microscopy
T_c	Critical temperature
T_C	Curie-temperature
TEM	Transmission Electron Microscopy
UHV	Ultrahigh Vacuum
XAS	X-ray Absorption Spectroscopy
XMCD	X-ray Magnetic Circular Dichroism
X-PEEM	X-ray Photo Emission Electron Microscopy