

**In situ Abbildung
magnetischer Domänen
in dünnen Filmen
mit magnetooptischer
Rasternahfeldmikroskopie**

von

Gereon Meyer

am Fachbereich Physik
der Freien Universität Berlin
eingereichte Dissertation

Oktober 2003

1. Gutachter: Prof. Dr. Dr. h.c. G. Kaindl
2. Gutachter: Prof. Dr. M. Dähne (TU Berlin)

Tag der Disputation: 26. November 2003

Kurzfassung

In dieser Arbeit berichte ich von der Untersuchung der Domänenstrukturen und Ummagnetisierungsprozesse ultradünner Filme von Fe/Cu(100) mit einem magneto-optischen Rasternahfeldmikroskop (magneto-optisches SNOM), das im Ultrahochvakuum (UHV) betrieben wird. Die Filme wurden bei einer Substrattemperatur von 80 K präpariert und dann *in situ* bei variabler Temperatur und in äußeren Magnetfeldern untersucht. Es zeigte sich, dass die Ummagnetisierung in der Nähe des Spinreorientierungsübergangs über die Bildung eines Musters aus Streifendomänen mit Breiten unterhalb eines Mikrometers verläuft. Magneto-optisches SNOM gehört zu den wenigen hochauflösenden magnetischen Abbildungsmethoden, mit denen das Wachstum solch kleiner Domänen direkt beobachtet werden kann, da es auch in Gegenwart äußerer Magnetfelder funktioniert. In dieser Arbeit wurde erstmals ein SNOM im UHV verwendet, und der magneto-optische Kerr-Effekt wurde mit einem Sagnac-Interferometer gemessen. Dieses Interferometer detektiert ausschließlich nicht-reziproke Phasenverschiebungen zwischen rechts- und links zirkular polarisierten Lichtstrahlen. Damit ignoriert es andere Sorten von Polarisationsänderungen, die bei herkömmlicher Detektion der magneto-optischen Effekte zu Artefakten führen würden. Es liefert zudem ein Gesamtintensitätssignal, das ein geeignetes Maß für die Kontrolle des Spitze-Probe-Abstandes darstellt. In dieser Arbeit konnte eine laterale Auflösung von 300 nm (bei einer Lichtwellenlänge von 670 nm) und eine magneto-optische Empfindlichkeit von $350 \mu\text{rad}$ erreicht werden - genug zur Domänenabbildung in Filmen mit einer Schichtdicke von wenigen Monolagen. Die gemessenen Streifenbreiten stimmen gut mit theoretischen Vorhersagen überein, die die Streifenbreite mit der Höhe des Sättigungsmagnetfeldes verknüpfen. Die Transformation des Streifendomänenmusters verläuft in einem diskontinuierlichen Wachstumsprozess, der durch das Pinning von Domänenwänden an lokalen Inhomogenitäten von Film und Substrat (z.B. Polierkratzern) bestimmt wird. Ausgehend von diesen Beobachtungen entwerfe ich im Rahmen dieser Arbeit das Modell eines Ummagnetisierungsprozesses, der über die Nukleation und das Wachstum von Streifendomänen verläuft. Es erklärt die Form der zu den Filmen gehörigen Magnetisierungskurven sowie vorliegende Kerr-Mikroskopiedaten.

Abstract

In this thesis I report on studies of the magnetization reversal process in ultrathin films of Fe/Cu(100) grown at 80 K. In the vicinity of the spin-reorientation transition, magnetization reversal was found to take place via formation of stripe domains with submicron stripe width. Imaging of such stripe-domain patterns requires high-resolution magnetic microscopy that can be operated in external magnetic fields. The present studies were performed by a scanning near-field optical microscope (SNOM) operated *in situ* at variable temperature, and in the presence of external magnetic fields. The SNOM is the first to be operated in ultrahigh vacuum. Magnetic domain contrast arises from the magneto-optical Kerr effect, which is measured by a Sagnac interferometer. Such interferometer is exclusively sensitive to non-reciprocal phase shifts between right and left circularly polarized light beams. It ignores all other kinds of polarization changes that often lead to artifacts in magneto-optical SNOM. The Sagnac interferometer also provides a total-intensity signal which can be used for the tip-to-sample distance control. The lateral resolution of the instrument is ≈ 300 nm (at a wavelength of 670 nm), and the magneto-optical sensitivity amounts to $350 \mu\text{rad}$, which is sufficient to image domain stripes of a few monolayers thick films. The observed stripe widths are in good agreement with theoretical predictions connecting stripe width and saturation field. By applying external magnetic fields, the transformation of the stripe-domain pattern could be studied. It occurs in a non-continuous growth process, governed by pinning of domain walls to local inhomogeneities of film and substrate, e.g. polishing scratches. Based on the experimental results, I propose a model of the magnetization-reveral process via nucleation and growth of stripe domains. It explains the shape of the corresponding magnetization curves measured by the magneto-optical Kerr effect (MOKE) as well as previous Kerr-microscopy results.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	iii
Abstract	v
1 Einleitung	1
2 Magnetismus dünner Filme	3
2.1 Magnetische Domänen	3
2.2 Magnetische Anisotropie	5
2.3 Spinreorientierungsübergang	7
2.4 Streifendomänenzustand	11
2.5 Ummagnetisierungsprozess	15
3 Magnetooptische Mikroskopie	23
3.1 Kerr- und Faraday-Effekt	23
3.1.1 Makroskopische Beschreibung	25
3.1.2 Mikroskopische Beschreibung	29
3.2 Messmethoden	32
3.2.1 Magnetooptischer Kerr-Effekt (MOKE)	33
3.2.2 Sagnac-Interferometer	34
3.3 Kerr-Mikroskopie	37
3.4 Magnetooptische Rasternahfeldmikroskopie	39
3.4.1 Optische Rasternahfeldmikroskopie	41
3.4.2 Abstandskontrolle	43
3.4.3 Nahfeldsonden	45
3.4.4 Magnetooptisches SNOM	47
3.4.5 Magnetooptik im Nahfeld	51
4 Experimenteller Aufbau	53
4.1 Ultrahochvakuum-System	53
4.2 Präparation von Substraten und Filmen	57
4.3 MOKE-Aufbau	58
4.4 Kerr-Mikroskop	58
4.5 Sagnac-SNOM	60

4.5.1	UHV-SNOM-Aufbau	62
4.5.2	Sagnac-Interferometer	65
4.5.3	Elektronische Ansteuerung	67
4.6	Performance-Tests	68
4.6.1	Scherkraft-Abstandskontrolle im UHV	70
4.6.2	Optischer Kontrast unbedampfter Glasfaserspitzen	70
4.6.3	Magnetooptischer Kontrast	73
5	Magnetische Domänen in Fe/Cu(100)	79
5.1	Dünne Eisenfilme auf Cu(100)	79
5.2	Charakterisierung von Substraten und Filmen	87
5.3	Spinreorientierungsübergang in Fe/Cu(100)	88
5.4	Domänen und Ummagnetisierung in Fe/Cu(100) mit senkrechter Anisotropie	93
5.5	Streifendomänen in Fe/Cu(100)	100
5.6	Ummagnetisierungsprozess bei der Spinreorientierung	104
6	Zusammenfassung und Ausblick	111
	Literaturverzeichnis	115
	Publikationen	125
	Vorträge und Poster	127
	Dank	129
	Lebenslauf	131