

Franziskus Heigl

Magneto-optics in Lanthanides



am Fachbereich Physik
der Freien Universität Berlin
eingereichte Dissertation

2002

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

2. Gutachter: Prof. K. Horn, Ph.D.

Tag der Disputation: 16. Dezember 2002

Abstract

The optical reflectivity of metallic lanthanide samples in the visible-light region arises normally from electron excitations in the conduction band. Since the structure of the conduction band depends strongly on the overlap of the atomic wave functions, the optical transitions will be affected by thermal contraction. In magnetic samples changes in magnetization go with changes in the crystal volume (magnetostriction). These effects become visible in the temperature dependent magneto-optical Kerr signal. In the present work this temperature dependence has been investigated for the elements Gd and Tb.

Magneto-optical methods in the visible-light region generally lack element specificity, which has become a considerable shortcoming in research on magnetic compounds. Using soft x-rays tuned to the transition energies of deeper lying core-levels, it is possible to obtain the element-specific magnetization of one particular element within a compound (XMOKE). Reflection measurements are not affected by external magnetic fields, thus giving access to element-specific hysteresis. The element specificity of XMOKE is demonstrated for the example of a Gd/Y/Tb trilayer.

In the soft x-ray region, lanthanide metals give rise to an extremely large absorption. Especially at the giant x-ray absorption threshold ($N_{4,5}$), the penetration depth is smaller than the wavelength of light. This strong absorption is accompanied by a huge change in light propagation speed upon magnetization reversal. Calibrated data at the Gd $N_{4,5}$ absorption threshold reveal a penetration depth of ~ 3 nm, together with a Faraday rotation of about 0.7° per atomic layer.

From the imaginary part of the refractive index one obtains the related real part by use of the Kramers-Kronig relation. The reflectivity was calculated using experimental absorption data, and good agreement was found between the calculated and the experimental reflectivities at the $M_{4,5}$ absorption threshold of Gd.

Given that the wavelength of the probing light is comparable to the thickness of the sample, small inhomogeneities in the magnetization can be seen in the specularly reflected magneto-optical signal. As a result the magneto-optical signal becomes sensitive to the direction in which the domain walls propagate. This can be seen in the shape of the hysteresis loop. This is another aspect of XMOKE method, which opens up new perspectives in the study of nanomagnetism, based on lanthanide materials.

Auszug

Sichtbares Licht wird an metallischen Proben reflektiert indem optische Übergänge normalerweise im Leitungsband angeregt werden. Die Struktur des Leitungsbandes hängt stark vom Überlapp der atomaren Wellenfunktionen der benachbarten Atome ab. Die optischen Übergänge werden deshalb durch die thermische Kontraktion des Kristalls beeinflusst. Andererseits ist in magnetischen Proben die Änderung der Magnetisierung mit einer Änderung des Kristallvolumens verbunden (Magnetostriktion). Diese Effekte sind auch in der Temperaturabhängigkeit des magneto-optischen Kerr Signals im sichtbaren Bereich zu beobachten. In der vorliegenden Arbeit wurden solche durch Volumenänderung hervorgerufene Effekte auf das magneto-optische Kerrsignal im Bereich des sichtbaren Licht für die Lanthanidelemente Gd und Tb untersucht.

In magnetischen Verbundstoffen (z.B. Speichermedien) zeigen die einzelnen Komponenten bisweilen sehr unterschiedliches magnetisches Verhalten. Mit Röntgenlicht können stärker gebundene Elektronen aus tiefer liegenden Schalen angeregt werden. Solche Anregungen sind elementspezifisch und ihr magnetischer Kontrast spiegelt die Magnetisierung des jeweiligen Elements wider. Reflektionsmessungen im Röntgenbereich bieten deshalb die Möglichkeit elementspezifische Hysteresen zu beobachten. Diese Möglichkeit wurde in der vorliegenden Arbeit am Beispiel eines Gd/Y/Tb Dreilagensystems gezeigt.

Im weichen Röntgenbereich zeigen Lanthanidmetalle ungewöhnlich starke Lichtabsorption. Besonders an der Riesenresonanz ($N_{4,5}$ -Übergang) führt dies zu Absorptionslängen von wenigen Nanometern. Die starke Absorption wird durch den Imaginärteil des komplexen Brechungsindex beschrieben und geht einher mit einer beträchtlichen Änderung der Lichtgeschwindigkeit im Medium (Realteil des Brechungsindex) bei der Ummagnetisierung. Anhand geeichter Absorptionsdaten am Gd $N_{4,5}$ -Übergang wird gezeigt, daß die Absorptionslänge bis zu ~ 3 nm abnimmt, was einer sehr großen Faraday Drehung von 0.7° pro atomarer Lage entspricht.

Ist der Imaginärteil der Lichtbrechung über einen weiten Energiebereich bekannt, dann lässt sich der zugehörige dispersive Realteil mittels Kramers-Kronig Transformation bestimmen. Man kann somit aus experimentellen Absorptionsmessungen die zugehörigen optischen Eigenschaften der Probe bestimmen, und mit einem Fresnel-Ansatz die erwartete Reflektivität berechnen. Eine gute Übereinstimmung von Rechnung und Experiment wurde an der $M_{4,5}$ Absorptionskante von Gd erzielt.

Ist die Wellenlänge des Lichts vergleichbar mit der Dicke der untersuchten Probe, dann machen sich kleine Inhomogenitäten in der Magnetisierung im magneto-optischen Signal bemerkbar. Unter diesen Umständen wird das magneto-optische Signal empfindlich auf die Richtung in der Domänenwandbewegung, was sich in der Form der Hysterese widerspiegelt. Dies ist ein weiterer Aspekt der Röntgen-Magnetooptik, welcher neue Perspektiven in der Erforschung des Nanomagnetismus bei Lanthanidmaterialien eröffnet.

Contents

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 3 |
| 2 | Theoretical Considerations | 7 |
| 2.1 | Metal optics | 7 |
| 2.2 | Magneto Optics | 10 |
| 2.3 | Magnetic x-ray absorption | 12 |
| 2.4 | Magnetism in lanthanide metals | 14 |
| 2.4.1 | Magnetic order | 14 |
| 2.4.2 | Magnetic anisotropy | 19 |
| 2.4.3 | Magnetic domains | 20 |
| 2.4.4 | Magnetostriction | 20 |
| 3 | Experimental Procedures | 25 |
| 3.1 | General settings of the experiment | 25 |
| 3.2 | Set-up for visible-light MOKE measurements | 26 |
| 3.3 | X-ray absorption and reflection | 29 |
| 3.4 | Two-axis rotatable magnet | 29 |
| 3.5 | Rare-earth evaporator | 31 |
| 4 | MOKE in the Visible-Light Region | 35 |
| 4.1 | Annealing-induced extension of the helical phase in Tb | 35 |
| 4.2 | Magnetization reversal in Tb films | 43 |
| 4.3 | Temperature dependent magnetization of Gd and Tb films | 47 |
| 5 | MOKE in the Soft-X-Ray Region (XMOKE) | 55 |
| 5.1 | Lanthanide $N_{4,5}$ and $M_{4,5}$ absorption thresholds | 55 |
| 5.2 | Hysteresis | 59 |
| 5.2.1 | Influence of domain-wall movements | 60 |
| 5.2.2 | Photon energy dependence | 63 |
| 5.3 | The optical constants | 65 |
| 5.4 | Calculated reflectivities and interference effects | 69 |
| 6 | Discussion: XMOKE versus MOKE | 75 |

| | |
|--|-----------|
| 7 Summary and Outlook | 79 |
| Bibliography | 81 |
| Appendix | 91 |
| A. Temperature dependence of the crystal anisotropy | 91 |
| B. Stability of the helical phase in Tb | 93 |
| C. Accuracy of temperature measurements | 94 |
| Acknowledgements | 95 |
| Publications | 97 |