

Herstellung von funktionellen Schichten und Multischichten mittels Laserdeposition (PLD)

Marcus Kuhn¹, Andreas Heinrich², Bernd Schey¹, Bernd Stritzker²

¹AxynTeC Dünnschichttechnik GmbH, Am Mittleren Moos 48, 86167 Augsburg, Germany,

²Lehrstuhl für Experimentalphysik IV, Institut für Physik, Universität Augsburg, Augsburg, Germany

Der Einsatz der gepulsten Laserdeposition (PLD, Pulsed Laser Deposition) für die Schichtentwicklung eröffnet dem Anwender unbegrenzte Möglichkeiten auf dem Gebiet des Designs von Schichtsystemen für Anwendungen in der Medizin- und Mikrosystemtechnik, der Optik und Sensorik. Anhand eines Beispiels daraus soll die hohe Flexibilität der Verfahrenstechnik und Qualität der resultierenden Schichtsysteme aufgezeigt werden.

Die optische Kommunikationstechnik ist die Basis für heutige und zukünftige Datenübertragungen mit hohen Raten und Geschwindigkeiten im Infrarotbereich. Dafür sind integrierte Komplettsysteme aus Halbleiterlaser, optischen Isolatoren, Wellenleitern und Modulatoren auf Mikrometerskala in Kombination mit bestehender Siliziumtechnik erforderlich.

Magnetooptisch aktive Eisengranate sind eine interessante Materialgruppe für die integrierte Optik im Wellenlängenbereich von 1-5 μm . Mit Hilfe der PLD wurden homoepitaktische Granatschichten auf Granatsubstraten sowie über Pufferschichten auf Silizium hergestellt. Das Schichtwachstum (RHEED, TEM), die Stöchiometrie (RBS) sowie die Faraday-Drehung wurden in Abhängigkeit der Herstellungsparameter analysiert.

corresponding author: kuhn@axyntec.de, +49 821 74999-140

Keywords: pulsed laser deposition, thin films, iron garnet, integrated optics

Einleitung

Magnetooptisch aktive Materialien drehen bei Reflexion (Kerr Effekt) oder in Transmission (Faraday Effekt) die Polarisations Ebene von Licht. Diesen Effekt kann man einerseits zur Analyse magnetischer Strukturen oder beispielsweise in der optischen Datenkommunikationstechnik über Glasfaserkabel zu Nutzen machen. Dort werden optische Isolatoren zur Unterdrückung von Rückkopplungen in den Datenleitungen benötigt, die ansonsten zu Instabilitäten in davor geschalteten Bauteilen führen. Solche Isolatoren können auf Basis des Faraday Effekts realisiert werden, indem ein magnetooptisch aktives Material zwischen zwei Polarisatoren geschaltet wird. Durch geeignete Einstellung der Polarisationsrichtungen erhält man in Kopplung mit dem magnetooptisch aktiven Material einen optischen Gleichrichter, der nur Lichtsignale in einer Richtung passieren lässt (Abb. 1).

Für den mikroelektronischen Einsatz müssen solche makroskopischen Bauelemente auf einem Chip integriert werden (integrierte Optik). Die Informationsübertragung erfolgt dabei

über Wellenleiter, für die ebenfalls magnetooptische Materialien im relevanten Wellenlängenbereich von 1-5 μm aufgrund ihrer geringen Absorption eingesetzt werden [1]. Ein Halbleiterlaser dient dabei als Lichtquelle, der vor zurückreflektiertem Licht geschützt werden muss. Sämtliche optische Bauelemente sind dabei in Form von magnetooptisch aktiven Materialien mit den Standard-Halbleitermaterialien wie Si oder SiO_2 zu kombinieren.

Ferrimagnetische Eisengranate wie $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $(\text{Y}, \text{Bi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ oder $(\text{Lu}, \text{Bi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ sind geeignete magnetooptische Materialien, die sich durch eine hohe Faraday Drehung bei Raumtemperatur (RT) auszeichnen. Die Faraday Drehung steigt dabei linear mit der Konzentration an Bi-Ionen. Zudem nimmt dabei gleichzeitig die Lichtabsorption ab. Aus Anwendungssicht ist somit eine maximale Bi Konzentration wie im Falle des $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (BIG) wünschenswert. Thermodynamisch ist diese Zusammensetzung aufgrund des großen Ionenradius von Bi ($r = 1,17 \text{ \AA}$) jedoch nicht stabil formbar. Damit ist eine Herstellung derartiger Schichten nur mit Verfahren möglich, die jenseits des thermodynamischen Gleichgewichts arbeiten. Die gepulste Laserdeposition ist hierfür besonders geeignet. Zumal sie auch eine einfache Herstellung von Multischichten und damit der Kombination mit Halbleiter- und dielektrischen Materialien ermöglicht.

Experiment

Bei der Laserablation (Abb. 2) [2] wird über gepulste UV-Strahlung (*Pulsed Laser Deposition, PLD*) eines Excimer-Lasers (Wellenlänge

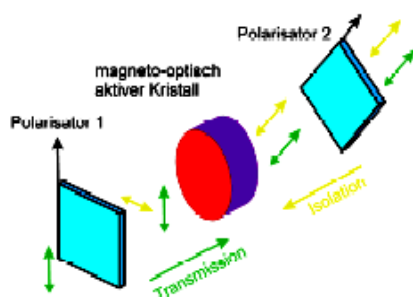


Abb. 1 Schematischer Aufbau eines optischen Isolators auf Basis des Faraday-Effekts.

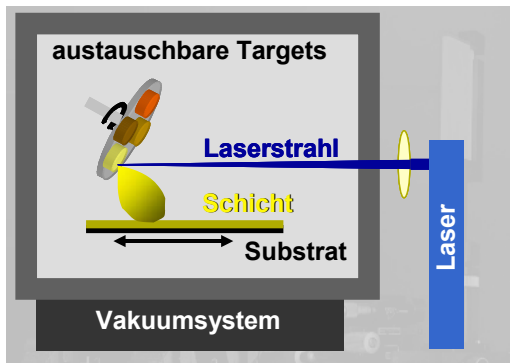


Abb. 2 PLD-Setup mit Targetwechsler

248 nm, Pulslänge 20-40 ns, Pulsenergie 800-1200 mJ, Repetitionsrate 1-50 Hz) die Oberfläche des Ausgangsmaterials (Target) „explosionsartig“ abgetragen und in die Plasmaphase gebracht. Die abgetragenen Moleküle und Cluster scheiden sich daraufhin auf dem gegenüber liegenden Bauteil (Substrat) als dünne Schicht ab. Die oben genannten Laserparameter, können dabei unabhängig von den übrigen Herstellungsparametern wie Arbeitsatmosphäre (reaktiv bis inert) und -druck (10^{-1} bis 10^{-6} mbar) sowie Substrattemperatur (RT bis 800 °C) eingestellt werden. Durch die Charakteristik des Laserabtrags erfolgt auch bei komplexen Materialzusammensetzungen wie der hier behandelten Gruppe der Granate ein Stöchiometrieübertrag vom Target auf die Schicht unabhängig vom Dampfdruck oder Sputteryield einzelner Elemente.

Die Targetmaterialien liegen dabei in Form von kleinen Feststofftabletten (Dm. 20 mm) mit entsprechender Ausgangszusammensetzung vor. Durch den Einsatz eines Targetwechslersystems können dabei bis zu sechs verschiedene Materialien in-situ als Multischichtsystem abgeschieden werden. Im vorliegenden Fall wurden YIG-, LBIG und BIG-Targets verwendet, die auf GGG ($Gd_3Ga_5O_{12}$) oder Si-Substraten deponiert wurden.

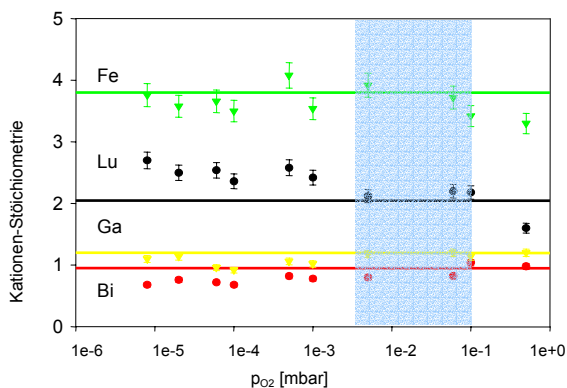


Abb. 3 Kationenverhältnis in Abhängigkeit des Sauerstoffpartialdrucks. Im Fenster von 5×10^{-3} bis 1×10^{-1} mbar ist ein guter Stöchiometrieübertrag möglich.

Ergebnisse

Zur Untersuchung des Einflusses des Wachstums von PLD-deponierten Schichten auf den anwendungsrelevanten Parameter, die Faraday-Drehung, wurden zuerst $Lu_{2,05}Bi_{0,95}Fe_{3,8}Ga_{1,2}O_{12}$ (LBIG) Schichten auf einkristallinen $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) sowie Si-Substraten bei 650 °C - 800 °C und unterschiedlichen Sauerstoffdrücken abgeschieden. Mittels RBS (Rutherford Backscattering Spectroscopy) konnte der stöchiometrische Übertrag des Targetmaterials auf die Schicht nachgewiesen werden. Es ergibt sich ein breites Parameterfenster von 5×10^{-3} bis 1×10^{-1} mbar (Abb. 3) in der ein sehr guter Stöchiometrieübertrag möglich ist.

Wachstumsuntersuchungen mittels RHEED [3] zeigten, dass LBIG im Bereich von 740 °C - 800 °C epitaktisch auf dem GGG-Substrat aufgrund des geringen Gittermisfits ($a_{LBIG} = 12.49 \text{ \AA}$, $a_{GGG} = 12.38 \text{ \AA}$) aufwächst. Die Untersuchungen ergaben ein Lagenwachstum des LBIG auf GGG. Mittels TEM Querschnittsaufnahmen und Beugungsbildern konnte nachgewiesen werden, dass die mittels PLD hergestellten Schichten eine homoepitaktische Beziehung zum einkristallinen Substrat aufweisen [3]. Abbildung 4a, b zeigt zwei TEM-Querschnittsaufnahmen bei unterschiedlichen Vergrößerungen. Es zeigt sich ein glatter Film von ca. 300 nm Dicke ohne starke Defekte mit einem epitaktischen Übergang des Films an der Grenzfläche zum Substrat. Dies wird auch von den TEM-Beugungsbildern bestätigt (siehe Abb. 4c), in denen eine Überlagerung der Substrat- und Schichtreflexe auftritt, was auf die Übereinstimmung des Kristallgitters schließen lässt.

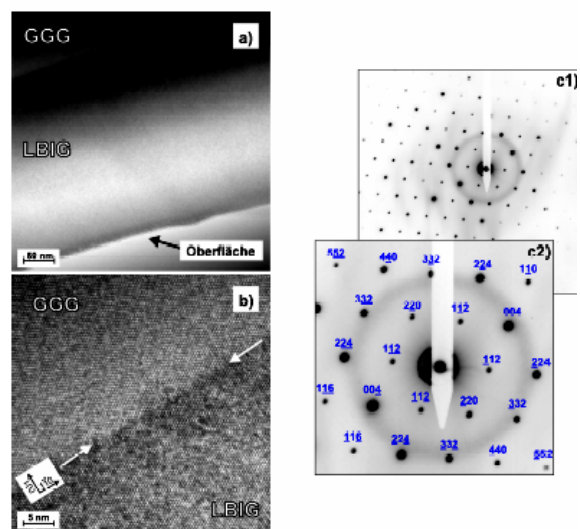


Abb. 4 a) und b) TEM-Aufnahme einer LBIG-Schicht auf GGG; c) dazugehöriges Beugungsbild. Beides zeigt das homoepitaktische Wachstum der Schicht auf GGG.

Um das magnetooptisch aktive Medium auch auf einem Halbleitermaterial abzuscheiden, wurden Granatschichten auf Silizium und Siliziumdioxid hergestellt und analysiert. In diesem Fall wurde vor allem $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (BIG) als die Materialzusammensetzung gewählt, die den maximalen Bi-Gehalt aufweist, um eine maximale Faraday-Drehung in den späteren Bauteilen zu erzielen. Die Schichten wurden mittels PLD bei Temperaturen von $500\text{ }^\circ\text{C}$ – $600\text{ }^\circ\text{C}$ und Sauerstoffdrücken von 4×10^{-3} bis 7×10^{-2} mbar hergestellt. Mittels RBS und Röntgendiffraktometrie (XRD) konnte zunächst festgestellt werden, dass das Wachstum der BIG-Schicht auf GGG aufgrund des höheren Gittermisfits ($a_{\text{LBIG}} = 12.62\text{ \AA}$) inselförmig mit einer (110) Vorzugsrichtung stattfindet. Die Faraday Drehung zeigt ein Maximum im sichtbaren Bereich ($1,7\text{ }^\circ/\mu\text{m}$ @ 600 nm) und ist gegenüber der zu erzielenden Faraday Drehung von $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) deutlich erhöht. Sie nimmt, wie aus der Literatur bekannt, mit zunehmendem Bi-Anteil hier auf bis zu $2,2\text{ }^\circ/\mu\text{m}$ bei 40 mT (Abb. 5) zu. Obwohl die Sättigung für BIG bei dem maximal erreichbaren Messfeld von 100 mT noch nicht erreicht ist, weisen die Schichten bereits eine Faraday Drehung von $4,1\text{ }^\circ/\mu\text{m}$ auf. Im Vergleich dazu zeigt LBIG eine Drehung von $0,8\text{ }^\circ/\mu\text{m}$ in Sättigung (@ 633 nm [4]).

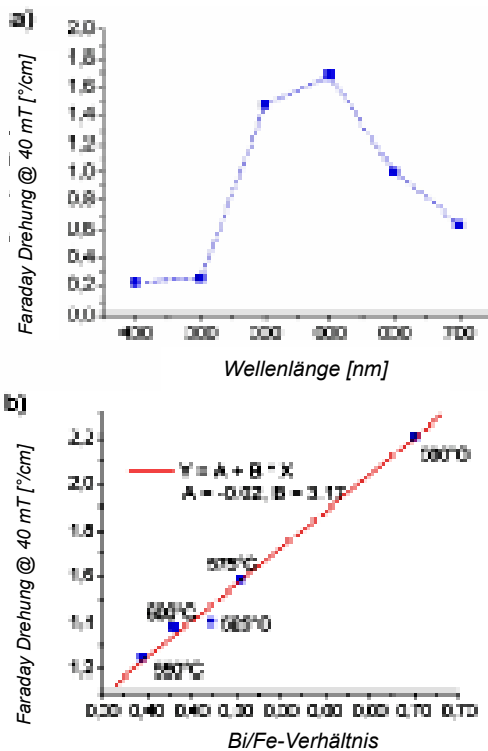


Abb. 5 Faraday-Drehung von BIG in Abhängigkeit der Wellenlänge (a) sowie des Bi-Gehalts in der Schicht (b).

Im Weiteren erfolgte die Herstellung von BIG auf Halbleitersubstraten als Voraussetzung für die Herstellung integrierter Optik. Dabei stellte sich heraus, dass eine direkte Abscheidung von kristallinem BIG auf SiO_2 , das amorph vorliegt, nicht möglich ist. Daher erfolgte vorab die Deposition einer YIG-Pufferschicht bei $700\text{ }^\circ\text{C}$, die in einem anschließenden Annealing-Schritt oberhalb $1000\text{ }^\circ\text{C}$ kristallisierte. Auf diese kristalline YIG-Pufferschicht war die Schichtabscheidung einer kristallinen BIG-Phase bei $600\text{ }^\circ\text{C}$ analog zur Herstellung auf GGG möglich. Röntgenanalysen ergaben hier die Bildung eines polykristallinen BIG-Films, der jedoch eine nur geringfügig reduzierte Faraday Drehung aufweist. Das Schichtsystem BIG//YIG// SiO_2 zeigt bei einem Magnetfeld von 40 mT eine Faraday-Drehung von $1,17\text{ }^\circ/\mu\text{m}$ im Vergleich zu BIG//YIG//GGG von $1,65\text{ }^\circ/\mu\text{m}$ (Abb. 6).

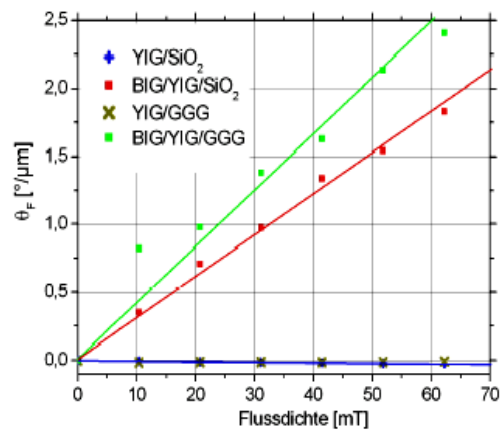


Abb. 6 Faraday Drehwinkel für verschiedene Schichtsysteme als Funktion der Flussdichte: YIG// SiO_2 und BIG//YIG// SiO_2 sowie für YIG//GGG und BIG//YIG//GGG.

Ein derartiges Schichtsystem kann die Grundlage für den Aufbau einer integrierten Optik für die optische Datenübertragung sein.

- [1] H. Dötsch, N. Bahlmann, O. Zhuromskyy, M. Hammer, L. Wilkens, R. Gerhardt, P. Hertel, A.F. Popkov, J. Opt. Soc. Am. B/Vol. 22 1 (2005) 240
- [2] B. Schey, W. Biegel, M. Kuhn, B. Stritzker, Appl. Phys. A 69 (1999) 419
- [3] A. Heinrich, Habilitationsschrift, Augsburg 2006
- [4] B. Keszei, Z. Vertesy, G. Vertesy, Cryst. Res. Tech.36 (2001) 953