

Herstellung von nanometerdicken metallischen Schichtstapeln für spintronische Anwendungen mittels Laserpulsabscheidung (PLD)

J. Maus, G. Reiß, S. Weissmantel

Durch den permanent wachsenden Bedarf der Datenspeicherung werden immer höhere Anforderungen an neue Speichertechnologien hinsichtlich der Speicherkapazität und der Datenverarbeitungsgeschwindigkeit gestellt. Die Entdeckung des Riesen-Magneto-Widerstandes (GMR) sowie die Entwicklung und Realisierung von GMR-Leseköpfen ermöglichte eine große Erhöhung der Speicherdichte. Ein vielversprechender Anwendungsbereich des GMR-Effektes ist neben der allgemeinen Datenspeicherung und Sensorik auch der Einsatz von magnetoresistiven Systemen als magnetische Arbeitsspeicher (MRAM). Entscheidende Vorteile gegenüber konventionellen und etablierten Speichertechnologien sind vor allem die nicht flüchtige Informationsspeicherung und die hohe Geschwindigkeit verbunden mit einer hohen Integrationsdichte.

Aktuelle Untersuchungen im Bereich der Spinelektronik beschäftigen sich mit der Forschung an metallischen Schichtstrukturen, z.B. im Bereich der GMR-Sensoren. Diese Schichtsysteme wurden typischerweise mittels molecular beam epitaxy (MBE) [1] und sputter deposition abgeschieden [2]. Aus der Literatur ist bekannt, dass es ebenfalls möglich ist, GMR-Schichtsysteme mittels PLD-Verfahren herzustellen [3]. Am Laserinstitut Hochschule Mittweida wird das PLD-Verfahren für die Abscheidung von Metallschichtstapeln eingesetzt [4].

Im Rahmen eines Verbundprojektes mit weiteren wissenschaftlichen Einrichtungen (Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS Chemnitz, TU Chemnitz) wurden Metallschichten und Metallschichtstapel für spintronische Anwendungen unter Einsatz des PLD-Verfahrens im Hochvakuum abgeschieden und ihre Oberflächeneigenschaften sowie materialspezifischen Eigenschaften hinsichtlich ihres Einsatzes als spintronisches Schichtsystem untersucht. Die für die Erzeugung der spintronischen Metallschichtstapel besonders relevanten Vorteile des PLD-Verfahrens sind dabei speziell das in weiten Parameterbereichen charakteristische atomlagenweise (layer-by-layer) Wachstum von Schichten, die hohen mittleren Energien der vom Target ablatierten schichtbildenden Teilchen, die hohe Reinheit des Verfahrens sowie die im Vergleich zu anderen geeigneten Verfahren hohen Schichtaufwachsraten. Es ist möglich, die Abscheidung von sehr dünnen geschlossenen und dichten Schichten mit Dicken von wenigen Atomlagen zurealisieren.

Das Teilvorhaben der Hochschule Mittweida wurde dabei mit dem Ziel durchgeführt, die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen für den erstmaligen Einsatz des PLD-Verfahrens zur Herstellung von spintronischen Schichtstapeln zu schaffen, um eine höhere, industrierelevante Produktivität im Vergleich zu den bisher für die Abscheidung dieser Schichtstapel eingesetzten Verfahren (MBE, ALD) zu erreichen. Um das Verfahren der Laserpulsabscheidung für die industrielle Herstellung von GMR-Sensorschichten zu etablieren, ist eine Lösung zur großflächigen Beschichtung von wenigstens 4-Zoll-Si-Wafern erforderlich, wofür die Voraussetzungen im Rahmen des Verbundprojektes ebenfalls geschaffen wurden.

Experimenteller Aufbau und Versuchsdurchführung

Die Erzeugung des schichtbildenden Teilchenstromes erfolgte durch Ablation eines Metalltargets mittels eines KrF-Excimerlasers LPX Pro 305 ($\lambda = 248 \text{ nm}$, Pulsdauer 25 ns, max. Pulsenergie 1200 mJ, max. Repetitionsrate 50 Hz) der Firma Coherent GmbH. Durch die Variation des Laserstrahlquerschnittes auf dem Target zwischen 1,5 und 6,4 mm² konnte die Laserpulsfluenz im Bereich von 2,2 bis 13 J/cm² eingestellt werden. Für die Abscheidung von verschiedenen Targets wurde ein 6-facher Targetwechsler (vgl. Abb.1) in den Rezipienten integriert.



Abb. 1 Beschichtungskammer mit Substratbewegungseinheit und 6-fachem Targetwechsler.

Um einen homogenen Targetabtrag zu erreichen, wurde das Target bei stationärem Laserstrahl spiralförmig mit konstanter Vektorgeschwindigkeit bewegt, wobei der Laserstrahl unter einem Einfallswinkel von 45° auf das Target traf. Der Target-Substratabstand betrug dabei 70 mm. Um eine homogene Schichtdicke über einen großen Substratbereich zu erreichen, erfolgte ebenfalls eine spiralförmige Relativbewegung des Substrats zum stationären Laserstrahlquerschnitt auf dem Target. Hierfür wurde ein neuartiger heiz- und kühlbarer Substrathalter mit einem xy-Substratbewegungssystem konzipiert, so dass bis zu 4-Zoll große Si-Wafer mit einer Schichtdickenabweichung von weniger als $\pm 5 \%$ beschichtet werden können. Zusätzlich wurde ein Simulationsprogramm entwickelt, welches die Vorausberechnung der Schichtdickenverteilung über die Substratfläche in Abhängigkeit von den Substratbewegungsparametern gestattet. Die Metallschichten wurden auf Si-(111) und SiO₂-(111)-Substraten abgeschieden. Das abgeschiedene Schichtsystem entsprach dem eines Spin-Ventil-Systems mit folgendem Aufbau: Substrat / Ta (5 nm) / NiFe₁₉ (2 nm) / IrMn₇₈ (5 nm) / CoFe₁₀ (2,1 nm) / Cu (2,054 nm) / CoFe₁₀ (1 nm) / NiFe₁₉ (2 nm) / Ru (0,4 nm) / Cu (0,5 nm) / Ta (3,0 nm).

Ergebnisse und Demo-Metallschichtstapel

Mittels des PLD-Verfahrens konnten bei geeigneten Prozessparametern metallische Schichten und Schichtstapel mit einem Spin-Ventil-Layout (vgl. oben) erzeugt werden. Als optimale Prozessparameter für eine Minimierung der Partikulatflächendichte, d.h. die prozentuale mit Partikulaten besetzte Schichtfläche, erwiesen sich ein Laserstrahlquerschnitt von 2,3 mm² und eine Laserpulsfluenz zwischen 8 und 10 J/cm². Die aus der Schichtaufwachsraten berechneten mittleren Schichtdickenzunahmen pro Laserpuls lagen

in Abhängigkeit vom Targetmaterial zwischen 0,05 und 0,32 Å, womit eine exakte Einstellung der Schichtdicke der einzelnen Metallschichtstapel über die regelbare Pulszahl des Lasers möglich war. Die AFM-Messungen an 5 und 10 nm dicken Schichten in Tab.1 zeigen für alle Metalle mit Ausnahme von Cu glatte homogene Schichtoberflächen mit einer Flächenrauheit S_{RMS} von 0,6 nm (Cu) und weniger als 0,3 nm für alle anderen Metalle.

Tab. 1 Eigenschaften von laserpulsablatierten Metallschichten auf Silizium unter Verwendung der Analysemethoden XRR; AFM und REM.

Material	Schichtdicke	S_{RMS}	Partikulatgröße
Ta	5.1 - 5.3 nm	0.22 - 0.33 nm	0.44 - 0.68 μm
$\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$	5.3 nm	0.19 - 0.20 nm	0.36 - 3.2 μm
Cu	6.7 - 6.8 nm	0.5 - 0.6 nm	0.3 - 0.4 μm
$\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$	9.6 - 9.8 nm	0.12 - 0.13 nm	0.65 - 1.0 μm
$\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}$	8.6 - 8.8 nm	0.18 - 0.19 nm	0.05 - 1.0 μm
Ru	9.7 - 9.8 nm	0.14 - 0.16 nm	< 0.3 μm

Um die Grenzflächenrauheit eines laserpulsablatierten Metallschichtstapels zu charakterisieren, wurde eine Probe (vgl. Abb.2) mit einer Schichtarchitektur des vorgestellten Spin-Ventil-Systems mit 10-fach größerer Subschichtdicke hergestellt.

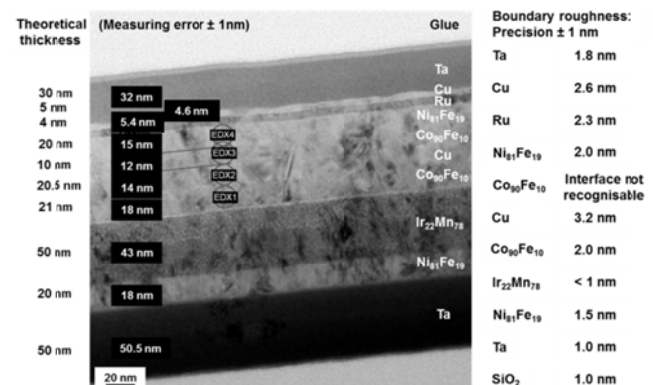


Abb. 2 TEM-Aufnahme eines Metallschichtstapels im Querschnittsprofil mit 10-fach größerer Subschichtdicke ($d = 212,5$ nm) und den gemessenen Grenzflächenrauheiten R_{pv} .

Der mittels PLD - abgeschiedene Metallschichtstapel in Abb. 2 weist scharfe Schichtgrenzflächen auf, wobei die Messergebnisse der Grenzflächenrauheiten gut mit den Flächenrauheiten der 5 und 10 nm dicken Einzelschichten korrelierten. In weiteren Untersuchungen wurde ein Metallschichtstapel als sogenanntes Spin-Ventil-Schichtsystem abgeschieden.

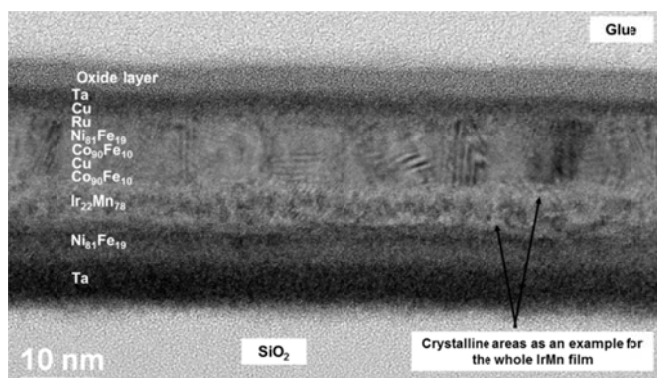


Abb. 3 HRTEM-Aufnahme des abgeschiedenen spintronischen Schichtsystems mit einer Gesamtschichtdicke von $d = 31$ nm.

Dessen Grenzflächenrauigkeiten waren kleiner gleich 1 nm, wie eine HTEM-Probenanalyse dieses Metallschichtstapels in Abb.3 im Querschnitt zeigt. Anhand von AFM- und REM-Aufnahmen des Metallschichtstapels in Abb. 4 konnten nur vereinzelte Partikulate festgestellt werden. Die Partikulatflächendichte von 0,3 % dieses Metallschichtstapels wurde vor allem durch die erhöhte Bedeckung der Schichtoberfläche mit Partikulaten bei den Subschichten Cu, $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ und $\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}$ verursacht. Ob diese Partikulate, deren Durchmesser im Bereich weniger 100 nm und teilweise im Mikrometerbereich lagen, für die spintronische Funktionalität störend wirken, müssen nachfolgende Untersuchungen noch zeigen.

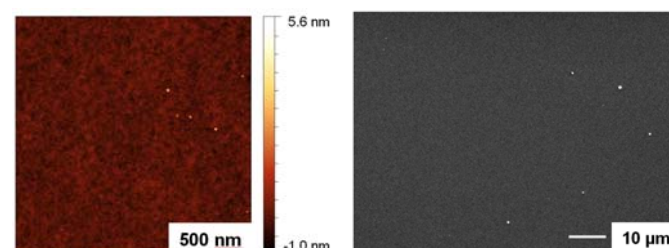


Abb. 4 AFM-Aufnahme (links) und REM-Aufnahme (rechts) eines Spin-Ventil-Schichtsystems mit einer Gesamtschichtdicke von $d = 31$ nm, $S_{RMS} = 0,21 - 0,22$ nm.

Durch die Realisierung des Projektes konnten Parameterbereiche ermittelt und die apparativen Voraussetzungen für die produktive PLD-Abscheidung von metallischen Schichtstapeln für spintronische Anwendungen aus bis zu sechs verschiedenen Materialien geschaffen werden, so dass zukünftig bis zu 4-Zoll große Si-Substrate schichtdickenhomogen beschichtet werden können. Um zukünftig kontaminations- und partikulatfreie Schichten und Schichtstapel mittels des PLD-Verfahrens zu erzeugen, wird Mitte des kommenden Jahres im Laserinstitut Hochschule Mittweida eine über einen DFG-Großgeräteantrag geförderte PLD-Ultrahochvakuumanlage installiert, die eine 90°-Magnetfeldablenkeinheit enthält. Diese dient zur Ablenkung des ablatierten ionisierten Teilchenstroms und der Nutzung nur dieses Teilchenstromanteils ohne elektrisch neutrale Partikulate zur Schichtbildung.

Neben der Herstellung von Metallschichtstapeln für Sensor-Schichtsysteme kann das PLD-Verfahren auch für die Erzeugung von funktionellen Schichten für Sicherheitsmerkmale, Interferenzschichtsysteme, Korrosionsschutzschichten, Hartstoffschichten für Verschleißschutz, biokompatiblen Schichten oder für leitfähige Oberflächen eingesetzt werden.

Literatur

- [1] R.F.C. Farrow et al.: J. Appl. Phys. 76, 3688 (1994)
- [2] G. Anderson, Y. Huai, L. Miloslawsky: J. Appl. Phys. 87, 6989 (2000)
- [3] M. Krieger et al.: Appl. Phys. A 78 (2004) 327-333
- [4] J. Maus, S. Weißmantel, G. Reiß: 22th International Scientific Conference Mittweida IWKM 2012: Scientific Report - Mittweida - Nr. 2, 2012, S.75-77 - ISSN 1437-7624

Danksagung: Die Autoren bedanken sich für die Finanzierung des Projektes aus den Mitteln der Europäischen Union und des Freistaates Sachsen.

Kontakt:

Johannes Maus, M.Sc.
 Laserinstitut Hochschule Mittweida
 Technikumplatz 17
 09648 Mittweida, Deutschland
 Tel.: 03727 / 58-1396
 E-Mail: maus@hs-mittweida.de
 Web: www.laser.hs-mittweida.de