

## KURZFASSUNG

Das vorliegende Manuskript beschreibt die Entwicklung, Herstellung und Charakterisierung von weichmagnetischen Dünnschichten für Hochfrequenzanwendungen bis zu GHz-Frequenzen. Diese hochfrequenztauglichen Schichten wurden für den Einsatz als magnetisches Kernmaterial, zum Aufbau von Mikroinduktoren und Mikrosensoren in der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik untersucht. Im Rahmen dieser Arbeit wurden amorphe CoB- und FeCoBSi-Schichten sowie nanokristalline FeTaN-Schichten mittels Magnetronspütern abgeschieden und bezüglich ihres Schichtaufbaus und ihrer Schichteigenschaften charakterisiert. Das Hauptentwicklungsziel dabei war die Realisierung von Schichten mit hohen ferromagnetischen Resonanzfrequenzen, geringen Wirbelstromverlusten und geeigneten HF-Permeabilitäten bis in den GHz-Bereich.

Als Konzept zur Realisierung hochfrequenztauglicher Schichtsysteme wurde die direkte Abscheidung von Schichten mit einer induzierten uniaxialen Anisotropie verfolgt. Die Schichtherstellung erfolgte mit Hilfe eines Magnetfeldbeschichtungstellers, der ein Magnetfeld innerhalb der Schichtebene erzeugt. Als Schichtmaterialien wurden zunächst amorphe Dünnschichten mit verschiedenen Sputtertargets ( $\text{Co}_{79}\text{B}_{21}$ <sup>1</sup>,  $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{18}\text{B}_{14}\text{Si}_1$  und  $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{15}\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ ) mit einem Targetdurchmesser von 75 mm deponiert. Durch die Variation der Beschichtungsbedingungen (Ar-Sputterdruck und HF-Sputterleistung) erfolgte eine Optimierung der Schichtherstellung im Hinblick auf die Abscheidung von Schichten mit geringen Eigenspannungen.

Diese optimierten amorphen Schichten zeigen eine ausgeprägte uniaxiale magnetische Anisotropie in der Schichtebene. Mit einer Sättigungsmagnetisierung ( $\mu_0 M_s$ ) von 1,8 T und einer Anisotropiefeldstärke ( $\mu_0 H_k$ ) von 3,5 mT erreichen  $\text{Fe}_{68}\text{Co}_{18}\text{B}_{13}\text{Si}_1$ -Schichten jeweils die höchsten Werte ( $\text{Co}_{84}\text{B}_{16}$ :  $\mu_0 M_s = 1,2$  T,  $\mu_0 H_k = 1,5$  mT,  $\text{Fe}_{58}\text{Co}_{18}\text{B}_{12}\text{Si}_{12}$ :  $\mu_0 M_s = 1,2$  T,  $\mu_0 H_k = 1,5$  mT). Entlang der leichten Richtung besitzen diese Schichten hohe Permeabilitäten ( $\text{Co}_{84}\text{B}_{16}$ : 2340,  $\text{Fe}_{58}\text{Co}_{18}\text{B}_{12}\text{Si}_{12}$ : 1825,  $\text{Fe}_{68}\text{Co}_{18}\text{B}_{13}\text{Si}_1$ : 3340), die jedoch bei Anregungsfrequenzen im kHz-Bereich stark gedämpft werden.

Entlang der schweren Richtung sind die Permeabilitäten der Schichten ( $\text{Co}_{84}\text{B}_{16}$ : 690,  $\text{Fe}_{58}\text{Co}_{18}\text{B}_{12}\text{Si}_{12}$ : 830,  $\text{Fe}_{68}\text{Co}_{18}\text{B}_{13}\text{Si}_1$ : 520) geringer, bleiben jedoch über den gesamten Frequenzbereich konstant. Für dünne Schichten (0,1  $\mu\text{m}$ ) werden entlang der schwereren Richtung Permeabilitäten bis in den GHz-Bereich ( $\text{Co}_{84}\text{B}_{16}$ : 1,3 GHz,  $\text{Fe}_{58}\text{Co}_{18}\text{B}_{12}\text{Si}_{12}$ : 1,5 GHz,  $\text{Fe}_{68}\text{Co}_{18}\text{B}_{13}\text{Si}_1$ : 2,3 GHz) beobachtet. Diese experimentell ermittelten Permeabilitäten und ferromagnetischen Resonanzfrequenzen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den theore-

---

<sup>1</sup> Chemische Zusammensetzung in At.-%

tischen, aus den statischen Magnetisierungsmessungen berechneten Werten. Im Hinblick auf den Einsatz der Schichten als magnetisches Kernmaterial in Mikroinduktoren wurde die Abhängigkeit der HF-Permeabilität von der Schichtdicke untersucht. Diese Experimente bestätigten, dass nur für dünne Schichten (bis  $0,2 \mu\text{m}$  für  $\text{Fe}_{68}\text{Co}_{18}\text{B}_{13}\text{Si}_1$ ) das Spektrum der HF-Permeabilität durch die ferromagnetische Resonanzfrequenz limitiert wird. Für dickere Schichten nehmen die Wirbelstromverluste zu, wodurch sich die Resonanzfrequenzen zu geringeren Werten hin verschieben.

Die thermische Stabilität der magnetischen Eigenschaften der Schichtsysteme wurde untersucht, um die Prozesskompatibilität der verschiedenen Schichtmaterialien zu beurteilen. Hier zeigte sich, dass die amorphen Schichten bei Temperaturen von über  $300^\circ\text{C}$  zu kristallisieren beginnen und nach der Wärmebehandlung keine uniaxiale Anisotropie mehr besitzen. Da diese kristallisierten Schichten keine HF-Permeabilität bis in den GHz-Bereich mehr aufweisen, eignen sich diese amorphen Schichtmaterialien nur bedingt für die etablierte Halbleiterfertigung mit ihren hohen Prozesstemperaturen ( $400 - 500^\circ\text{C}$ ).

Zur Realisierung von ersten Mikroinduktoren als Testmuster auf großflächigeren Substraten ( $100 \text{ mm}$  Si-Wafern) erfolgte das Aufskalieren der Schichtherstellung mit einem  $\text{Fe}_{66}\text{Co}_{17}\text{B}_{16}\text{Si}_1$ -Target und einem Durchmesser von  $152 \text{ mm}$ . Die mit diesem Target hergestellten Schichten besitzen hohe Anisotropiefeldstärken von bis zu  $33 \text{ mT}$  und erreichen ferromagnetische Resonanzfrequenzen von  $4,7 \text{ GHz}$  mit Permeabilitäten von  $110$ . Als Ursache für diese hohen Anisotropiefelder können nicht nur magnetfeldinduzierte Prozesse verantwortlich gemacht werden. Vielmehr müssen darüber hinaus auch Anteile einer spannungsinduzierten bzw. strukturellen Anisotropie berücksichtigt werden, wie dies die Ergebnisse der durchgeführten Magnetfeldtemperungen belegen.

Aufgrund der unzureichenden thermischen Stabilität der magnetischen Eigenschaften der untersuchten amorphen Schichtsysteme wurde mit der Abscheidung von nanokristallinen FeTaN-Schichten begonnen. Die Herstellung dieser nanokristallinen Schichten erfolgte von einem  $152 \text{ mm}$   $\text{Fe}_{95}\text{Ta}_5$ -Target mit unterschiedlichen  $\text{Ar}/\text{N}_2$ -Zusammensetzungen im Sputtergas. Der Stickstoffgehalt der FeTaN-Schichten wurde dabei von  $0 \text{ At.-%}$  (bei  $0 \text{ Vol.-% N}_2$  in Ar) bis etwa  $40 \text{ At.-%}$  (bei  $30 \text{ Vol.-% N}_2$  in Ar) variiert. Aufgrund des zunehmenden Stickstoffanteils in den Schichten erhöht sich der spezifische Widerstand der Schichten und reduziert sich die Sättigungsmagnetisierung bis in den superparamagnetischen Bereich (ab  $30 \text{ At.-% N}$  in den Schichten).  $\text{Fe}_{64}\text{Ta}_4\text{N}_{32}$ -Schichten mit einer uniaxialen Anisotropie erreichen eine ferromagnetische Resonanzfrequenz von  $1,5 \text{ GHz}$  mit einer Permeabilität von etwa  $40$ . Gegenüber der ungetemperten zeigt eine bei  $500^\circ\text{C}$  im Magnetfeld getemperte  $\text{Fe}_{79}\text{Ta}_5\text{N}_{16}$ -Schicht ein deutlich weichmagnetischeres Verhalten mit einer Anisotropiefeldstärke von  $0,4 \text{ mT}$ . Bedingt durch die thermische Stabilität der magnetischen Eigenschaften besitzt dieses nanokristalline Schichtsystem gegenüber den amorphen Systemen ein größeres Potential im Hinblick auf die Integration in bestehende Halbleiterfertigungsprozesse.