Abschlussbericht

Thema: Integrierte Mikrospulen mit magnetischem Kern für Anwendungen in Mikrotrafos und Mikro-Aktor-Arrays (MIMAK)

zur Vorlage beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
als Projektträger

Antragsteller: Siemens AG, Corporate Technology, CT MM1
Günther-Scharowsky-Str. 1
91058 Erlangen

Förderkennzeichen: 13N8976

Laufzeit: 01.05.06 bis 30.04.09

Autoren: R. Weiss, J. McCord

Inhaltsübersicht

1. Projektorganisation und Vorraussetzungen
1.1. Aufgabenstellung
1.2. Voraussetzung des Vorhaben
1.3. Zeitplan und Ablauf
1.4. Stand der Technik
1.5. Kooperation
2. Projektergebnisse
2.1 Technische Ergebnisse
2.2. Verwertungsmöglichkeiten
2.4. F&E Ergebnisse von dritter Seite bzw. Marktumfeld

1. Projektorganisation

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes war die Entwicklung von Si-integrierten Mikrotransformatoren und Mikrospulen mit magnetischen Kernen, die sich durch hohe Wirkungsgrade bei der Arbeitsfrequenz (10MHz und darüber), hohe Induktivitäten von 5µH - 50 µH und durch eine hohe Kopplungsinduktivität auszeichnen. Um dieses Anforderungsprofil abzudecken, sollten Toroid-Transformatoren und planare Spulen in Dünnschichttechnik entwickelt werden. Durch ein Toroid-Design bei gleichzeitig geschichtetem Aufbau des Kerns und geeigneter Ausrichtung der magnetischen Vorzugsrichtung kann eine optimale Führung des magnetischen Flusses erreicht werden. Dies sollte zu einer signifikanten Steigerung der Induktivität und damit auch der Güte bei hohem Wirkungsgrad führen. Durch die Ringform des Magnetkerns ist eine hohe homogene Permeabilität bei hohen Frequenzen längs des Flusspfads eine technisch- naturwissenschaftliche Herausforderung. Um bei dieser Geometrie weiterhin die Anforderungen an die lokale Orientierung der magnetisch leichten Richtung erfüllen zu können, sollen neuartige metallische ferromagnetische Schichten mit gekreuzten Anisotropien verwendet werden. Die aus den neuartigen Kernen in Planartechnologie gefertigten Spulen und Transformatoren sollten bezüglich ihrer elektrischen Eigenschaften charakterisiert und die Technologie aufbauend auf diesen Erkenntnissen bezüglich hoher Güte, hoher Kopplung, hoher Induktivität und hoher Grenzfrequenz der Spulen und Transformatoren optimiert werden.

1.2 Vorraussetzungen des Vorhabens (Bisherige Arbeiten der Antragsteller und Literaturverzeichnis)

In der F&E Abteilung Corporate Technology, Innovative Electronics der Siemens AG, liegt seit vielen Jahren ein Schwerpunkt der Entwicklungstätigkeit auf magnetischen Schichtsystemen.

Die Kompetenz reicht von Werkstoffkenntnissen über Simulation komplexer Magnetkreise, Charakterisierung der magnetischen und elektrischen Eigenschaften von Bauelementen aus magnetischen Schichtsystemen (NanoMOK, Magnetokoppler, umfangreiche elektrische Messtechnik) über Elektronikauslegung für Messaufbauten bis hin zum Prototyping von einfachen elektronischen Systemen. Durch jahrelange Materialentwicklung auf dem Gebiet magnetischer Werkstoffe für ein ehemaliges Siemens-Tochterunternehmen (Vacuumschmelze GmbH) hat sich in der Arbeitsgruppe Magnetsensorik ein ausgeprägtes Knowhow auf dem Gebiet magnetischer Werkstoffe und Werkstoff-Composite aufgebaut, so dass im Projektvorhaben die Bewertung industriell relevanter physikalischer Messgrößen für Mikrotransformatoren mit magnetischen Kernen gewährleistet ist. Daneben besteht durch die F&E-Arbeiten auf dem Gebiet der GMR/TMR-Sensoren, der Arbeiten auf dem Gebiet der Magnetoelektronik und der magnetischen Speicherung von Daten (MRAM) auch ein breites Knowhow bezüglich der Machbarkeit und der Grenzen der Prozessintegration von magnetischen Materialien in die Siliziumprozesstechnology. Konkret wurden bereits vor Antragstellung

Berechnungen und Simulationen bezüglich der Hochfequenzeigenschaften von Induktivitäten mit Toroid-Kern durchgeführt.
Ausgewählte Veröffentlichungen der Arbeitsgruppe Magnetwerkstoffe und magnetische Microsysteme bei Siemens CT aus der Zeit vor der Antragstellung:

Magnetfeldinduzierte Anisotropien in Fe-Zr-B Legierungen
G. Rieger, G. Herzer, Materialica/Werkstoffwoche (1998)
Werkstoffe für die Informationstechnik, Wiley-VCH (1999)

Soft Magnetic Iron Plastic Composites for Electrical and Electronic Applications
J. Huber, W. von Gentzkow, G. Piecha, Materials Week, 2002 München

GMR Sensors for Contactless Position Detection
G. Rieger, K. Ludwig, J. Hauch, W. Clemens
European Magnetic Sensors and Actuators 2000, Dresden (2000)
Sensors and Actuators A91 (2001) 7-11

Adapting GMR Sensors for Integrated Devices
K. Ludwig, J. Hauch, R. Mattheis, K. U. Barholz, G. Rieger
EMSA2002, Athen (June 2002)

1.3 AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DES ARBEITSPLANES

Die Arbeiten am Projekt begannen mit dem Entwurf verschiedener Toroid-Transformatoren, planarer Spulen und Teststrukturen, aufbauend auf Simulationsergebnissen des Magnetkreises unter Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften der verwendeten magnetischen Dünnschichten z.B. FeCoBSi/SiO_2/FeCoBSi-Schicht mit gekreuzter Anisotropie und unserer Erfahrungen in der magnetischen Dünnschichttechnik. Nach den ersten Prototypen-Durchläufen zeigte sich, dass um den Meilenstein M2 zu halten ein neues Schichtsystem am Caesar unter Beratung von Hr. McCord vom IFW entwickelt werden musste. Nach aufwändigen Versuchen und elektrischen und magnetooptischen Messungen (am IFW und bei Siemens) konnte mit dem Schichtsystem aus NiFe/SiO_2/NiFe (auf Permaloybasis) die Lösung zum erreichen der Werte des Meilensteins M2 gefunden werden. Durch die ungünstigen magnetostriktiven Eigenschaften der FeCoBSi/SiO_2/FeCoBSi-Schicht wurde zum ersten Mal eine größere Umplanung erforderlich.
Teilweise parallel zur Optimierung des Schichtsystems wurden aufbauend auf die Ergebnisse der ersten Untersuchungen an den NiFe-basierten Schichten neue Toroid-Transformatoren und Planarspule so ausgelegt, dass die geforderten Induktivitätswerte bei hoher Kopplung und bei einer Arbeitsfrequenz von 10MHz erreichbar sein sollten.
Als weiterer Punkt wurde ein Testkonzept aufbauend auf Teststrukturen, in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Herrn Quandt (damals am Caesar), das -wenn möglich- eine Kontrolle des Fertigungsprozesses erlaubt, entwickelt. Dieses Konzept lies die Charakterisierung von wichtigen Einzelparametern, die

am fertigen Bauelement nicht mehr ohne erheblichen Mehraufwand gemessen werden können -wie z.B. Schichtwiderstände der einzelnen Metallisierungen und der magnetischen Kerne, Kontaktwiderstände usw.- zu.
Im Laufe des Projekts wurden 3 verschiedene Layouts mit jeweils unterschiedlichen Microspulen und Microtransformatoren entworfen. Zu den Layoutentwürfen wurden Masken beauftragt und entsprechend an die Arbeitsgruppe von Herrn Quandt (Caesar) weitergegeben.
Einen weiteren wichtigen Punkt des Projektes stellte die Charakterisierung der elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Übertragerbauelemente und der Teststrukturen durch elektrische und magnetische und gegebenenfalls magnetooptische Messungen dar. Darin enthalten war die Dokumentation der durch die Messungen gewonnenen Erkenntnisse zur Optimierung des Herstellungsprozesses, des Layouts (Redesign) und des Parametersatzes zur numerischen Simulation. Dazu wurden unter anderem der Gleichstromwiderstand der Wicklung der Frequenzgang der Induktivitäten bis zur Arbeitsfequenz parasitäre Kapazitäten und Widerstände sowie deren Frequenzgang bestimmt.
Es wurde ein Messplatz, der die Messung der wichtigsten elektrischen Basiseigenschaften wie z.B. Induktivität und Widerstand der Spulen direkt auf dem Wafer ermöglicht und so über ein „mapping“ dieser Eigenschaften über den Wafer wichtige Erkenntnisse zur Prozessoptimierung ermöglichte, aufgebaut.
Zur Unterstützung der Aktivitäten bestand ein Unterauftrag mit dem IFW, wo vor allem spezielle magnetooptische und induktive Messungen zur Beurteilung der Schichtqualität durchgeführt wurden. Darüber hinaus half die Expertise von Herr McCord bei der Auswahl und Optimierung der Schichtmaterialen beträchtlich. Der in Abb. 1 dargestellte ausführliche Zeitplan könnte bis auf kleine Abweichungen eingehalten werden.

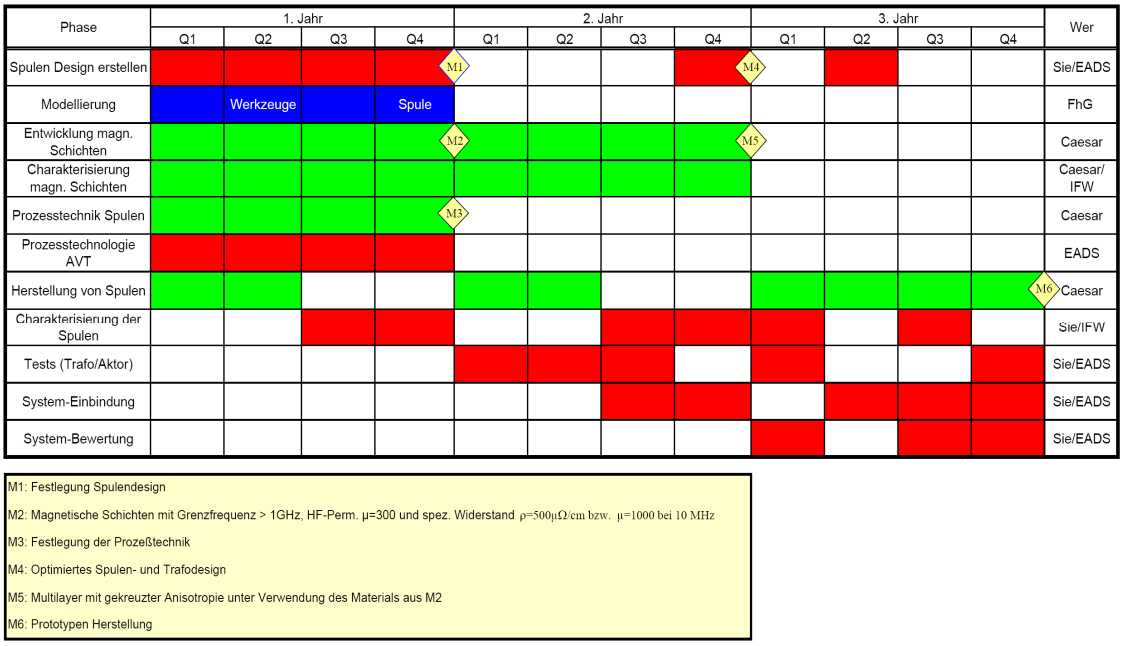


Abb. 1 Zeitplan

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Zum Zeitpunkt der Antragstellung wurden miniaturisierte Transformatoren und Spulen in großen Stückzahlen als hybrid aufgebaute bewickelte Ferritkerne angeboten (Abb. 2a). Dagegen wurden reine Induktoren auf Si-Basis in IC-Technologien (CMOS, Bipolar, BiCMOS) in der Regel als Spiralspulen ohne magnetischen Kern ausgelegt, die durch die obersten zwei Metallisierungslagen realisiert werden.

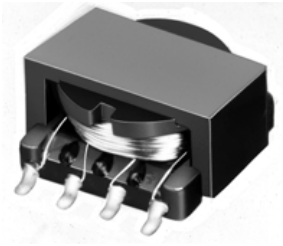
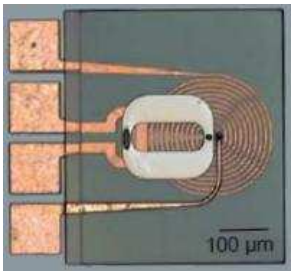
a)  b) 

Abb. 2 a) Kommerzieller, SMT-fähiger aber hybrid aufgebauter Kleintrafo. b) Forschungsansatz: Mikrotrafo mit Planarspulen (siehe b.)

Die hybrid aufgebauten Transformatoren sind in der Fertigung vergleichsweise aufwändig (Zeitaufwand) da es sich bei den hierbei zum Einsatz kommenden Fertigungsverfahren um serielle Fertigungsprozess handelt. Zudem müssen für den Einsatz der hybrid aufgebauten Transformatoren auch immer Hybridsysteme mit dem entsprechenden Platzbedarf und Materialaufwand gefertigt werden. Die auf dem IC integrierten Induktoren umgehen zwar die aufwändige Herstellung hybrider Systeme, verfügen aber nicht über einen geeigneten Magnetkern und weisen deshalb beträchtliche Nachteile wie geringe Induktivität, Güte und Kopplung auf.

Zu Projektbeginn wurden in der Literatur verschiedene Konzepte diskutiert und es wurde über die prototypische Realisierung und Untersuchung einiger dieser Konzepte berichtet. Ein damaliger Ansatz war die hybride Planarintegration von amorphem magnetischem Bandmaterial [12]. Weitere wichtige Ansätze betrafen die Dünnschichtintegration von magnetischen Kernen in verschiedenen Mikrotransformatorendesigns, wie planare Spiralspulen mit magnetischen Sandwichschichten (Abb. 2b, 3a) [1-3, 12, 15,16, 19], Solenoide [1,], d.h. ein Kern ist von einer Spule umwickelt (Abb. 3b), den sogenannte. „low resistivity inductor“ [3, 17, 18] und Streifenleiter mit magnetischem Mantel für sehr hohe Frequenzen (Abb. 3c) [4].

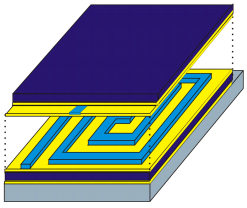
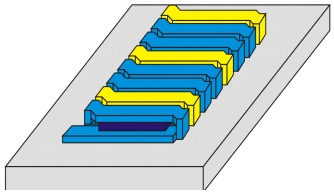
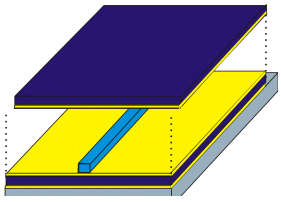
a)  b)  c) 

Abb.3.: Verschiedene gängige Mikrotrafo-und Induktor Designs, a) planare Spiralspule mit magn. Sandwich, b) Solenoid mit magn. Kern, c) Streifenleiter mit magn. Mantel.