

Kapitel 4

Charakterisierungs - und Testverfahren

4.1. Einführung

4.1.1. Test von Mikrosystemen

Um bei der Fertigung von Halbleiterbauelementen eine gleichbleibende Qualität und hohe Ausbeute des Produktes zu erhalten, ist während der Fertigung die Kontrolle, Erfassung und Bewertung einer Vielzahl von Prozeß- und Maschinenparametern sowie ein intensiver Test des Produkts auf Waferebene und als Bauelement notwendig. Für die derzeit in der Fertigung befindlichen Bipolar- und MOS-Technologien und die damit produzierten analogen und digitalen Bauelemente existieren dabei eine Vielzahl etablierter Meßverfahren, und am Markt ist eine breite Palette von Meßgeräten und Testern erhältlich. Dabei ist eine Einteilung in In-Line Messungen, Parametermessungen und Produkttest sinnvoll.

In-line Messungen sind meist physikalischer Art und umfassen während der Fertigung durchgeführte Messungen zu Schichtdicken, Strukturbreiten, Schichtspannungen, Alignments usw. an den Wafern und den darauf befindlichen Strukturen selbst aber auch zu Partikeldichten, Gasdrücken, Endpunkten usw. in den Anlagen. Neben dem REM als „Arbeitspferd“ kommen dabei die unterschiedlichsten Inspektionssysteme, Schichtdicken- und Schichtwiderstandsmeßgeräte sowie eine Vielzahl anlagenspezifischer Meßsysteme zum Einsatz.

Die Parametermessungen sind Messungen an elektrisch funktionsfähigen Teilstrukturen. Diese Messungen werden gewöhnlich nach Abscheidung und Strukturierung der ersten Metallisierungsebene, da hier erstmals eine elektrische Kontaktierung von Strukturen möglich ist, und am Ende der Waferfertigung nach dem Aufbringen und Strukturieren der letzten Passivierungsschicht durchgeführt. In erster Linie dienen diese Messungen der Kontrolle der Transistorparameter, da diese anderweitig während der Fertigung nur schwer erfassbar sind. Außerdem ist durch geeignete Teststrukturen auch die Kontrolle anderer wichtiger Parameter wie Kontaktgüten, Schichtwiderständen, Leckströmen usw., die bei In-line Messungen ebenfalls nur schwer erfaßt werden können, möglich. Durch entsprechende Array- oder Kettenstrukturen an unterschiedlichen Waferpositionen können dabei Wafer- und Lostrends mit produktrele-

vanten Anzahlen von Einzelstrukturen erfaßt werden. Vorteil dabei ist, daß Abweichungen im Prozeß sehr zeitig erfaßt und korrigiert werden und das Lose mit Prozeßunfällen verworfen werden oder ein Rework durchlaufen können /ZIM 82/. Außerdem sind die Ergebnisse der Parametertests sehr nützlich bei der Analyse von Ausfällen im Produkttest.

Der Produkttest umfaßt die Kontrolle der Funktionalität des Bauelementes unter den in der Spezifikation angegebenen Bedingungen. Dabei wird der erste Test der Bauelemente im Waferverbund durchgeführt. Gewöhnlich erfolgt dieser Test an der oberen durch die Spezifikation garantierten Temperaturgrenze. Mitunter, speziell für COB-Anwendungen, erfolgen zusätzliche Wafertests bei anderen Temperaturen. Ziel des Wafertests ist, eine möglichst gute Testabdeckung für die Tests am fertigen Bauelement zu erhalten, um die Zahl der Ausfälle nach dem Backend-Prozess zu minimieren. Die Prüflingsadaptierung beim Wafertest und die dabei übliche Beschränkung auf eine Temperatur wirken hier jedoch limitierend. Der Test der aufgebauten Bauelemente erfolgt üblicherweise bei mehreren Temperaturen. Da aber auch hier nicht jeder sich aus der Spezifikation ergebende Betriebspunkt abgetestet werden kann, müssen wiederum durch geeignete Tests an kritischen Punkten eine hohe Testabdeckung in minimaler Testzeit gewährleistet und Ausfälle beim Anwender vermieden werden.

Ein erster Aspekt ist hier, daß die Entwicklung von Mikrosystemen am IMS in starker Anlehnung an einen Standard-CMOS-Prozess (z.B. den C1540 mit 1,5 µm Strukturbreite und 40 nm Gate-Oxid für den in dieser Arbeit beschriebenen Sensor) erfolgt. Dabei wird versucht, durch nur wenige zusätzliche und kompatible Prozeßschritte oder Prozeßänderungen die für den Sensor oder Aktor notwendige Funktionalität zu erreichen. Damit kann auch ein Großteil der für die Standardtechnologien vorhandenen In-line Prüftechnik verwendet werden. Lediglich für die zusätzlichen Prozeßschritte muß je nach Bedarf Prüftechnik beschafft oder entwickelt werden. Im Bereich der Parametermeßtechnik werden alle für den Standardprozeß vorhandenen Teststrukturen und die entsprechende Prüftechnik weiter benutzt. Meist kann auch ein Teil der Sondertechnologie durch geeignete Teststrukturen mit der Standardprüftechnik erfaßt werden. Oft ist aber, wie auch im hier vorliegenden Fall, bedingt durch das dem Mikrosystem zugrundeliegende physikalische Prinzip eine Erweiterung der Parametermeßtechnik notwendig. Für den Produkttest steht die Funktionalität des Mikrosystems im Vordergrund. Da meist eine Eingangs- oder Ausgangsgröße nichtelektrisch ist und damit der Rahmen der konventionellen Prüftechnik gesprengt wird, erfolgt einhergehend mit der Bauelemententwicklung oft auch eine Prüftechnikentwicklung. Dabei kann der Schaltungsteil durch spezielle Testmodi und Testpads oder -pins vom übrigen Mikrosystem entkoppelt und damit den für konventionelle analoge bzw. digitale Schaltungen verfügbaren Testverfahren zugänglich gemacht werden. Bei der Entwicklung von Testverfahren für das aufgebaute Bauelement wird man sich an der Prüftechnik für vergleichbare konventionelle Sensoren und Aktoren orientieren können, beim Test der Funktionalität des kompletten Bauelementes im Waferverbund jedoch meist Neuland betreten.

Ein zweiter Aspekt ist die Tatsache, daß die Entwicklung der Prüftechnik nicht entkoppelt von der Entwicklung des Bauelementes erfolgt. Vielmehr teilt man den Entwicklungsprozeß oft in die Technologieentwicklung einerseits und die Analyse, Optimierung und Charakterisierung des Produktes andererseits ein. Die Charakterisierungsergebnisse sind dabei wichtige Informa-

tionsquelle sowohl für die Analyse und Optimierung des Produkts bezüglich des Designs als auch für die Entwicklung der Technologie. Weiterentwicklung von Technologie und Design wiederum erfordern verfeinerte oder neue Charakterisierungsmethoden. Technologie- und Designvariationen gestatten deren Evaluierung. Am Ende des Entwicklungsprozesses werden die für die Fertigung notwendigen Testverfahren aus den umfangreicheren Charakterisierungsmessungen entsprechend der bestehenden Prozeßrisiken und kritischen Bauelementeeigenschaften bezüglich der Spezifikation ausgewählt. Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die theoretische Analyse und Optimierung erfolgte, sollen nun die zur Charakterisierung der Technologie und des Produktes verwendeten Meßverfahren beschrieben werden. Diese wurden so konzipiert, daß sie für eine Serienproduktion verwendet oder aber leicht dafür modifiziert werden können.

Im folgenden werden nach einer Diskussion der für eine Charakterisierung nützlich erscheinenden Effekte an dünnen ferromagnetischen Schichten zwei Verfahren zur In-line Charakterisierung der Schichten nach der Abscheidung beschrieben. Anschließend erfolgt die Beschreibung von Teststrukturen, die die am IMS vorhandenen Teststrukturen zur Parametermessung für die Sensortechnologie ergänzen. Der nächste Abschnitt beinhaltet Verfahren zur Charakterisierung integrierter Spulen im Waferverbund. Diese sind einerseits zur Erfassung der magnetischen Eigenschaften der integrierten Spulen im Sinne einer erweiterten Parametermessung als auch als Grundlage von Produkttests im Waferverbund für Bauelemente basierend auf integrierten Spulen mit ferromagnetischen Kernen geeignet. Abschließend werden das Testsystem für aufgebaute Sensoren und damit durchführbare Messungen beschrieben.

4.1.2. Nutzbare physikalische Effekte

Wichtigster Effekt zur Charakterisierung bleibt die Induktion einer Spannung in einer Spule mit ferromagnetischen Kern bei Ummagnetisierung des Kerns durch ein magnetisches Wechselfeld. Die Magnetisierung ferromagnetischer Kerne durch ein homogenes Feld (Kapitel 2.2.) bzw. durch Ströme in den integrierten Spulen (Kapitel 2.3.) und die Signalentstehung an der nichtlinearen Materialkennlinie (Kapitel 2.4.) sowie entsprechende FEM-Rechnungen (Kapitel 2.5.) wurden bereits beschrieben.

Ein interessanter Effekt ist der magnetooptische Kerr-Effekt (MOKE). Elektro-optische Methoden werden bereits mit Erfolg zum Test hochintegrierter CMOS-Schaltungen verwendet /FRI 90/. Die in Kapitel 3.2. diskutierten Domäneneffekte wurden bereits an einem auf dem MOKE basierenden Polarisationsmikroskop aufgenommen. Somit ist es naheliegend, diesen Effekt auch zur quantitativen Schichtcharakterisierung zu benutzen.

Ausführliche Abhandlungen zu diesem Effekt finden sich in /HUB 98/, /SCH 74/ und die Grundlagen in /BOR 33/. Im folgenden soll der Effekt kurz entsprechend /SCH 90/ beschrieben werden. Der magnetooptische Kerr-Effekt bewirkt eine Drehung der Polarisations Ebene

linear polarisierten Lichtes bei der Reflexion an magnetischen Materialien. Der Effekt läßt sich phänomenologisch durch das vereinfachte dielektrische Gesetz für Effekte erster Ordnung

$$\mathbf{D} = \varepsilon \begin{pmatrix} 1 & iQm_3 & -iQm_2 \\ -iQm_3 & 1 & iQm_1 \\ iQm_2 & -iQm_1 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{E} = \varepsilon \mathbf{E} - i \varepsilon Q \mathbf{m} \times \mathbf{E} \quad (4.1)$$

beschreiben. Es verknüpft den \mathbf{E} -Vektor der Lichtwelle mit dem Vektor \mathbf{D} der im Material induzierten elektrischen Verschiebungsdichte. Die Richtung des \mathbf{D} -Vektors bestimmt die Schwingungsrichtung des reflektierten Lichtes. Im zweiten Term von (4.1) entsteht aus dem Kreuzprodukt $\mathbf{m} \times \mathbf{E}$ eine magnetisierungsabhängige Komponente, die senkrecht zur Magnetisierung \mathbf{m} und zum \mathbf{E} -Vektor der einfallenden Welle und damit auch zu deren Polarisierungsrichtung steht und folglich zu einer magnetisierungsabhängigen Drehung der Polarisationssebene des reflektierten Strahls führt. Q ist eine frequenzabhängige komplexe Materialkonstante, die in etwa der Sättigungsmagnetisierung proportional ist. Interessant und anschaulich ist die Interpretation des Kreuzproduktes als Lorentzkraft auf die vom Licht angeregten Elektronen /HUB 98/. Demnach regt der \mathbf{E} -Vektor der einfallenden Lichtwelle die Elektronen zu einer Schwingung parallel zu seiner Polarisierungsrichtung an, und das reflektierte Licht hat für verschwindende Magnetisierung die gleiche Polarisierungsrichtung wie das einfallende. Ist die Probe jedoch magnetisiert, induziert die Lorentzkraft eine sekundäre Schwingungskomponente senkrecht zur Primärschwingung und senkrecht zur Magnetisierung. Daraus resultiert eine sekundäre Komponente des reflektierten Lichtes und nach Überlagerung mit der Primärkomponente eine magnetisierungsabhängige Drehung der Polarisationsrichtung des Lichtes.

Aus den unterschiedlichen Lagerrelationen der Magnetisierung zu Einfallsebene und Polarisierung des Lichtes unterscheidet man zwischen polarem, longitudinalem und transversalem Kerr-Effekt /HUB 98/. Aufgrund der geringen Sättigungsmagnetisierung und dem daraus resultierenden kleinen Q wird der longitudinale Kerr-Effekt für den später beschriebenen Meßplatz verwendet, da hier die resultierende Kerr-Amplitude am größten ist.

Außer zur quantitativen Schichtcharakterisierung kann der Effekt zur Domänenbeobachtung benutzt werden. Für die Abbildungen in Kapitel 3.2. wurde das am IFW Dresden vorhandene Gerät verwendet. Es handelt sich dabei um ein Polarisations-Auflichtmikroskop der Firma Zeiss (Jenapol), dessen Optik und Ausstattung für den Kerr-Effekt optimiert wurde /SCH 90/. Die Mikroskopbilder werden digital nach dem Differenzbildverfahren weiterverarbeitet. Abb. 4.1 zeigt ein Bild des Gerätes. Ausführliche Darstellungen zu Aufbau und technischen Details finden sich in /PFA 88/ und /SCH 86/.

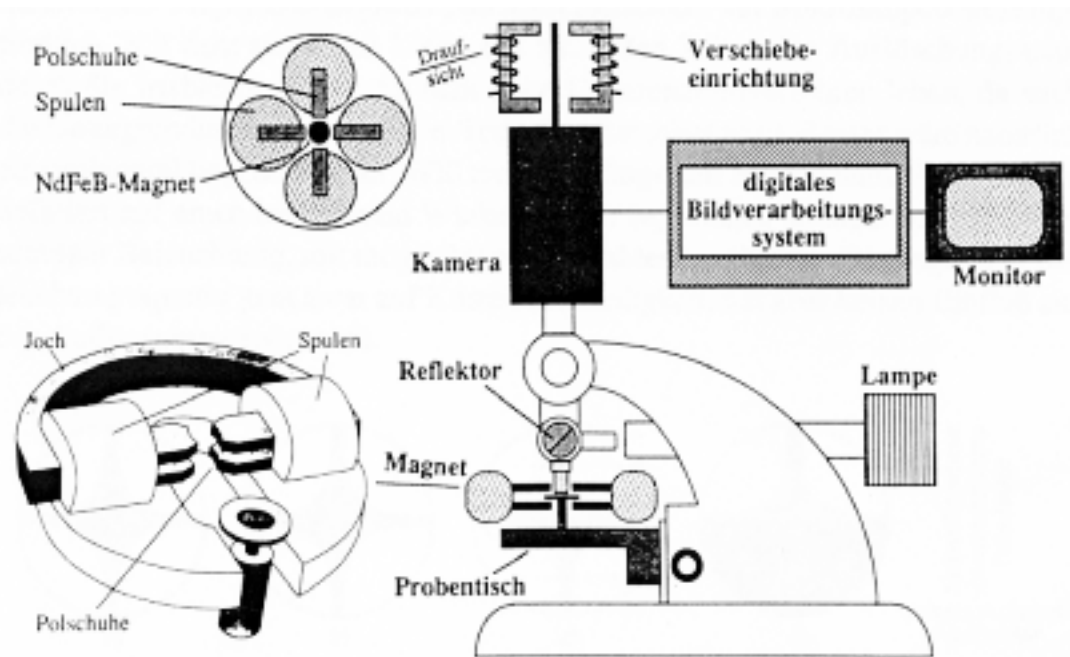


Abb. 4.1: Kerr-Mikroskop aus /SCH 90/

Ein weiterer zunächst für die Parametermessungen interessant erscheinender Effekt ist der magneto-resistive Effekt (MR). Dieser Effekt beinhaltet den Zusammenhang zwischen Magnetisierung und elektrischem Widerstand einer ferromagnetischen Schicht.

Entsprechend /GOE 89/ läßt sich der Effekt als die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes ρ vom Winkel θ zwischen der Magnetisierung M und dem Strom I (ρ_{\parallel} mit $\theta = 0^\circ$, ρ_{\perp} mit $\theta = 90^\circ$) beschreiben

$$\rho(\theta) = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2 \theta = \rho_{\perp} + \Delta\rho \cos^2 \theta . \quad (4.2)$$

Der Quotient $\Delta\rho/\rho_{\perp}$ wird auch als der magneto-resistive Effekt bezeichnet und liegt in der Größenordnung weniger Prozente. Um bei den zulässigen Stromdichten mit der üblichen Parametermeßtechnik erfaßbare Spannungsänderungen zu erreichen, sind hohe Widerstände notwendig. Diese erhält man bei einer vorgegebenen Schichtdicke durch lange und schmale Strukturen, die zu einer hohen, unerwünschten magnetischen Formanisotropie führen. Um diese zu vermeiden, werden Mäanderstrukturen u.ä. verwendet. Prinzip ist, durch magnetische Kopplung zwischen den Streifen die störende Formanisotropie zu vermeiden. Allerdings muß dazu der Abstand zwischen den Streifen in der Größenordnung der Schichtdicke ($0.5 \mu\text{m}$) liegen. Bereits bei Mäandern mit $10 \mu\text{m}$ Streifenabstand traten Probleme bei der Strukturierung mittels des in Kapitel 1 beschriebenen Opferschichtverfahrens auf, so daß auf die Ausnutzung dieses Effektes verzichtet werden mußte.

Im Zusammenhang mit ferromagnetischen Materialien existieren noch eine Reihe weiterer interessanter physikalischer Effekte. Erwähnt seien hier die Magnetostriktion und der magneto-akustische Effekt /JIL 91/, die jedoch der üblichen Parametermeßtechnik nur schwer zugänglich sind und auf deren Behandlung an dieser Stelle verzichtet werden soll.