Qualitätskontrolle mittels digitaler Bildverarbeitung

Praktikumsbericht
von
Dietmar Kreye
(E-mail: d.kreye@gmx.de)

IBM Deutschland Speichersysteme GmbH
Werk Mainz

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Informatik und Praktische Mathematik

Mainz
23. Dezember 1998

Führungskraft:	Dipl.-Ing. E. Mähringer-Kunz
Betreuer:	Dipl.-Ing. R. Göbel

Beginn des Praktikums:	01.09.1998
Ende des Praktikums:	31.12.1998

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Der Schreib-/Lesekopf **3**
2.1 Herstellung 3
2.2 J4-Layer 4

3 Das AIM-Tool **8**
3.1 Hardware 8
3.2 Software 11

4 Spezifikation der Inspektion des J4-Fotostadiums **12**
4.1 Teilprüfungen 12
4.2 Typische Fehler und Variationen 13
4.3 Konfigurierbarkeit 13
4.4 Dokumentation der Inspektionsergebnisse 16

5 Implementierung **17**
5.1 Wafer-Ausrichtung korrigieren 17
5.2 Element finden 18
5.3 Statistische Grundlagen 19
5.3.1 Histogramm 19
5.3.2 Statistik des Histogramms 19
5.4 Prüfung eines mittleren Grauwertes 20
5.5 Partikelprüfung 20
5.6 Kantenprüfung 21
5.7 Prüfung der Layer-Ausrichtung 22
5.7.1 Vertikale Ausrichtung 22
5.7.2 Horizontale Ausrichtung 24

6 Zusammenfassung **26**

Literaturverzeichnis **28**

Abbildungsverzeichnis

2.1 Erzeugung von Strukturen durch ein galvanisches Bad 4
2.2 Erzeugung von Strukturen durch Kathodenzerstäubung und Ätzen 5
2.3 Ein einzelnes Element vor Anwendung der J4-Prozeßschritte . . 6
2.4 Belichtungsmaske für ein einzelnes Element des J4-Layers . . . 7
2.5 Ein einzelnes Element im J4-Fotostadium 7

3.1 Das AIM-Tool 9

4.1 Schatten um die untere Kontaktfläche des J4-Layers 14
4.2 Layout eines Wafers 15

5.1 Prinzipieller Ablauf der Inspektion 17
5.2 Ermittlung des Ausrichtungswinkels φ 18
5.3 Prüfung der vertikalen Layer-Ausrichtung 22
5.4 Prüfung der horizontalen Layer-Ausrichtung 25

Kapitel 1

Einleitung

Das Unternehmen „IBM Deutschland Speichersysteme GmbH“ (nachfolgend IBM genannt) mit Sitz in Mainz ist ein führender Anbieter von Speichertechnologie. Es stellt Dünnfilm-Magnetplatten und Schreib-/Leseköpfe für Festplattenlaufwerke her, außerdem entwickelt es Software für Speichersysteme.

Schreib-/Leseköpfe werden in mehreren Schichten (Layer) mit Hilfe der sogenannten Dünnfilmtechnologie auf einer runden Keramikscheibe (Wafer) aufgebaut. Für jedes einzelne Layer sind mehrere Arbeitsschritte nötig. Dies sind unter anderem:

- Oberflächenbehandlungen;
- Fotoprozesse;
- galvanische Prozesse;
- Kathodenzerstäubung;
- Ätzprozesse.

Da die Strukturen eines Schreib-/Lesekopfes sehr klein (µm) sind, ist der Herstellungsprozeß recht fehleranfällig. Um den Ausschuß möglichst gering zu halten, werden daher nach allen kritischen Prozeßschritten Qualitätskontrollen vorgenommen. Ein dabei als fehlerhaft erkannter Wafer wird nach Möglichkeit noch einmal überarbeitet; bei irreversiblen Schäden wird er verschrottet.

Bisher werden diese Qualitätskontrollen zu großen Teilen vom Menschen (Operator) durchgeführt. Dazu werden die Wafer vom Operator unter ein Mikroskop gelegt und einer visuellen Kontrolle unterzogen. Diese Vorgehensweise hat jedoch eine ganze Reihe von Nachteilen. Weil der Operator ermüdet oder sich ablenken läßt, werden etwa Fehler übersehen oder Wafer beim Hantieren beschädigt. Ferner ist die manuelle Kontrolle sehr zeitaufwendig.

Daher hat die Abteilung „Test Engineering (TE) 2“ der IBM in Zusammenarbeit mit der Firma LEICA das Tool AIM (Automatic Inspection Metrology) entwickelt, mit dessen Hilfe die Inspektion der Wafer automatisiert werden kann. Das AIM-Tool übernimmt sowohl das Handling der Wafer als auch die visuelle Inspektion. Letzteres geschieht mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung auf PC (Personal Computer) -Basis.

Das AIM-Tool wird für die ersten drei Layer in den Produktionsstätten Mainz und San José (USA) bereits erfolgreich eingesetzt. Die Aufgabe für das Praktikum besteht darin, ein AIM-Tool für ein weiteres Layer — das sogenannte J4-Layer — fertigzustellen. Dazu muß in enger Zusammenarbeit mit den verantwortlichen Prozeßingenieuren zuerst eine genaue Spezifikation der notwendigen Inspektionsroutinen erarbeitet werden. Anschließend ist diese Spezifikation in eine entsprechende Bildverarbeitungs-Software umzusetzen, und letztere im realen Einsatz auf der Inspektions-Hardware zu testen und zu debuggen. Der Projektplan sieht vor, daß das J4-AIM im Februar 1999 für den Einsatz in der Produktionslinie qualifiziert wird.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt: Das nachfolgende Kapitel 2 erläutert kurz den Herstellungsprozeß eines Schreib-/Lesekopfes und stellt das J4-Layer vor; in Kapitel 3 wird der prinzipielle Aufbau des AIM-Tools beschrieben. Das Kapitel 4 enthält die Spezifikation der J4-Inspektion und Kapitel 5 dokumentiert die Software-Implementierung dieser Inspektion. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung in Kapitel 6.

Kapitel 2

Der Schreib-/Lesekopf

Der Schreib-/Lesekopf (SL-Kopf) ist Teil eines Festplattenlaufwerkes und dient dazu, Informationen auf der magnetischen Plattenoberfläche zu speichern bzw. von dieser auszulesen.

2.1 Herstellung

Die Herstellung eines SL-Kopfes ist ein sehr komplexer und vielschrittiger Prozeß. Als Basis dient eine runde Keramikscheibe (Wafer) von 125 μm Durchmesser. Auf diesem Wafer werden in mehreren Schichten (Layer) Metalle bzw. Isolatoren bestimmter Struktur aufgetragen, bis schließlich mehrere Tausend Schreib-/Leseelemente entstanden sind.[1] Anschließend wird der Wafer in die einzelnen SL-Elemente zersägt und jedes dieser SL-Elemente durch Formschleifung u. ä. zu einem flugfähigen SL-Kopf (Slider) weiterverarbeitet. Insgesamt dauert die Produktion eines SL-Kopfes etwa zwei bis drei Monate.

Der Aufbau der SL-Elemente auf dem Wafer wird in Dünnfilmtechnologie durchgeführt. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten, die einzelnen Schichten, die eine Dicke von teilweise weniger als 1 μm besitzen, aufzubringen. Im ersten Verfahren (siehe Abbildung 2.1) wird der Wafer zuerst mit Fotolack überzogen, anschließend wird durch Maskenbelichtung und nachfolgende Entwicklung die gewünschte Layer-Struktur erzeugt. Danach wird auf den nicht von Fotolack bedeckten Regionen mit Hilfe eines galvanischen Bades Material aufgetragen (plating). Die Alternative (siehe Abbildung 2.2) besteht darin, zuerst durch Ka-

[1]Zur Zeit kommen etwa 14 verschiedene Layer zum Einsatz und es befinden sich knapp 20.000 Elemente auf einem Wafer.

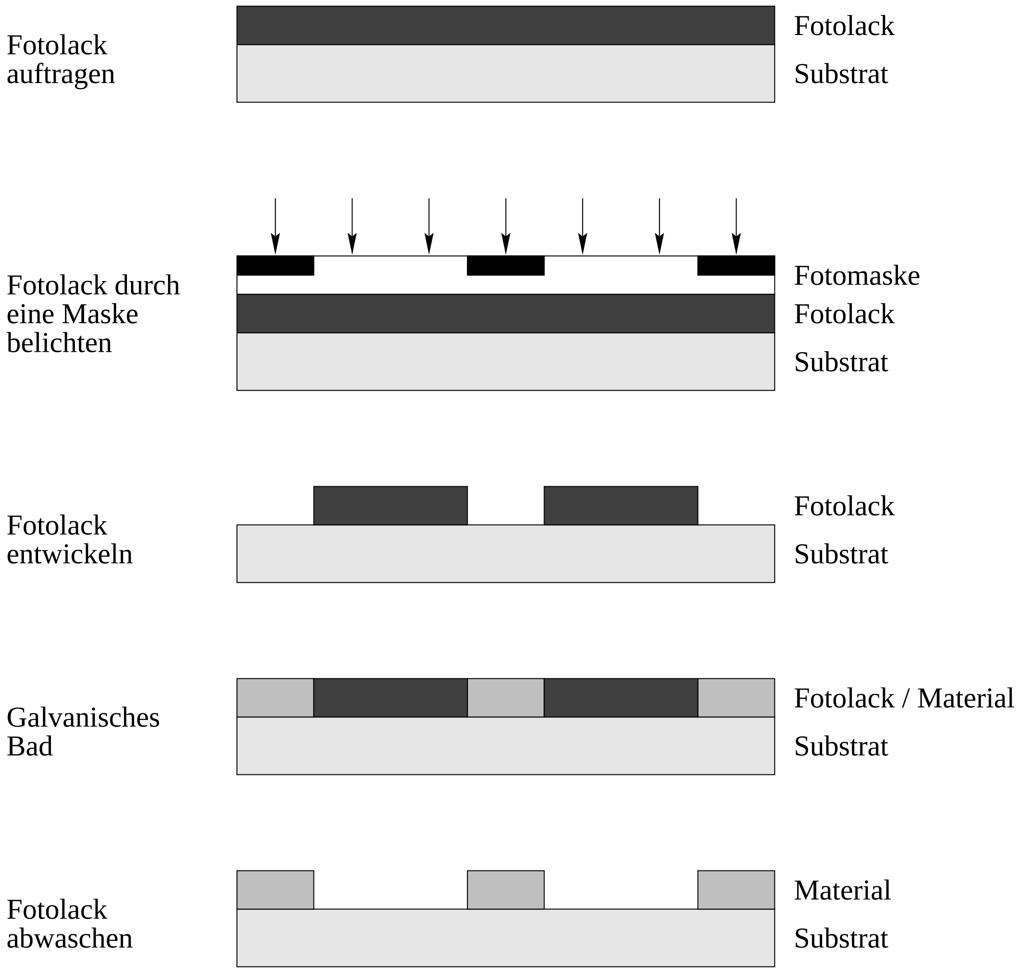

Abbildung 2.1: Erzeugung von Strukturen durch ein galvanisches Bad

thodenzerstäubung (sputtering) die gesamte Wafer-Oberfläche mit einer Materialschicht zu überziehen. Anschließend wird mit Fotolack die *negative* Struktur des Layers erzeugt und nicht bedeckte Teile werden in einem Ätzbad weggeätzt.

2.2 J4-Layer

Vor der Anwendung der J4-Prozeßschritte hat ein einzelnes Element auf dem Wafer die in Abbildung 2.3 gezeigte Form. Auf einer durch Sputtering aufgetragenen Isolationsschicht aus Aluminiumoxid (Al_2O_3), dem sogenannten Gap, befinden sich die Flügel des Leseelementes, die in ihrer Mitte den Lesespalt

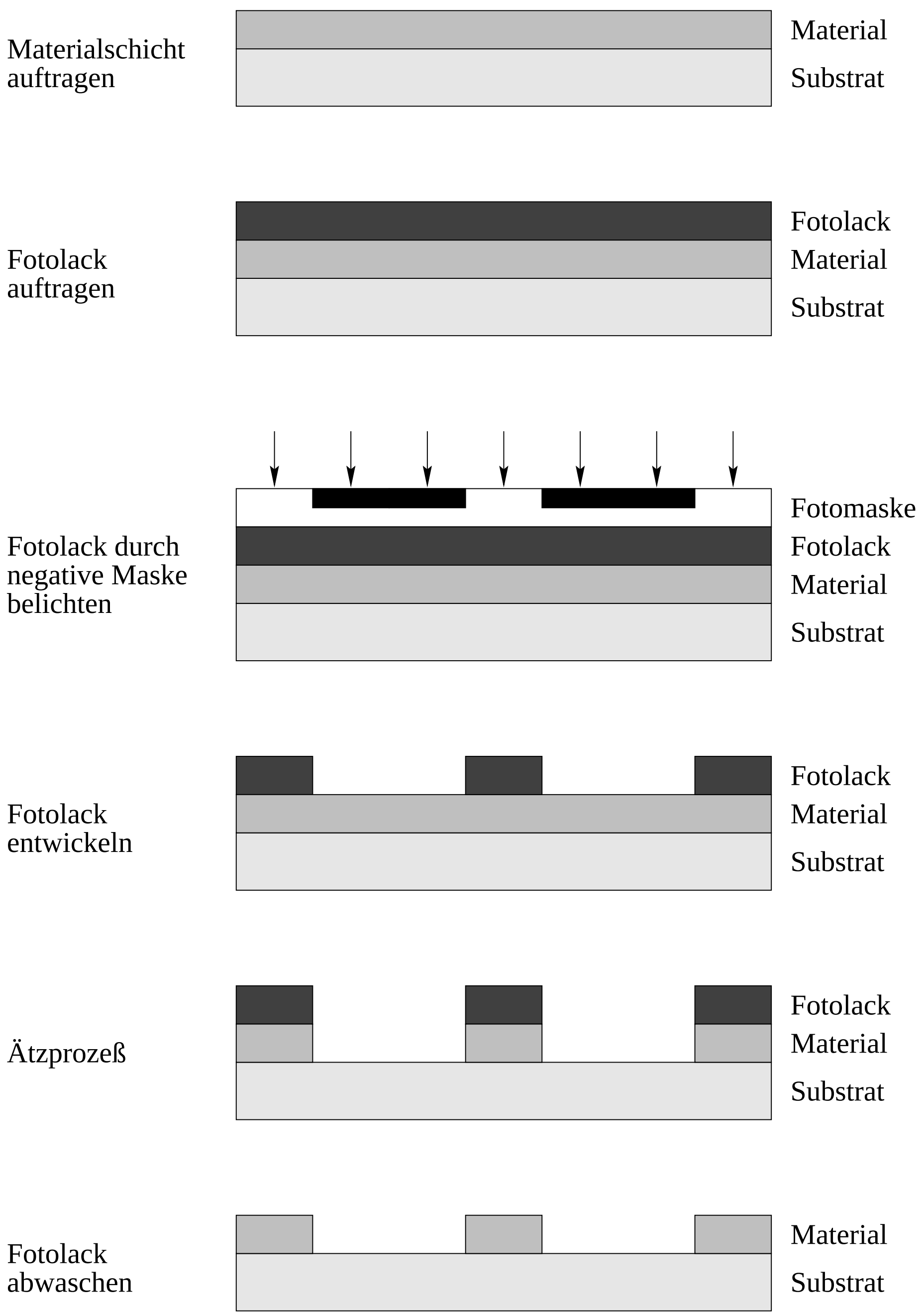

Abbildung 2.2: Erzeugung von Strukturen durch Kathodenzerstäubung und Ätzen

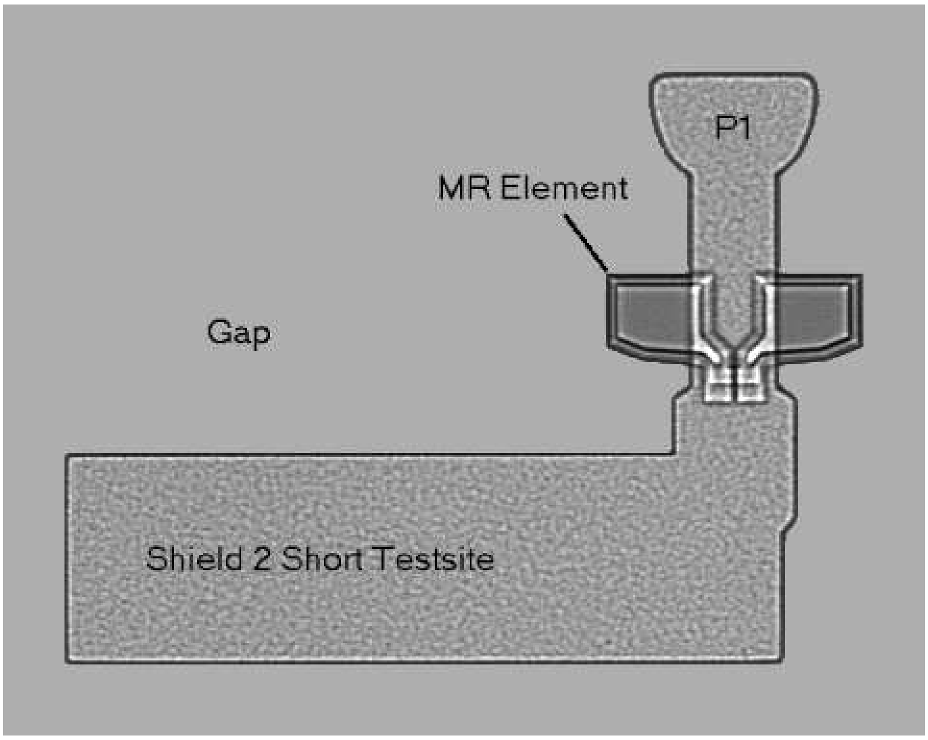

Abbildung 2.3: Ein einzelnes Element vor Anwendung der J4-Prozeßschritte

bilden. Darüber ist Nickel-Eisen (NiFe) aufgebracht — diese Schicht wird P1 genannt —, das im unteren Teil eine große Kontaktfläche ausbildet, mit deren Hilfe das fertige Element auf Kurzschlüsse getestet werden kann (shield 2 short testsite).

Das J4-Layer dient nun dazu, das Gap um das Element herum so weit zu entfernen, daß nur eine bestimmte Region übrigbleibt, auf die in nachfolgenden Prozeßschritten die Spule des Schreibelementes aufzubringen ist (coil area). Dazu wird — wie in Abschnitt 2.1 beschrieben — Fotolack aufgetragen, mit der in Abbildung 2.4 dargestellten Maske belichtet und entwickelt. Anschließend hat das Element das in Abbildung 2.5 wiedergegebene Aussehen. Ein Teil des Gaps (coil area) und das gesamte P1 mit MR-Element sind mit Fotolack überzogen, der äußere Teil des Gaps ist fotolackfrei und im folgenden wegzuätzen. Dieser Prozeßzustand heißt J4-Fotostadium.

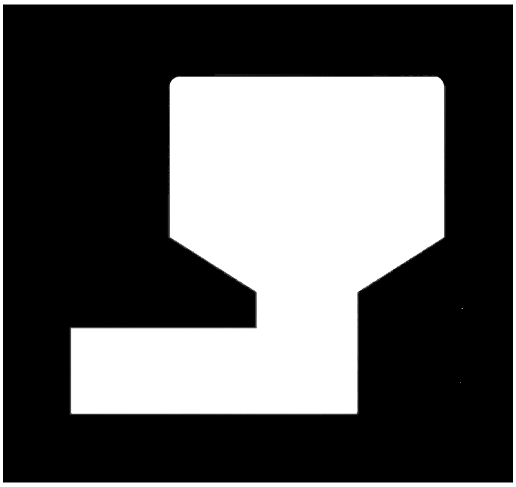

Abbildung 2.4: Belichtungsmaske für ein einzelnes Element des J4-Layers

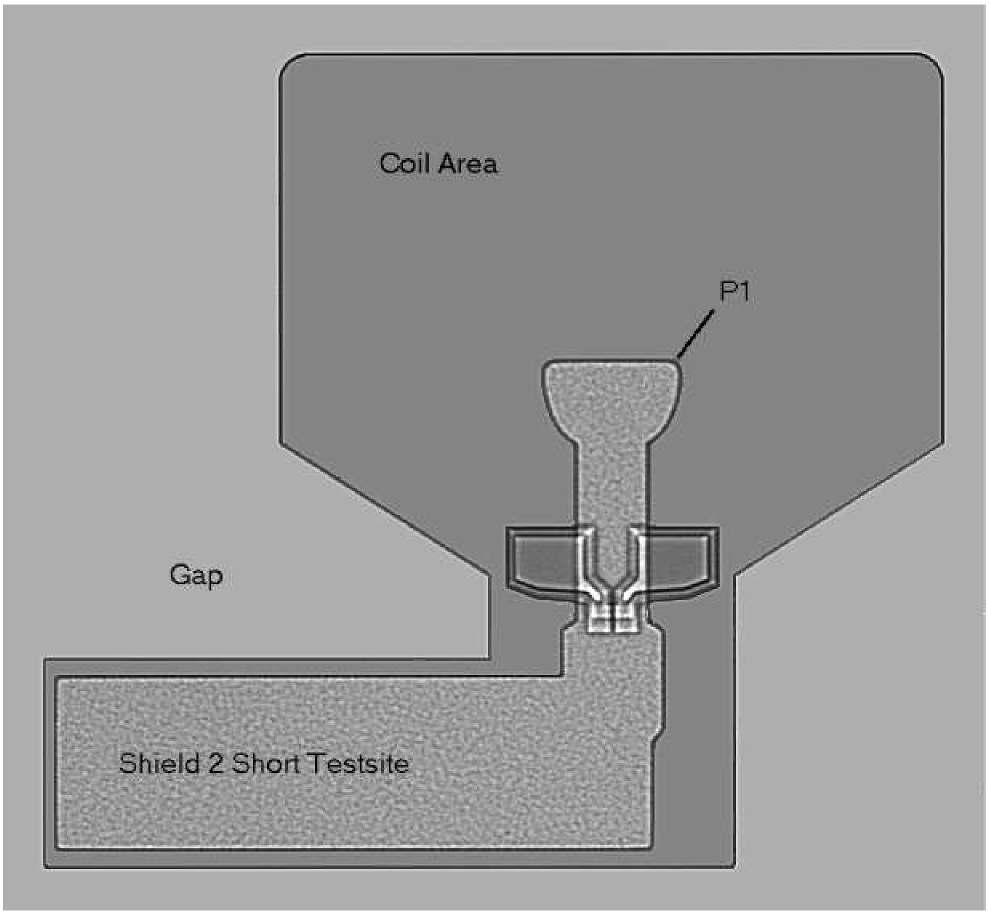

Abbildung 2.5: Ein einzelnes Element im J4-Fotostadium

Kapitel 3

Das AIM-Tool

Das AIM (Automatic Inspection Metrologie) -Tool ist ein Arbeitsplatz für die automatische Wafer-Inspektion.

3.1 Hardware

Folgende wesentliche Hardware-Komponenten gehören zu dem Inspektionssystem (siehe Abbildung 3.1):

- **Zwei Containerlifte**

  Jeder der beiden Lifte kann einen Container mit Wafern aufnehmen (Markierung (11) in der Abbildung). Vor Beginn der Inspektion enthält der Container auf Lift 1 alle zu inspizierenden Wafer und der auf Lift 2 ist leer. Nach Ablauf der Inspektion enthält der Container auf Lift 1 die fehlerfreien und der auf Lift 2 die schadhaften Wafer.

- **Waferhandler**

  Der Waferhandler sorgt für den Transport der Wafer aus einem der Container (11) über den Tumbler mit WNR auf den Inspektionstisch (8) und wieder zurück in einen Container (11).

- **Tumbler**

  Der Waferhandler plaziert jeden Wafer, der sich auf dem Weg von einem Container (11) zum Inspektionstisch (8) befindet, einmal auf dem Tumbler. Dort wird zum einen vom WNR die Seriennummer des Wafers gelesen, zum anderen wird der Wafer in eindeutiger Weise ausgerichtet, um

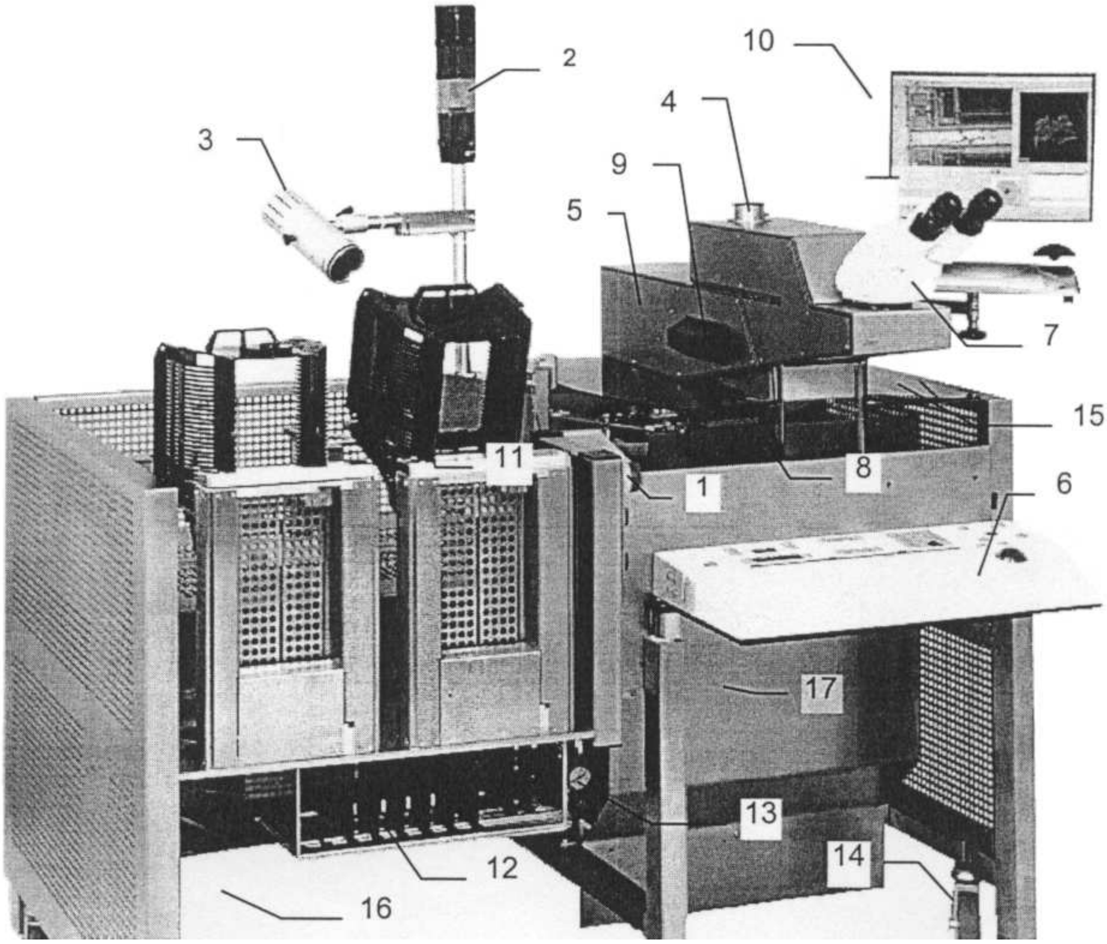

Abbildung 3.1: Das AIM*-Tool*

die spätere Inspektion zu erleichtern. Diese Ausrichtung erfolgt an Hand einer Einkerbung des Randes, die sich bei jedem Wafer an der gleichen Stelle befindet, der sogenannten Notch (siehe auch Abbildung 4.2 on page 15).

- **Wafer Number Reader**

  Jeder Wafer besitzt zur Identifizierung auf seiner Unterseite eine eindeutige Seriennummer. Der Wafer Number Reader (WNR) ist in der Lage, diese Seriennummer zu lesen, während sich der Wafer auf dem Tumbler befindet.

- **Inspektionstisch**

  Wenn ein Wafer vom Waferhandler auf dem Inspektionstisch (8) plaziert worden ist, liegt er dort dank der Ausrichtung auf dem Tumbler in einer definierten Orientierung. Da der Inspektionstisch in allen drei räumlichen Achsen bewegbar ist, können anschließend beliebige Positionen des Wafers unter dem Mikroskop (5) angefahren und fokussiert werden.

- **Mikroskop**

  Um die winzigen Strukturen auf dem Wafer erkennen zu können, ist über dem Inspektionstisch (8) ein Mikroskop (5) positioniert. Es verfügt über einen Revolver mit sechs Objektiven verschiedener Auflösung.

- **CCD-Kamera**

  Auf das Mikroskop (5) ist eine CCD (Charge Coupled Device) -Kamera montiert (Markierung (4), in der Abbildung nicht dargestellt), die ein analoges Grauwertbild liefert. Der Ausgang der Kamera ist mit dem Framegrabber eines PCs verbunden, der die empfangenen Daten in digitale Grauwertbilder mit 8-Bit Grauwerttiefe quantisiert. Anschließend steht der Bilderstrom im PC zur Weiterverarbeitung zur Verfügung.

- **Tastatur und Monitor**

  Tastatur (6) und Monitor (10) sind die Ein- und Ausgabegeräte für den Operator in der Produktion. Über die Tastatur erfolgt die Bedienung der notwendigen Software (siehe Abschnitt 3.2); der Monitor dient zur Überwachung des Inspektionsvorganges über Diagnosemeldungen der Software und das sogenannte Live-Bild, das ständig das aktuelle Videosignal des Framegrabbers wiedergibt.

3.2 Software

Die Hardware des AIM wird von einem PC gesteuert und kontrolliert, der an Hand der Videodaten auch die eigentliche Inspektion durchführt. Dabei kommen die folgenden, in den Programmiersprachen C [KR88] bzw. C++ [Stro97] entworfenen, Software-Module zum Einsatz:

- Es existieren Bibliotheken mit Routinen zur Steuerung der Hardware (Waferhandler, Inspektionstisch, Mikroskop, Framegrabber, ...).
- Das Bildverarbeitungssystem WIVIS (Workstation Industrial Vision and Imaging System) stellt allgemeine Bildverarbeitungs (BV) -Routinen (Histogramm, Filter, Kantendetektion, Winkeldetektion, Bereichsanalyse, Korrelation, OCR, ...) bereit. Alle diese BV-Routinen können auf einen beliebigen viereckigen Ausschnitt eines Videobildes, den sogenannten Locus (*lat.:* Ort), angewendet werden.
- Die für die jeweilige Inspektionsaufgabe spezifischen Anforderungen werden in einem Inspektionsprogramm implementiert, das auf den vorgenannten Modulen aufsetzt. Im allgemeinen übernimmt dieses Programm die folgenden Aufgaben: Interaktion mit dem Operator, Durchführung der Inspektion, Auswertung der Inspektion, Dokumentierung der Inspektionsergebnisse (Reporting).

Kapitel 4

Spezifikation der Inspektion des J4-Fotostadiums

Bei der J4-Inspektion (Fotostadium) sollen ausgewählte Elemente auf dem Wafer — in der Praxis werden es ungefähr 30 verschiedene Elemente sein — auf eventuell vorhandene Defekte untersucht werden. Für jedes Element wird dabei derselbe Satz von Teilprüfungen durchgeführt. Anschließend müssen die Ergebnisse ausgewertet und dokumentiert werden (Reporting). Auf der Basis dieser Inspektionsergebnisse ist der Wafer dann als „in Ordnung" bzw. „fehlerhaft" zu klassifizieren.

Da der Produktionsprozeß eines SL-Kopfes unter Umständen gewissen Schwankungen unterworfen ist und ferner in der Produktion mehrere verschiedene Produkte mit etwas unterschiedlichen Strukturen hergestellt werden, muß das Inspektionsprogramm ausreichend konfigurierbar sein, um flexibel auf neue Produkte und Produktvariationen reagieren zu können.

4.1 Teilprüfungen

Die Inspektion des J4-Fotostadiums umfaßt die folgenden Teilprüfungen:

(1) **Prüfung der mittleren Grauwerte**

Es müssen die mittleren Grauwerte der Region ohne Fotolack, sowie der Fotolackflächen auf Gap bzw. P1 ermittelt und mit Sollwerten verglichen werden.

(2) **Partikelprüfung**

Die fotolackfreie Fläche muß auf Partikel und Beschädigungen (z. Bsp. Fotolackrückstände) untersucht werden.

Gleiches gilt für die Fotolackflächen auf Gap bzw. P1. Insbesondere ist dort die Vollständigkeit des Fotolacks zu überprüfen.

(3) **Kantenprüfung**

Es muß das Vorhandensein und die Qualität (Linearität) der horizontalen und vertikalen Kanten von J4 und P1 geprüft werden.

(4) **Prüfung der Layer-Ausrichtung**

Es ist sicherzustellen, daß P1 und J4 korrekt zueinander ausgerichtet sind. Vor allem müssen an der Kontaktfläche für Kurzschlußtests die Kanten des P1 echt innerhalb des J4 liegen, damit P1 beim Ätzen nicht beschädigt wird.

4.2 Typische Fehler und Variationen

Die am häufigsten auftretenen Fehler beim J4-Layer im Fotostadium sind:

- fehlende Fotolackschicht;
- beschädigte oder unvollständige Fotolackschicht;
- Verunreinigungen durch Partikel o. ä.

Es treten aber auch einige Prozeßvariationen auf, die *nicht* als fehlerhaft anzusehen sind. Das in Abbildung 4.1 dargestellte Element weist zum Beispiel einen ausgeprägten Schatten um die untere Kontaktfläche auf. Dieser Schatten ist produktionsbedingt und führt zu keiner Einschränkung der Funktionstüchtigkeit des SL-Elementes. Daher darf die Inspektions-Software einen solchen Schatten nicht als Fehler bewerten.

4.3 Konfigurierbarkeit

Damit die Inspektions-Software flexibel einsetzbar ist, muß sie über zahlreiche Parameter verfügen, die mit Hilfe von Konfigurationsdateien einstellbar sind. Insbesondere sind die folgenden Parameter erforderlich:

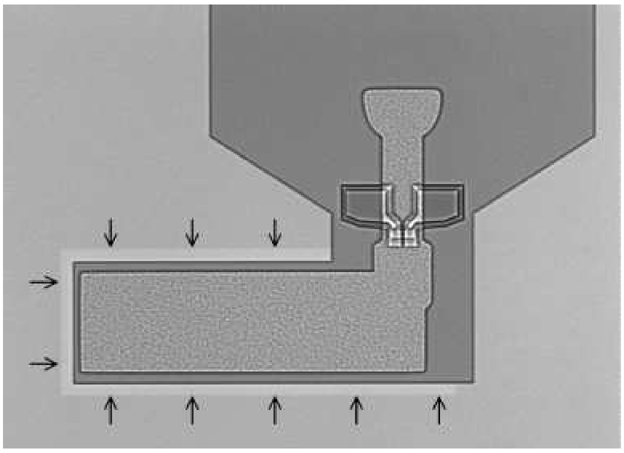

Abbildung 4.1: Schatten um die untere Kontaktfläche des J4-Layers

- **Layout des Wafers**

  Ein Wafer ist in vier Quadranten aufgeteilt; jeder Quadrant enthält eine bestimmte Anzahl von Elementpositionen, die in Zeilen und Spalten angeordnet sind (siehe Abbildung 4.2). Die genaue Position der Quadranten, die Zahl der Zeilen und Spalten in den Quadranten, sowie der jeweilige räumliche Abstand der einzelnen Elemente voneinander sind je nach Produkt unterschiedlich. Diese Daten werden daher in einer produktspezifischen Konfigurationsdatei zur Verfügung gestellt.

- **Abfolge und Ausprägung der Teilprüfungen**

  Die konkrete Abfolge und Kombination der einzelnen Teilprüfungen während der Inspektion muß frei wählbar sein, um bei Bedarf je nach Produkt verschiedene Inspektionsstrategien anwenden zu können. Ferner muß bei jeder Teilprüfung zumindest der Locus konfigurierbar sein, da zum einen die genauen Elementabmessungen produktspezifisch sind und zum anderen einige Teilprüfungen unter Umständen mehrfach an verschiedenen Positionen des Elementes durchgeführt werden müssen (z. Bsp. die Grauwert- und die Partikelprüfung). Es wird daher für jedes Produkt eine Datei angelegt, die den vollständigen Ablaufplan der Inspektion mit den einzelnen Teilprüfungen nebst Parametern enthält.

- **Allgemeine Parameter für alle Teilprüfungen**

  Es gibt einige produktspezifische Parameter, die für mehrere Teilprüfungen relevant sind. Dazu gehören zum Beispiel die Soll-Grauwerte der drei

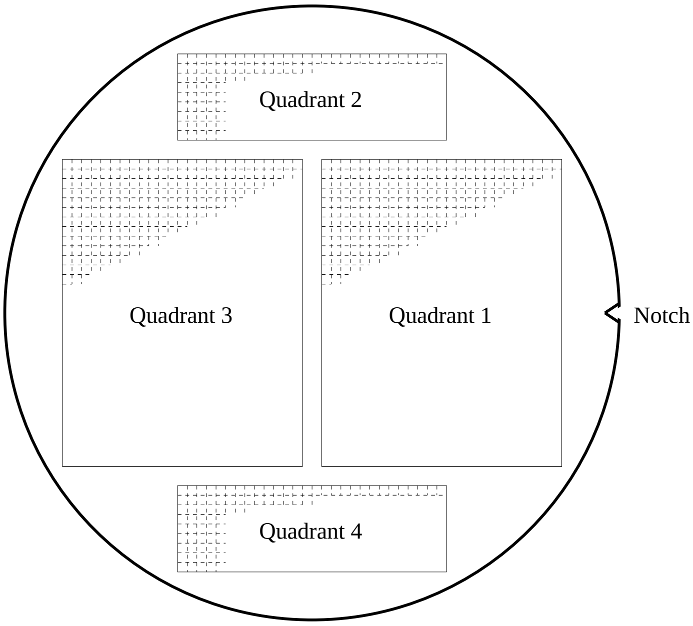

Abbildung 4.2: Layout eines Wafers

Regionen des J4-Elementes (ohne Fotolack, Gap mit Fotolack, P1 mit Fotolack), die sowohl bei der Überprüfung der mittleren Grauwerte als auch für die Partikelprüfung benötigt werden. Solche Parameter werden in einer eigenen Datei aufgeführt.

- **Umfang und Ausprägung der Stichprobe**

  Auf Grund der großen Zahl von Elementen auf dem Wafer ist es in der Praxis meist nicht möglich, *alle* Elemente zu prüfen. Vielmehr wird es notwendig sein, sich bei der Inspektion auf eine Stichprobe von Elementen zu beschränken. Daher kann in einer Konfigurationsdatei festgelegt werden, wieviele und welche Elemente des Wafers inspiziert werden sollen.

- **Parameter für die Klassifikation und das Reporting**

  Bei der Klassifikation eines inspizierten Wafers in eine der Kategorien „in Ordnung“ oder „fehlerhaft“ stellt sich die Frage, welche Abweichungen von der Norm noch tolerierbar sind und welche nicht. Für jedes Produkt und jede Teilprüfung wird daher in einer Konfigurationsdatei spezifiziert, um wieviel die gemessenen Werte von den Sollwerten abweichen dürfen, ohne das der Wafer als „fehlerhaft“ aussortiert werden muß.

4.4 Dokumentation der Inspektionsergebnisse

Für jeden inspizierten Wafer wird ein Detail- und ein Gesamtreport erstellt. Im Detailreport werden die Inspektionsresultate aller untersuchten Elemente dokumentiert. Für den Gesamtreport werden diese Einzelergebnisse zu einer Statistik zusammengefaßt. Der Gesamtreport gibt unter anderem an, wieviele Elemente bei den einzelnen Teilprüfungen durchgefallen sind und ob der Wafer die Spezifikation erfüllt oder nicht.

Kapitel 5

Implementierung

Dieses Kapitel dokumentiert die wesentlichen Teile (siehe Abbildung 5.1) der entwickelten Inspektions-Software für das J4-Layer im Fotostadium. Da die Implementierung einiger Teilprüfungen statistische Eigenschaften des Bildes ausnutzt, werden in Abschnitt 5.3 außerdem die dafür nötigen Vorkenntnisse vermittelt.

5.1 Wafer-Ausrichtung korrigieren

Die Ausrichtung des Wafers auf dem Tumbler sorgt dafür, daß der Wafer in einer definierten Orientierung auf dem Inspektionstisch zu liegen kommt (siehe Abschnitt 3.1). Diese mechanische Positionierung arbeitet jedoch nur mit einer Genauigkeit von $\pm\ 0,5$ Grad. Da die einzelnen Elemente auf dem Wafer sehr kleine Abmessungen haben, kann selbst diese geringe Verdrehung dazu führen,

Für jeden Wafer:			
	Wafer-Ausrichtung korrigieren		(Abschnitt 5.1)
	Für jedes zu testende Element:		
		Element anfahren und korrekt ausrichten	(Abschnitt 5.2)
		1. Teilprüfung: Prüfung der mittleren Grauwerte	(Abschnitt 5.4)
		2. Teilprüfung: Partikelprüfung	(Abschnitt 5.5)
		3. Teilprüfung: Kantenprüfung	(Abschnitt 5.6)
		4. Teilprüfung: Prüfung der Layer-Ausrichtung	(Abschnitt 5.7)

Abbildung 5.1: Prinzipieller Ablauf der Inspektion

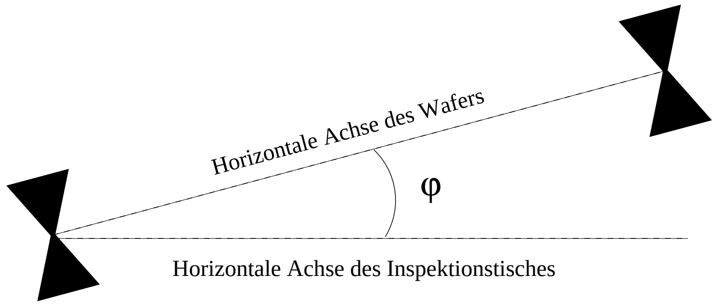

Abbildung 5.2: Ermittlung des Ausrichtungswinkels φ

daß einige Elemente nicht korrekt gefunden werden können. Daher ist es notwendig, vor der eigentlichen Inspektion den tatsächlichen Ausrichtungswinkel zu bestimmen.

Dies kann mit Hilfe zweier Referenzkreuze (Stundengläser) geschehen, die sich an definierten Positionen auf gegenüberliegenden Randpunkten des Wafers befinden. Die Referenzkreuze haben eine ausreichende Größe, so daß sie auch bei einer maximalen Ausrichtungsabweichung von ihrer theoretischen Position aus auffindbar sind, d. h. sich zumindest ein Teil der Struktur im sichtbaren Bereich der Kamera befindet. Bei exakter Ausrichtung des Wafers liegt die durch die Mittelpunkte der beiden Referenzkreuze gebildete Gerade parallel zur horizontalen Achse des Inspektionstisches. Aus der tatsächlichen Position der beiden Stundengläser läßt sich der Ausrichtungswinkel φ berechnen (siehe Abbildung 5.2). Dieser Winkel muß beim Anfahren eines Elementes unbedingt berücksichtigt werden.

5.2 Element finden

Um ein einzelnes Element des Wafers inspizieren zu können, muß es vorher korrekt unter dem Mikroskop positioniert worden sein. Dazu werden die Koordinaten der Elementposition einer Konfigurationsdatei entnommen und entsprechend des ermittelten Ausrichtungswinkels φ des Wafers (siehe Abschnitt 5.1) korrigiert. Mit Hilfe dieser Werte kann das Element angefahren werden.

Auf Grund der limitierten Positionierungsgenauigkeit des Inspektionstisches ist im Anschluß noch eine Feinjustierung der Elementausrichtung notwendig. Dazu werden die obere waagerechte, sowie die linke senkrechte Kante der coil area detektiert.[1] Anschließend wird die Differenz zwischen erwarteter und tat-

[1]Durch die Vorjustierung an Hand der Referenzkreuze ist gewährleistet, daß sich die coil

sächlicher Position der coil area berechnet und die Positionierung entsprechend korrigiert.

5.3 Statistische Grundlagen

Die J4-Inspektion arbeitet auf der Basis von Grauwertbildern. Sei G die Menge aller Grauwerte. Dann lassen sich Grauwertbilder, bzw. rechteckige Teilbilder daraus, bestehend aus $n \times m$ Pixeln in Form einer $(n \times m)$-Matrix $(g_{x,y})$ über G repräsentieren, die die Grauwerte der einzelnen Pixel enthält.

5.3.1 Histogramm

Die Häufigkeit H der einzelnen Grauwerte als Funktion über G wird Histogramm genannt:

$$H : G \to \mathbb{N}_0 \, , \; g \mapsto |\, \{g_{x,y} \mid x \in \{1,..,n\},\, y \in \{1,..,m\},\, g_{x,y} = g\} \,|$$

Anstelle der absoluten Häufigkeit H kann alternativ auch die relative Häufigkeit h verwendet werden:

$$h \; := \; \frac{H}{nm}$$

5.3.2 Statistik des Histogramms

Die beiden grundlegenden Parameter, die eine Verteilung beschreiben, sind der Mittelwert (mean) μ und die Varianz (variance) σ^2. Für den diskreten Fall einer Grauwertverteilung gilt:

$$\mu \; = \; \sum_{g \in G} g \cdot h(g) \; = \; \frac{1}{nm} \sum_{x=1}^{n} \sum_{y=1}^{m} g_{x,y} \tag{5.1}$$

$$\sigma^2 \; = \; \sum_{g \in G} (g-\mu)^2 \cdot h(g) \; = \; \frac{1}{nm} \sum_{x=1}^{n} \sum_{y=1}^{m} (g_{x,y}-\mu)^2 \tag{5.2}$$

Die Varianz ist ein Maß für die Streuung der auftretenen Grauwerte um den Mittelwert.

area im Bildausschnitt der Kamera befindet.

Weitere wichtige Charakteristika einer Verteilung sind die zentralen Momente k-ter Ordnung M_k:

$$M_k \;=\; \sum_{g \in G} (g-\mu)^k \cdot h(g) \;=\; \frac{1}{nm} \sum_{x=1}^{n} \sum_{y=1}^{m} (g_{x,y} - \mu)^k$$

Das erste Moment M_1 ist definitionsgemäß gleich 0, das zweite Moment M_2 entspricht der Varianz σ^2. Das dritte Moment M_3 wird Schiefe (skewness) genannt und gibt den Grad der Asymmetrie einer Verteilung an. Damit wird die Abweichung der Histogrammverteilung zu größeren (positive Schiefe) bzw. kleineren (negative Schiefe) Grauwerten bestimmt. Um ein von der Varianz unabhängiges Schiefemaß zu erhalten, wird diese häufig herausgerechnet:

$$M'_3 \;:=\; \frac{M_3}{\sigma^3} \qquad \text{, falls } \sigma \neq 0 \tag{5.3}$$

Das vierte Moment M_4 heißt Exzess (kurtosis), wobei für Normalverteilungen[2] $M_4 = 3\sigma^4$ gilt. Wird der Exzess also um die Varianz bereinigt und die Zahl 3 subtrahiert,

$$M'_4 \;:=\; \frac{M_4}{\sigma^4} - 3 \qquad \text{, falls } \sigma \neq 0 \tag{5.4}$$

so zeigt er an, wie weit die Häufigkeitswerte der Verteilung von der Normalform nach oben (positiver Exzess) bzw. unten (negativer Exzess) abweichen [Abma94].

5.4 Prüfung eines mittleren Grauwertes

Die Routine zur Prüfung eines mittleren Grauwertes erwartet als Parameter einen Locus und einen Soll-Grauwert μ_{Soll}. Sie berechnet für das durch den Locus selektierte Teilbild gemäß Gleichung (5.1) den mittleren Grauwert μ und stellt die Abweichung zum Sollwert μ_{Soll} fest.

5.5 Partikelprüfung

Die Partikelprüfung benötigt als Parameter einen Locus, den Soll-Grauwert μ_{Soll} der zu untersuchenden Fläche und Vorgaben über die gewünschte Größenklas-

[2] Für normalverteilte Maße h mit Mittelwert μ und Varianz σ^2 $(\sigma > 0)$ gilt:

$$h(x) \;=\; \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad , \quad M_k \;=\; \int_{-\infty}^{\infty} (x-\mu)^k \cdot h(x)\, dx$$

sifikation von gefundenen Partikeln. Ferner ist zu beachten, daß eine Partikelprüfung nur auf homogenen Flächen Sinn macht. Sie muß also auf den drei Regionen des J4-Elementes jeweils getrennt durchgeführt werden.

Genau dann, wenn sich innerhalb des Locus keine Partikel oder Defekte befinden, sind annähernd normalverteilte Grauwerte ($M_3' \approx 0$, $M_4' \approx 0$) mit dem Mittelwert μ_{Soll} und kleiner Varianz ($\sigma^2 \approx 0$) zu erwarten. Es werden daher zuerst die statistischen Größen der Gleichungen (5.1) bis (5.4) berechnet. Befinden sie sich alle innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen, wird davon ausgegangen, daß keine Partikel vorhanden sind. Andernfalls werden mit Hilfe der sogenannten Bereichsanalyse alle Flächen erkannt und vermessen, die einen von μ_{Soll} zu stark abweichenden Grauwert besitzen. Diese Partikelflächen werden anschließend nach ihrer Größe klassifiziert und gezählt.

5.6 Kantenprüfung

Die Linearität einer Kante läßt sich durch die sogenannte Korrelation prüfen. Dazu werden mit Hilfe eines Kantenfilters alle Punkte (x_i, y_i) der Geraden — es seien n Stück — bestimmt und daraus der empirische Korrelationskoeffizient ϱ_{XY} berechnet:

$$\mu_X := \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad \mu_Y := \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i$$

$$\sigma_X{}^2 := \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu_X)^2 \qquad \sigma_Y{}^2 := \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \mu_Y)^2$$

$$\sigma_{XY} := \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu_X)(y_i - \mu_Y)$$

$$\varrho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

ϱ_{XY} liegt im Intervall $[0;1]$ und ist ein Maß dafür, ob zwischen x_i und y_i ein linearer Zusammenhang besteht. Falls alle Punkte auf einer Geraden liegen, gilt $\varrho_{XY} = 1$.

Leider ist der Korrelationskoeffizient nur für $\sigma_X, \sigma_Y \neq 0$ definiert. Das bedeutet, daß er sich für ideale vertikale oder horizontale Geraden so nicht verwenden läßt. Dieses Problem kann aber vermieden werden, wenn in solchen Fällen die Gerade etwas geneigt wird.

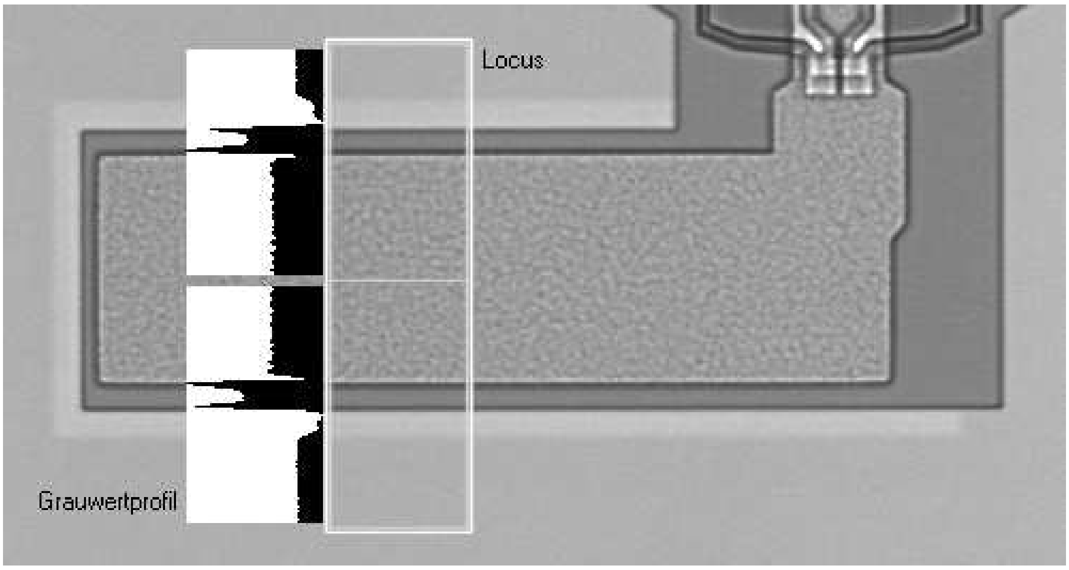

Abbildung 5.3: Prüfung der vertikalen Layer-Ausrichtung

Für vertikale Geraden ist zum Beispiel zu befürchten, daß $\sigma_X = 0$ gilt. Daher sollte der Korrelationskoeffizient statt für (x_i, y_i) etwa für die Punktmenge $(x_i + a \cdot y_i,\ y_i)$ — mit geeignetem $a \neq 0$ — berechnet werden.

5.7 Prüfung der Layer-Ausrichtung

5.7.1 Vertikale Ausrichtung

Die vertikale Ausrichtung des J4-Layers relativ zum P1-Layer wird an Hand der unteren Kontaktfläche vermessen. Bei korrekter Ausrichtung ist dort die Breite der Überlappung an der oberen und der unteren Kante gleich.

Die Meß-Routine erwartet einen rechteckigen Locus, der vertikal und annähernd zentriert über der unteren Kontaktfläche liegt. Für die obere und untere Hälfte des Locus wird nun jeweils das vertikale Grauwertprofil[3] berechnet und daraus die Länge des dunklen Teilstückes — dies ist gerade die Überlappung — bestimmt (siehe Abbildung 5.3). Die relative Differenz zwischen diesen beiden Längen ist ein Maß für die Güte der vertikalen Ausrichtung.

Um die Länge des dunklen Teilstückes zu berechnen, wird folgender Algorithmus angewendet, wobei die Locuszeilen von unten nach oben *aufsteigend*

[3]Mittelung der Grauwerte über jede Zeile

durchnummeriert seien:

(1) Suche die Locuszeile y_{center} mit dem dunkelsten (= kleinsten) mittleren Grauwert. Diese Zeile liegt in jedem Fall innerhalb des dunklen Teilstückes.

(2) Suche die Zeile $y_{bot} \in \{y_{center} - 1,\ y_{center} - 2, ...\}$ mit dem hellsten (= höchsten) mittleren Grauwert. Diese Zeile liegt in jedem Fall außerhalb des dunklen Teilstückes.

(3) Suche die Zeile $y_{top} \in \{y_{center} + 1,\ y_{center} + 2, ...\}$ mit dem hellsten (= höchsten) mittleren Grauwert. Diese Zeile liegt ebenfalls in jedem Fall außerhalb des dunklen Teilstückes.

(4) Sei $g(y)$ der mittlere Grauwert der Zeile y. Berechne die Schwellenwerte:

$$\begin{aligned} thres_{bot} &:= \frac{1}{2}\,(\,g(y_{bot}) + g(y_{center})) \quad , \\ thres_{top} &:= \frac{1}{2}\,(\,g(y_{top}) + g(y_{center})) \quad . \end{aligned}$$

(5) Suche ausgehend von y_{bot} in aufsteigender Reihenfolge die erste Zeile y_{start} mit

$$g(y_{start}) \ \leq\ thres_{bot} \quad .$$

Berechne durch Geraden-Interpolation $y'_{start} \in (\,y_{start} - 1;\ y_{start}]$ mit der Eigenschaft $g(y'_{start}) = thres_{bot}$:

$$y'_{start} \ :=\ y_{start} - \frac{thres_{bot} - g(y_{start})}{g(y_{start} - 1) - g(y_{start})} \quad .$$

Dieses Verfahren wird subpixeling genannt.[4]

(6) Suche ausgehend von y_{top} in absteigender Reihenfolge die erste Zeile y_{stop} mit

$$g(y_{stop}) \ \leq\ thres_{top} \quad .$$

Berechne durch Subpixeling $y'_{stop} \in [\,y_{stop};\ y_{stop} + 1)$ mit $g(y'_{stop}) = thres_{top}$:

$$y'_{stop} \ :=\ y_{stop} + \frac{thres_{top} - g(y_{stop})}{g(y_{stop} + 1) - g(y_{stop})} \quad .$$

[4] Subpixeling ist insofern mit Vorsicht zu verwenden, als die inhärente Meßungenauigkeit von $\pm$ einem Pixel bzw. einer Locuszeile natürlich erhalten bleibt, obwohl der gebrochene Zahlenwert eine höhere Genauigkeit vorgaukelt!

(7) $(y'_{stop} - y'_{start})$ gibt die extrapolierte Anzahl der Locuszeilen innerhalb des dunklen Teilstückes an.

5.7.2 Horizontale Ausrichtung

Die horizontale Ausrichtung des J4-Layers läßt sich am besten unterhalb der Flügel des Leseelementes überprüfen, da nur dort die Überlappung an der linken und rechten Kante gleich groß ist. Allerdings ist der vertikale Bereich, in dem eine korrekte Messung möglich ist, relativ klein. Würde, analog zur Prüfung der vertikalen Ausrichtung, der angegebene Locus direkt zur Messung verwendet, so könnte schon eine geringe Ungenauigkeit bei der Positionierung des Elementes o. ä. zu fehlerhaften Meßwerten führen. Daher sucht die Meß-Routine innerhalb des gegebenen Locus selbständig nach einem geeigneten Ausschnitt für die Prüfung. Dazu muß der Locus lediglich folgenden Eigenschaften genügen:

- Er ist rechteckig.
- Er liegt horizontal und annähernd zentriert über J4 und P1 im Bereich des Leseelementes.
- Die obere Kante (J4) der unteren Kontaktfläche liegt teilweise innerhalb des Locus.
- Die untere waagerechte Kante des P1 liegt außerhalb des Locus.
- Die linke diagonale Kante der coil area schneidet *nicht* den *linken* Rand des Locus. Den *oberen* Rand des Locus darf sie dagegen schneiden.
- Der Locus sollte ungefähr wie in Abbildung 5.4 liegen, um eine maximale Translationstoleranz zu erzielen.

Die Messung läuft dann wie folgt ab: Es wird innerhalb des Locus die horizontale Kante gesucht, die am weitesten links und möglichst weit oben liegt. Etwas oberhalb dieser Kante werden einige Zeilen des Locus selektiert. In der linken und rechten Hälfte wird jeweils das horizontale Grauwertprofil[5] berechnet und daraus die Länge des dunklen Teilstückes ermittelt (analog Abschnitt 5.7.1, siehe Abbildung 5.4). Anschließend wird die relative Differenz zwischen diesen beiden Längen bestimmt.

[5] Mittelung der Grauwerte über jede Spalte

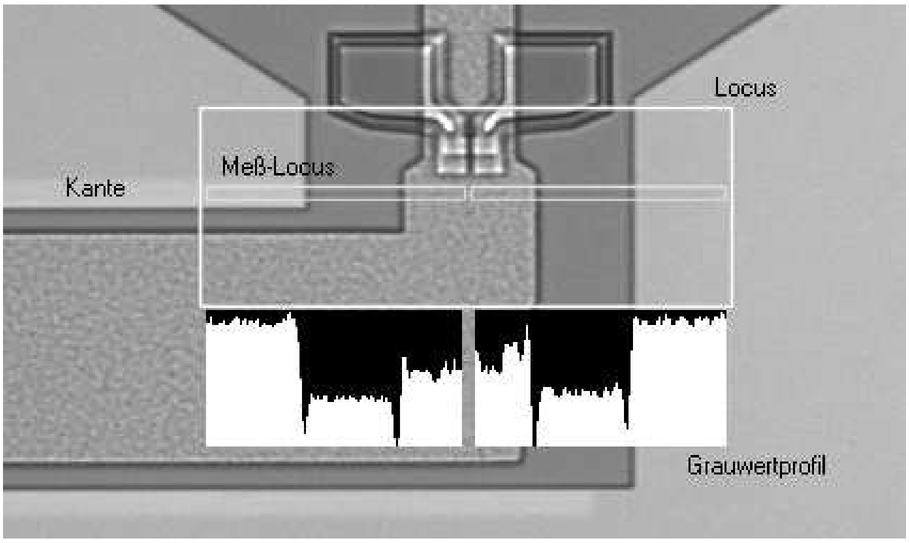

Abbildung 5.4: Prüfung der horizontalen Layer-Ausrichtung

Kapitel 6

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit dem sogenannten AIM-Tool — einer kombinierten Hardware-Software-Lösung zur automatischen Qualitätskontrolle bei der Produktion von Schreib-/Leseköpfen für Festplatten. Es wird die Implementierung einer Software vorgestellt, mit deren Hilfe das AIM-Tool in dem J4-Fotostadium des Produktionsprozesses eingesetzt werden kann.

Wesentliche Teile der Software konnten fertiggestellt und an Hand eines Probe-Wafers getestet werden:

- Einlesen und Auswerten der Konfigurationsdateien.
- Auffinden der beiden Referenzstrukturen und Berechnung des Ausrichtungswinkels.
- Anfahren der Elemente unter Berücksichtigung des Ausrichtungswinkels.
- Durchführung der Inspektion gemäß des vorgegebenen Ablaufplans.
- Erstellung eines Detail- und eines Gesamtreports für jeden Wafer.

Damit die Software in der Produktion tatsächlich einsetzbar ist, müssen jedoch noch einige Arbeiten ausgeführt werden:

- Das Reporting ist noch unvollständig. Es fehlt die Meldung der Inspektionsresultate an den Host (MESA).
- Die Routine zur komfortablen Generierung des Ablaufplans (Teaching) ist noch nicht fertig.

- Die Überprüfung der Eichung des AIM-Tools (Tool-Monitoring) wurde noch nicht realisiert.
- Es wurden noch nicht alle Teile der Software auf Fehler überprüft (Debugging).
- Das AIM-Tool wurde bisher nur mit *einem* Wafer getestet.

Insgesamt erscheint die Fertigstellung der Software innerhalb des Zeitplans — also bis Februar 1999 — aber realistisch.

Literaturverzeichnis

[Abma94] W. Abmayr: *Einführung in die digitale Bildverarbeitung*. Teubner, 1994. ISBN 3-519-06138-4.

[BK98] H. Bäßmann, J. Kreyss: *Bildverarbeitung Ad Oculos*. Springer, 3. Auflage, 1998. ISBN 3-540-63649-8.

[BSMM99] I. N. Bronstein, K. A. Semendjajew, G. Musiol, H. Mühlig: *Taschenbuch der Mathematik*. Harri Deutsch, 4. Auflage, 1999. ISBN 3-8171-2004-4.

[Habe91] P. Haberäcker: *Digitale Bildverarbeitung*. Carl Hanser, 4. Auflage, 1991. ISBN 3-446-15644-5.

[Jähn97] B. Jähne: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer, 4. Auflage, 1997. ISBN 3-540-61379-X.

[Kopp97] H. Kopp: *Bildverarbeitung interaktiv: Eine Einführung mit multimedialem Lernsystem auf CD-ROM*. Teubner, 1997. ISBN 3-519-02995-2.

[KR88] B. W. Kernighan, D. M. Ritchie: *The C Programming Language*. Prentice Hall, 2. Auflage, 1988. ISBN 0-13-110362-8.

[Stro97] B. Stroustrup: *The C++ Programming Language*. Addison-Wesley, 3. Auflage, 1997. ISBN 0-201-88954-4.