

Einfluß realistischer Defektformen auf die Größenverteilung von Defekten für die Ausbeutevorhersage

Christopher Hess, Larg H. Weiland

Institut für Rechnerentwurf und Fehlertoleranz (Prof. Dr. D. Schmid)
Universität Karlsruhe, 76128 Karlsruhe, <http://goethe.ira.uka.de/ddg>

Kurzfassung: Modelle zur Ausbeutevorhersage und Berechnungen der "critical area" von hochintegrierten Schaltungen basieren auf kreisförmig modellierten Defekten. Untersuchungen realer Defekte zeigen jedoch zumeist unregelmäßige Defektformen. Daher wird hier der Einfluß realer Defektformen auf die Bestimmung von Defektgrößenverteilungen für die Ausbeutevorhersage untersucht. Um die notwendigen Angaben über Defekte zu erhalten, werden Karree-Teststrukturen eingesetzt, welche eine präzise Lokalisierung von Defekten innerhalb großer Chip-Flächen erlauben. Weiterhin stellen wir ein Verfahren zur Bestimmung einer Defektgrößenverteilung vor, welches die Vielfalt auftretender Defektformen berücksichtigt.

1 Einleitung

In Abhängigkeit der Strukturen einer hochintegrierten Schaltung können Defekte (z. B. Partikel) zu elektrisch meßbaren Fehlern (killer defects) führen, die für herstellungsbedingte Fehlfunktionen der Schaltung verantwortlich sind. Immer kürzere Produktzyklen bei gleichzeitig verkleinerten Strukturbreiten erfordern eine präzise Fehleranalyse und Ausbeutevorhersage. Ein entscheidender Faktor sind dabei Daten über die Häufigkeit und Größe auftretender Defekte. Seit den siebziger Jahren beinhalten die Modelle zur Ausbeutevorhersage auch Defektgrößenverteilungen, die auf einer kreisrunden Form der Defekte basieren [Stap83], [Ferr85c], [Walk87], [Maly90], [StRo95]. Aber, wie sind die tatsächlichen Formen von Defekten, die heute in modernen Halbleiterprozessen auftreten? Um dies zu untersuchen, haben wir mehrere hundert Defekte aus verschiedenen Prozessen exakt vermessen und in verschiedene Klassen eingeteilt. Indem man die verschiedenen Formen bei der Defektgrößenbestimmung berücksichtigt, wird es möglich, die Genauigkeit der Defektgrößenverteilung für die Ausbeutevorhersage zu verbessern.

2 Karree-Teststruktur

Zur exakten Vermessung der Defekte haben wir in mehreren Prozessen Karree-Teststrukturen (KTS) eingesetzt [HeWe95b], [HeWe95], [HWLS96], welche einerseits über eine große defektsensitive Fläche verfügen, innerhalb der Defekte zu meßbaren Fehlern führen können, und andererseits eine räumliche Lokalisierung der erkannten Defekte ermöglichen. Dabei wird die Anschlußpunktconfiguration üblicher Standard-Chips verwendet sowie die dabei übliche Meßmethode (Digitaltester) eingesetzt. Die gesamte Fläche des Test-Chips wird in eine große Anzahl wohlunterscheidbarer Karrees unterteilt, wobei die Anzahl n der Karrees quadratisch mit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Anschlußpunkte p wächst.

$$n = \frac{p}{2 \cdot k} \cdot \left(\frac{p}{k} - 1 \right) \quad (1)$$

k: Anzahl der leitfähigen Layer

Jedes Karree wird durch eine Menge von Teststrukturlinien begrenzt, die in dieser Kombination nur ein einziges Mal innerhalb der KTS implementiert sind. Die Abbildung 1 zeigt den Rahmen einer Karree-Teststruktur mit 276 unterscheidbaren Karrees. Wenn ein Defekt beispielsweise zwei Teststrukturlinien verbindet, kann aus den Nummern der Anschlußpunkte, zwischen denen ein sprunghaft veränderter Widerstand gemessen wird, auf das Karree mit dem Defekt geschlossen werden (vgl. fette

Linien in Abbildung 1). Verfahren zur Analyse der elektrischen Meßwerte sowie präzise Lokalisierungsalgorithmen werden bei [HeWe95d], [HeSt94], [HeWe95] diskutiert. Zur Diagnose von Defekten, die zu Kurzschlüssen führen können, werden in den Karrees beispielsweise kammförmige Leitungen angeordnet, wie dies in der Abbildung 2 zu sehen ist. Die Abmessungen der Kammlinien können an beliebige Entwurfsregeln angepaßt werden. Der symmetrische und modulare Aufbau einer KTS erlaubt einen automatischen Entwurf innerhalb beliebiger Randanschlußpunkt-Konfigurationen, wobei der Anteil der defektsensitiven Fläche in der Regel mehr als 90% beträgt. Da die KTS keine aktiven Bauelemente benötigt, kann sie in beliebigen Materiallagenkonfigurationen implementiert werden.

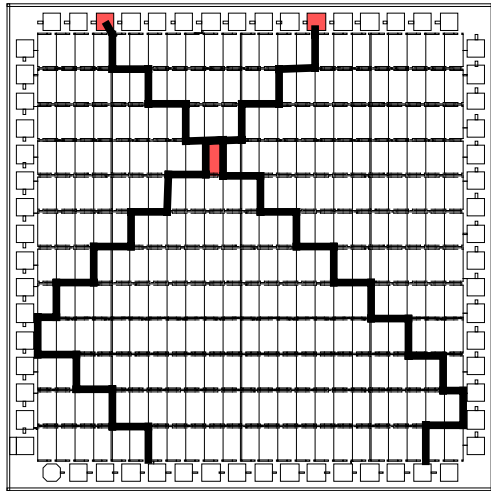


Abbildung 1:
Rahmen einer KTS mit 276 Karrees

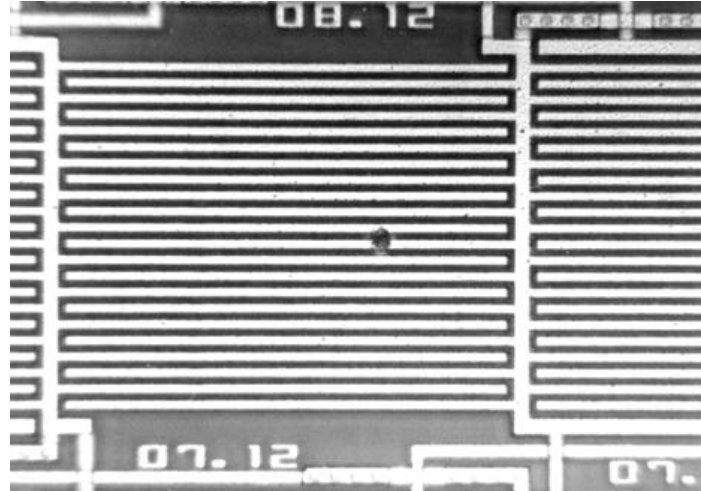


Abbildung 2:
Parallele Kammlinien in einem Karree

3 Vermessung und Klassifizierung von Defektformen

In den vergangenen fünf Jahren sind verschiedene Test-Chips mit Karree-Teststrukturen am Institut für Mikroelektronik in Stuttgart, bei ALCATEL/SEL in Stuttgart, bei National Semiconductor in Santa Clara, bei Thesys in Erfurt und bei ELMOS in Dortmund hergestellt worden. Mittels elektrischer Messungen und einer anschließenden Datenanalyse wurden mehrere hundert Defekte lokalisiert und anschließend zusätzlich optisch erfaßt. Die Ausdehnung eines Defekts wird bestimmt, in dem man den Defekt zwischen zwei parallelen Geraden einklemmt, so daß diese Geraden den Defekt tangential berühren. Die Ausdehnung des Defekts entspricht dem Abstand d' bzw. d'' der parallelen Geraden, wie dies in der Abbildung 3 zu sehen ist. Dabei wird der Winkel φ' bzw. φ'' zwischen diesen parallelen Geraden und den Kammlinien der Teststruktur gemessen.

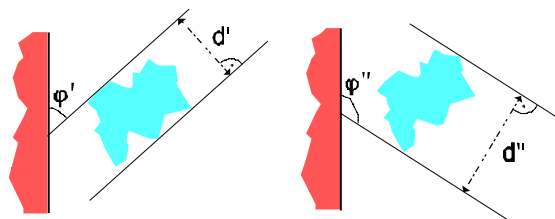


Abbildung 3: Vermessung eines Defekts mit Hilfe paralleler tangentialer Geraden

Bei dieser Meßmethode ist das Intervall $[0^\circ, 180^\circ[$ für den Meßwinkel φ zur Beschreibung des gesamten Defekts ausreichend. Die Vermessung der Defekte erfolgt mit rechnergestützten Bildverarbeitungsverfahren [GuGa95], wobei die einzelnen Defekte beispielsweise in $\Delta\varphi=5^\circ$ Schritten vermessen werden. So kann die Ausdehnung eines jeden Defekts in Abhängigkeit des Meßwinkels in einem Diagramm aufgetragen werden. Um später die Modelle zur Beschreibung der Defektform hinsichtlich ihrer Realitätstreue zu prüfen, wird bei der Analyse dieser Ausdehnungskurven eine Klassifikation der Defektformen vorgenommen, wie sie in der Tabelle 1 aufgeführt wird. Darüber hinaus wird ein Defekt als *Typ- ∞ Defekt* bezeichnet, wenn seine Ausdehnung mehr als 25% variiert und dabei weder lokale Ausdehnungsmaxima noch lokale Ausdehnungsminima vorhanden sind.

| Klasse der Defektform | winkelabhängige Ausdehnung | Defektabbildung |
|---|----------------------------|-----------------|
| Variiert die Ausdehnung eines Defekts weniger als 25%, d. h. der Quotient der minimalen Ausdehnung min durch die maximale Ausdehnung max ist größer als 0,8 ($\frac{m i n}{m a x} > 0,8$), so wird dieser Defekt als <i>Typ-0 Defekt</i> bezeichnet. | | |
| Variiert die Ausdehnung eines Defekts mehr als 25% ($\frac{m i n}{m a x} \leq 0,8$) und sind dabei genau $i_{max} > 0$ lokale Ausdehnungsmaxima oder $i_{min} > 0$ lokale Ausdehnungsminima vorhanden, so wird dieser Defekt als <i>Typ-i Defekt</i> bezeichnet mit $i=i_{max}$ falls $i_{max} \geq i_{min}$ oder $i=i_{min}$ falls $i_{max} < i_{min}$. | i=1 | |
| | i=2 | |

Tabelle 1: Klasseneinteilung der Defektformen

Die Klassifizierung ergibt, daß etwa ein viertel aller Defekte als Typ-0 Defekte einzustufen sind. In der Regel treten weniger als 12% Typ-2 Defekte auf. Typ-i Defekte mit $i > 2$ sind bei den Untersuchungen nicht in Erscheinung getreten. Die Typ-∞ Defekte sind nur in wenigen Charge vorhanden. Die überwiegende Mehrheit der Defekte haben nur eine maximale oder eine minimale Ausdehnung und sind deshalb als Typ-1 Defekte einzustufen.

| Charge | A [%] | B [%] | C [%] | D [%] | E [%] | F [%] | G [%] | H [%] |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Typ-0 Defekte | 22,58 | 25,0 | 21,43 | 18,75 | 22,58 | 11,54 | 18,18 | 29,73 |
| Typ-1 Defekte | 70,97 | 61,0 | 71,43 | 75,0 | 75,81 | 84,62 | 79,55 | 67,57 |
| Typ-2 Defekte | 4,03 | 12,0 | 7,14 | 6,25 | 1,61 | 3,85 | 2,27 | 2,7 |
| Typ-(i>2) Defekte | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Typ-∞ Defekte | 2,42 | 2,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabelle 2: Verteilung der Defektklassen

4 Bestimmung der Defektgrößenverteilung

Zur Prozeßkontrolle und zur Ausbeutevorhersage wird eine Defektgrößenverteilung verlangt, bei der die Häufigkeit auftretender Defekte (y-Achse) über der Defektgröße (x-Achse) aufgetragen wird. Wie wir zuvor gesehen haben, kann jedoch ein realer Defekt nicht durch einen einzigen Größenwert beschrieben werden. In der Literatur ([Stap83], [Ferr85c], [Walk87], [Maly90], [StRo95]) wird aber genau dieses durch die Modellierung eines realen Defekts als Kreis durchgeführt. Dabei bleibt in der Literatur jedoch völlig offen, wie dieser "einzige" Größenwert in Abhängigkeit des realen Defekts bestimmt wird. Daher wird hier nun ein Verfahren zur Bestimmung realer Defektgrößen eingeführt. Diese realistische Defektgrößenverteilung dient dann im weiteren Verlauf als Referenz im Vergleich verschiedener Modelle zur Beschreibung von Defektformen.

Ziel einer realistischen Größenverteilung ist die möglichst genaue Berücksichtigung realer Defektformen bei der Bemessung der Defektausdehnung. Dabei werden hier äquidistante Meßschritte $\Delta\varphi$ für $0^\circ \leq \varphi < 180^\circ$ gewählt, so daß man

$$w = \frac{180^\circ}{\Delta\varphi} \quad (2)$$

Meßwerte erhält. Nun ersetzt man in Gedanken jeden realen Defekt durch w kreisrunde Imaginärdefekte wobei jedem Kreisdurchmesser ein individueller meßwinkelabhängiger Ausdehnungswert zugewiesen wird. Diese Modellierung ist zulässig, da von einer näherungsweisen Gleichverteilung der Meßwinkel, bei denen die maximale oder minimale Defektausdehnung gemessen wird, ausgegangen werden darf. So wird beispielsweise für $\Delta\varphi=5^\circ$ Meßschritte ein realer Defekt auf insgesamt $w=36$ Imaginärdefekte abgebildet. Zusätzlich muß jeder Imaginärdefekt gewichtet werden, damit die Gesamtanzahl der realen Defekte N gleich der Gesamtanzahl aller Imaginärdefekte ist. Dabei muß immer gelten:

$$\sum_{i=1}^s \frac{1}{w} D_i = 1 \quad (3)$$

wobei s die Gesamtanzahl der Größenintervalle repräsentiert und D_i für die Anzahl der Imaginärdefekte je Größenintervall steht.

Jetzt kann man für jeden realen Defekt eine sogenannte *Mikrogrößenverteilung (MGV)* bestimmen, die auf den Imaginärdefekten dieses realen Defekts basiert. Die folgende Abbildung 4 zeigt eine solche Mikrogrößenverteilung eines in der Tabelle 1 dargestellten Typ-1 Defekts.

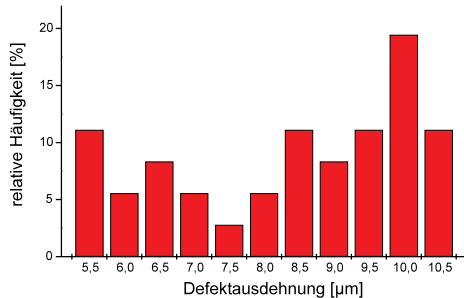


Abbildung 4:
Mikrogrößenverteilung (MGV) imaginärer Defekte

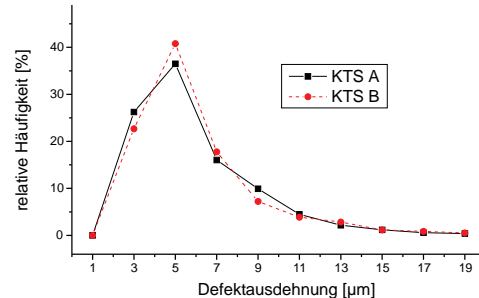


Abbildung 5:
Vergleich zweier Defektgrößenverteilungen

So ist es nun möglich, eine *Gesamtdefektgrößenverteilung (GV)* zu bestimmen, die entweder auf sämtlichen Imaginärdefekten aller realen Defekte basiert oder durch die Zusammenfassung aller Mikrogrößenverteilungen gebildet wird. Möchte man eine Defektgrößenverteilung bestimmen, die auch unabhängig von der Dimensionierung der verwendeten Teststrukturen ist, so muß man zusätzlich die Häufigkeiten der Imaginärdefekte mit ihrer Fehlerwahrscheinlichkeit gewichten [Stap84], [Ferr85b]. So erhält jeder Imaginärdefekt seine individuelle Wahrscheinlichkeit, mit der er zu einem elektrisch meßbaren Fehler geführt hat. Berücksichtigt man dieses Gewicht bei der Addition der Häufigkeiten der Imaginärdefekte, so erhält man eine Defektgrößenverteilung, die für den Größenbereich oberhalb des Zwischenraums der Teststrukturlinien unabhängig von der Dimensionierung der verwendeten Teststruktur ist. Die folgende Abbildung 5 zeigt zwei Gesamtgrößenverteilungen, die auf diese Weise bestimmt wurden. Beide basieren auf Defekten, die in Teststrukturen mit völlig verschiedenen Bahnabständen aufgetreten sind. Diese verschiedenen Teststrukturen wurden zur besseren Vergleichbarkeit jedoch auf den gleichen Wafern nebeneinander prozessiert. Trotz der verschiedenen Strukturabmessungen liefern sie eine annähernd gleiche Größenverteilung.

5 Auswirkungen auf die Ausbeutevorhersage

In der Literatur ist die Modellierung eines realen Defekts als Kreis weit verbreitet (vgl. [Stap83], [Ferr85c], [Walk87], [Maly90], [StRo95]). Um nun den Kreisdurchmesser in Abhängigkeit eines realen Defekts zu bestimmen, kommen dabei zwei Grenzwerte in Frage. Einerseits kann der Kreisdurchmesser höchstens die maximale Defektausdehnung **max** erreichen (*Max-Kreis-Modell*). Andererseits sollte er wenigstens die minimale Defektausdehnung **min** annehmen (*Min-Kreis-Modell*). Für den Fall, daß der Quotient $\frac{\text{min}}{\text{max}} > 0,8$ ist, entspricht der Verlauf der Ausdehnung eines idealen Kreises, näherungsweise den Typ-0 Defekten, wie sie in der Tabelle 1 zu sehen sind.

Der prozentuale Anteil der Typ-0 Defekte liegt jedoch nur bei etwa 25% aller auftretenden Defekte. Für den Fall, daß der Quotient $\frac{m}{a} \cdot \frac{n}{x} \leq 0,8$ ist, müssen daher Alternativen zu dem einfachen Max-Kreis-Modell oder Min-Kreis-Modell eruiert werden, um auch die Mehrzahl der Typ-1 Defekte beschreiben zu können. Ziel bleibt dabei, die reale Defektform in einen Kreis abzubilden. Für jeden Defekt lassen sich abhängig von seiner Form mehrere Ausdehnungswerte unter verschiedenen Meßwinkeln bestimmen. Bei dem *Mittelwert-Modell* wird daher der Kreisdurchmesser \bar{d} als der arithmetische Mittelwert aller gemessenen Defektausdehnungen festgelegt. Für konvexe Defekte bedeutet dies zusätzlich, daß ein solcher Kreis die gleiche Fläche hat wie der ihm zugrundeliegende reale Defekt. Es gilt

$$\bar{d} := \frac{1}{w} \cdot \sum_{i=1}^w d_i \quad (4)$$

wobei d_i für die Defektausdehnung unter einem Meßwinkel φ steht und w die Anzahl der Meßwerte repräsentiert.

Da es in der Praxis sehr aufwendig ist, alle für das Mittelwert-Defektmodell notwendigen Meßwerte zu erfassen, wurde bei [HeSt94] ein Näherungsverfahren vorgestellt, welches die reale Defektform als Ellipse modelliert (*elliptisches Modell*). Dabei bestimmt die Näherungsgleichung

$$\bar{d} \approx \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\min \cdot \max} + \frac{\min \cdot \max}{\min + \max} \quad (5)$$

die mittlere Ausdehnung der Ellipse, wozu nur die maximale Defektausdehnung **max** und die minimale Defektausdehnung **min** erforderlich sind.

Die folgende Abbildung 6 zeigt die winkelspezifischen Ausdehnungen eines realen Typ-1 Defekts und der modellierten Kreise nach den zuvor beschriebenen vier Verfahren. Dabei fällt auf, daß der Durchmesser des elliptischen Modells kleiner ist als der Durchmesser, der auf dem arithmetischen Mittelwert aller Meßwerte beruht. Dies ist bei mehr als 90% aller Typ-1 und Typ-2 Defekte der Fall.

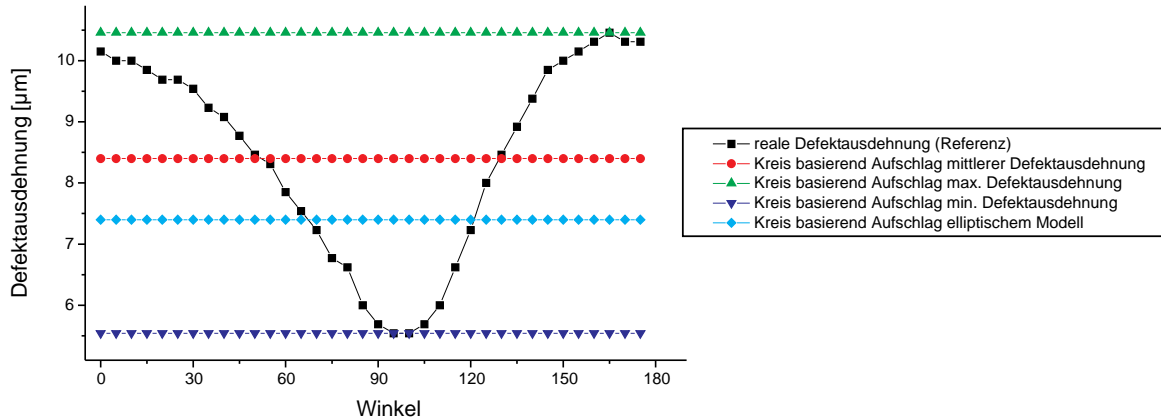


Abbildung 6: Vergleich der Ausdehnung eines realen Defekts mit modellspezifischen Kreisdurchmessern

Die Abbildung 6 zeigt deutlich, daß keines dieser einwertigen kreisförmigen Modelle die tatsächliche Form realer Defekte beschreibt. Daher soll nun geprüft werden, welchen Einfluß diese Modelle auf die Defektgrößenverteilung haben. Dabei wird insbesondere auch die im Abschnitt 4 beschriebene Gesamtgrößenverteilung betrachtet, die als einzige auf der realistischen Mikrogrößenverteilung (MGV) einzelner Defekte basiert. Die Abbildung 7 zeigt einen solchen Vergleich der Defektgrößenverteilungen. Dabei fällt auf, daß das Min-Kreis-Modell zu einer erhöhten Häufigkeit bei kleinen Defektdurchmessern tendiert, während das Max-Kreis-Modell zu einer höheren Häufigkeit bei größeren Defektdurchmessern tendiert. Trotz der "Einwertigkeit" dieser kreisförmigen Modelle kann die geeignete Wahl des Kreisdurchmessers die Realität widerspiegeln, wie dies für das Mittelwert-Modell und das elliptische Modell zu sehen ist. Sowohl die mikrogrößenbasierte Verteilung als auch das elliptische Modell entsprechen den von Stapper eingeführten analytischen Funktionen zur Beschreibung einer Defektgrößenverteilung im Zusammenhang mit der Ausbeutevorhersage. Dies erleichtert demnach die dazu notwendige Anpassung der Gleichungsparameter.

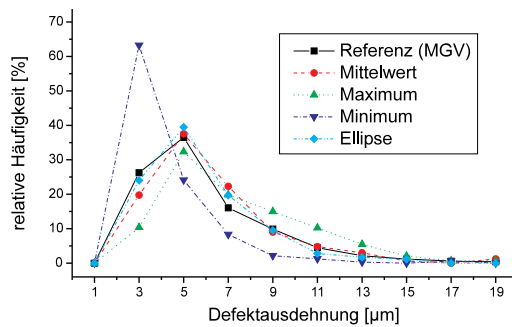


Abbildung 7:
Vergleich verschiedener Defektgrößenverteilungen

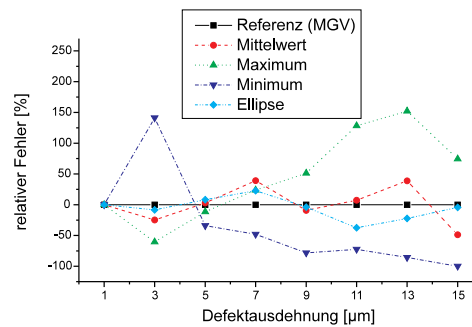


Abbildung 8:
Relative Fehler der Defektgrößenverteilungen

Bei der prozentualen Bestimmung der Meßfehler der Verteilungen modellierter Defektformen wurde als Referenz die im Abschnitt 4 beschriebene Gesamtgrößenverteilung gewählt, da nur sie auf der realistischen Mikrogrößenverteilung einzelner Defekte basiert. Man sieht in der Abbildung 8, daß die Fehler des elliptischen Modells maximal +25%/-40% betragen, während das Min-Kreis-Modell und das Max-Kreis-Modell Fehler von mehr als $\pm 100\%$ aufweisen. Auch das Mittelwert-Modell weist mit +40%/-60% vergleichsweise niedrige Fehler auf, kann aber nicht die Güte des elliptischen Modells erreichen. Insbesondere die Summe der Beträge aller Fehler ist für das elliptische Modell bis zu 6 mal kleiner als für das Max-Kreis-Modell oder das Min-Kreis-Modell.

6 Zusammenfassung

Bisher geht man bei einer fehlerhaften Ausbeutevorhersage davon aus, daß dies entweder an dem nicht richtig gewählten Modell zur Beschreibung der prozesspezifischen Defektdichte (z. B. Gamma-Funktion) oder aber an der fehlerhaften Berechnung der schaltungsspezifischen fehlersensitiven Fläche (critical area) liegt. Unsere Ergebnisse zeigen klar, daß auch die Bestimmung der Defektgrößenverteilung eine nicht unbeträchtliche Fehlerquelle in sich birgt, die jedoch unter Berücksichtigung realer Defektformen weitestgehend kompensiert werden kann.

Das hier vorgestellte Verfahren zur Bestimmung einer Größenverteilung ist sowohl unabhängig von der Form realer Defekte als auch unabhängig von den verwendeten Teststrukturabmessungen. Dazu wird zunächst im ersten Schritt für jeden realen Defekt eine Mikrogrößenverteilung (MGV) ermittelt. Im zweiten Schritt wird basierend auf diesen Mikrogrößenverteilungen eine Gesamtgrößenverteilung bestimmt, wobei jedem Imaginärdefekt einer MGV jetzt zusätzlich ein teststrukturspezifisches Gewicht zugewiesen wird.

Literaturverzeichnis

- [Ferr85b] Ferris Prabhu, A. V.; Defect Size Variations and Their Effect on the Critical Area of VLSI Devices; IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. SC-20, No. 4, August 1985
- [Ferr85c] Ferris Prabhu, A. V.; Role of Defect Size Distribution in Yield Modeling; IEEE Transactions on Electron Devices, No. 9, 1985
- [Guga95] Gugau, A.; Automatisierte Vermessung von Defekten in hochintegrierten Schaltungen; Diplomarbeit am Institut für Rechnerentwurf und Fehlertoleranz, Universität Karlsruhe, 1995
- [HeSt94] Hess, C., Ströle, A.; Modeling of Real Defect Outlines and Defect Parameter Extraction Using a Checkerboard Test Structure to Localize Defects; IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 7, No. 3, 1994
- [HeWe95] Hess, C., Weiland, L. H.; Verfahren zur optimierten Auswahl, Entwicklung und Datenanalyse von Teststrukturen in Backend-Prozessschritten; GME-Fachbericht 15: Vorträge der GME-Fachtagung Mikroelektronik, S. 45-53, Baden-Baden, 1995
- [HeWe95b] Hess, C., Weiland, L. H.; Defect Parameter Extraction in Backend Process Steps using a Multilayer Checkerboard Test Structure; Proc. International Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS), pp. 51-56, Nara (Japan), 1995
- [HeWe95d] Hess, C., Weiland, L. H.; A Digital Tester Based Measurement Methodology for Process Control in Multilevel Metallization Systems; Proc. 1995 SPIE's Microelectronic Manufacturing, Spie Vol. 2637, Austin (USA), 1995
- [HWLS96] Hess, C., Weiland, L. H., Lau, G., Simoneit, P.; Control of Application Specific Interconnection on Gate Arrays Using an Active Checkerboard Test Structure; Proc. International Conference on Microelectronic Test Structures, Trento (Italy), 1996
- [Maly90] Maly, W.; Computer-Aided Design for VLSI Circuit Manufacturability; Proceedings of the IEEE, Vol 78, No. 2, Feb. 1990
- [Stap84] Stapper, C. H.; Modeling of Defects in Integrated Circuits Photolithographic Patterns; IBM J. Res. Develop., No. 4, July 1984
- [Stap83] Stapper, C. H.; Modeling of Integrated Circuit Defect Sensitivities; IBM J. Res. Develop., Vol. 27, No. 6, November 1983
- [StRo95] Staper, C. H., Rosner, R. J.; Integrated Circuit Yield Management and Yield Analysis: Development and Implementation; IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, pp. 95-102, Vol. 8, No. 2, 1995
- [Walk87] Walker, D. M. H.; Yield Simulation for Integrated Circuits; Kluwer Academic Publisher, Boston, 1987