
Laserumschalterstruktur in CMOS-Technologie

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Ole Mende
geboren am 20.05.1969 in Bremerhaven

2003

1. Referent : Prof. Dr.-Ing. Jürgen Graul
2. Referent : Prof. Dr.-Ing. Hartmut Grabinski
Tag der Promotion : 7. Juli 2003

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laboratorium für Informationstechnologie der Universität Hannover. Für die Betreuung dieser Arbeit und für die Übernahme des Referats bedanke ich mich sehr herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Graul. Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Grabinski für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Georg Musmann für den Vorsitz bei der Prüfung.

Weiterhin sei allen ehemaligen und derzeitigen Mitarbeitern des Laboratoriums für Informationstechnologie für die vielen anregenden Diskussionen gedankt.

Spezieller Dank gebührt Frau Dr.-Ing. Kirsten Weide-Zaage, die mit großer Sorgfalt das Manuskript gegengelesen hat.

Meiner Frau, Franziska Mende, möchte ich für ihr Verständnis und die tatkräftige Unterstützung danken.

Hannover, Juli 2003

Ole Mende

Schlagwörter : Laserumschalter, Konfiguration, Mikroelektronik

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung, Charakterisierung und Implementierung eines neuartigen Halbleiterbauelements, welches sich in außerordentlicher Weise für die lasergestützte Konfiguration und Reparatur von Mikroelektronischen Schaltungen der VLSI-Technologien mit dem Ziel der Ausbeutesteigerung eignet. Dieses Bauelement, welches im Folgenden als Laserumschalter bezeichnet wird, vereinigt erstmals zwei Strukturen unterschiedlicher Funktionalität platz- und zeitsparend in einem Bauelement. Bisherige Lösungsansätze erforderten zur Konfiguration bzw. Reparatur zwei separate Bauelemente, eines zum Herstellen einer leitenden Verbindung und ein anderes, mit dessen Hilfe eine Leitbahn an definierter Stelle unterbrochen werden kann. Jede dieser einzelnen Strukturen benötigt Fläche auf dem Chip und Zeit für die Bearbeitung. Da die Fläche und die Bearbeitungszeit kostbare Größen bei der Halbleiterherstellung sind, war die Entwicklung einer neuen Struktur erforderlich.

Der in dieser Arbeit entwickelte neue Laserumschalter vereint eine Laserkontaktstruktur und eine Lasertrennstruktur in vertikaler Anordnung. Hierdurch ergeben sich Vorteile bzgl. des Flächenbedarfs und der Bearbeitungszeit. Vergleichende Untersuchungen ergaben eine mögliche Ersparnis für die Bearbeitungszeit von 66 % und eine Reduktion des Flächenbedarfs um 35-40 %, wenn anstelle von zwei separaten Bauelementen der Laserumschalter verwendet wird. Die Ermittlung der optimalen Laserprozessparameter ist ein essenzieller Bestandteil dieser Arbeit. Es wurden Energiebereiche, Pulsfolgefrequenzen und Laserspotgrößen bestimmt, bei deren Anwendung der Laserumschalter zuverlässig funktioniert. Als optimale Prozessparameter wurden solche definiert, deren Verwendung zu geringen Widerständen in der Laserkontaktstruktur und zu einer sicheren Unterbrechung der Trennstruktur führt. Von entscheidender Bedeutung für den industriellen Einsatz der Laserumschalter ist die zu erwartende Lebensdauer. Zur Feststellung der Lebensdauer unter Betriebsbedingungen wurden beschleunigte Lebensdauertests durchgeführt. Die untersuchten Teststrukturen unterschritten alle die geforderten 10 FIT nach Extrapolation der beschleunigten Lebensdauertestdaten auf Betriebsbedingungen. Abschließend werden Vorschläge für die Implementierung in VLSI-Designs gegeben.

Keywords : laser-switch, configuration, VLSI

Abstract

This work deals with the development and characterization of a new semiconductor device. This device is suitable in an extraordinary way for the laser-based configuration and repair of microelectronic circuits in *VLSI* technologies for yield enhancement purposes. This laser-switch combines two structures of different functionality to one element. Previous solutions for configuration or repair required two separate elements: one to generate a conducting connection and another one to open a connection by cutting. Each of the devices requires its own area on the chip, making the total area of conventional laser structures too large to be utilized in high volume chip production.

The development of a new structure was necessary, since area and operating time are precious parameters during semiconductor manufacturing.

The new laser-switch unites a laser linking structure and a laser cutting structure in a vertical arrangement. This vertical arrangement reduces the processing time and the area requirements for large configuration arrays. The decrease of processing time is mainly achieved by the simultaneous linking and cutting without repositioning the laser-switch structure underneath the laser. Comparative investigations have shown a possible processing time reduction of 66% and a reduction of area requirements around 35-40%.

The determination of the optimal laser processing parameters is an important part of this work. For reliable processing of the laser-switches, energy ranges, pulse sequence frequencies, and laser spot dimensions were determined. Process parameters, whose use lead to low resistances in the laser-link structure and to a reliable disconnection of the cutting structure were, defined as optimal parameters. For industrial applications of the laser-switches, the expected life-time is very important. To estimate the life-time under use conditions, accelerated life tests were performed. All analyzed test structures have shown a failure rate below 10 FIT after extrapolation on use conditions.

Finally, examples for the implementation within *VLSI* designs are given.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Abstract	7
Symbole	11
Abkürzungen	13
1 Einleitung	15
1.1 Ziele der Arbeit	16
1.2 Aufbau der Arbeit	17
2 Bekannte Verfahren der Laserkontaktierung	19
2.1 Die lasergestützte Legierung von Aluminium und Silizium	19
2.2 Die Lasergestützte Diffusion von Dotierstoffen	20
2.3 Der vertikale Laserkontakt nach Hartmann et al.	21
2.4 Der laterale Laserkontakt nach Bernstein et al.	23
2.5 Der vertikale Laserkontakt nach Bernstein et al.	24
3 Der Laserumschalter	26
3.1 Prinzip des Laserumschalters	27
3.2 Theoretisches Verhalten des Kontaktwiderstandes	30
4 Experimentelle Anlagen	34
4.1 Der Laserkonfigurationsautomat	34
4.1.1 Der verwendete Laser	35
4.1.2 Der optische Aufbau	36
4.1.3 Das Positioniersystem	43
4.1.4 Das Bildverarbeitungssystem	44
4.1.5 Der Steuercomputer	44
4.2 Der Lebensdauerermessplatz	44
5 Teststrukturen	46
5.1 Die verwendeten Design-Tools	46
5.2 Die verwendeten Technologien	47
5.3 Laserumschalter der ersten Generation (LS1 und LS2)	49
5.4 Laserumschalter der zweiten Generation (LS12 und LS10)	50
5.5 Teststrukturen für die Lebensdaueruntersuchungen	51
6 Prozessierung der Laserumschalter	53
6.1 Grundlegende Parameterbestimmung	53
6.2 Ergebnisse der Teststrukturen auf TC 8	55

6.3	Ergebnisse der Teststrukturen auf TC 9	59
6.4	Korrektur des theoretischen Modells aus Kap. 3.2	64
6.5	Toleranz gegenüber Energieschwankungen	67
7	Lebensdaueruntersuchungen	70
7.1	Fehlermechanismen	70
7.1.1	Elektromigration	71
7.2	Die verwendeten Verfahren und Werkzeuge der beschleunigten Lebensdauertests	72
7.3	Testdurchführung	77
7.4	Statistische Auswertung der Lebensdauerermessdaten	80
8	Implementierung der Laserumschalter	89
8.1	Die Busrekonfiguration mit Laserumschaltern	90
8.2	Überschreiben statischer Konfigurationssignale	92
8.3	Die LEPROM-Zelle	93
9	Diskussion	94
10	Zusammenfassung	98
11	Literaturverzeichnis	100

Symbole

\bar{t}'	$\ln(t_{50})$
$\sigma_{t'}$	Standardabweichung des natürlichen Logarithmus der Lebensdauer
ρ	spezifischer Widerstand
A	Konstante in der Black'schen Gleichung
a	Breite des Laserspots
a	Jahre
A_{Kon}	leitende Querschnittsfläche im Kontakt des Laserumschalters
\varnothing_{EP}	Durchmesser der Eintrittspupille
B	Quotient aus der Aktivierungsenergie und der Boltzmann-Konstante
C	Volumenkonstante
C	Arrhenius Modellparameter
d	minimaler Abstand zweier optisch erkennbarer Punkte
d_1	Schichtdicke von Metall $n+2$
d_2	Schichtdicke des Intermetallisolator
d_3	Schichtdicke von Metall $n+1$
d_a	Arbeitsabstand
d_s	Schichtdicke
E_a	Aktivierungsenergie
f	Brennweite
H	Gesamthöhe der Kontaktstruktur im Laserumschalter
h	Stunden
j	Stromdichte
j_B	Stromdichte unter Betriebsbedingungen
j_T	Stromdichte unter Testbedingungen
k	Boltzmann-Konstante
K	Volumenkonstante
K_{LT}	Transmissions-Faktor der Linsen
K_{WR}	Reflexions-Faktor des Strahlteilerwürfels
K_{WRT}	Reflexions-Transmissions-Faktor des Strahlteilerwürfels
K_{WT}	Transmissions-Faktor des Strahlteilerwürfels
l	Wellenlänge des Lichtes

m	Stromdichteexponent in der Black'schen Gleichung
MTF, t_{50}	Median Time to Failure (mittlere Ausfallzeit)
n	Variable der Schichtnummerierung
$N.A.$	numerische Apertur
R	Arrhenius Reaktionsrate
R_K	Kontaktwiderstand
R_{Kon}	Kontaktwiderstand
R_m	mittlerer Widerstand
R_{max}	maximaler Widerstand
R_{min}	minimaler Widerstand
R_S	Schichtwiderstand
R_{Via}	Widerstand eines Vias
T	Temperatur
t	Lebensdauer
t'	$\ln(t)$
t_B	Lebensdauer unter Betriebsbedingungen
T_B	Temperatur unter Betriebsbedingungen
T_S	Schmelztemperatur
t_T	Lebensdauer unter Testbedingungen
T_T	Temperatur unter Testbedingungen
V_{Kon}	Materialvolumen der leitenden Verbindung
V_{Res}	Volumen des Materialreservoirs
V_{Ver}	Verlustvolumen des Laserprozesses (Materialauswurf)

Abkürzungen

<i>AR</i>	Antireflektierend
<i>ASIC</i>	Application Specific Integrated Circuit
<i>CMOS</i>	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
<i>DFR</i>	Decreasing Failure Rate
<i>FIB</i>	Focused-Ion-Beam
<i>FIT</i>	Failure in Time
<i>HR</i>	Hochreflektierend
<i>HT</i>	Hochtransmittierend
<i>IFR</i>	Increasing Failure Rate
<i>IPL</i>	Inverse Power Law
<i>LECVD</i>	Laser Enhanced Chemical Vapour Deposition
<i>LKA</i>	Laserkonfigurationsautomat
<i>LNV</i>	Log Normal Verteilung
<i>LPROM</i>	Laser Programmable Read Only Memory
<i>LS</i>	Laserumschalter
<i>MCM</i>	Multi Chip Modul
<i>MTF</i>	Median Time to Failure
<i>Nd:YLF</i>	Neodymium-doped Yttrium Lithium Fluoride
<i>pdf</i>	probability density function, Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
<i>PROM</i>	Programmable Read Only Memory
<i>R</i>	Reflexion
<i>REM</i>	Raster Elektronen Mikroskop
<i>T</i>	Transmission
<i>TC8</i>	Test-Chip 8
<i>TC9</i>	Test-Chip 9
<i>UV</i>	Ultraviolettes Licht
<i>VIS</i>	sichtbares Licht
<i>VLSI</i>	Very Large Scale Integration

1 Einleitung

Grundsätzlich existieren zwei Wege, um die "Performance" von Rechenwerken zu erhöhen. Ein bewährter Weg, die Rechenleistung zu erhöhen, liegt in der Optimierung der Schaltungsarchitektur bei gleichzeitiger Erhöhung der Taktrate. Das Resultat sind relativ kleine Prozessoren mit integriertem schnellen Speicher, die bei sehr hohen Taktraten betrieben werden. Der zweite mögliche Weg ist die Steigerung der Performance durch Parallelverarbeitung. Hier wird die zu lösende Rechenaufgabe in mehrere Teilaufgaben zerlegt und verschiedenen Prozessoren zugewiesen, die dann die Gesamtaufgabe parallel bearbeiten. Die Zusammenfassung von mehreren Prozessoren kann in Platinenbauweise, in Form von Multi-Chip-Modulen (MCM) oder in Form von großflächig monolithisch integrierten mikroelektronischen Schaltungen erfolgen. Abhängig vom Anwendungsfall, ist die eine oder die andere Lösung aus Performance- oder Kostengründen zu bevorzugen.

Die Verarbeitung von Videosignalen, wie es in zukünftigen Multimedia-Anwendungen der Fall sein wird, stellt die Hardware vor sehr komplexe Aufgaben, welche mit den bisherigen Standard Technologien nicht zu lösen sind. So scheiden hier Lösungsvorschläge in Platinenbauweise oder als MCM zusammengefasste Prozessoren aus, da eines der Hauptprobleme bei der Bilddatenauswertung das sehr große Datenaufkommen ist. Die Datenmengen müssen den parallel arbeitenden Prozessoren über externe Bussysteme zur Verfügung gestellt werden, da derzeit Prozessoren und dynamische Speicher nur als separate Schaltungen erhältlich sind. Da der Transfer der Daten über die Bussysteme mit beschränkter Bitbreite und Transferrate erfolgt, sind genau hier die Performanceeinbußen zu verzeichnen. Es ist ein Missverhältnis zwischen maximaler Rechenleistung und Bereitstellung der Daten gegeben.

Die neuen Halbleiterprozesse, die die gleichzeitige Integration von Logik und dynamischen Speicher erlauben, eröffnen jedoch neue Möglichkeiten für die Konzeption von Multiprozessor-Chips mit eingebettetem DRAM. Die Zusammenfassung von Prozessoren und DRAM auf einem Stück Silizium erlaubt den Speicherzugriff über die volle Bitbreite mit Prozessortakt. Multiprozessor-Chips, bestehend aus mehreren Prozessoren, die über ihren eigenen dynamischen

Speicher verfügen, besitzen die Performancecharakteristiken, die für Videosignalverarbeitung erforderlich sind.

Trotz fortschreitender Miniaturisierung erreichen die so realisierten Multiprozessor-Chips Siliziumflächen von mehreren Quadratzentimetern. In modernen Halbleiterprozessen treten Defektdichten von 1-2 Defekten/cm² auf. Folglich ist unter normalen Umständen nicht damit zu rechnen, dass die Fabrikation eines solchen Multiprozessor Chips erfolgreich ist [1]. Zur Steigerung der Ausbeute müssen aus diesem Grund mehrere Redundanz-Technologien zum Einsatz kommen. Neben der Integration von redundant ausgelegten Speichern müssen ebenfalls die globalen Bussysteme über Redundanzen verfügen. Des Weiteren scheint die Implementierung von Reparaturmöglichkeiten in kritischer statischer Konfigurationslogik sinnvoll.

Zur Durchführung derartiger Konfigurations- und Reparaturaufgaben bietet sich der Einsatz eines Lasersystems an, welches prinzipiell wie ein LötKolben eingesetzt werden kann. Das Ziel des Verfahrens ist es, defekte Komponenten durch intakte Ersatzsysteme zu ersetzen. Dies setzt voraus, dass man in der Lage ist, mit Hilfe des Lasers leitende Verbindungen zu schaffen und andere zu durchtrennen. Diese Möglichkeiten werden durch die Integration von geeigneten Bauelementen geschaffen, die die lasergestützte Bearbeitung ermöglichen.

1.1 Ziele der Arbeit

In dieser Arbeit wird für den Bereich der Redundanz-Technologien ein neues flächenreduziertes Bauelement vorgestellt, durch welches Konfigurations- und Reparaturaufgaben in industriell gefertigten mikroelektronischen Schaltungen vereinfacht und beschleunigt werden. Dieses Bauelement ermöglicht das gleichzeitige lasergestützte Kontaktieren und Auftrennen von Leitbahnen. Ein entscheidender Aspekt dieser Arbeit ist die Ermittlung von optimalen Prozessparametern, mit denen das Bauelement mit hoher Zuverlässigkeit reproduzierbar bearbeitet werden kann. Gleichmaßen werden die Abhängigkeiten zwischen den Prozessparametern und den erzielten Widerständen der leitenden Verbindungen aufgezeigt. Beschleunigte Lebensdaueruntersuchungen sollen die

hohe Zuverlässigkeit des entwickelten Bauelements unter Betriebsbedingungen belegen. Eine lange Lebensdauer des Bauelements ist für den industriellen Einsatz unbedingt erforderlich. Des Weiteren werden Redundanz-Konzepte vorgestellt, in denen die Vorteile dieses neuen Bauelements herausgestellt werden.

Die Voraussetzung für die erfolgreiche Prozessierung des neuen Bauelements ist das Vorhandensein eines Werkzeuges, welches die lasergestützte Feinstbearbeitung von Halbleiterbauelementen zulässt. Die Entwicklung eines geeigneten Laserkonfigurationsautomaten ist ebenfalls eine Zielsetzung dieser Arbeit.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im Anschluss an diese Einleitung folgt in Kapitel 2 ein kurzer Überblick über die existierenden Verfahren der Laserkontaktierung. Es werden die bekannten Strukturen und ihre Funktionsmechanismen vorgestellt.

Der Aufbau, die Funktionsweise und die bei der Bearbeitung des neuen Bauelements notwendigen Prozessschritte, welches im folgenden als Laserumschalter bezeichnet wird, werden im Kapitel 3 beschrieben und erklärt. Die Entwicklung eines theoretischen Modells zu Widerstandsvorhersage in Abhängigkeit von den Laserprozessparametern ist ebenfalls Teil dieses Kapitels.

In Kapitel 4 werden die experimentellen Anlagen erläutert, angefangen beim Laserkonfigurationsautomaten mit seinen Komponenten bis hin zum Lebensdaueremessplatz, an dem die Zuverlässigkeitsuntersuchungen durchgeführt wurden.

Die Beschreibung der entworfenen Teststrukturen, die verwendeten Entwurfswerkzeuge und CMOS-Technologien, sowie die Anordnung der Laserumschalter in übergeordneten Teststrukturen, durch welche die Zuverlässigkeitsuntersuchungen ermöglicht werden, erfolgt in Kapitel 5.

Die Ergebnisse der Prozessierung der Laserumschalter werden in Kapitel 6 dargestellt. Neben der ausführlichen Erläuterung der ermittelten Prozessparameter und der erzielten Kontaktwiderstände wird hier das theoretische Widerstandsmodell aus Kapitel 3 korrigiert und in ein aussagekräftiges Modell überführt.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen statistisch ausgewertet und präsentiert. Zuvor erfolgt jedoch eine Zusammenfassung der lebensdauerbegrenzenden Faktoren, die für Halbleiterbauelemente gültig sind. Daran anschließend werden die verwendeten Verfahren und Werkzeuge zur Bestimmung der Lebensdauer beschrieben.

Der Implementierung der Laserumschalter ist das Kapitel 8 gewidmet. Dieses Kapitel beinhaltet Vorschläge für eine mögliche Integration der Laserumschalter in mikroelektronische Schaltungen. Hier werden die Vorteile herausgearbeitet, die die Anwendung der Laserumschalter mit sich bringt.

Es folgt in Kapitel 9 die Diskussion der erzielten Ergebnisse und ein Vergleich mit ähnlichen Bauelementen.

Die Zusammenfassung der Hauptaussagen dieser Arbeit ist Kapitel 10 zu entnehmen.

2 Bekannte Verfahren der Laserkontaktierung

Es existieren eine Vielzahl von lasergestützten Verfahren zur Herstellung von leitenden Verbindungen in mikroelektronischen Schaltungen. Hier sind jedoch ausschließlich Verfahren gemeint, welche Fertigungsfehler kompensieren oder die Konfigurationszwecken dienen, und die erst nach der industriellen Fertigstellung der Chips zum Einsatz kommen. Grundsätzlich können die Verfahren in zwei Kategorien eingeordnet werden. Zu der ersten Kategorie gehören die Verfahren, bei denen das Material, welches die leitende Verbindung bildet, von außen zugeführt werden muss, wie es zum Beispiel bei der **Laser Enhanced Chemical Vapour Deposition (LECVD)** [2][3] der Fall ist. Bei diesem Verfahren wird das für die Kontaktformierung notwendige Metall aus der Gasphase einer metallorganischen Verbindung gewonnen und mit Hilfe eines Lasers auf dem entsprechenden Ziel abgeschieden. Der apparative Aufwand dieses Verfahrens ist jedoch unangemessen groß, folglich ist die *LECVD* ungeeignet für die Integration in eine industrielle Fertigungslinie. Gleiches gilt für die **Focused-Ion-Beam (FIB)** Technologien, bei denen statt eines Laserstrahls ein Ionenstrahl verwendet wird. Diese beiden Technologien sollen im Folgenden nicht weiter betrachtet werden. Die zweite Kategorie beinhaltet verschiedene Verfahren, die das für die Kontaktformierung notwendige Material aus der mikroelektronischen Schaltung selbst beziehen. Diese Verfahren sind es, auf die im Folgenden etwas näher eingegangen werden soll, um eine Basis für vergleichende Untersuchungen bereitzustellen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die an dieser Stelle vorgestellten Verfahren und Strukturen nur für die Schaffung einer leitenden Verbindung konzipiert sind.

2.1 Die lasergestützte Legierung von Aluminium und Silizium

Diese von Chapman entworfene Laserkontaktstruktur (Bild 1) misst $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ und besteht aus zwei übereinander liegenden Metalllagen, welche durch SiN_x voneinander isoliert sind. Während der Bearbeitung dieser Struktur mit einem Argon-Ionen-Laser wird das Metall der oberen Metallisierung geschmolzen und der Stickstoff aus dem SiN_x entfernt (Bild 1). Das verbleibende geschmolzene Silizium und das flüssige Metall der oberen Lage bilden eine Al-Si-Legierung. Die relativ lange Bestrahlung von einigen 100 ns der Kontaktstruktur mit Laserlicht geringer

Leistung sorgt dafür, dass das Metall nicht verdampft, sondern schmilzt, um mit dem Silizium zu legieren. Die dabei entstehende Verbindung hat einen typischen Kontaktwiderstand von 1-10 Ω bei sehr guten Ausbeuten [5].

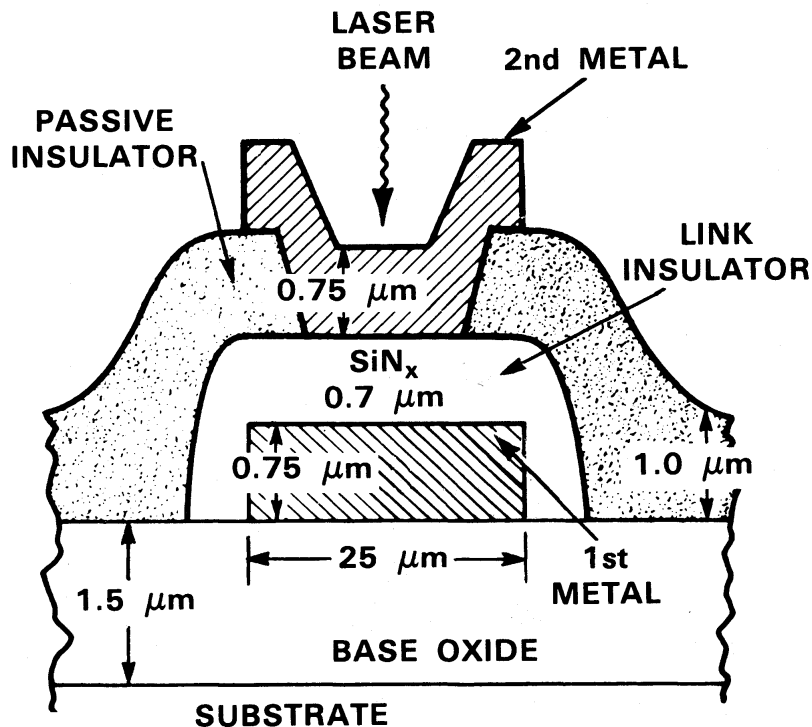


Bild 1 Vertikale Laserkontaktstruktur nach Chapman.

2.2 Die Lasergestützte Diffusion von Dotierstoffen

Bild 2 zeigt das Layout einer Laserkontaktstruktur, bei der durch Laserbestrahlung zwei in einer n-Wanne oder in einem n-Substrat eingebettete gegenüberliegende hochdotierte p-Gebiete elektrisch miteinander verbunden werden sollen. Vor der Laserbearbeitung sind die hoch dotierten p-Gebiete durch einen schwach dotierten n-Streifen voneinander isoliert. Die lokale Erwärmung durch die Bestrahlung mit einem Argon-Ionen-Laser lässt das Silizium im Bereich des Laserspots schmelzen. Schließt die Schmelzzone die hoch dotierten p-Gebiete und den schwach dotierten n-Streifen mit ein, so defundiert Bor innerhalb der Schmelze vom p-Gebiet in die schwach dotierte n-Zone.

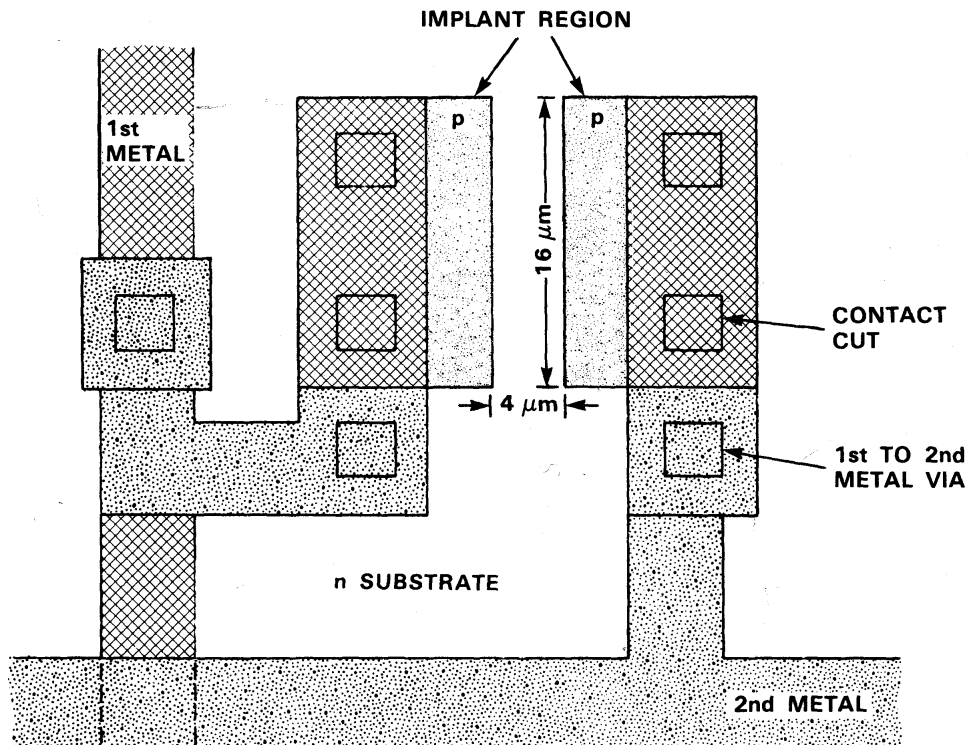


Bild 2 Horizontale Laserkontaktstruktur nach Chapman.

Der sperrende pn-Übergang wird dabei zerstört. Die erforderliche Bestrahlungsdauer von einigen Mikrosekunden ist in erster Linie von der Diffusionskonstante des Bors in geschmolzenem Silizium abhängig. Bei einer Breite von $16\ \mu\text{m}$ und drei Laserbearbeitungsstellen mit einem Abstand von $5\ \mu\text{m}$ konnte ein Kontaktwiderstand von ca. $100\ \Omega$ erzielt werden. Der Gesamtplatzbedarf dieser Struktur beträgt ca. $1600\ \mu\text{m}^2$ [5][6].

2.3 Der vertikale Laserkontakt nach Hartmann et al.

Der vertikale Laserkontakt wird aus zwei sich überlappenden Leitbahnaufweitungen gebildet, die in verschiedenen vertikal benachbarten Metallebenen liegen und durch eine Schicht aus SiO_2 voneinander isoliert sind. Die lateralen Abmessungen der Leitbahnaufweitungen sind $14 \times 14\ \mu\text{m}^2$. Der Verbindungsaufbau zwischen den beiden Metalllagen erfolgt in zwei Schritten (Bild 3). Der Laserpuls durchdringt im ersten Schritt die Passivierung und wird in der obersten Metallschicht absorbiert. Unter der Passivierung schmilzt das Metall und es bildet sich eine überhitzte Schmelze, deren

Dampfdruck schließlich die Passivierung aufbrechen lässt. Flüssiges Metall und geborstenes SiO_2 werden dabei ausgetrieben.

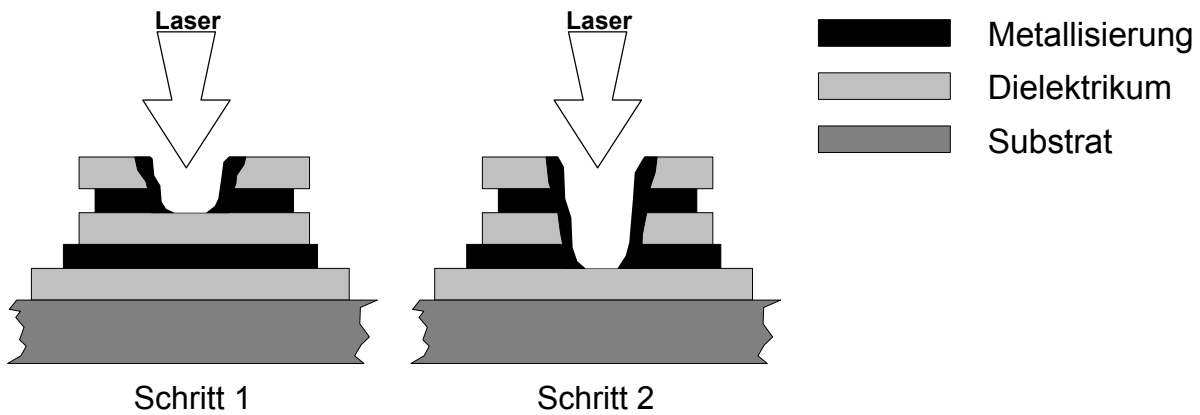


Bild 3 Prinzip der Laserkontaktformierung.

Während des zweiten Schritts reagiert der zweite Laserpuls mit der nun freigelegten unteren Metallisierung. Hier wiederholt sich der Vorgang des ersten Schritts. Flüssiges Metall wird aus dem Kontaktloch herausgetrieben und bleibt an dessen Bewandungen hängen. Das an den Bewandungen des Kontaktloches erstarrte Metall bildet einen ohmschen Kontakt zwischen den beiden Metalllagen. [7][8][9]. Bild 4 zeigt eine REM-Aufnahme eines in dieser Weise formierten Laserkontaktes. Deutlich sind hier die Metallablagerungen zu erkennen.

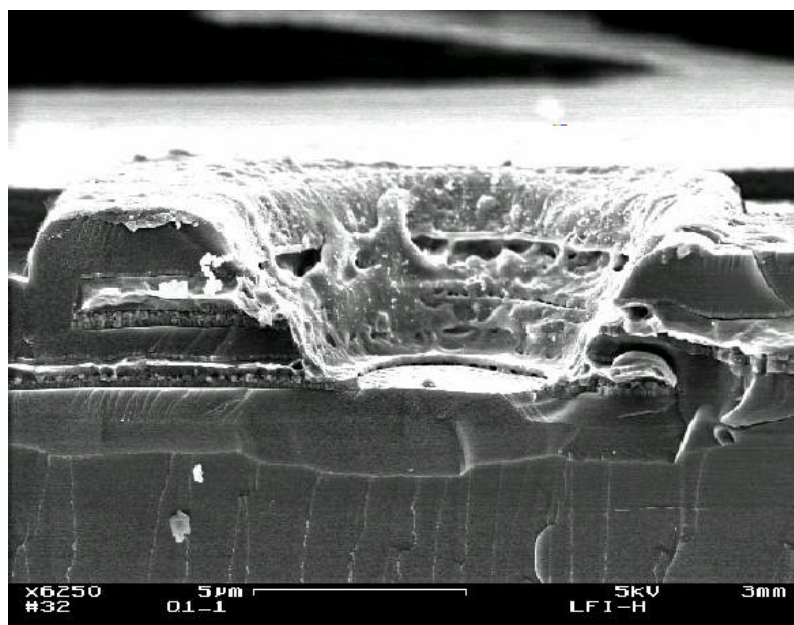


Bild 4 REM-Aufnahme eines prozessierten Laserkontaktes.

Die vertikalen Laserkontakte wurden in einem Standard CMOS-Prozess mit zwei Metalllagen gefertigt. Die Bearbeitung der Strukturen bei Verwendung der optimalen Prozessparameter führt zu einer 100-prozentigen Ausbeute bei Widerständen $< 3 \Omega$.

2.4 Der laterale Laserkontakt nach Bernstein et al.

Dieser Laserkontakt wurde in einem zwei Metalllagen Standard CMOS-Prozess gefertigt. Er besteht aus zwei Metallstreifen mit einer Breite von $2 \mu\text{m}$, die über eine Länge von $6 \mu\text{m}$ in einem Abstand von $1 \mu\text{m}$ parallel zueinander angeordnet sind (Bild 5). Beide zu kontaktierenden Metallstreifen befinden sich in Metall 2 (Bild 6). Die Region, in der die Verbindung aufgebaut wird, ist der $1 \mu\text{m}$ breite Spalt zwischen den beiden Metallstreifen der oberen Lage. Die Bestrahlung mit einem Dioden gepumpten Q-switched *Nd:YLF* Laser erwärmt das Metall, den Intermetallisolator (SiO_2) und die Passivierung (Si_3N_4) der Umgebung. Bedingt durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, Schmelztemperaturen, thermischen Leitfähigkeiten und Härten der Materialien im Einflussbereich des Laserspots entstehen feinste Risse, die mit geschmolzenem Aluminium der oberen Metalllagen gefüllt werden. Vorrangig bilden sich horizontale Risse zwischen den Oberkanten der Metallregionen, dort wo die Auswölbung der Passivierung (Si_3N_4) in die Senke des Dielektrikums (SiO_2) hinein reicht (Bild 6).

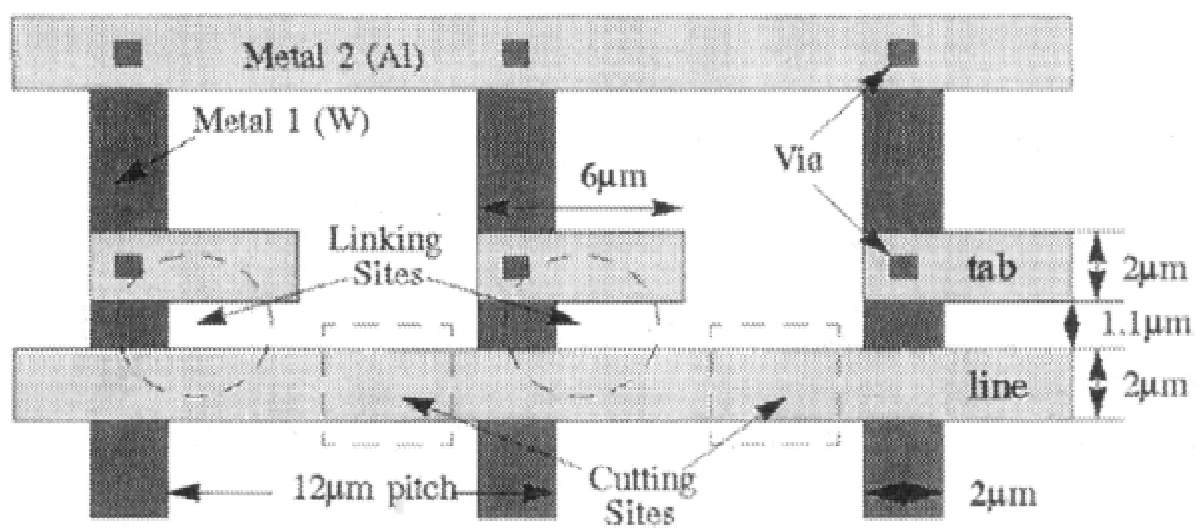


Bild 5 Aufsicht einer Anordnung aus 3 lateralen Laserkontaktstrukturen.

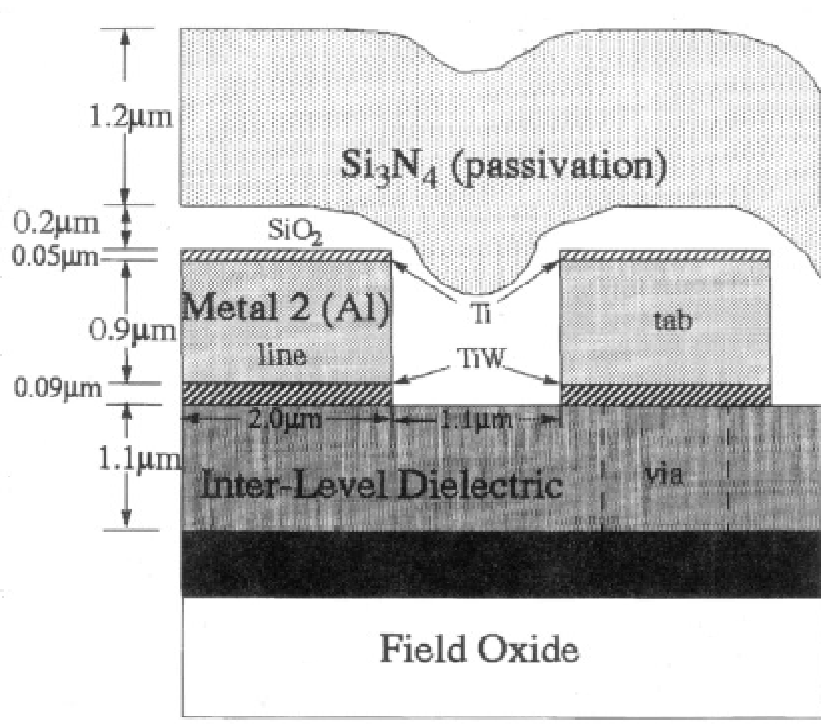


Bild 6 Querschnitt einer lateralen Kontaktstruktur.

Die mit dem Laser bearbeiteten lateralen Kontaktstrukturen weisen einen mittleren Widerstand R_m von 3Ω auf. Eine große Anzahl von Teststrukturen konnte mit diesem Verfahren zuverlässig formiert werden [10][11][12].

2.5 Der vertikale Laserkontakt nach Bernstein et al.

Der vertikale Laserkontakt ist eine Weiterentwicklung des lateralen Laserkontaktes nach Bernstein et al. (s. Kap. 2.4). Das Prinzip der Kontaktformierung macht sich erneut die unterschiedlichen thermischen Materialeigenschaften des Metalls (Schmelztemperatur, thermische Leitfähigkeit, thermischer Ausdehnungskoeffizient, Härte) und des umgebenden Dielektrikums zu nutze. Im Verlauf der Bearbeitung durchdringt der Laserstrahl das quadratische Fenster in der oberen Metalllage (Bild 7a) und wird vom Aluminium der Leitbahn in der unteren Metallisierung absorbiert. Dies führt zum Aufschmelzen des Metalls in der unteren Lage. Bedingt durch die thermische Ausdehnung des flüssigen Metalls entstehen im umgebenden Dielektrikum feinste Risse entlang von Stresspfaden (Bild 7, Bild 8), in die flüssiges Metall 1 gedrückt wird.

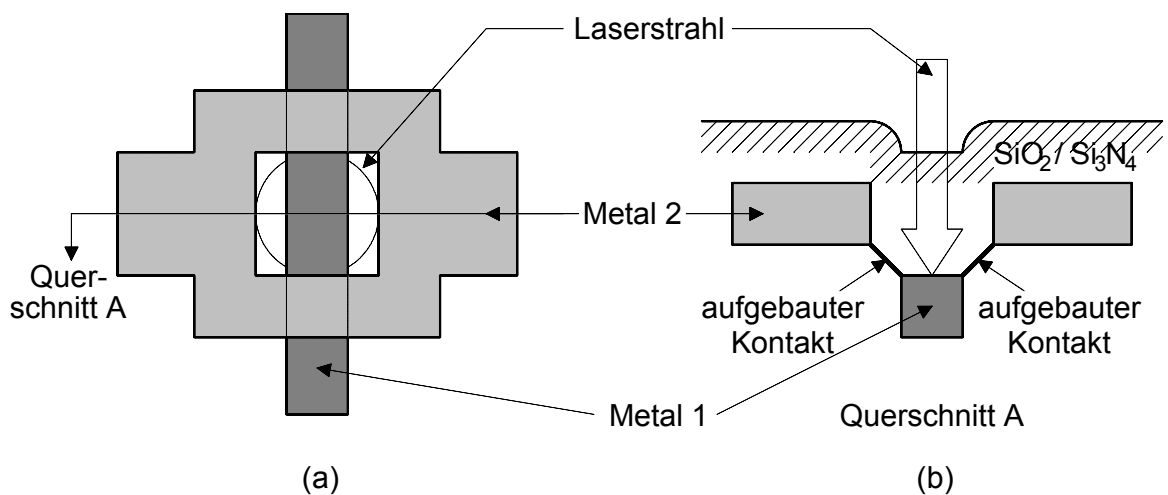


Bild 7 Schematische Darstellung der vertikalen Laserkontaktstruktur nach Bernstein et al. : (a) Aufsicht und (b) Querschnitt in der Ebene A.

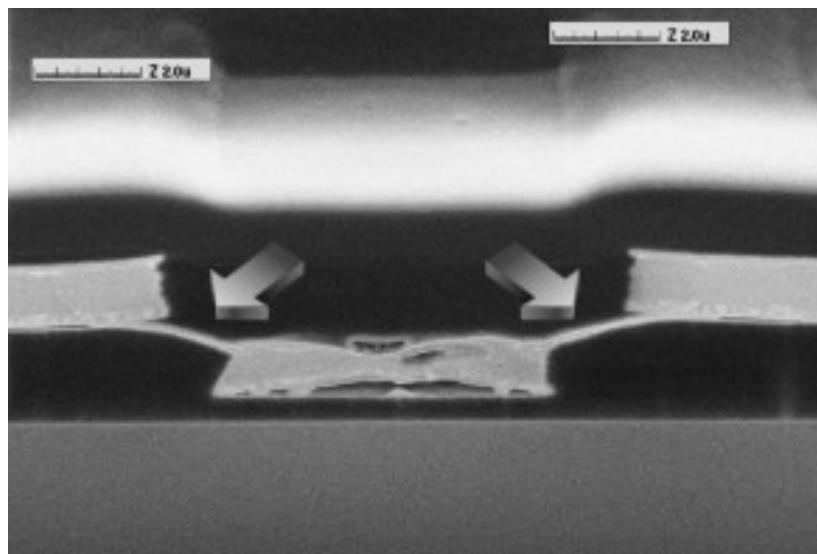


Bild 8 REM-Aufnahme eines Querschnitts durch einen bearbeiteten Laserkontakt. Die Pfeile deuten auf die mit Metall gefüllten Risse, welche die leitende Verbindung darstellen.

Die Risse bilden sich an den seitlichen Oberkanten von Metall 1 und enden an den seitlichen Unterkanten von Metall 2. Die hergestellten Kontakte weisen einen mittleren Widerstand R_m von $0,8 \Omega$ auf. Die zu erwartende mittlere Lebensdauer dieser Laserkontaktstrukturen wird mit 38 Jahren bei 300 K und einer Stromdichte von 3 MA/cm^2 angegeben [13][14][15].

3 Der Laserumschalter

Die Entwicklung des neuen Laserumschalters ist das Ergebnis der konsequenten Weiterentwicklung der in Kapitel 2.3 vorgestellten vertikalen Standard Laserkontakte. Die zunehmende Integrationsdichte der mikroelektronischen Schaltungen auf immer größer werdenden Siliziumflächen erfordert eine Anpassung aller Bauelemente bezüglich ihres Flächenbedarfs. Dies schließt eine Reduzierung des Flächenbedarfs der Komponenten mit ein, die zu Konfigurationszwecken in die mikroelektronischen Schaltungen integriert werden. Die Anpassung der Bauelemente stößt jedoch sehr bald an ihre Grenzen, da die Laserkontakte nicht beliebig verkleinert werden können. Zum einen begrenzt dies der Fertigungsprozess und zum anderen werden bei der Prozessierung mit dem Laser deutliche Grenzen durch die minimale Größe des Laserspots gesetzt. Sind die Laserspotgröße und die Größe des Bauteils nicht optimal aufeinander abgestimmt, leiden die elektrischen Eigenschaften des Laserkontaktes. Das aktuelle Flächenoptimum des Standard Laserkontakts liegt zur Zeit bei ca. $10 \times 10 \mu\text{m}^2$, das des Lasertrenners bei ca. $10 \times 6 \mu\text{m}^2$. Da hier vorerst keine Reduzierung des Flächenbedarfs mehr zu erzielen war, musste ein neuer Weg eingeschlagen werden. Dies führte zu der Entwicklung der in dieser Arbeit vorgestellten neuen Laserumschalterstruktur, die eine Laserkontaktstruktur und eine Lasertrennstruktur in einer vertikalen Anordnung vereint. Die Zusammenfassung von zwei funktional verschiedenen Bauelementen zu einem einzigen Bauelement führt zu einer erheblichen Reduktion des Flächenbedarfs. Des Weiteren ist mit einer nicht zu vernachlässigenden Verringerung der Laserbearbeitungszeit zu rechnen, da nicht mehr zwei separate Bauelemente unter dem Laser positioniert und bearbeitet werden müssen. Das Kontaktieren und Durchtrennen einer Leitbahn erfolgt in einem Arbeitsgang. Auch die Problematik von nicht angeschlossenen schwebenden Leitungen fällt nicht mehr ins Gewicht, da die Bearbeitung des Laserumschalters mit dem Laser einem Umschaltvorgang gleicht. In den folgenden Unterkapiteln wird die Funktionsweise des Laserumschalters und die erforderliche Prozessfolge erläutert. Die Vorstellung eines einfachen Modells zur Vorhersage der Kontaktwiderstände in Abhängigkeit von den Prozessparametern schließt dieses Kapitel ab.

3.1 Prinzip des Laserumschalters

Die entwickelte Laserumschalterstruktur (Bild 9), die zwei Bauelemente in einer vertikalen Anordnung vereint, besteht aus drei übereinander liegenden Metalllagen, im Folgenden Metall n , $n+1$ und $n+2$ genannt. Der Laserkontakt (Bild 10a) wird dabei aus den Metallen der beiden oberen Lagen gebildet. Beide Leitbahnen sind an den Enden aufgeweitet und überlappen einander, um eine zuverlässige Laserbearbeitung zu gewährleisten. Metall n und Metall $n+1$, die mit einem Via verbunden sind, bilden die vertikale Trennstruktur (Bild 10) dieses Bauelements.

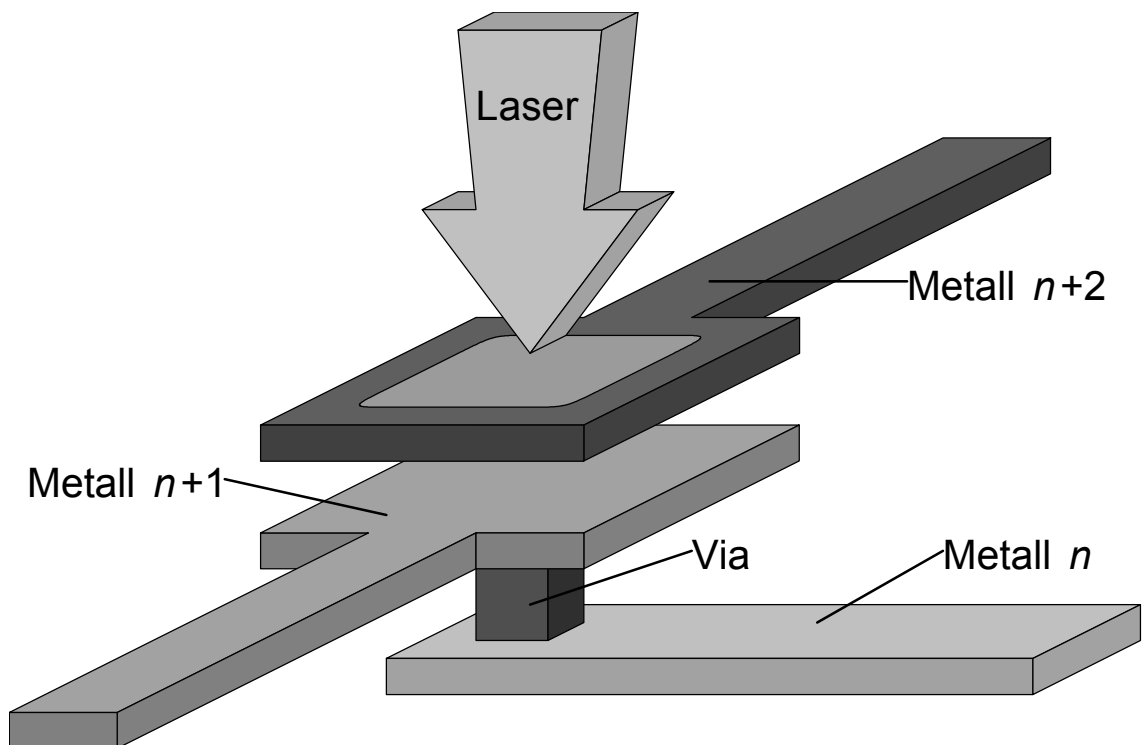


Bild 9 Schematische Darstellung der Laserumschalterstruktur.

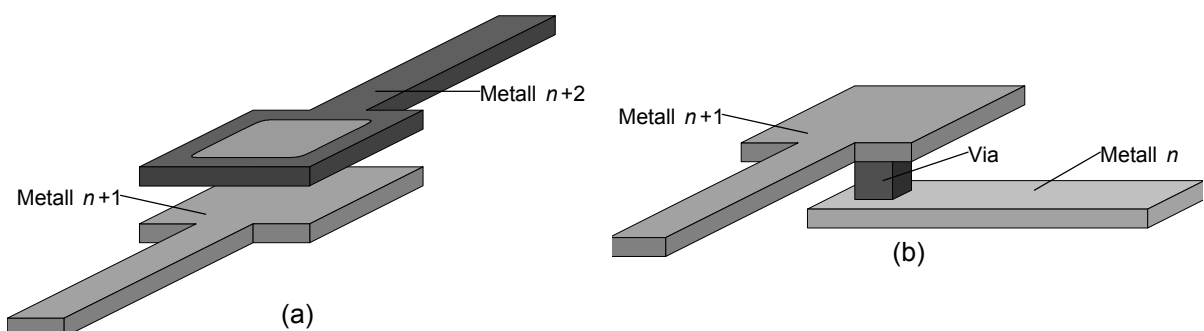


Bild 10 Schematische Darstellung der einzelnen Komponenten der Laserumschalterstruktur : (a) Laserkontakt, (b) Lasertrenner.

Die Bearbeitung der Laserumschalter erfolgt grundsätzlich in drei Schritten [16]. Wird der unbearbeitete Laserumschalter (Bild 11a) einem ersten Laserpuls ausgesetzt, so durchdringt dieser die Passivierung und wird vom Metall der obersten Lage teilweise reflektiert und teilweise absorbiert. Die absorbierte Dosis erwärmt das Metall oberflächlich bis zum Schmelzpunkt und darüber hinaus. Es breitet sich eine Schmelzfront in den oberen Schichten des Metalls $n+2$ aus. Die mit der Erwärmung einhergehende Expansion des Metalls erzeugt eine unter Druck stehende überhitzte Schmelze unter der noch intakten Passivierung. Auf Grund des zunehmenden Dampfdruckes entstehen feinste Risse in der Passivierung oberhalb des Einflussbereiches des Lasers bzw. des geschmolzenen Metalls. Hat der Dampfdruck sein Maximum erreicht, reißt die Passivierung auf und wird explosionsartig fortgeschleudert.

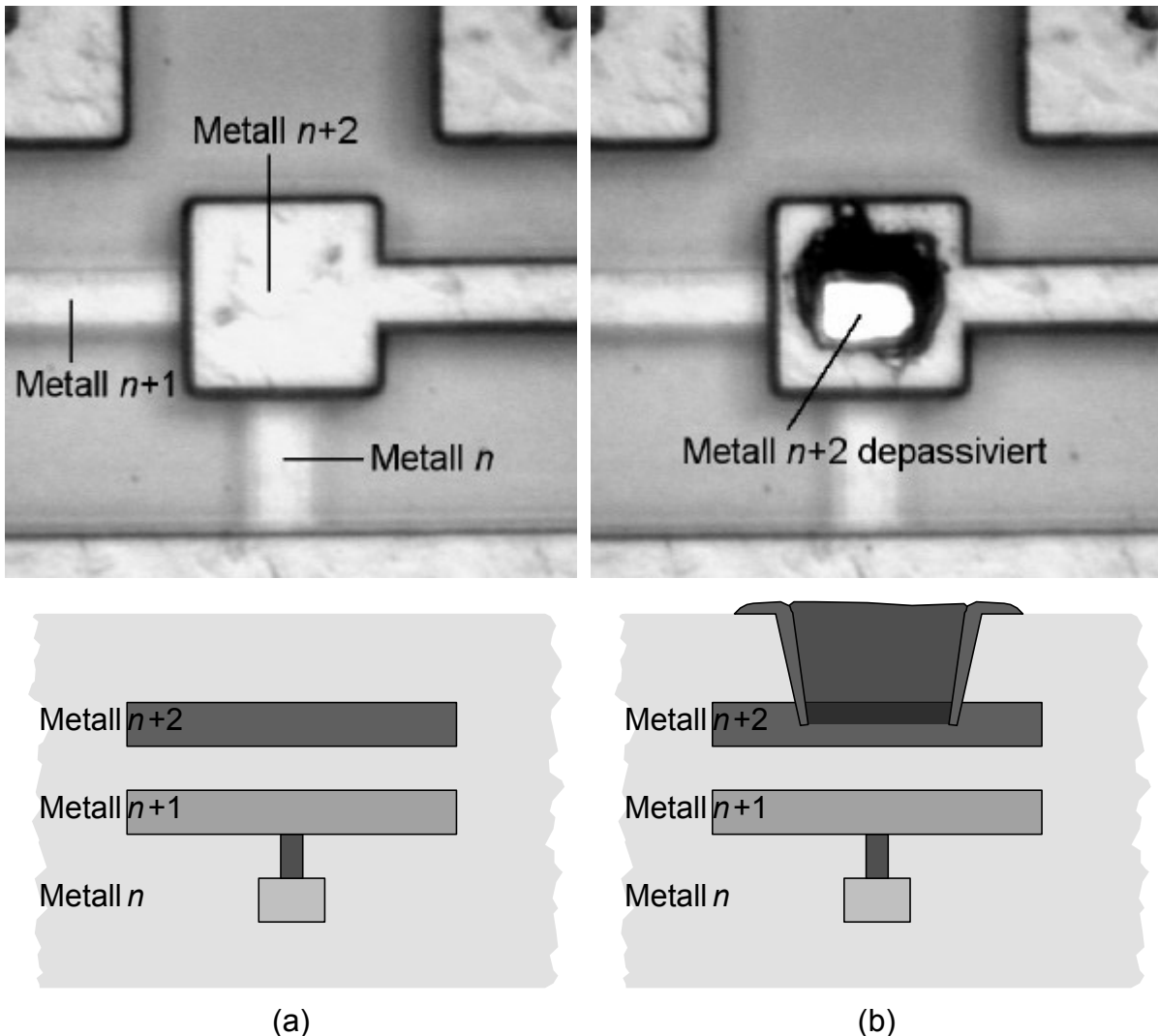


Bild 11 Schematische und fotografische Darstellung der Bearbeitungssequenz eines Laserumschalters : (a) unbearbeitet (b) nach dem ersten Laserpuls.

Teile der Metallisierung $n+2$ werden ebenfalls aus dem Bearbeitungskrater geschleudert (Bild 11b) und bleiben auf der Oberfläche der umgebenden Passivierung liegen, sowie an den Bewandungen des Bearbeitungskraters als Niederschlag hängen.

Der zweite Laserpuls (Bild 12a) entfernt das Metall $n+2$ vollständig und perforiert bereits durch die Volumenzunahme des geschmolzenen Metalls der Lage $n+1$ den Intermetallisolator (SiO_2). Er bedeckt jedoch noch vollständig Metall $n+1$.

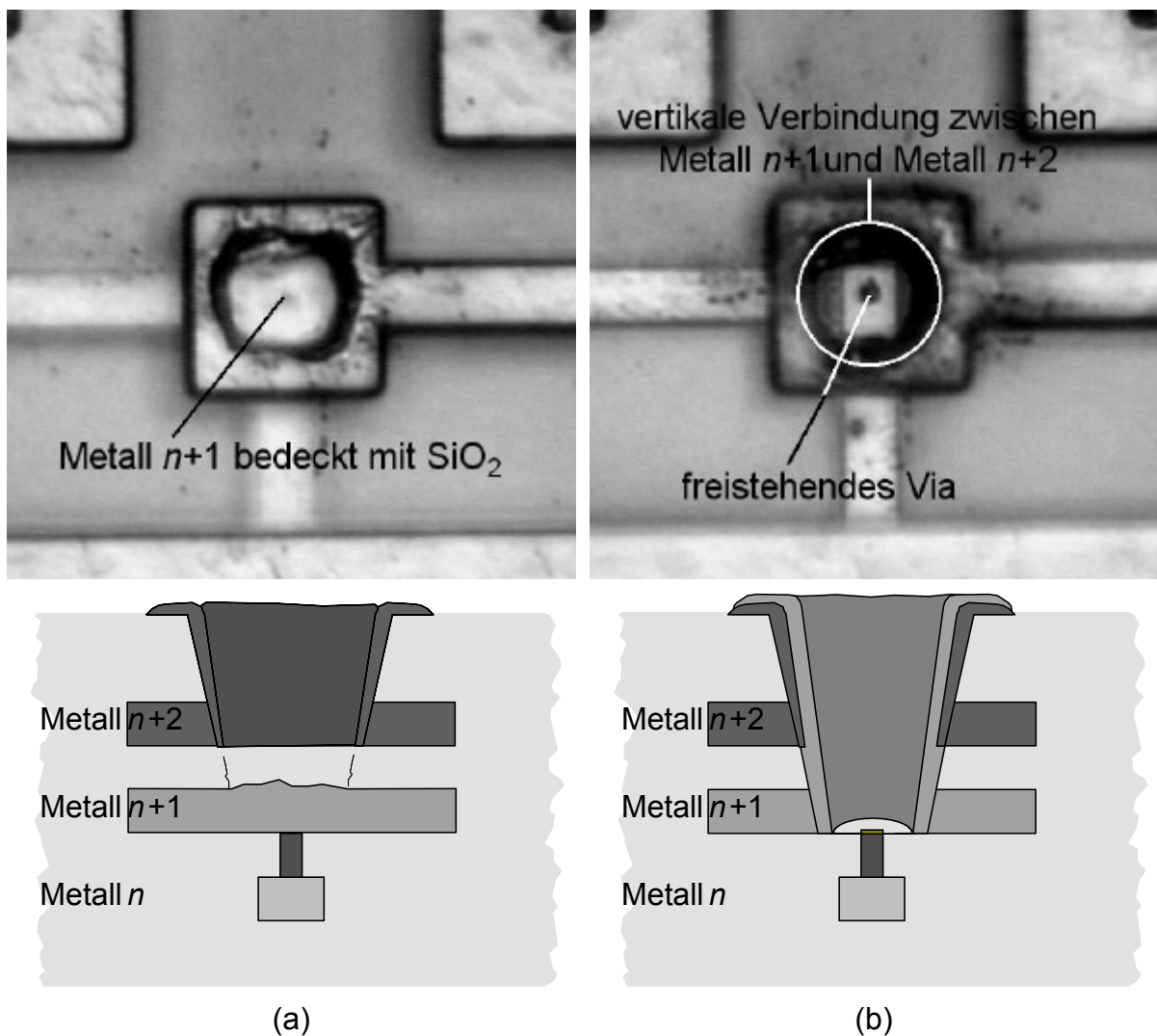


Bild 12 Schematische und fotografische Darstellung der Bearbeitungssequenz eines Laserumschalters : (a) nach 2. Laserpuls (b) nach 3. Laserpuls.

Der dritte Puls formt dann die leitende Verbindung zwischen Metall $n+1$ und Metall $n+2$ und öffnet gleichzeitig die Trennstruktur (Bild 12b). Der ohmsche Kontakt zwischen Metall $n+1$ und Metall $n+2$ wird durch das geschmolzene und verdampfte

Aluminium gebildet, welches sich an den Bewandungen des Bearbeitungstrichters niederschlägt. Der Prozess des Materialaustriebs im dritten Schritt ist vergleichbar mit dem des ersten. Durch extreme Volumenzunahme und schlagartige Expansion wird flüssiges und dampfförmiges Metall herausgeschleudert und überzieht die Innenseite des Bearbeitungstrichters. Die Abtrennung des Vias, welches Metall n und Metall $n+1$ miteinander verbindet, erfolgt ebenfalls mit Hilfe des dritten Pulses. Bei einem erfolgreich prozessierten Laserumschalter ist Metall $n+1$ im Bereich des Laserspots vollständig entfernt und ein von Metall n heraufragendes freistehendes Via wurde erzeugt. Das Via hat keine Verbindung mehr zu Metall $n+1$ (Bild 12b).

Entscheidend für das korrekte Funktionieren des Laserumschalters ist das Material bzw. die Materialeigenschaften des Vias und der Leitbahn in Metall $n+1$. Das Via des vorgestellten Laserumschalters besteht aus Wolfram, dessen Schmelzpunkt ($T_s = 3380 \text{ °C}$ [17]) erheblich höher ist, als das der Aluminiumlegierung ($T_s = 650 \text{ °C}$). Bei richtiger Wahl der Energiedosis kann das Metall der Lage $n+1$ sicher abgetragen werden, ohne das Via oder das darunter liegende Metall n zu beschädigen oder gar eine unerwünschte elektrische Verbindung zwischen Metall n und Metall $n+1$ zu erzeugen [16][18][19].

3.2 Theoretisches Verhalten des Kontaktwiderstandes

Zur Abschätzung des Widerstandsverhaltens in Abhängigkeit von der verwendeten Spotgröße wurde zunächst ein einfaches Modell entwickelt. Die Erstellung des Modells erfolgte unter Zugrundelegung von zwei Annahmen (Bild 13) :

1. Die Querschnittsfläche des Laserspots ist quadratisch und der Laserstrahl weist über die Tiefe des Kontaktloches keine Divergenzen auf.
2. Das komplette zur Verfügung stehende Materialvolumen geht in die Kontaktformierung ein und verteilt sich gleichmäßig an der Bewandung des Kontaktloches.

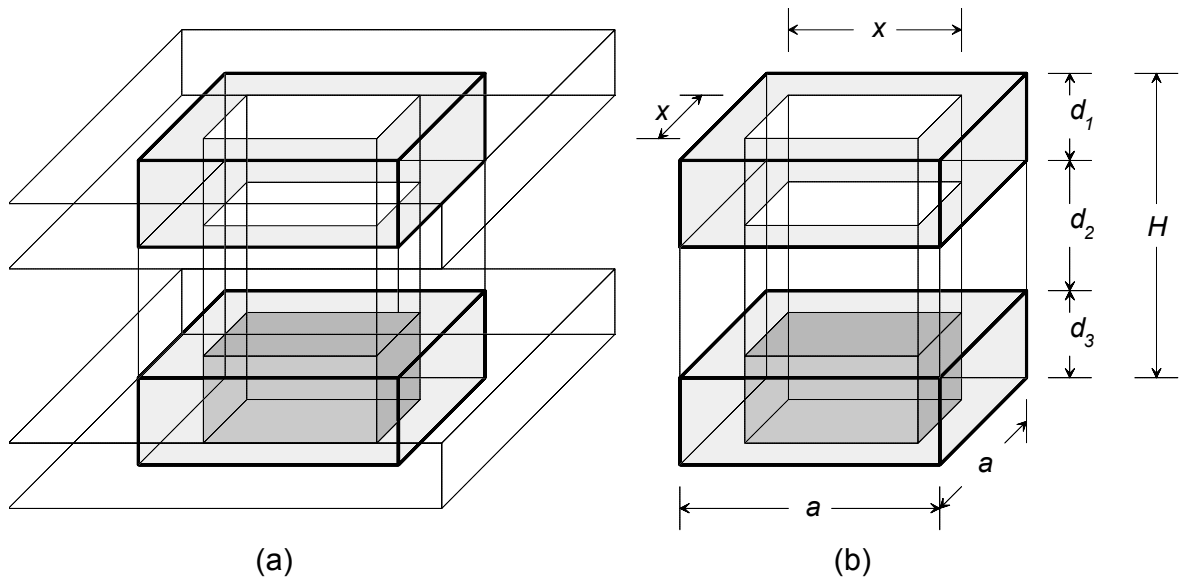


Bild 13 Darstellung der Kontaktstruktur des Laserumschalters (a) und des Wirkungsbereichs des Laserspots (b).

Der Wirkungsbereich des Laserspots bestimmt das für die Kontaktformierung zur Verfügung stehende Materialvolumen V_{Res} , welches ausschließlich aus Metall $n+1$ gewonnen und durch (Gl. 1) beschrieben wird.

$$V_{\text{Res}} = a^2 \cdot d_3 \quad (\text{Gl. 1})$$

Die lateralen Abmessungen des Laserspots a und die Schichtdicke d_3 von Metall $n+1$ bestimmen dieses Materialvolumen. Das Volumen des Kontaktes V_{Kon} berechnet sich idealerweise zu,

$$V_{\text{Kon}} = H \cdot (a^2 - x^2) \quad (\text{Gl. 2})$$

mit H als Gesamthöhe des Kontaktes und x als seitliche Abmessungen des freibleibenden Loches im Bearbeitungstrichter. Die Annahme $V_{\text{Res}} = V_{\text{Kon}}$ liefert, mit

$$A_{\text{Kon}} = a^2 - x^2 \quad (\text{Gl. 3})$$

die von der Spotgröße abhängige Querschnittsfläche der leitenden Verbindung (Gl. 4) zwischen Metall $n+1$ und Metall $n+2$

$$A_{\text{Kon}} = \frac{a^2 \cdot d_3}{H} \quad (\text{Gl. 4})$$

Wird (Gl. 4) in der Formel für den elektrischen Widerstand berücksichtigt, ergibt sich der ideale Widerstand des Laserkontaktes zu

$$R_{\text{Kon}} = \frac{\varrho \cdot l \cdot H}{a^2 \cdot d_3} \quad (\text{Gl. 5})$$

Der elektrische Widerstand R_{Kon} der formierten Laserumschalter internen Kontaktstruktur wird bestimmt durch den spezifischen Widerstand ϱ , der leitenden Querschnittsfläche A_{Kon} und der Weglänge l , die mit dem zur Verfügung stehenden Materialvolumen überbrückt werden muss.

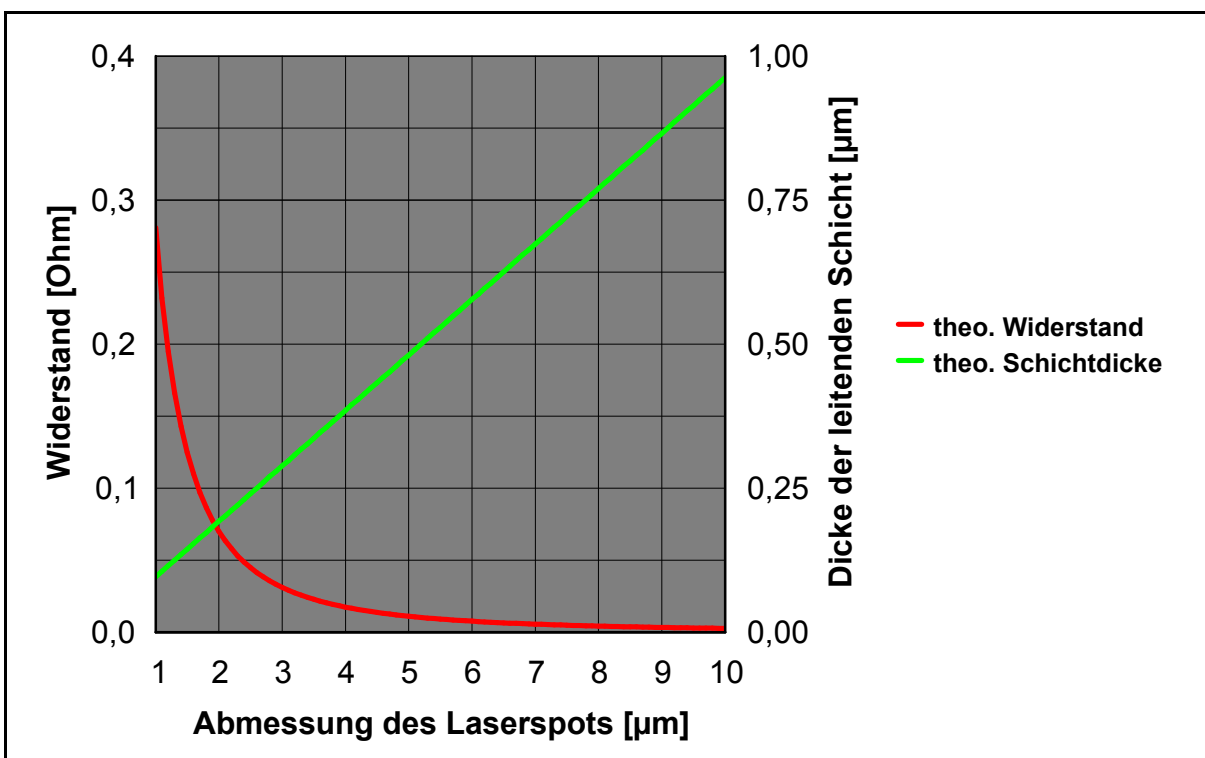


Bild 14 Abhängigkeit des idealen elektrischen Kontaktwiderstandes von den Dimensionen des Laserspots.

Die graphische Darstellung (Bild 14) des beschriebenen idealen Widerstands verdeutlicht die exponentielle Widerstandszunahme bei kleiner werdenden lateralen Abmessungen des Laserspots. Die Berechnung der Kurve erfolgte unter Verwendung von typischen Werten für H und I , wie sie zum Beispiel in den $0.25\ \mu\text{m}$ CMOS-Prozessen auftreten (Kap. 5.2).

Auf Grund der Vereinfachung $V_{\text{Res}} = V_{\text{Kon}}$, die den Materialverlust durch Auswurf und Verdampfung nicht berücksichtigt, ist anzunehmen, dass die errechneten Widerstandswerte deutlich kleiner sind als real gemessene Widerstände.

Die Korrektur dieses Modells erfolgt in einem späteren Kapitel unter Berücksichtigung von real gemessenen Widerständen der Laserkontaktstrukturen in den Laserumschaltern (Kap. 6.4 Bild 31). Die Graphik (Bild 14) zeigt jedoch, dass ab Laserspotgrößen von ca. $3 \times 3\ \mu\text{m}^2$ mit einem unverhältnismäßigen Widerstandsanstieg zu rechnen ist und auf Grund dessen die Laserumschalter nicht beliebig verkleinert werden können. Die Verkleinerung der Laserumschalter erfordert gleichermaßen eine Reduzierung der Laserspot Dimensionen, was entsprechend der Graphik zu einer Erhöhung des Widerstands führt.

4 Experimentelle Anlagen

Dieses Kapitel widmet sich der Beschreibung der Anlagen und Geräte mit deren Hilfe die Laserumschalter prozessiert und charakterisiert wurden. Zunächst werden der Laserkonfigurationsautomat und seine Subsysteme eingehender erläutert. Besonderes Augenmerk wird dabei auf den optischen Aufbau gerichtet, da die Optiken von entscheidender Bedeutung für die Qualität des zur Bearbeitung eingesetzten Laserstrahls sind. Die Reproduzierbarkeit des Laserprozesses wird durch die integrierten Komponenten zur visuellen und energetischen Prozesskontrolle sichergestellt.

Die abschließende Beurteilung der Güte der erfolgreich prozessierten Laserumschalter erfolgte an einem Lebensdauermeßplatz, welcher am Ende dieses Kapitels beschrieben wird. An diesem Meßplatz wurden beschleunigte Lebensdauertests unter erhöhter Strom- und Temperaturbelastung durchgeführt.

4.1 Der Laserkonfigurationsautomat

Das Werkzeug für die experimentelle Bearbeitung der Laserumschalter ist ein Laserkonfigurationsautomat (LKA) (Bild 15). Er wurde eigens für die Bearbeitung der Laserumschalter optimiert. Die Anlage besteht aus diversen aufeinander abgestimmten Einzelkomponenten. Neben einem Excimer-Laser zur Erzeugung kurzer Pulse im UV-Bereich besteht der Aufbau aus einem speziell angepassten Strahlengang, einem XYZ-Positioniersystem, einer Bildverarbeitung zur genauen Positionierung der Teststrukturen in der Anlage und aus einem Steuercomputer, der alle Einzelkomponenten zusammenfasst und steuert. Die vibrationsempfindlichen Komponenten der Anlage sind auf einer optischen Bank, bestehend aus einer auf einem Stahluntergestell schwingungsgedämpft gelagerten Granitplatte, installiert. Der gesamte Laserkonfigurationsautomat befindet sich in einer klimatisierten Laminarstromzelle. Dejustierungen durch Temperaturschwankungen werden somit verhindert. Auch die Anzahl der Staubpartikel im Inneren der Laminarstromzelle ist erheblich reduziert, was die Verschmutzung der optischen Komponenten herabsetzt.

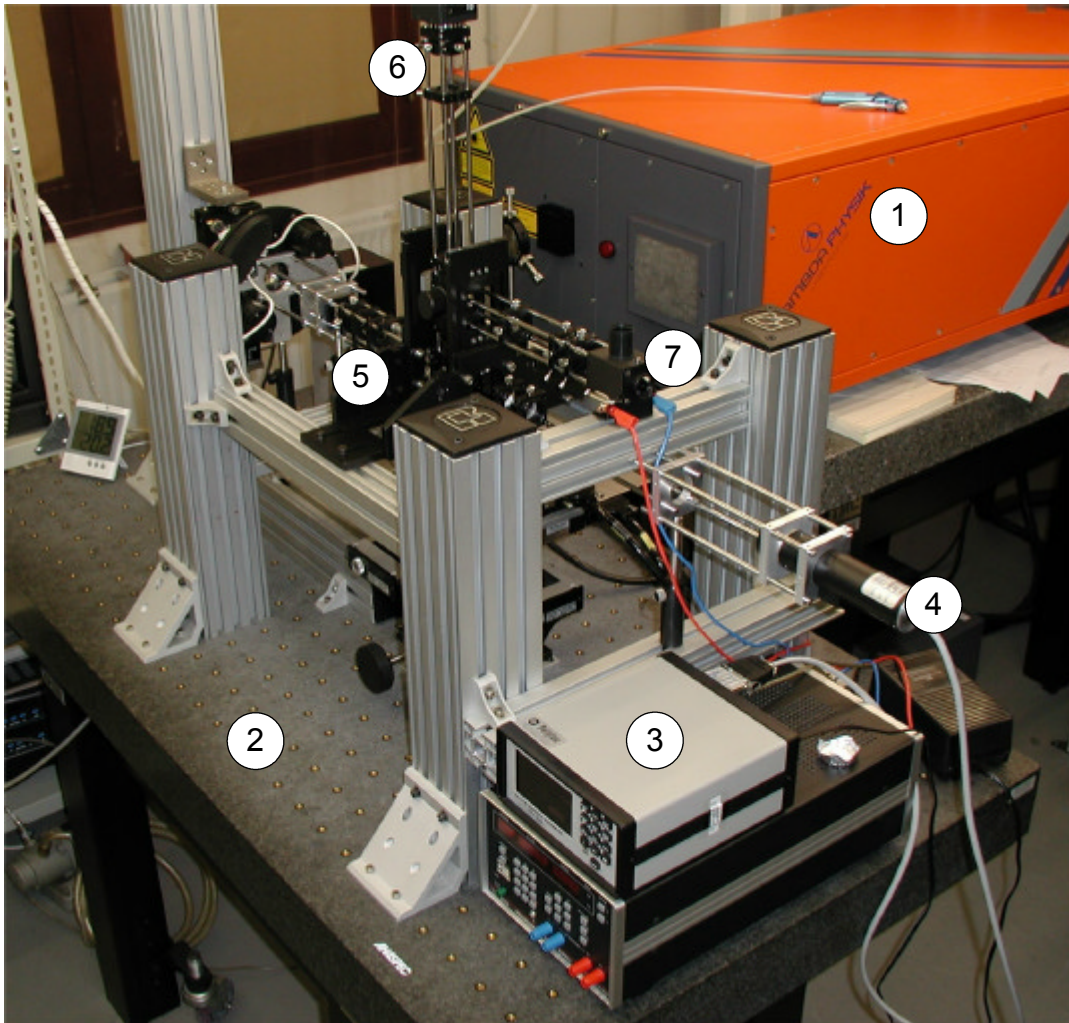


Bild 15 Der Laserkonfigurationsautomat : ① Laser, ② optische Bank, ③ Energieanzeigegerät, ④ Energiesesskopf, ⑤ Strahlengang, ⑥ Beobachtungssystem, ⑦ Beleuchtungssystem.

4.1.1 Der verwendete Laser

Für die Bearbeitung der Laserumschalter wird ein Excimer-Laser (LPX 120i) der Firma Lambda Physik eingesetzt. Der Laser arbeitet mit einem XeCl (Xenonchlorid) Gasgemisch, welches Licht der Wellenlänge 308 nm mit einer maximalen Pulsenergie von 200 mJ bei einer Pulsdauer von ca. 20 ns emittiert [22]. Dies führt zu einer maximalen Pulsleistung im Megawatt-Bereich. Der rechteckige Strahlquerschnitt des Excimer-Lasers hat eine Breite von 20 mm und eine Höhe von 9 mm.

Der Laser hat zwei grundsätzliche Betriebsmodi. Im ersten Betriebsmodus wird die Energie der emittierten Strahlung mit Hilfe eines im Laser integrierten Energiemonitors durch Regelung der Hochspannung an den Kondensatorbänken konstant gehalten, wohingegen im zweiten Modus lediglich die voreingestellte Hochspannung konstant gehalten wird. Der Modus der konstanten Hochspannung ist jedoch dem der konstanten Energie vorzuziehen, da die Regelung der Pulsenergie auf den Messwert der Energie des vorherigen Pulses zurückgreift. Der erste Puls einer Sequenz entspricht demzufolge nie dem voreingestellten Wert. Ausgehend von einer Standard Bearbeitungssequenz mit drei Pulsen ist daher mit signifikanten Fehlern zu rechnen. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass die Regelstrecke nach dem zweiten Puls noch nicht eingeschwungen ist. Aus diesem Grund wird der Modus der konstanten Hochspannung bevorzugt, da hier die Energien der aufeinanderfolgenden Pulse einander ähnlicher sind. Die Hochspannung wird einmal zu Beginn der Prozessierung mit Hilfe eines externen Energiemonitors eingestellt und anschließend nur noch überwacht und ggf. nachgeregelt.

4.1.2 Der optische Aufbau

Die komplexeste Komponente des Laserkonfigurationsautomaten bildet der optische Aufbau. Das optische System lässt sich in drei Subsysteme unterteilen :

Subsystem 1 beinhaltet alle Komponenten, die den Laserstrahl formen, um ein optimales Strahlprofil zu erzeugen. Dieses System bildet den Laserstrahlengang.

Subsystem 2 dient der Beleuchtung, um das Werkstück ausreichend für die Beobachtung mit Weißlicht auszuleuchten.

Subsystem 3 besteht im wesentlichen aus einer CCD-Kamera und abbildenden Optiken, um mit Hilfe eines Monitors und einer Bildverarbeitung eine visuelle und rechnergestützte Prozesskontrolle zu ermöglichen.

Subsystem 1 / Laserstrahlengang

Das Kernstück des optischen Aufbaus bildet das Subsystem 1. An den Laserstrahlengang werden verschiedene Anforderungen gestellt. Zum einen soll er den Laserstrahl formen ohne das Strahlprofil zu zerstören und gleichzeitig das rechteckige Loch einer Blende als Bearbeitungsquerschnitt auf das Werkstück abbilden. Divergenzen, Beugungen und ungewollte Reflexionen müssen vermieden werden. Gleichmaßen muss der Aufbau aber so flexibel bleiben, dass verschiedene Versuchsreihen bei unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt werden können, ohne den Aufbau grundlegend zu verändern. Flexibilität bedeutet hier, dass ein großer Bereich von möglichen Energiedichten, Pulsfolgen, Pulsfolgefrequenzen und Spotgrößen bei Verwendung unterschiedlicher Objektive durchfahren werden kann. Dies bedarf unter anderem diverser mechanischer Stellmöglichkeiten zur Erzielung eines optimalen Laserspots aber auch die richtige Wahl der optischen Komponenten und dielektrischen Beschichtungen [20]. Der Einfluss der Energiedichte ist von entscheidender Bedeutung. Durch sie wird der Materialabtrag pro Laserpuls definiert. Über die Anzahl der in einer Pulsfolge enthaltenen Einzelpulse wird der gesamte Materialabtrag festgelegt. Die in diesem Prozess angewendeten Pulsfolgefrequenzen von einigen Hertz beeinflussen zwar nicht das Prozessverhalten, wohl aber die Regeneration des im Laser verwendeten Gasgemisches. Bei Wahl einer ungünstigen Pulsfolgefrequenz konnte beobachtet werden, dass die Energie der Einzelpulse innerhalb einer Sequenz abnahm. Die Laserspotgröße ist neben der Energiedichte der wichtigste Prozessparameter. Die Größe des Laserspots muss optimal auf die Größe der zu prozessierenden Struktur abgestimmt sein. Die Bearbeitung sehr kleiner Strukturen erfordert einen noch kleineren Laserspot. Die Qualität sehr kleiner Strahlquerschnitte wird durch die Güte des optischen Aufbaus bestimmt.

Im folgenden wird der Laserstrahlengang genauer beschrieben und seine Charakteristiken detaillierter herausgestellt. Bild 16 zeigt in einer schematischen Darstellung den optischen Aufbau des Laserkonfigurationsautomaten. Der rechteckige Laserstrahl wird zunächst mit Hilfe eines Galelei-Teleskops 2:1 kollimiert. Damit Gehäusekomponenten und Optikfassungen nicht bestrahlt werden und mögliche Streustrahlung vermieden wird, reduziert eine runde Feldblende den Strahlquerschnitt auf einen Durchmesser von 5 mm.

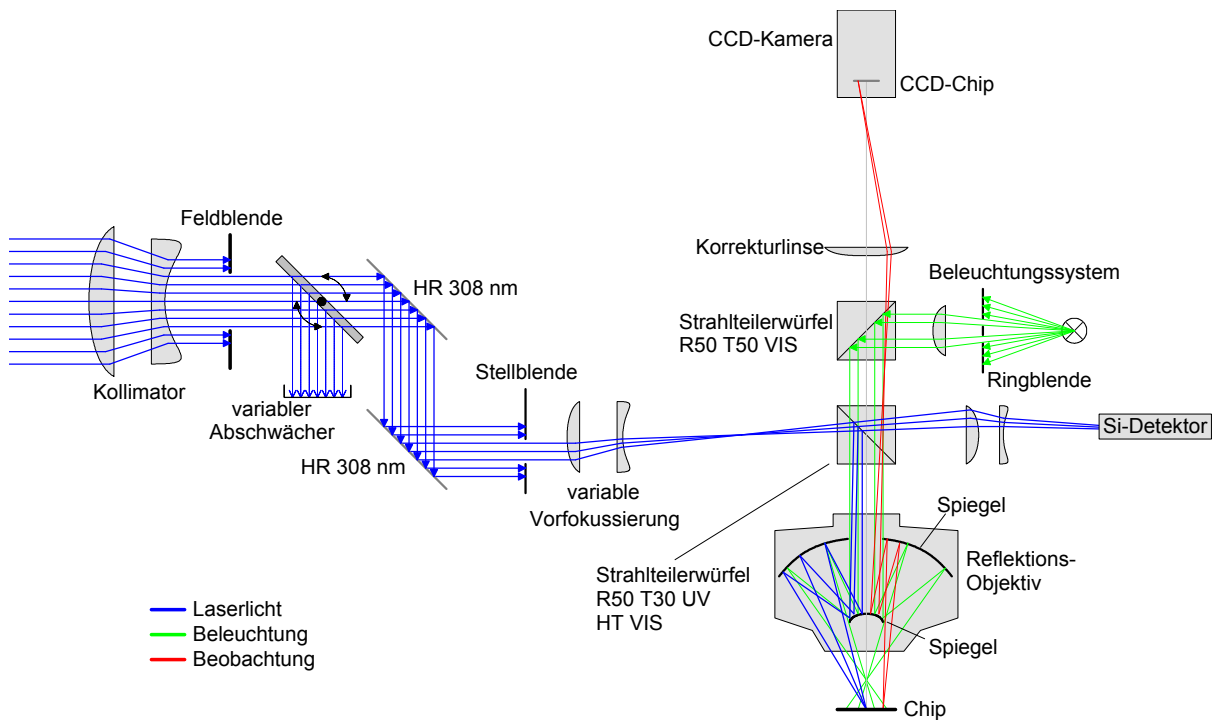


Bild 16 Schematische Darstellung des optischen Aufbaus

Nach der Feldblende folgt eine variable Abschwächereinheit [23], bestehend aus einem dielektrischen Kantenfilter mit winkelabhängiger Transmission. Ein hochauflösender Schrittmotor dreht den Kantenfilter in definierte Winkelpositionen. Dieser Abschwächer ermöglicht eine Variation der Pulsenergie des Lasers um zwei Größenordnungen in Energieschritten $< 1\%$.

Der energetisch korrekt eingestellte Laserstrahl wird von zwei dielektrisch beschichteten Spiegeln (HR 308 nm) auf eine Stellblende gelenkt. Die schrittmotorgesteuerte Stellblende besteht aus zwei unmittelbar hintereinanderliegenden Doppelspalten mit einem Öffnungsbereich von 40 - 20000 μm , der in Schritten von 2 μm variiert werden kann. Diese Stellblende bestimmt die endgültige Geometrie des Laserspots. Das Abbild der geöffneten Stellblende wird mit Hilfe der variablen Vorfokussierung, die mit zwei Mikrometerschrauben optimal axial justiert werden kann, auf die rückwärtige Bildebene des Objektivs abgebildet. Zusätzlich sind die Linsen der Vorfokussierung radial verschiebbar, damit der Laserstrahl an die gewünschte Position verschoben werden kann. Anschließend durchläuft der Strahl einen 50:30 UV-Strahlteilerwürfel, der zum einen den Hauptstrahl in das Objektiv umlenkt und zum anderen einen Teilstrahl für die Online-Energiemessung auskoppelt. Das ungewöhnliche Teilverhältnis des Würfels ist konstruktiv bedingt.

Der Strahlteilerwürfel (Bild 17) ist aus zwei Prismen zusammengesetzt, die an ihren Hypotenusen miteinander verkittet sind. Die optisch relevanten Seiten der Prismen sind dielektrisch mit HR-, AR- oder Teiler-Schichten beschichtet. Der verwendete Kitt weist im UV-Bereich schlechte Transmissionseigenschaften auf, was zu einem 20 %igen Verlust der Strahlungsleistung führt. Die Verlustleistung wird von dem Kitt absorbiert und in Wärme umgewandelt. Bei zu intensiver Bestrahlung des Würfels, wird der Kitt erblinden und der Strahlteilerwürfel damit unbrauchbar.

Um Messfehler bei der Verwendung des Strahlteilerwürfels im UV-Bereich zu vermeiden, war es notwendig den Würfel für diesen Wellenlängenbereich einzumessen und sein Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsverhalten genau zu charakterisieren (Bild 17) [Tabelle 1].

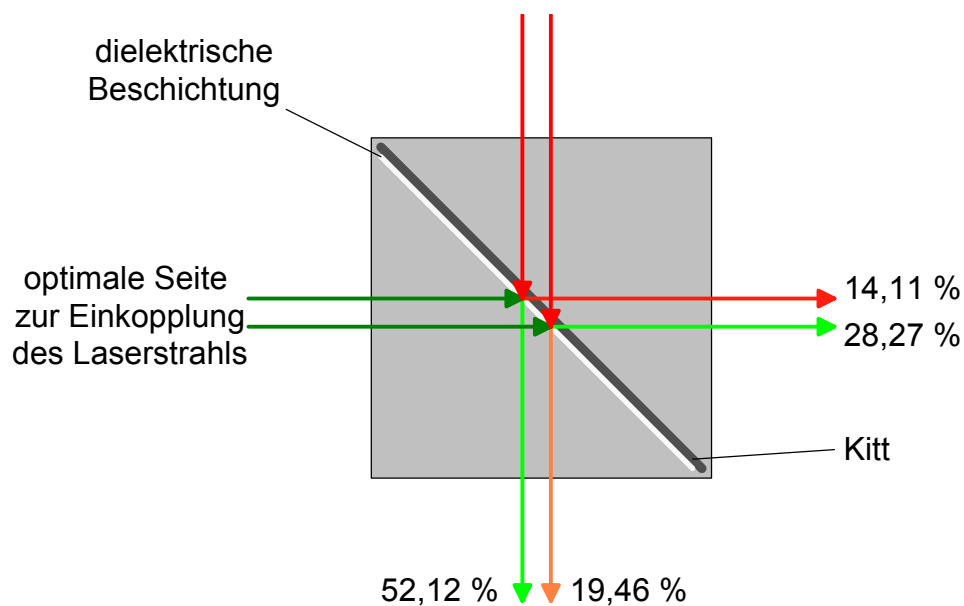


Bild 17 Schematische Darstellung des eingemessenen Strahlteilerwürfels.

Es wurde der Faktor K_{WRT} ermittelt, der das Verhältnis des transmittierten zum reflektierten Teilstrahl korrekt beschreibt. Bei Verwendung eines gekitteten Strahlteilerwürfels ist streng darauf zu achten, dass der Laserstrahl auf der richtigen Seite eingekoppelt wird (Bild 17), da es sonst zu extremen Energieverlusten kommt. Bei nicht sachgemäßer Verwendung weist der reflektierte Teilstrahl große Verluste auf, da er den Kitt zweimal passieren muss.

Eingangsenergie [J]	Transmission [J]	Transmission [%]	K_{WT}	K_{WRT}	Reflexion [J]	Reflexion [%]	K_{WR}
1,07E-03	3,16E-04	29,53%	3,39	1,78	5,63E-04	52,62%	1,9
1,11E-03	3,14E-04	28,29%	3,54	1,84	5,79E-04	52,16%	1,92
1,10E-03	3,17E-04	28,82%	3,47	1,83	5,79E-04	52,64%	1,9
1,07E-03	3,13E-04	29,25%	3,42	1,76	5,52E-04	51,59%	1,94
1,12E-03	3,02E-04	26,96%	3,71	1,96	5,92E-04	52,86%	1,89
1,12E-03	3,01E-04	26,88%	3,72	1,89	5,70E-04	50,89%	1,97
Mittel							
1,10E-03	3,11E-04	28,27%	3,54	1,84	5,73E-04	52,12%	1,92

Tabelle 1 Charakterisierung des UV-Strahlteilerwürfel und Angabe des gemittelten Wertes für den Reflexions-Transmissions-Faktor K_{WRT} , wobei jede Zeile dem Mittel aus 100 Laserpulsen entspricht.

Zwei weitere Linsen sorgen für die präzise Abbildung des ausgekoppelten Teilstrahls auf dem Silizium-Detektor (RjP-765a UV/Si, LaserProbe Inc. [25]) des Energiemonitors (Universal Radiometer Rm-3700, LaserProbe Inc. [24]). Auch sie wurden bezüglich ihres optischen Verhaltens charakterisiert. Für jede Linse ergibt sich ein Transmissions-Faktor von $K_{LT} = 1,408$. Der Faktor wurde entsprechend dem Reflexions-Transmissions-Faktor K_{WRT} ermittelt.

Der vom Strahlteilerwürfel reflektierte Hauptstrahl wird in das Objektiv eingekoppelt und auf die Bearbeitungsebene projiziert. Das hier verwendete Objektiv ist ein Schwarzschild-Objektiv, welches auch unter dem Begriff Reflexionsobjektiv (Bild 18) [26][27] bekannt ist.

Es besteht aus einer Anordnung von einem großen Konkav- und einem kleinem Konvex-Spiegel (Bild 18). Bedingt durch seine aus Spiegeln bestehende Konstruktion verfügt es über eine hervorragende Transmission $> 98 \%$. Das 36-fach Objektiv hat eine numerische Apertur von $N.A. = 0,5$ bei einem Arbeitsabstand von $d_a = 8,6 \text{ mm}$. Resultierend aus diesen Eckdaten ergibt sich ein wellenlängenabhängiges Auflösungsvermögen von :

$$d = \frac{0,61\lambda}{N.A.} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{\varnothing_{EP}} \quad (\text{Gl. 6})$$

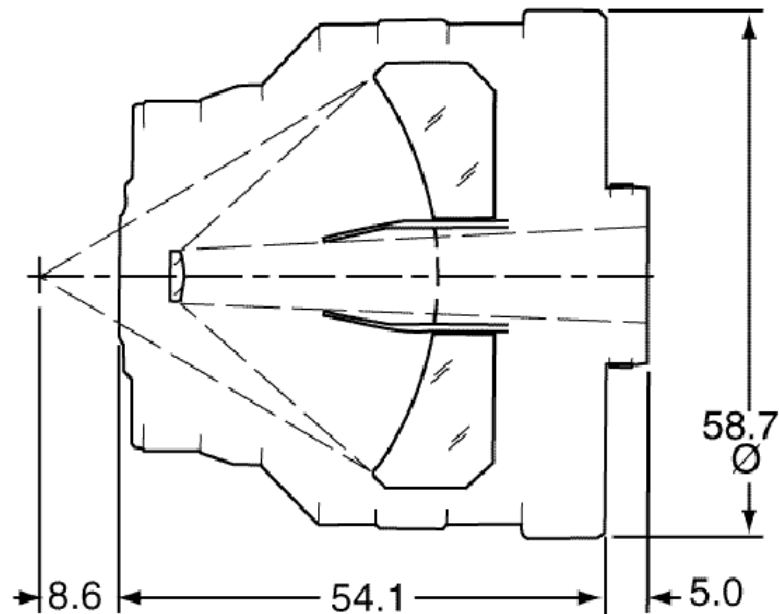


Bild 18 Zeichnung des verwendeten Schwarzschild Objektivs, Maße in mm

Wobei d den Abstand zweier Punkte beschreibt, die gerade noch als solche erkannt werden können. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die Abbildungsfehler auf Grund von sphärischen Aberrationen in den Randbereichen dieses Objektivs, im Vergleich zu einem aus Quarzglasoptiken bestehenden, nicht zu vernachlässigen sind. Aus diesem Grund muss der Laserstrahl so zentral wie möglich in das Objektiv eingekoppelt werden, wobei jedoch vermieden werden muss, ihn genau zentriert auf den Konkav-Spiegel zu lenken. In diesem Fall käme es zu einer Totalreflexion an diesem Spiegel und der Laserstrahl würde durch die Eintrittsöffnung des Objektivs zurück reflektiert. Ist die Einkopplung des Laserstrahls in das Objektiv ordnungsgemäß erfolgt, wird die Stellblende auf das Werkstück abgebildet.

Subsystem 2 / Beleuchtung

Die Beleuchtung der Werkstücke übernimmt das Subsystem 2 [28][29]. Es besteht aus einer Halogen Lampe, einer Kondensorlinse, einer Ringblende, einer Abbildungsoptik, einem Strahlteilerwürfel und dem Objektiv. Das Licht der Halogenlampe wird von der Kondensorlinse gesammelt und durchläuft die

Ringblende. Die Ringblende ist aus einer Irisblende und einer davor platzierten Punktblende zusammengesetzt. Irisblende, Punktblende und Abbildungsoptik sind axial und radial verschiebbar. Um eine Trübung des Kamerabildes durch Blendung zu vermeiden, wird die Ringblende mit Hilfe der Abbildungsoptik, den radialen und den axialen Justiermöglichkeiten zentrisch auf den kleinen Konvex-Spiegel des Objektivs projiziert. Der Spiegel wird in der Mitte nicht mehr beleuchtet. Eine Überbelichtung des CCD-Chips durch Reflexion des Beleuchtungslichtstrahls vom Objektiv selbst ist somit ausgeschlossen. Bild 19 verdeutlicht den Einfluss der Ringblende auf das Reflexionsverhalten des Objektivs. Die starken Reflexionen ohne Ringblende (Bild 19a) machen eine Prozessbeobachtung mit der CCD-Kamera unmöglich. Bild 19b zeigt eine Teilbeschattung des Spiegelzentrums. Die Reflexe haben sich bereits deutlich reduziert. In Bild 19c wurden durch die Vollbeschattung der Spiegelmitte alle Reflexionen unterbunden. Nur so ist eine qualitativ hochwertige Beobachtung möglich. Der Strahlteilerwürfel ermöglicht die Einkopplung der Beleuchtung in den Beobachtungsstrahlengang unter einem Winkel von 90° , so dass mit Auflicht gearbeitet werden kann und Schatten auf dem Werkstück vermieden werden.

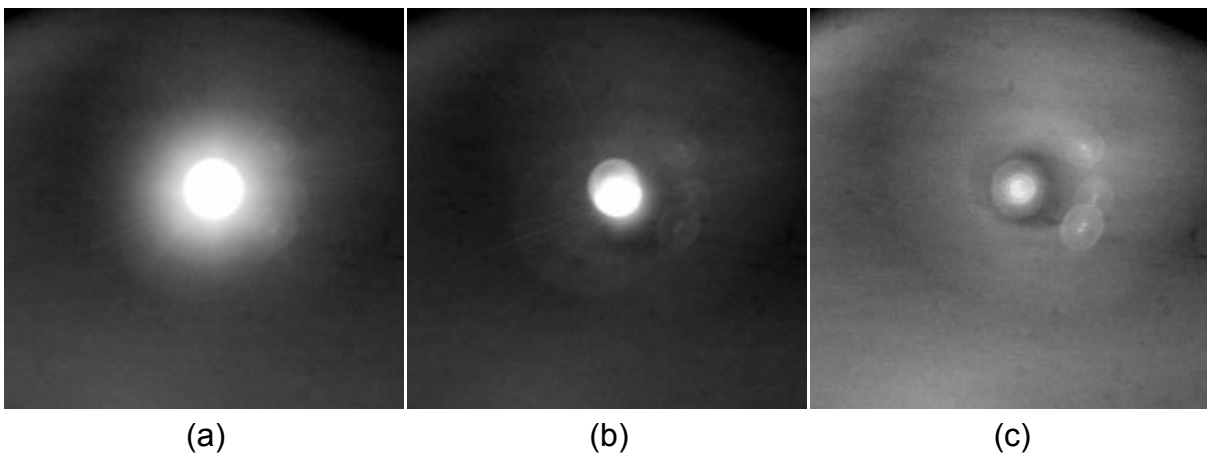


Bild 19 Einfluss der Ringbeleuchtung auf das Reflexionsverhalten des Objektivs :
 (a) zentrische Einkopplung der Beleuchtung in das Objektiv,
 (b) Reduzierung der Reflexe bei zunehmender Beschattung der Spiegelmitte durch die Ringblende, (c) Vollständige Beschattung der Spiegelmitte, keine Reflexionen.

Subsystem 3 / Beobachtung

Ein Mikroskopaufbau [28][29] gewährleistet eine gute Prozessbeobachtung. Das Beobachtungssystem und das Subsystem 1 teilen sich dasselbe Objektiv. Neben dem Objektiv besteht der Beobachtungsstrahlengang noch aus einem Zwei-Linsen-System, welches ähnlich einem Fernglas durch Variation des Abstandes die resultierende Brennweite und Vergrößerung verändern kann. Mit Hilfe dieser beiden Linsen wird das Bild aus der rückwärtigen Bildebene des Objektivs auf den CCD-Chip einer Kamera projiziert. Die Beobachtung erfolgt außerdem noch durch zwei Strahlteilerwürfel. Einer von ihnen koppelt den Laserstrahl ein und der zweite die Beleuchtung. Generell verschlechtert jede Grenzfläche durch Reflexe die Bildqualität des Beobachtungssystems. So ist es auch bei dem UV-Strahlteilerwürfel. Da durch ihn hindurch das Werkstück beleuchtet wird, kommt es zu Reflexionen an seiner senkrecht zur Beleuchtung stehenden Grenzfläche, die das Bild auf dem CCD-Chip negativ beeinflussen. Durch minimales Verkippen von der Normalen fällt kein reflektiertes Licht mehr auf den CCD-Chip. Entscheidend für die gute Bildqualität bei Beobachtung mit Weißlicht sind die sehr geringen chromatischen Aberrationen des Spiegelobjektivs im Vergleich zu einer UV-Quarzglasoptik.

4.1.3 Das Positioniersystem

Die präzise Positionierung der mikroelektronischen Schaltungen innerhalb des Laserkonfigurationsautomaten erfolgt mittels eines Steuergerätes und drei DC-Positioniereinheiten, je eine für die X-, Y- und Z-Richtung. Das System der Firma Newport verfügt über eine Positioniergenauigkeit von $0,5 \mu\text{m}$ in XY-Richtung und von $0,1 \mu\text{m}$ in Z-Richtung [30]. Die horizontalen Verfahrgeschwindigkeiten der entsprechenden Positioniereinheiten betragen 20 mm/s bei einem möglichen Fahrweg von 150 mm . In der vertikalen Richtung werden Geschwindigkeiten von $0,25 \text{ mm/s}$ erreicht. Es kann eine Höhendifferenz von 4 mm durchfahren werden. Integriert wurde das System in den LKA über eine RS232-Schnittstelle.

4.1.4 Das Bildverarbeitungssystem

Die automatisierte Prozesskontrolle wird von einem Bildverarbeitungssystem der Firma Graphikon unterstützt. Das System besteht aus einer CCD-Kamera, einem Videomonitor und einem Bildverarbeitungsrechner mit integrierter Bildverarbeitungssoftware der Firma Cognex. Die Aufgabe der Bildverarbeitung ist das Suchen und Finden von antrainierten Suchmustern mit anschließender Rückgabe der Position in XY-Koordinaten relativ zur Bildmitte. Als Suchmuster kann jede beliebige Struktur dienen, die mit Hilfe des Beobachtungssystems optisch auf einem Chip erkannt werden kann. Die gewünschten Strukturen werden aus dem Kamerabild extrahiert und im Bildverarbeitungssystem gespeichert. Das System versucht dann, den gespeicherten Bildausschnitt im aktuellen Kamerabild wiederzufinden. Auf Grund der zurückgegebenen Positionsdaten kann die Position der zu bearbeitenden Strukturen unter dem Objektiv korrigiert werden. Die Repositionierung erfolgt automatisch.

4.1.5 Der Steuercomputer

Alle Komponenten des LKA werden durch einen zentralen Computer gesteuert. Die Kommunikation zwischen dem Rechner und den Peripheriegeräten erfolgt über die RS232-Schnittstelle. Zu diesem Zweck wurde eigens eine Schnittstellenerweiterungskarte mit 8 zusätzlichen Ports installiert. Die speziell für den LKA entwickelte Software beinhaltet diverse Module zur Steuerung der Einzelkomponenten, sowie einige Algorithmen zur automatischen Prozessierung.

4.2 Der Lebensdauermeßplatz

Ein Spitzenmeßplatz (Bild 20) der Firma Süss mit der Bezeichnung PM5, der mit einem 5" Thermochuck der Firma Temptronics ausgestattet ist, diente als Basis für die Lebensdauermessungen. Über Messspitzen wird der Strom als Belastungsgröße eingepreßt. Die programmierbare 4-Kanal Konstantstromquelle liefert Ströme von 1 mA bis 2,5 A. Zusätzlich können die Teststrukturen über den Thermochuck durch erhöhte Temperatur belastet werden. Die Temperatur ist in einem Bereich von 25°C bis 300°C bei einer Genauigkeit von $\pm 0,1^\circ\text{C}$ variierbar. Gleichmaßen wie die

Belastungen über die Messspitzen eingepreßt werden, werden die Messgrößen mit Hilfe der Spitzen abgegriffen und über mehrere PREMA Multimeter erfasst. Der Messablauf, wie Belastungsprofil und Datenerfassung, wird durch einen PC gesteuert.

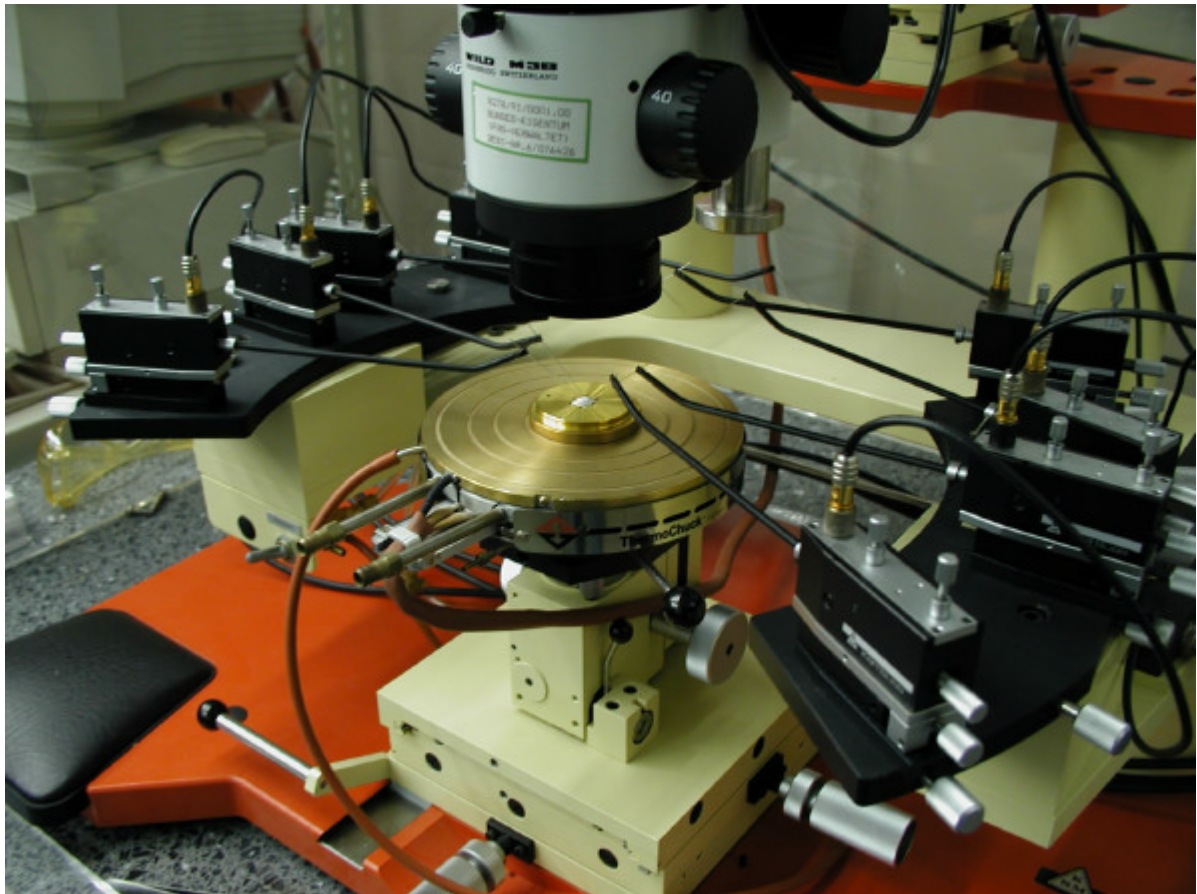


Bild 20 Der Lebensdauermeßplatz mit einer zu charakterisierenden Probe auf dem ThermoChuck. Die Kontaktierung der Probe erfolgt mit Messspitzen.

5 Teststrukturen

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Teststrukturen wurden in kommerziell verfügbaren CMOS-Prozessen, wie sie bei der ASIC-Herstellung verwendet werden, hergestellt. Es ist jedoch zu beachten, dass die verwendeten Halbleiterprozesse, mit denen die Laserumschalter produziert werden, über mindestens drei Metalllagen verfügen. Moderne Halbleiterprozesse verfügen derzeit über 6 Metalllagen. Eine der Hauptrestriktionen bei der Entwicklung der Teststrukturen bzw. der Laserumschalter war die Einhaltung der prozessspezifischen Vorgaben. Durch den Einsatz der Laserumschalter soll weder die Prozessfolge verändert noch sollen zusätzliche Prozessschritte eingeführt werden. Darüber hinaus sollen auf gar keinen Fall die herstellerepezifischen Entwurfsregeln verletzt werden. Verletzungen der Entwurfsregeln können zwar legitim sein, erschweren aber die Auswertung der Ergebnisse der sogenannten Design Rule Checker und verlängern folglich den Entwurfsprozess.

In den folgenden Kapiteln werden die angewendeten Entwurfswerkzeuge und die verwendeten CMOS-Technologien kurz erläutert. Die entwickelten Teststrukturen und ihre Dimensionierung wird eingehend beschrieben.

5.1 Die verwendeten Design-Tools

Die notwendigen Full Custom Designs der Teststrukturen wurden mit dem *Virtuoso Layout Editor* der Version 4.4.3 erstellt. Dieser Editor ist ein Modul des *Cadence Design Framework II*. Unter Verwendung dieses Programms wurden die einzelnen Bauelemente beziehungsweise Teststrukturen entwickelt und zu Kontaktketten zusammengefasst. Jede dieser manuell erstellten Teststrukturen wurde zunächst mit dem Editor internen Layout-Prüfprogramm auf Entwurfsregelverletzungen überprüft. Eine Verletzung der technologiespezifischen Entwurfsregeln kann zu Fehlern während der Lithographie- und Bedampfungsschritte des Halbleiterprozesses führen. Mögliche Folgen wären zum Beispiel Kurzschlüsse zwischen Leitbahnen einer Metallisierungsebene oder Fehlstellen im Metall. Abschließend ist das gesamte Chip-Layout ein zweites mal physikalisch verifiziert und analysiert worden. Die abschließende Prüfung erfolgte mit dem externen Design Rule Checker *Dracula* auf Basis der zu den Prozessen gehörenden Technologie-Informationen.

5.2 Die verwendeten Technologien

Die Herstellung der beiden Testchips *TC8* und *TC9*, zur Erprobung der Laserumschalter, erfolgte in zwei unterschiedlichen CMOS-Technologien. Der erste Satz Teststrukturen auf dem *TC8* wurde mit dem Prozess A gefertigt. Prozess A ist ein 3 Metalllagen 0,5 μm Standard CMOS-Prozess. Dieser Prozess erfüllt damit die Minimalanforderungen zur Herstellung der Laserumschalter. In den Tabellen (Tabelle 2, Tabelle 3) sind die für den Laserprozess relevanten Daten von Prozess A angegeben.

Prozess A	Beschreibung	d_s [nm]	R_s [m Ω /square]
Metall 1	total	570	72
Metall 2	total	680	55
Metall 3	total	980	33
Dielektrika	Metall 3 \Rightarrow Metall 2	800	
	Metall 2 \Rightarrow Metall 1	800	
Passivierung	PSG	500	
	Nitrid	600	

Tabelle 2 Schichtdicken und Schichtwiderstände der Metalllagen (Prozess A).

Prozess A Widerstand	R_k [Ω]
Via 1	2,5
Via 2	2,5

Tabelle 3 Kontaktwiderstände der Vias in Prozess A.

Die Tabellen beinhalten Informationen über die Schichtdicken, deren Kenntnis für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Arbeit erforderlich ist. Die Widerstände der Vias sollen als Vergleichswert für die durch den Laserprozess formierten vertikalen Kontakte dienen.

Die Fertigung des *TC9* erfolgte im Prozess B. Der Prozess B in dem ein zweiter Satz Teststrukturen hergestellt wurde, ist ein 6 Metalllagen 0,25 μm Standard

CMOS-Prozess. Mit seinen 6 Metalllagen erfüllt dieser Prozess problemlos die Mindestanforderungen für die Laserumschalter. Die folgenden Tabellen (Tabelle 4, Tabelle 5) zeigen die prozessspezifischen Informationen für den Prozess B. Die aufgeführten schichtspezifischen Informationen sind typische Schichtdicken und können nur als Richtwerte angenommen werden. Halbleiterprozess bedingte Abweichungen können möglicherweise zu Schichtdickenschwankungen von bis zu 10% führen. Die hier angegebenen Daten sollen nur einen Transfer auf andere Technologien erleichtern.

Prozess B	Beschreibung	d_s [nm]	R_s [m Ω /square]
Metall 4	total	720	55
Metall 5	total	1030	35
Metall 6	total	1030	35
Dielektrika	Metall 6 \rightsquigarrow Metall 5	900	
	Metall 5 \rightsquigarrow Metall 4	900	
Passivierung	PSG	500	
	Nitrid	600	

Tabelle 4 Schichtdicken und Schichtwiderstände der Metalllagen (Prozess B).

Prozess B Kontaktwiderstand	R_K [Ω]
VIA 4	1
VIA 5	0,8

Tabelle 5 Kontaktwiderstände der Vias in Prozess B.

5.3 Laserumschalter der ersten Generation (LS₁ und LS₂)

Anhand einer geringen Anzahl erster Proben, die für den Test-Chip *DRAM + Controller (TC8)* vorgesehen waren, sollte geklärt werden, ob die Laserumschalter die erwartete Funktionalität zeigen. Die Herstellung der Teststrukturen erfolgte in einem Standard 0,5 µm CMOS Prozess mit drei Metalllagen (Prozess A). Die Schichtinformationen sind dem Kapitel 5.2 zu entnehmen.

Die Standard-Laserschalter wurden um eine zusätzliche Metallisierung und ein Via ergänzt. Bild 21 zeigt die Geometrie des Laserschalters auf *TC8*. Die lateralen Abmessungen der Leitbahnaufweitungen von 14*14 µm² entsprechen denen der Standard-Laserkontakte [8][9]. Diese Dimensionen wurden gewählt, um sicher zu stellen, dass der Laserprozess der Kontaktformierung zuverlässig funktioniert. Die Anschlussleitungen der Laserumschalter in Metall *n*, *n+1* und *n+2*, die in erster Linie als Messleitungen dienen, sind 4 µm breit.

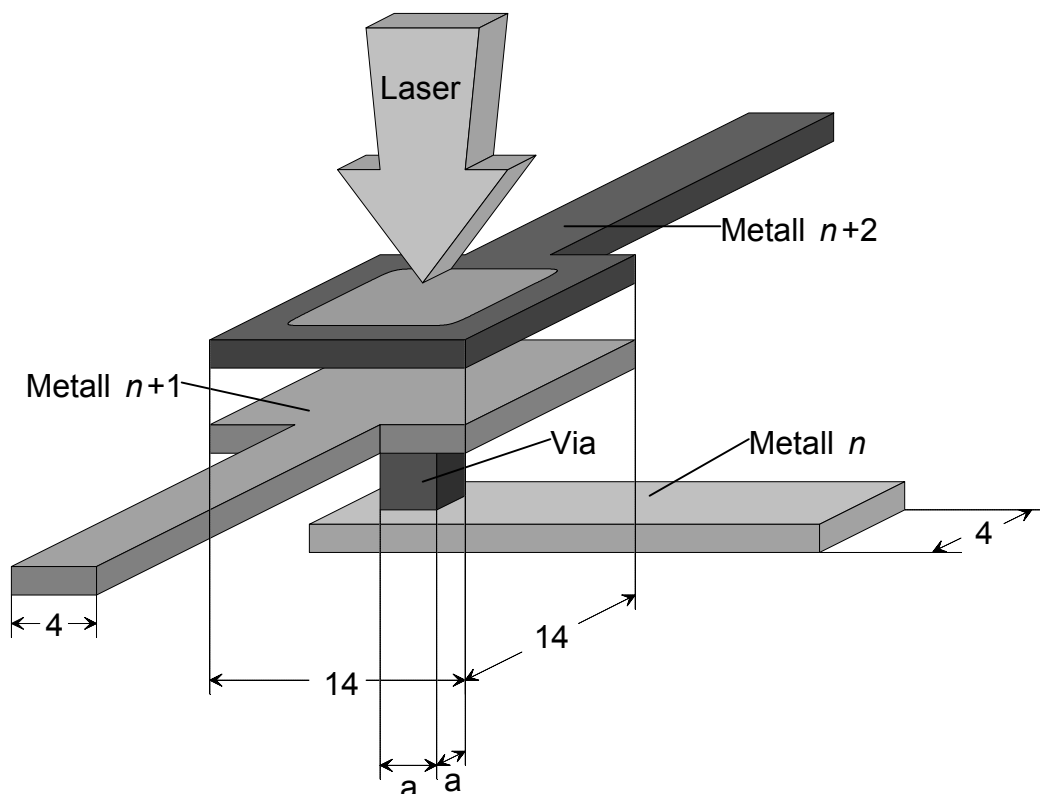


Bild 21 Laserumschalter auf Test-Chip *DRAM + Controller (TC8)*, Bemaßung in µm.

Um den Einfluss der Via-Geometrie zu untersuchen, wurden zwei verschiedene Laserumschalter für *TC8* entwickelt. Sie unterscheiden sich in den Abmessungen

des integrierten Vias (Bild 21). Die erste Variante ist mit einem Via der lateralen Ausdehnung $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ ($a=1 \mu\text{m}$) ausgestattet. Die Ausdehnung des Vias in der zweiten Variante hingegen beträgt $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ($a=2 \mu\text{m}$). Im Folgenden wird die erste Variante mit LS_1 und die zweite Variante mit LS_2 bezeichnet.

5.4 Laserumschalter der zweiten Generation (LS_{12} und LS_{10})

In das Design der zweiten Generation der Laserumschalter, welche in einem Standard $0,25 \mu\text{m}$ CMOS-Prozess mit 6 Metalllagen (Prozess B) gefertigt wurden, sind die Ergebnisse der Umschalter vom $TC8$ eingeflossen. Die grundlegenden Veränderungen im Design des Laserumschalters auf dem Test-Chip *Systemelemente* ($TC9$) sind in Bild 22 zu erkennen. Zunächst wurden die Abmessungen des Vias auf die der minimalen Entwurfsregeln von Prozess B reduziert.

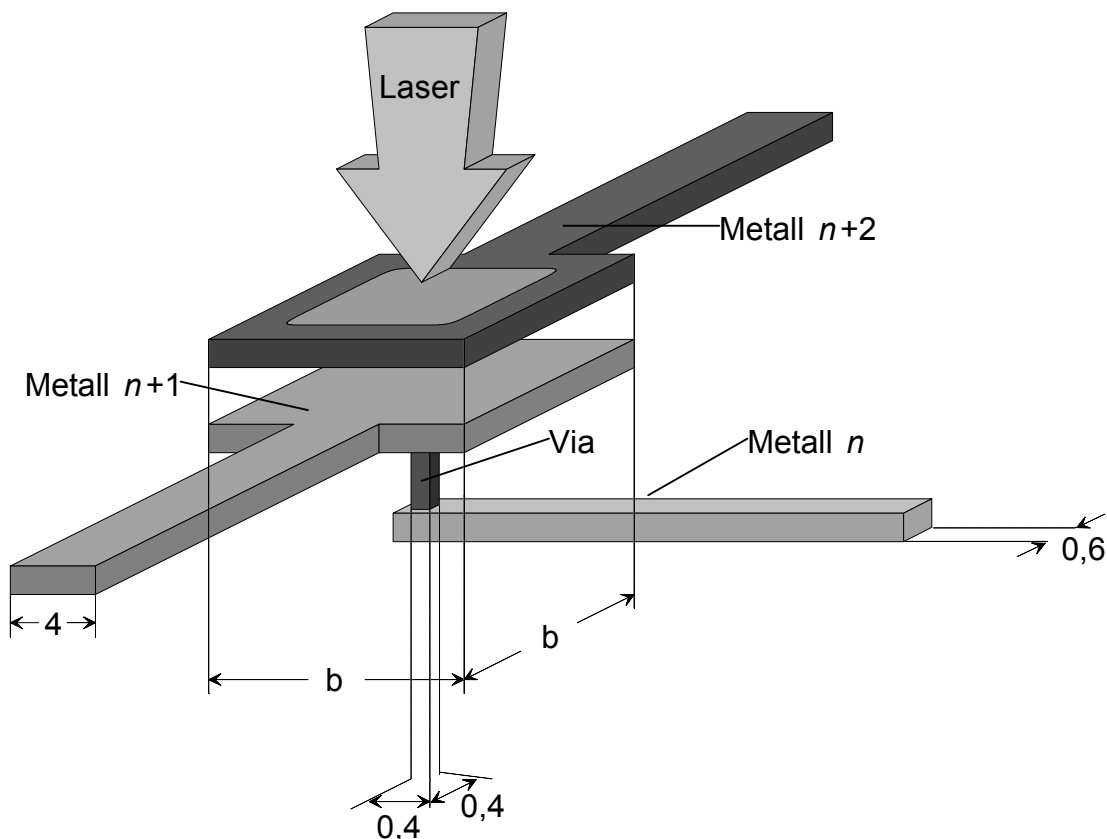


Bild 22 Laserumschalter der zweiten Generation auf dem Test-Chip *Systemelemente* ($TC9$), Bemaßung in μm .

Das eingesetzte Via hat nun eine laterale Ausdehnung $0,4 \times 0,4 \mu\text{m}^2$. Auch die Leitbahn, die in Metall n verläuft und als Prüfanschluss dient, wurde in ihrer Breite reduziert und entspricht nun mit $0,6 \mu\text{m}$ den minimalen Entwurfsregeln. Die Leitbahnbreiten von $4 \mu\text{m}$ der Anschlüsse in Metall $n+1$ und $n+2$ entsprechen weiterhin denen der Laserumschalter der ersten Generation. Neue Untersuchungsergebnisse bezüglich der minimalen lateralen Abmessungen sollten die Veränderungen der Leitbahnaufweitung in den Laserumschaltern der zweiten Generation bringen. Zu diesem Zweck wurden zwei unterschiedliche Aufweitungen von $12 \times 12 \mu\text{m}^2$ ($b=12 \mu\text{m}$) und $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ($b=10 \mu\text{m}$) in den Teststrukturen umgesetzt. Diese Strukturen werden im Folgenden mit LS_{12} und LS_{10} bezeichnet. Die Informationen zu Prozess B, die Schichtdicken und Widerstände betreffend, sind in Kapitel 5.2 beschrieben.

5.5 Teststrukturen für die Lebensdaueruntersuchungen

Die Durchführung von Lebensdauer- bzw. Zuverlässigkeitsuntersuchungen erfordert eine spezielle Anordnung der einzelnen Teststrukturen, durch welche es ermöglicht wird, mehrere Teststrukturen gleichzeitig zu untersuchen. Bild 23 zeigt eine Kettenstruktur, bestehend aus $n=10$ Laserumschaltern (A), n Kontrollpads (B) und $2(n+1)$ Messpads (C). Die Widerstände der einzelnen Laserumschalter können mit Hilfe der Vier-Spitzen-Methode und der vier Messpads, die um den entsprechenden Laserumschalter angeordnet sind, gemessen werden. Die erfolgreiche Trennung der Vias von Metall $n+1$ wird über die Anschlüsse in Metall n , die an die Kontrollpads (B) angeschlossen sind, kontrolliert.

Ebenso, wie bei der Bestimmung des Widerstandes, wird die Vier-Spitzen-Methode auch für die Zuverlässigkeitsuntersuchungen eingesetzt. Zunächst werden die äußersten Messpads (C), die alle 10 Laserumschalter einschließen, verwendet. Sukzessiv, abhängig davon, welcher Laserumschalter ausfällt, werden die verbliebenen Messpads (C) für die Zuverlässigkeitsuntersuchungen in Anspruch genommen. Über die Pads wird der Stressparameter Strom eingepreßt. Gleichzeitig wird die Spannung erfasst, um aus dem Widerstandsverhalten auf den Zustand der Laserumschalter schließen zu können.

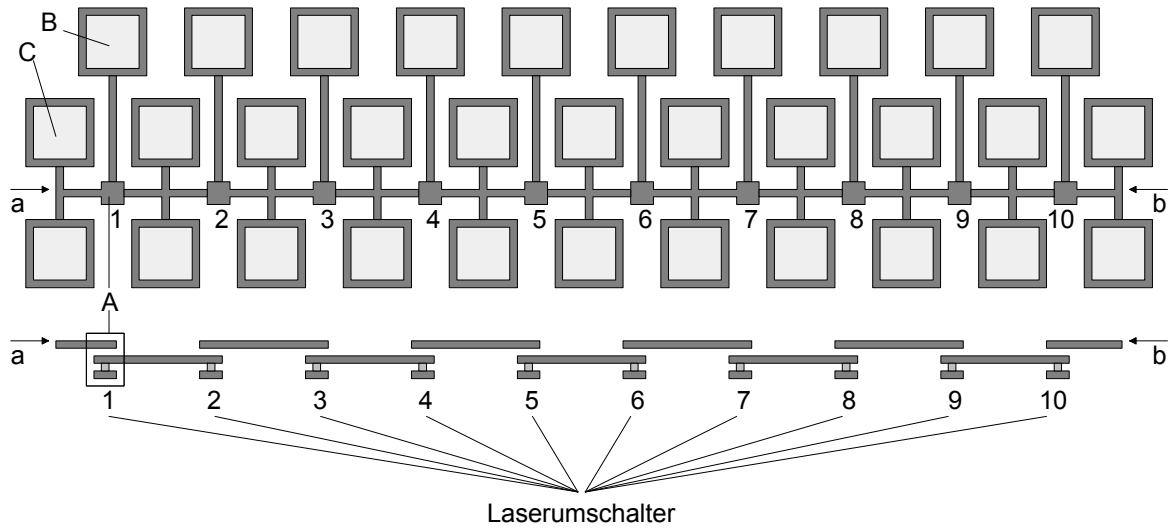


Bild 23 Anordnung der Laserumschalter (A), Kontroll- (B) und Messpads (C) in der Teststruktur für beschleunigte Lebensdaueruntersuchungen, Schnitt a-b zeigt einen Querschnitt durch die Teststruktur.

6 Prozessierung der Laserumschalter

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln das Prinzip der Laserumschalter, der Laserkonfigurationsautomat und die Teststrukturen vorgestellt wurden, soll im Folgenden auf die Prozessierung der Laserumschalter eingegangen werden. Besonderes Augenmerk wird hier auf die zu ermittelnden Prozessparameter gerichtet. Die Güte eines bearbeiteten Laserumschalters ist in erster Linie von diesen Parametern abhängig. Neben der Bestimmung der grundlegenden Prozessparameter, zu denen die Anzahl der Einzelpulse in einer Bearbeitungssequenz und die Pulsfolgefrequenz gehört, wird hier näher auf die Parameter eingegangen, die den verwendeten CMOS-Technologien und den verschiedenen Teststrukturen anzupassen sind. Zu den kritischen Parametern zählt die Größe des Laserspots und die Energie beziehungsweise die Energiedichte des Lasers.

Die anzuwendende Laserspotgröße wird durch die Dimensionen der Leitbahnaufweitung festgelegt. Die Energiedichte eines Einzelpulses entscheidet über den Materialabtrag pro Laserpuls. Die erforderliche Abtrage rate ist von der Dicke des abzutragenden Materials abhängig.

Nach der Ermittlung der grundlegenden Prozessparameter erfolgt die Bestimmung der strukturabhängigen optimalen Prozessparameter. Der Bearbeitungserfolg der Teststrukturen wird in Abhängigkeit von der verwendeten Energiedichte angegeben. Es wird klar herausgearbeitet, mit welchen Prozessparametern die Bearbeitung der Laserumschalter erfolgreich ist. Gleichmaßen werden die optimalen Prozessfenster für die Teststrukturen LS₁₀ und LS₁₂ genau definiert.

Das in Kapitel 3.2 entwickelte theoretische Modell zur Vorhersage der Kontaktwiderstände in Abhängigkeit von der Größe des Laserspots wird in diesem Kapitel unter Verwendung messtechnisch ermittelter Widerstände korrigiert.

6.1 Grundlegende Parameterbestimmung

Die ersten Untersuchungen an den Laserumschaltern erfolgten an Proben auf dem TC8 (s. Kap. 5.3). Die Teststrukturen wurden so konzipiert, dass mit ihrer Hilfe zunächst festgestellt werden konnte, ob die Laserumschalter generell den Erwartungen gerecht werden. Die grobe Eingrenzung eines möglichen

Energieintervalls, in dem eine erfolgreiche Prozessierung wahrscheinlich ist, wurde empirisch durchgeführt. Ausgehend von den ermittelten Parametern, die zu einer erfolgreichen Prozessierung der Standard-Laserschalter führten, wurden Schritt für Schritt die optimalen Parameter, wie die Abmessungen des Laserspots, die Anzahl der Pulse, die Pulsfolgefrequenz und die Energiedosis für den neuen Laserumschalter bestimmt. Einige der ermittelten Parameter, wie z. B. die Anzahl der Einzelpulse einer Bearbeitungssequenz, erwiesen sich schon recht frühzeitig als optimal und wurden in die folgenden Prozesse übernommen. Die von Hartmann [8] aufgestellte Abschätzung, die besagt, dass die seitlichen Abmessungen des Laserspots der Hälfte der Seitenlänge der Metallaufweitung des zu bearbeitenden Laserschalters entsprechen sollen, hat sich weitestgehend als richtig erwiesen. Hier ist jedoch zu erwähnen, dass diese Regel unter dem Gesichtspunkt aufgestellt wurde, dass die Kontaktwiderstände so gering und die durch Elektromigration beschränkte Lebensdauer so groß wie möglich ausfallen soll. Der Einfluss auf die strukturinterne Trennstelle wird hier jedoch außer Acht gelassen.

Die im Folgenden konstant gehaltene Anzahl der zur Bearbeitung notwendigen Laserpulse und der Pulsfolgefrequenz wurde durch die Eigenschaften des verwendeten Excimer-Lasers bestimmt. Durch die starken Puls zu Puls Instabilitäten des verwendeten Excimer-Lasers ist es nicht möglich, die Strukturen mit ein oder zwei Pulsen zu bearbeiten. Es hat sich erwiesen, dass die Pulsenergie nicht konstant gehalten werden kann. Die grafische Darstellung der Einzelpulsenergien in Bild 24 verdeutlicht das Problem. Die energetischen Abweichungen der Einzelpulse vom Mittelwert betragen dabei bis zu 17%. Die Energiekonstanz eines Laserpulses wäre jedoch die Voraussetzung, um den Prozess sicher mit ein oder zwei Pulsen reproduzieren zu können. Aus diesem Grund wurde für die Bearbeitung der Laserumschalter eine Sequenz von drei Pulsen gewählt. Die Summe von drei Einzelpulsen lässt sich leichter konstant halten, da sich die Abweichungen in den meisten Fällen kompensieren. Entscheidend ist nur noch der Gesamtenergiegehalt der Pulssequenz, welche jetzt nur noch maximal um ca. 7% vom Mittelwert abweicht (Bild 24). Der Verwendung einer größeren Anzahl von Einzelpulsen zur Erhöhung der Konstanz steht die Schwellenergie gegenüber, ab der die Laserablation des zu prozessierenden Materials einsetzt. Die Pulsfolgefrequenz wurde auf 5 Hz festgesetzt, da sich bei dieser Frequenz das Lasermedium bzgl. der Puls-zu-Puls-Stabilität und bezüglich des Gesamtenergiegehaltes aufeinander

folgender Pulssequenzen optimal zu erholen scheint. Die Abgabe einer Sequenz von 3 Pulsen mit einer höheren Repetitionsrate führt zu fallenden Energiewerten der letzten Pulse bzw. der folgenden Sequenz.

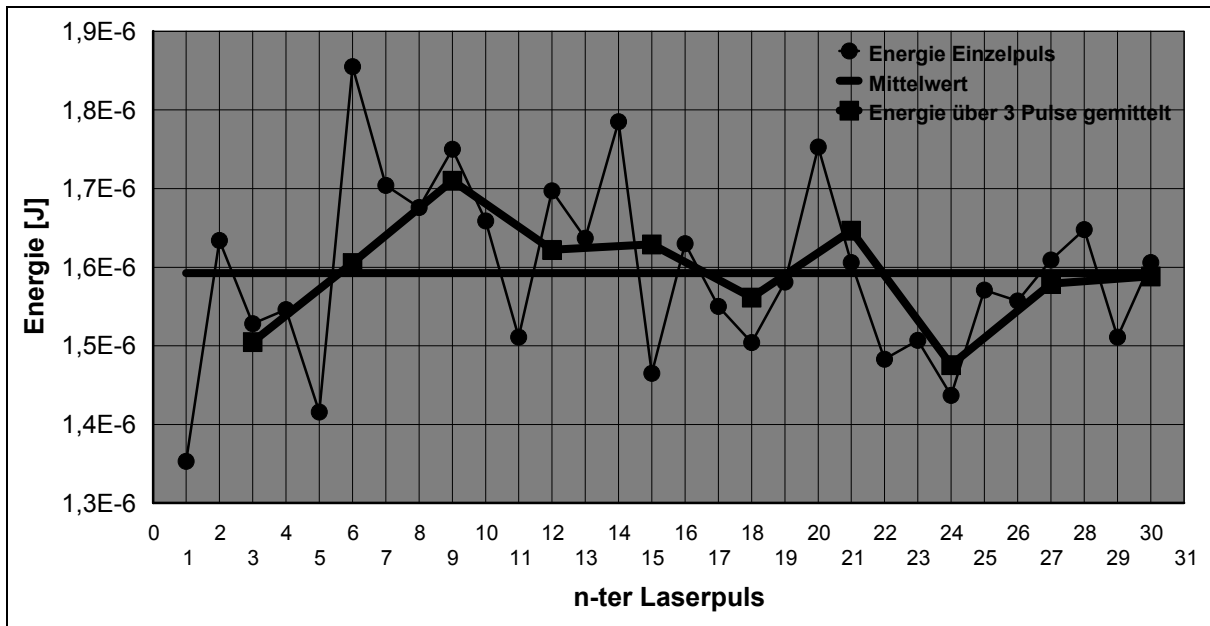


Bild 24 Energiefluktuationen des Excimer-Lasers gemessen bei einer Spotgröße von $6,5 \times 6,5 \mu\text{m}^2$.

6.2 Ergebnisse der Teststrukturen auf TC 8

Die Studie wurde begonnen mit den beiden Teststrukturen LS_1 und LS_2 , die mit Prozess A gefertigt wurden. Zum Nachweis der generellen Funktionalität wurden die Teststrukturen mit einer Sequenz von 3 Pulsen und einer Gesamtenergie von $3,4 \times 10^{-5} \text{ J}$ bis $5 \times 10^{-5} \text{ J}$ bearbeitet. Die Größe des verwendeten Laserspots beträgt ca. $9 \times 9 \mu\text{m}^2$. Daraus resultiert ein Intervall für die Energiedichte pro Puls von $13 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bis $20 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$. An Hand dieser beiden Strukturen konnte nachgewiesen werden, dass der entwickelte Laserumschalter grundsätzlich funktioniert und dass selektives Abtragen mit dem Excimer-Laser in mikroelektronischen Schaltungen möglich ist. Die in Bild 25 dargestellten Messwerte zeigen eine Schwellenergie, ab der die erfolgreiche Prozessierung der Laserumschalter möglich ist (s. Kap. 3.1).

Für den Laserumschalter LS_1 wurde eine Schwellenergie von $3,8 \times 10^{-5} \text{ J}$ ermittelt. Ab dieser Energie wird eine leitende Verbindung zwischen Metall $n+1$ und Metall $n+2$ aufgebaut und der Kontakt zwischen dem Via und Metall $n+1$ unterbrochen.

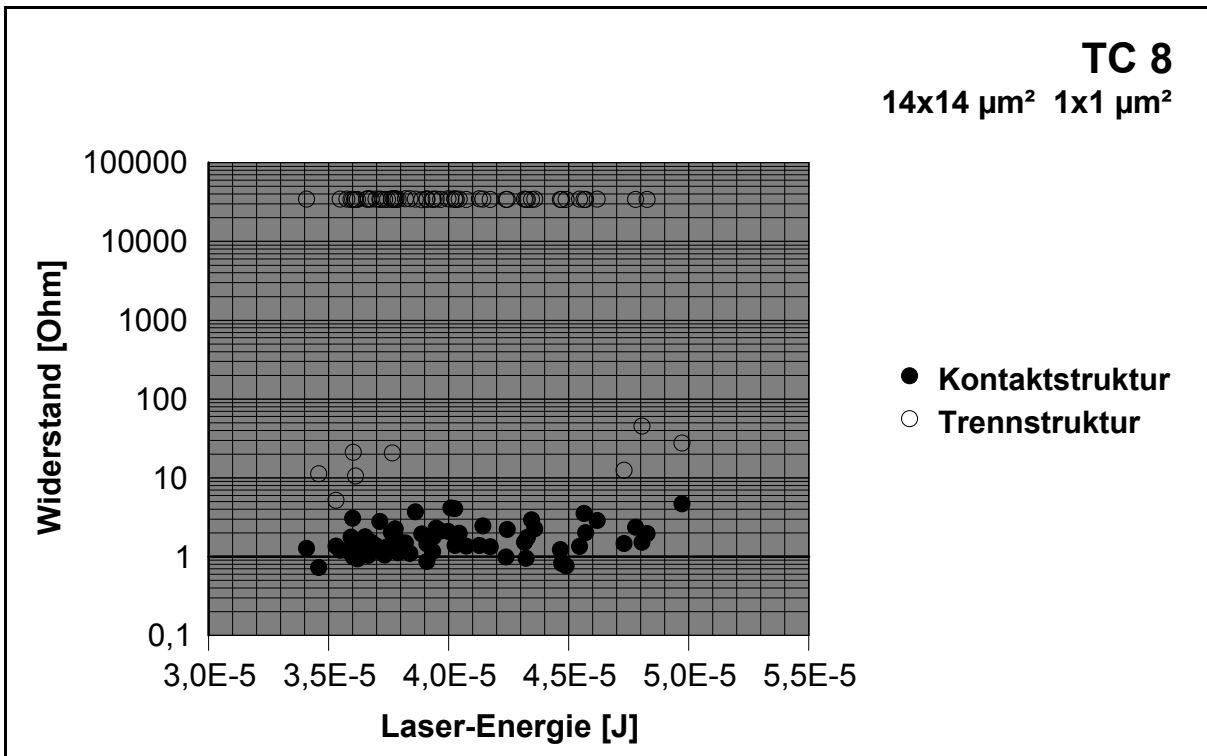


Bild 25 Abhängigkeit des Widerstandes von der verwendeten Energiedosis der Teststrukturen LS₁

Bei höheren Energiedosen traten jedoch Schwierigkeiten bei der Bearbeitung der Trennstruktur auf. Es konnte beobachtet werden, dass es bei der Verwendung von zu hohen Energiedosen zu Kurzschlüssen (Bild 26) zwischen Metall n und Metall $n+1$ kommt.

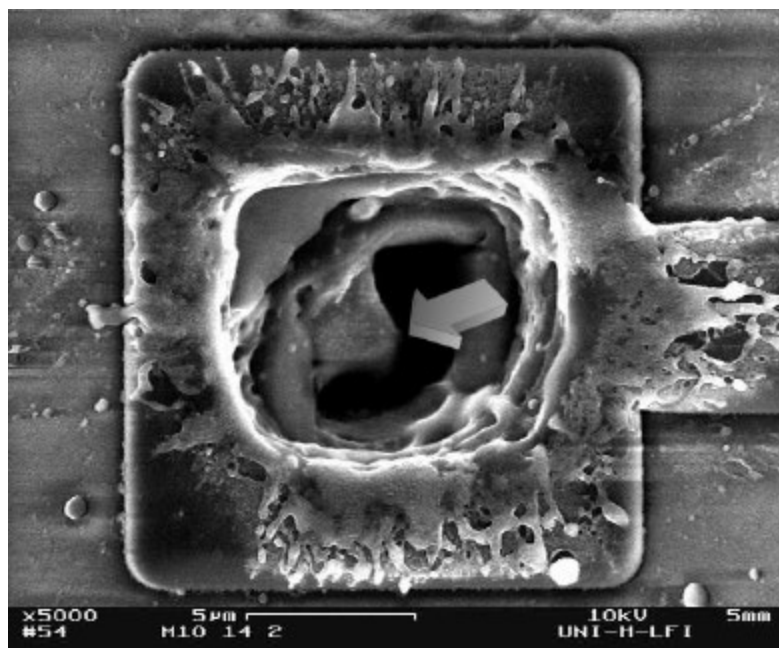


Bild 26 REM-Aufnahme eines Laserumschalters der einen Kurzschluss zwischen Metall n und Metall $n+1$ aufweist

Die Ursache ist eine parasitäre zweite Laserkontaktstruktur innerhalb des Laserumschalters, die sich aus der Leitbahnaufweitung in Metall $n+1$ und der Leitbahn in Metall n zusammensetzt. Die Bearbeitung der Laserumschalter mit zu hohen Energien führt zwar zu einem ordnungsgemäßen Auftrennen der Trennstruktur, aber gleichzeitig auch zum Aufschmelzen und Verdampfen des Materials der $4\ \mu\text{m}$ breiten Leitbahn in Metall n . Aus diesem Materialreservoir wird parallel zur geöffneten Trennstruktur erneut eine leitende Verbindung geschaffen, welche zu einem unerwünschten Kurzschluss führt.

Die elektrische Charakterisierung der korrekt formierten Laserumschalter ergab einen mittleren Widerstand der Kontakte von $R_m = 1,7\ \Omega$. Dieser Wert entspricht den Widerständen der Standard-Vias ($R_{Via} = 0,5 \dots 2,5\ \Omega$) aus dem Prozess A.

Für die zweite Teststruktur LS_2 konnte innerhalb des gleichen Energieintervalls keine Schwellenergie bestimmt werden, ab der eine Prozessierung erfolgreich ist. Bild 27 ist zu entnehmen, dass sich die Bearbeitung dieser Laserumschalter als sehr unzuverlässig erwiesen hat.

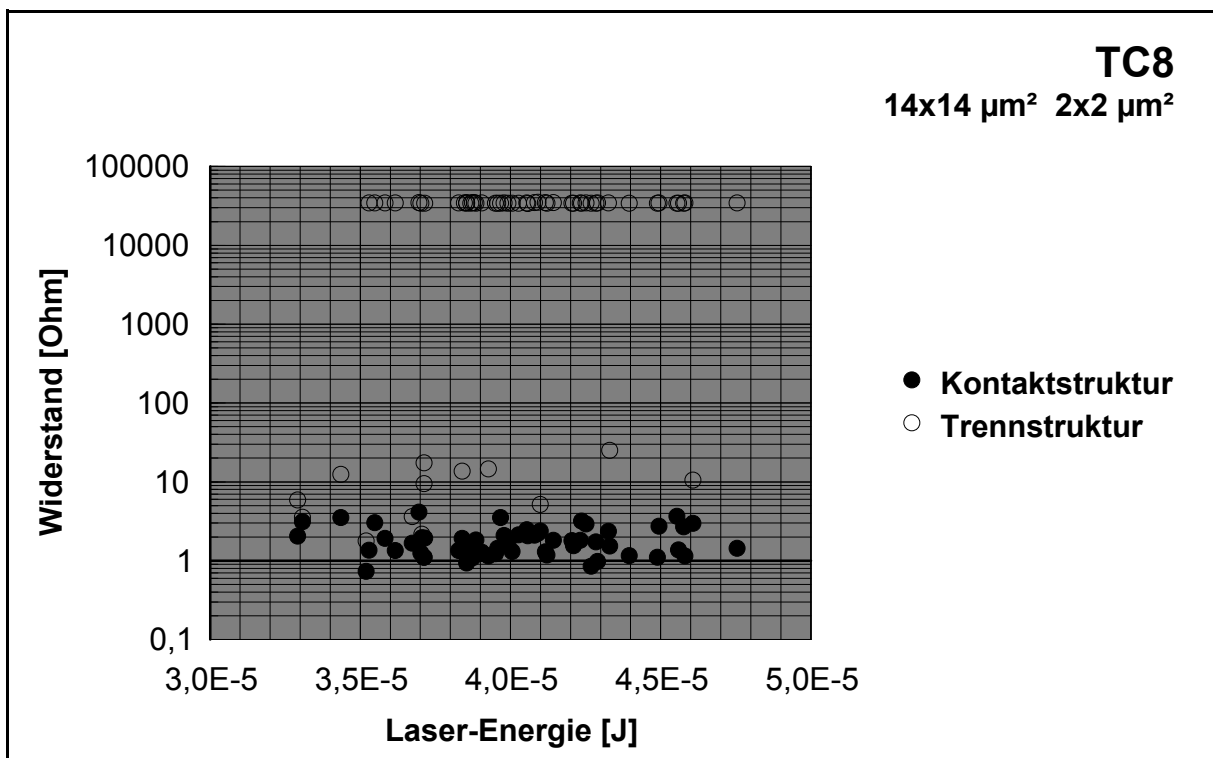


Bild 27 Abhängigkeit des Widerstandes von der verwendeten Energiedosis der Teststrukturen LS_2 .

Die elektrischen Eigenschaften der formierten Kontakte der Laserumschalter ($R_m = 1,8 \Omega$) entsprechen denen der Kontakte vom LS₁. Unsicher und nicht zuverlässig reproduzierbar ist jedoch das Auftrennen der leitenden Verbindung zwischen Metall n und Metall $n+1$. REM-Untersuchungen an einigen prozessierten Laserumschaltern gaben Aufschluss über die Ursachen dieses Verhaltens. Der Grund für die fehlgeschlagenen Bearbeitungsversuche an den LS₂ liegt an der Dimensionierung des Vias in der Trennstruktur. Im Gegensatz zum LS₁ mit einem $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ Via hat die Via-Struktur des LS₂ eine laterale Ausdehnung von $2 \times 2 \mu\text{m}^2$.

Bild 28 (a) zeigt die REM-Aufnahme eines Laserumschalters mit einem $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ Via als Trennstruktur. Deutlich ist ein Rest von erstarrtem Metall zu erkennen, welches auch nach der Bearbeitung das Via mit dem Metall aus $n+1$ und $n+2$ verbindet. Der metallfreie Bereich um das Via herum deutet jedoch darauf hin, dass die zur Bearbeitung verwendete Energiedosis hoch genug und die Fläche des Laserspots ausreichend war. Die Wechselwirkungen zwischen dem großvolumigen $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ Via und dem geschmolzenen Material aus Metall $n+1$ sind offensichtlich so groß, dass es nicht möglich ist, das Metall vollständig vom Via zu lösen. Die vergleichsweise hohe Wärmekapazität des Vias im LS₂ ist der Grund für eine Verschiebung der Schmelzfront, was im ungünstigsten Fall dafür sorgt, dass sich das Metall nicht vollständig vom Via lösen kann.

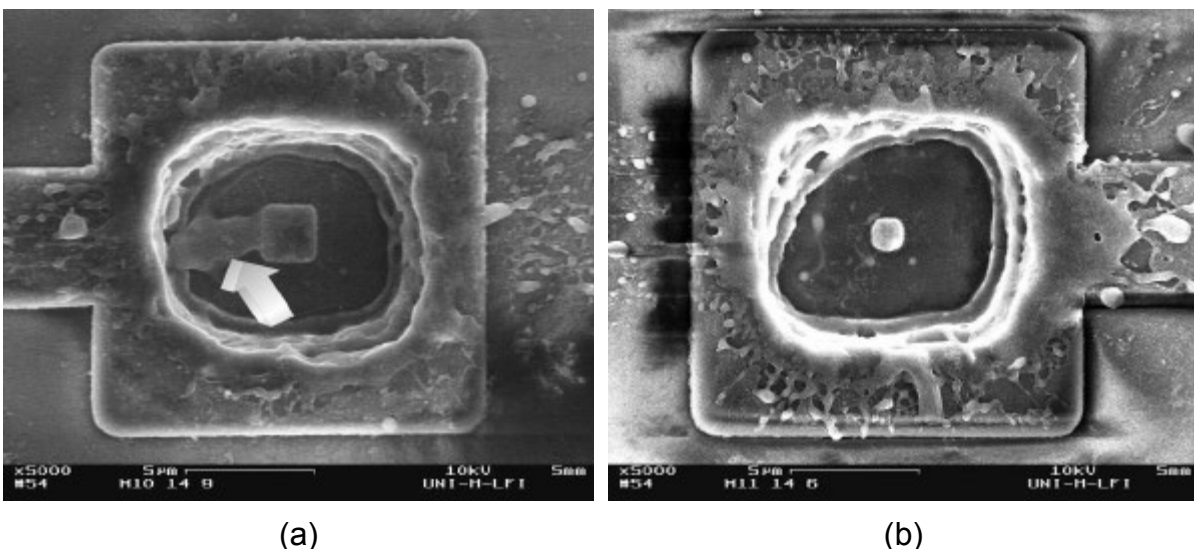


Bild 28 REM-Aufnahmen prozessierter Laserumschalter auf dem TC 8 : (a) Laserumschalter LS₂ mit einem $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ Via, (b) Laserumschalter LS₁ mit einem $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ Via.

Ausgehend vom Via bilden Residuen eine elektrische Verbindung zum Rand des Bearbeitungstrichters. Als zusätzlicher Aspekt ist die erhöhte Wahrscheinlichkeit zu nennen, mit der es zu ungewollten Kurzschlüssen kommen kann, wenn man ein Via der Größe $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ verwendet. Die freigelegte Via-Fläche von $4 \mu\text{m}^2$ begünstigt in hohem Maße die Bildung von leitenden Verbindungen zwischen Metall $n+1$ und dem Via während der Laserbearbeitung. Bild 28 (b) zeigt im Gegensatz dazu eine REM-Aufnahme von einem LS_1 . Durch die geringen seitlichen Abmessungen des Vias und die verminderte Wärmekapazität konnte Metall $n+1$ optimal entfernt werden. Am LS_1 wurde auch deutlich, dass die Fläche des verwendeten Laserspot groß genug war. Ein ausreichender Sicherheitsabstand zwischen freigelegtem Via und der Wand des Bearbeitungstrichters ist gegeben. Die Integration eines kleineren Vias erlaubt demzufolge auch die Verwendung eines kleineren Laserspots und ermöglicht damit auch eine Verkleinerung der kompletten Umschalterstruktur. Die Ergebnisse dieser ersten Experimente dienen als Basis für die Weiterentwicklung des Laserumschalters. Insbesondere resultieren aus den Ergebnissen Designrestriktionen bezüglich der Via-Dimensionen, die in der nächsten Generation von Laserumschaltern berücksichtigt wurden.

6.3 Ergebnisse der Teststrukturen auf TC 9

Die Minimierung der lateralen Abmessung des Vias in der Laserumschalter-Struktur und die Reduktion der Leitbahnbreite in Metall n sind die Maßnahmen, die aus den Vorversuchen abgeleitet werden konnten, um die Zuverlässigkeit der Laserumschalter während der Laserbearbeitung zu erhöhen. Es wurden die beiden Strukturen LS_{10} und LS_{12} entwickelt, deren Via Dimensionen von $0,4 \times 0,4 \mu\text{m}^2$ und deren Metallbreiten von $0,6 \mu\text{m}$ in Layer n den minimalen Entwurfsregeln des verwendeten CMOS-Prozesses entsprechen. Die Herstellung der Strukturen erfolgte im Prozess B. Des Weiteren wurde der Flächenbedarf der Leitbahnaufweitungen reduziert. Die Testergebnisse der Laserumschalter der ersten Generation wiesen eindeutig darauf hin, dass die lateralen Abmessungen von $14 \times 14 \mu\text{m}^2$ auf $12 \times 12 \mu\text{m}^2$ und $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ reduziert werden können.

Die Adaption des Laserprozesses an die neue Schichtfolge des TC 9 erfolgte zuerst an den LS_{12} . Zur Festlegung der verschiedenen Energieschwellwerte wurde ein

Energiebereich von ca. $10 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bis $40 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ für eine Sequenz von drei Pulsen durchfahren. Es ergibt sich eine Flächenleistungsdichte pro Puls von ca. $3,3 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bis $13,3 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$. Die vom Laser bestrahlte Fläche betrug $7 \times 7 \mu\text{m}^2$.

Die Ergebnisse der Laserprozessierung von LS₁₂ sind in Bild 29 dargestellt. Aus dem Diagramm lassen sich vier Bereiche ablesen, die den Bearbeitungsvorgang charakterisieren.

1. Bereich : Eine Prozessierung der Laserumschalter ist nicht möglich
2. Bereich : Die Verbindung zwischen Metall $n+1$ und Metall $n+2$ wird aufgebaut, die Trennstelle ist noch geschlossen
3. Bereich : Der Laserumschalter wird optimal prozessiert, da dieser Bereich das Energieoptimum darstellt
4. Bereich : Der Kontaktwiderstand nimmt bei erfolgreicher Bearbeitung zu

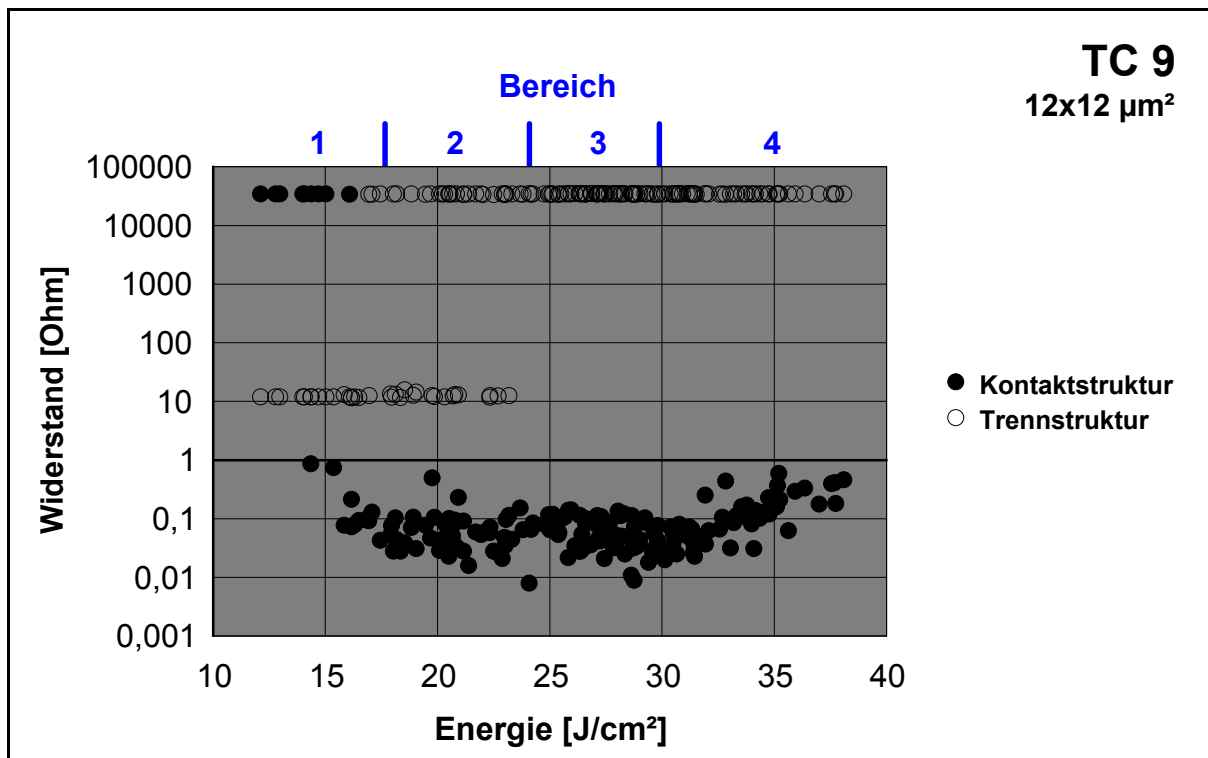


Bild 29 Abhängigkeit des Widerstandes von der verwendeten Energiedosis einer dreipulsigen Bearbeitungssequenz der Teststruktur LS₁₂

Der erste Bereich (Bild 29) von ca. $10 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bis $17 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ beschreibt vollständig fehlgeschlagene Formierungsversuche der Laserumschalter. Der Widerstand der Kontaktstruktur ist unendlich groß und die Verbindung zwischen Metall n und Metall $n+1$ wurde nicht unterbrochen. Entweder konnte auf Grund einer zu geringen Einzelpulsenergie, die unter der Schwellenergie lag, die Laserablation noch nicht einsetzen oder die Gesamtenergie der Bearbeitungssequenz war nicht hoch genug, so dass hier lediglich die obere Metalllage von der Laserstrahlung beeinflusst wurde. Dieser Energiebereich erlaubt weder die Kontaktformierung noch die Öffnung des integrierten Trenners.

Nach Bütje [31] ist für die Bearbeitung von Aluminium mit dem Excimer-Laser eine Energiedichte von mindestens $1,52 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bei einer Pulslänge von 20 ns erforderlich. Dieser Wert wurde für reine Aluminium-Oberflächen ermittelt. Es ist also zu erwarten, dass die notwendige Energiedosis zur Bearbeitung von eingebetteten Aluminium höher sein wird, da hier eine komplexe Schichtstruktur bearbeitet wird. Aluminium-Leitbahnen auf einem Mikrochip sind von SiO_2 umgeben. Nach oben ist die Schichtfolge mit einer Passivierung (Nitrid) abgeschlossen. Das Laserlicht hat mindestens drei Grenzschichten zu passieren, an denen jeweils ein großer Teil reflektiert wird. Die Energiedosis, die die Aluminiumoberfläche erreicht, muss erstens hoch genug sein, das Material zu schmelzen und zweitens darüber hinaus ausreichen, die Schmelze zu überhitzen, um einen Berstdruck unter der SiO_2 -Schicht zu erreichen, der die darüber liegenden Schichten aufbrechen lässt. Das für den zweiten Bereich bestimmte Energieintervall von $17 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bis $24 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$, bei einer Einzelpulsenergie von $5,67 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bis $8 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$, korreliert demzufolge recht gut mit dem von Bütje [31] ermittelten Wert.

Der zweite Bereich des Diagramms in Bild 29 beschreibt das Energieintervall, in dem die Energiedosis für die Herstellung einer leitenden Verbindung zwischen Metall $n+1$ und Metall $n+2$ ausreichend ist. Der mittlere Widerstand der Kontakte beträgt $0,08 \Omega$. Die Verbindung zwischen dem von Metall n heraufragenden Via und Metall $n+1$ wurde noch nicht getrennt, da Metall $n+1$ auf Grund der zu geringen Energiedosis nicht vollständig abgetragen werden konnte.

Der dritte Bereich, der von $24 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bis $30 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ reicht, zeigt das Energieoptimum für die Bearbeitung der Laserumschalter. Die Kontaktstruktur und die Trennstruktur des Laserumschalters wurden in diesem Bereich erfolgreich prozessiert. Hier beträgt der

mittlere Widerstand der Kontaktstrukturen $0,07 \Omega$. Die Trennstruktur ist geöffnet, was sich durch einen Widerstand von $R \rightarrow \infty$ äußert. Die experimentelle Ausbeute beträgt innerhalb dieses Energieintervalls 100 %.

Innerhalb des vierten Bereichs von $30 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bis $40 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ ist die erfolgreiche Bearbeitung der Laserumschalter genauso möglich wie im dritten Bereich. Auch in diesem Bereich beträgt die experimentelle Ausbeute 100 %. Die erhöhte Energiedosis führt jedoch zu einer Widerstandserhöhung in den Kontaktstrukturen. Der Wert für den mittleren Widerstand im vierten Bereich liegt bei $0,14 \Omega$. Er ist also ein wenig höher als in den Bereichen 2 und 3. Wird die Energie gesteigert nimmt auch der Anteil des Materials zu, der aus der Schmelzphase in die Dampfphase übergeht. Der Metaldampf trägt bei diesem Prozess in einem sehr viel geringeren Maße zur Kontaktbildung bei. Obgleich die Erzeugung einer Dampfphase für die erfolgreiche Bearbeitung der Laserumschalter unbedingt erforderlich ist, um den Berstdruck unter den für das Laserlicht transparenten Schichten zu erzeugen.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe an der Struktur LS_{10} verhalten sich analog zu denen der Struktur LS_{12} . Die Teststrukturen wurden mit einem Laserspot der Größe $6 \times 6 \mu\text{m}^2$ bei einer Energiedichte pro Bearbeitungssequenz von ca. $15 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bis $42 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bearbeitet. Die eingesetzte Energiedichte pro Puls beträgt demzufolge $5 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bis $14 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$. Deutlich lassen sich in Bild 30 wieder vier Energiebereiche erkennen, die Aufschluss über das Prozessverhalten des LS_{10} geben. Der erste Bereich, in dem keine Prozessierung möglich ist, erstreckt sich von ca. $15 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bis $20 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$. Die obere Grenze dieses Intervalls ist im Vergleich zu den Ergebnissen von LS_{12} um $3 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ nach oben verschoben. Anschaulich lässt sich dies dadurch erklären, dass der Druck, der unter der Passivierung entsteht, abhängig ist von der Energiedichte. Die resultierende Kraft, welche die Passivierung aufbrechen lässt, ist proportional zu der Fläche auf die der Druck wirkt. Bleibt die Energiedichte bei verkleinerten Laserspot konstant, verringert sich demzufolge die auf die Passivierung wirkende Kraft. Bei kleiner werdenden Strukturen und Laserspots ist demnach mit einer Schwellwertverschiebung nach oben zu rechnen.

Der zweite Bereich, in dem die Kontakte ($R_m = 0,1 \Omega$) erfolgreich formiert werden, die Trennstellen aber noch geschlossen bleiben, erstreckt sich von ca. $20 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bis $24 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$. Eine erforderliche Steigerung der Energie für diesen Bereich ist kaum zu erkennen,

da die Dicke des SiO₂ zwischen Metall *n*+1 und Metall *n*+2 im Verhältnis zur Summe der Dicken aus Dielektrikum und Passivierung, die die Schichtfolge nach oben abschließen, vernachlässigt werden kann.

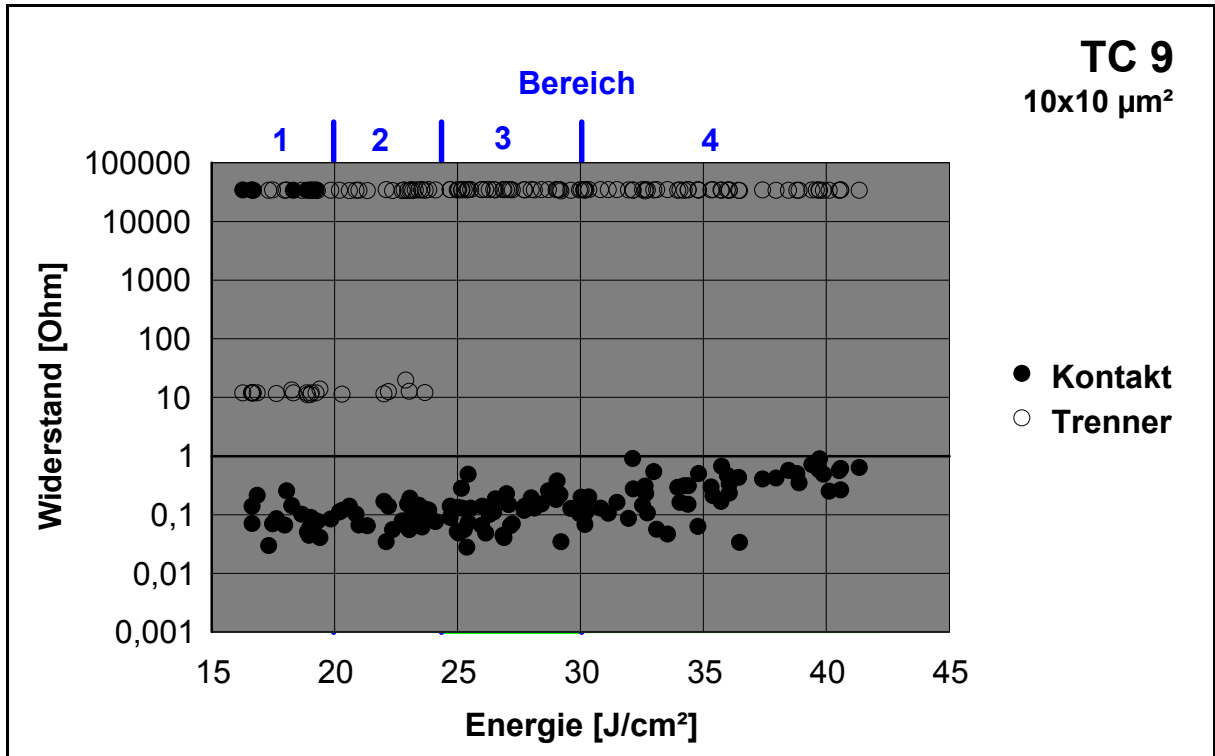


Bild 30 Abhängigkeit des Widerstandes von der verwendeten Energiedosis einer dreipulsigen Bearbeitungssequenz der Teststruktur LS₁₀.

Ein optimales Prozessverhalten ist im dritten Bereich zu erkennen, der von $24 \frac{J}{cm^2}$ bis $30 \frac{J}{cm^2}$ reicht. Der mittlere Widerstand im dritten Bereich ist $0,14 \Omega$. Genauso wie bei den Strukturen der Größe $12*12 \mu m^2$ verursachen auch hier höhere Energiedichten im vierten Bereich eine Zunahme des Widerstandes bei den Kontaktstrukturen. Der mittlere Widerstand hat sich auf $0,33 \Omega$ erhöht.

Struktur	Bereich 1 [J/cm ²]	Bereich 2 [J/cm ²]	Bereich 3 [J/cm ²]	Bereich 4 [J/cm ²]
LS ₁₀	10 - 20	20 - 24	24 - 30	30 - 45
LS ₁₂	10 - 17	17 - 24	24 - 30	30 - 40

Tabelle 6 Zuordnung der Energieintervalle und der Bereiche.

Struktur		Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3	Bereich 4
LS ₁₀	Kontakt	∞	0,1	0,14	0,33
	Trenner	→ 0	→ 0	∞	∞
LS ₁₂	Kontakt	∞	0,08	0,07	0,14
	Trenner	→ 0	→ 0	∞	∞

Tabelle 7 Abhängigkeit des mittleren Widerstandes der Kontaktstruktur und der Status des Trenners von den Energiebereichen.

Die genauen Untersuchungen des Prozessverhaltens der Laserumschalter haben gezeigt, dass sich deutliche Energieschwellen für die einzelnen Bearbeitungsschritte bestimmen lassen. Die Zuordnungen der Energieintervalle und die erzielten Bearbeitungsergebnisse sind Tabelle 6 und Tabelle 7 zu entnehmen. Auf Grund dieser Schwellenergie ist es möglich den Prozess sicher zu reproduzieren und die Laserumschalter optimal zu bearbeiten. Gleichermäßen verhindert das genaue Energie-Monitoring, dass das Feldoxid verletzt wird oder Substratkontakte auftreten.

6.4 Korrektur des theoretischen Modells aus Kap. 3.2

Das theoretische Modell aus Kap. 3.2 wurde unter erheblichen Vereinfachungen erstellt. In diesem Kapitel wird nun den Materialverlusten durch Auswurf von flüssigem und dampfförmigen Metall Rechnung getragen und das Modell entsprechend korrigiert. Der Abgleich des Modells erfolgt mit Hilfe der gemessenen und anschließend gemittelten Widerstandswerte aus zwei Energiebereichen. Zunächst wird von folgendem Ansatz ausgegangen,

$$V_{Kon} = V_{Res} - V_{Ver} \quad (Gl. 7)$$

in dem V_{Ver} die Volumenverluste durch flüssigen und dampfförmigen Materialauswurf berücksichtigt. Ferner wird angenommen, dass der Anteil des Verlustvolumens am Gesamtvolumen in Abhängigkeit von der Spotgröße konstant bleibt. Dies wird durch die Konstanten C und K ausgedrückt. Es resultiert (Gl. 8).

$$V_{\text{Kon}} = V_{\text{Res}} - C \cdot V_{\text{Res}} = V_{\text{Res}}(1 - C) \quad (\text{Gl. 8})$$

oder

$$V_{\text{Kon}} = K \cdot V_{\text{Res}} \quad (\text{Gl. 9})$$

Wird nun wie in Kap. 3.2 weiter vorgegangen, ergibt sich der elektrische Widerstand zu :

$$R_{\text{Kon}} = \frac{\rho \cdot l \cdot H}{a^2 \cdot d_3 \cdot (1 - C)} = \frac{1}{K} \cdot \frac{\rho \cdot l \cdot H}{a^2 \cdot d_3} \quad (\text{Gl. 10})$$

R_{Kon} = Widerstand der Laserkontaktstruktur

ρ = spezifischer Widerstand

l = Länge der leitenden Verbindung im Laserumschalter

H = Gesamthöhe des Laserumschalters

a = Seitenlänge des quadratischen Laserspots

d_3 = Dicke der als Materialreservoir dienenden Metallschicht

C, K = Konstanten

Die Bestimmung der Konstante K erfolgte durch Umformen der (Gl. 10) nach K und Einsetzen der gemessenen und gemittelten Widerstandswerte aus Tabelle 7, die mit den entsprechenden Spotgrößen bzw. Energiedosen erzielt wurden.

Bild 31 zeigt die Widerstandsverläufe in Abhängigkeit von der Spotgröße für drei verschiedene Fälle. Die untere Kurve beschreibt den idealen Widerstand ohne Auswurfverluste. Die mittlere Kurve repräsentiert den Widerstand, der aus der Laserbearbeitung mit optimaler Energie (Bereich 3) resultiert. Des Weiteren wird durch die obere Kurve das Widerstandsverhalten bei Verwendung einer zu großen Energiedosis (Bereich 4) beschrieben. In der graphischen Darstellung des elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Spotgröße (Bild 31) wird deutlich, dass der korrigierte Widerstand erheblich vom idealen Widerstand abweicht. Diese Abweichung wird durch den hohen Materialverlust verursacht. Für die

Kontaktformierung stehen demnach nur ca. 8 % des Ausgangsmaterials zu Verfügung. Die restlichen 92 % gehen dem Formierungsprozess in Form von Auswurf verloren, wie Volumenbilanzen belegen, welche sich auf die messtechnisch ermittelten Widerstandswerte stützen.

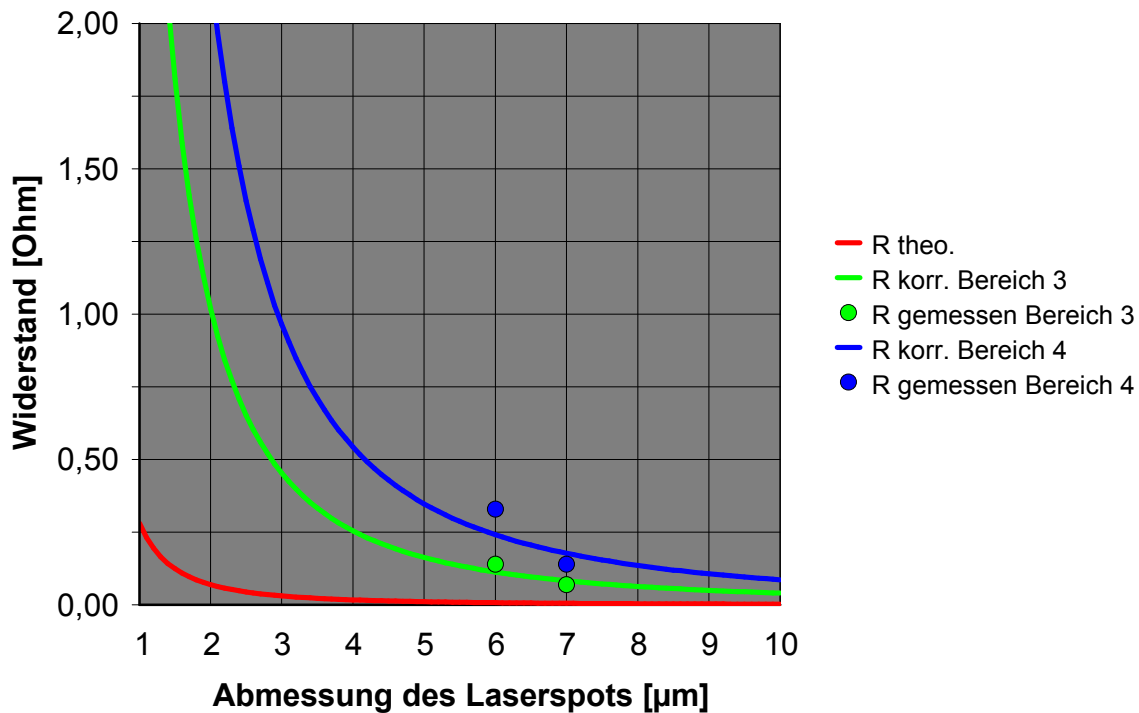


Bild 31 Abhängigkeit des idealen und des korrigierten elektrischen Widerstandes von der Seitenlänge des quadratischen Lasers.

Die große Diskrepanz zwischen den beiden Widerstandsverläufen aus dem Bereich 3 und dem Bereich 4 begründet sich durch die höhere Energiedosis mit der die Laserumschalter im Bereich 4 prozessiert wurden. Bedingt durch die hohe Dosis nimmt der Anteil von durch Verdampfung verlorenem Material zu und geht somit der Kontaktbildung verloren. Das wichtigste Ergebnis ist jedoch, dass auf Grund dieses Modells abgeschätzt werden kann, ob und wie weit die Strukturverkleinerung weiter vorangetrieben werden kann. Unter Zugrundelegung der verwendeten 0,25 μm Technologie lässt sich klar erkennen, dass ab Laserspotgrößen von 3*3 μm^2 der Widerstand der Kontaktstruktur im Laserumschalter größer wird, als der der Standard-Vias von ca. 1 Ω (Tabelle 5) dieses Prozesses. Aus der Restriktion, dass die elektrischen Eigenschaften der Kontaktstruktur in den Laserumschaltern denen der Vias des entsprechenden Prozesses ähneln sollen, folgen die minimal möglichen

theoretischen Dimensionen der Laserumschalterstruktur von ca. $6 \times 6 \mu\text{m}^2$. Wird außerdem die natürliche Streuung der Widerstandswerte, zu welcher es bei der Laserbearbeitung durch Fehlpositionierung, Fehlfokussierung und Puls-zu-Puls Instabilitäten kommt, berücksichtigt, so sollten die Dimensionen der Laserumschalter sicherheitshalber $8 \times 8 \mu\text{m}^2$ nicht unterschreiten. Diese Abschätzung wurde für die hier verwendete $0,25 \mu\text{m}$ Technologie (5.2, Prozess B) getroffen. Sollten die Schichtdicken der Metallisierungen folgender Technologien weiter zunehmen, steht dem Laserprozess wieder mehr Material für die Kontaktformierung zur Verfügung. Es ergeben sich dann neue Möglichkeiten für die Strukturverkleinerung, jedoch nicht ohne eine Anpassung des Laserkonfigurationsautomaten.

6.5 Toleranz gegenüber Energieschwankungen

Schwierigkeiten bei der Verwendung eines Excimer-Lasers für die Feinstbearbeitung von mikroelektronischen Schaltungen, die Energiekonstanz betreffend, sind vorprogrammiert. Zu Beginn des 6. Kapitels wurde kurz auf die Puls-zu-Puls Instabilitäten des verwendeten Excimer-Lasers und die Möglichkeiten, die negativen Einflüsse zu reduzieren, eingegangen. Neben der Erhöhung des Kontaktwiderstandes durch zu hohe Energiedosen können zu große Energiedichten auch das Risiko von Kurzschlüssen zwischen Metall n und Metall $n+1$ erhöhen. Im Verlauf der Untersuchungen an LS₁₀ und LS₁₂ konnten jedoch nur selten die negativen Einflüsse der Energieschwankungen beobachtet werden. Die gezielte Suche nach unerwünschten Effekten zeigte jedoch, dass die Laserumschalter der zweiten Generation über eine hohe Kurzschlussfestigkeit verfügen. Diese Eigenschaft ist im höchsten Maße positiv zu bewerten.

Als kritischer Bereich, in denen sich die Energieschwankungen besonders negativ auswirken, wurde der Energiebereich 4 bewertet. Dies erklärt sich wie folgt:

Die Bearbeitung der Laserumschalter erfolgt mit Energien an der oberen Grenze des Bereichs 4. Treten nun die unerwünschten Energieschwankungen auf, können die Energiegehalte einzelner Sequenzen den Grenzwert leicht übersteigen. Zwei mögliche Folgen wären denkbar, zum einen die totale Ablösung und Zerstörung des Laserumschalters und zum anderen die Erzeugung eines Kurzschlusses zwischen Metall n und Metall $n+1$ durch aufgeschmolzenes Material aus der Leitbahn, die in

Metall n verläuft. Beide möglichen Folgen konnten beobachtet werden, wobei die totale Zerstörung der Laserumschalter als Folge extremer Energien nur sehr selten auftrat. Kurzschlüsse konnten jedoch häufiger beobachtet werden, insbesondere bei den Laserumschaltern der ersten Generation (Kap.6.2). Die Laserschalter der zweiten Generation erwiesen sich hingegen bei Bestrahlung mit hohen Energiedosen als kurzschlussfest. REM-Untersuchungen an den Laserumschaltern der zweiten Generation gaben Aufschluss über die Ursachen dieser Eigenschaft. Genauso wie bei den Laserumschaltern der ersten Generation führt eine zu intensive Bestrahlung zu einer ungewollten Beeinflussung des Metalls in Layer n . Die negativen Folgen bleiben jedoch bei den Laserumschaltern der zweiten Generation aus. Verantwortlich dafür ist das veränderte Design von LS₁₀ und LS₁₂. In beiden Teststrukturen wurde die Breite der Zuleitung in Metall n auf 0,6 μm reduziert und damit auch das zur Verfügung stehende Materialvolumen für die parasitäre Kontaktstruktur verringert. Erfolgt die Prozessierung dieser Laserumschalter mit einer zu hohen Energiedosis, wird das Metall n auf Grund der geringen Wärmekapazität komplett verdampft und steht einer möglichen Kontaktformierung nicht mehr zu Verfügung.

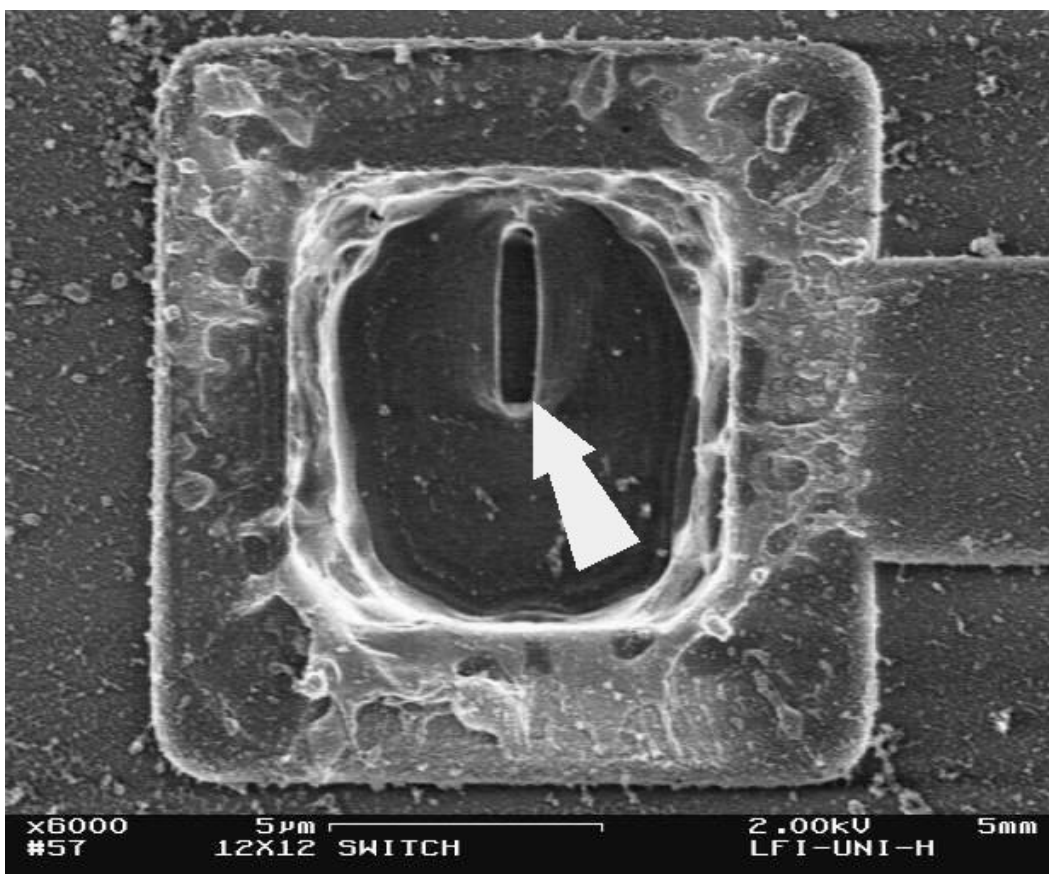


Bild 32 REM-Aufnahme eines Laserumschalters der 2. Generation, der mit einer Energiedosis aus dem oberen Grenzbereich bearbeitet wurde.

Bild 32 zeigt die REM-Aufnahme eines Laserumschalters der 2. Generation, der mit einer Energiedosis aus dem oberen Grenzbereich bearbeitet wurde. In der Mitte der Teststruktur innerhalb des Laserbearbeitungskraters ist deutlich eine vertikale Struktur zu erkennen. Diese vertikale Struktur ist ein Graben, in dem sich das Leitbahnmaterial der n -ten Lage befunden hat. Das Material wurde komplett evaporiert. Metallresiduen, die zu Kurzschüssen führen können, sind nicht vorhanden. Bedingt durch die Reduktion des Materialreservoirs hat sich die Wahrscheinlichkeit zur Kurzschlussbildung extrem verringert. In allen Versuchsreihen mit den Teststrukturen LS₁₀ und LS₁₂ konnten messtechnisch keine Kurzschlüsse zwischen Metall n und Metall $n+1$ erfasst werden.

7 Lebensdaueruntersuchungen

Die Vorhersage der zu erwartenden Lebensdauer mikroelektronischer Bauelemente hat große technologische und wirtschaftliche Bedeutung. Erst das Wissen um die Länge der zu erwartenden Lebensdauer ermöglicht die Entscheidung, ob ein Bauteil oder ein ganzes Gerät am Markt eingeführt wird und dort erfolgreich besteht. Um die Wirtschaftlichkeit zu wahren, muss ein Großteil der Bauteile zuvor festgelegte Garantiezeiten, die es zu bestimmen gilt, überleben. In der heutigen Zeit, in der die Langlebigkeit von Geräten, Gerätekomponenten und Bauteilen ein erhebliches Wettbewerbsmerkmal darstellt, sind Langzeittests unter Betriebsbedingungen nicht mehr denkbar, da die hier erwünschten Ausfälle zur Charakterisierung nicht in einer akzeptablen Zeitspanne erfolgen. Zur Verringerung der Testzeit wurden Testverfahren entwickelt, mit denen der Zeitbedarf von Lebensdaueruntersuchungen erheblich reduziert wurde.

Im Folgenden sollen die bekannten für diese Arbeit relevanten Fehlermechanismen und die existierenden Verfahren zur Vorhersage der Lebensdauer der Vollständigkeit halber kurz vorgestellt werden. Nachdem ein kleiner Überblick gegeben wurde, erfolgt die detaillierte Erläuterung des verwendeten Lebensdauermodells und der angewendeten Software-Werkzeuge. Im Anschluss werden die Ergebnisse der beschleunigten Lebensdauerermessungen und deren statistische Auswertung präsentiert.

7.1 Fehlermechanismen

In mikroelektronischen Schaltungen gibt es vier grundlegende Fehlermechanismen, die durch verschiedene äußere Bedingungen künstlich herbeigeführt werden und zum Ausfall von Metallisierungssystemen führen. Die Ursachen für Fehler können die aus elektrischen Feldern resultierenden Kräfte, Impulsübertragung durch Stöße von Ladungsträgern, Temperaturgradienten, unterschiedliche Materialkonzentrationen und Stress durch Verspannungen sein. Die vier Fehlermechanismen sind die Elektromigration, die Thermomigration, die Stressmigration und die Kontaktmigration. Allen Migrations-Phänomenen ist eines gemein; atomarer Materialtransport von einem Ort zum anderen führt zum Ausfall der Schaltung. Im Folgenden soll nur auf die Elektromigration als vorherrschenden

Ausfallmechanismus von Leitbahnen in hochintegrierten Schaltungen etwas näher eingegangen werden.

7.1.1 Elektromigration

Bei der Elektromigration [32] handelt es sich um einen gerichteten Materialtransport als Folge der zufälligen und ungerichteten Selbstdiffusion, die unter Einfluss eines elektrischen Feldes eine Richtung bekommt. Zwei Kräfte wirken auf die aktivierten Metallionen im Leitbahnmaterial und verursachen den Materialtransport. Zum einen ist dies das elektrische Feld, welches direkt auf die Metallionen wirkt, und zum anderen die aus der Impulsübertragung resultierenden Kräfte (Elektronenwind) der bewegten Ladungsträger, die bei Zusammenstößen frei werden. Diese Kräfte in Kombination führen zu einem kontinuierlichen Materialtransport, der die Bildung von Löchern und Hügeln (voids and hillocks) im und auf dem Leitbahnmaterial zur Folge hat [33][34][36]. Dies führt im Extremfall zur Unterbrechung der Leitbahn. Der Materialtransport durch Elektromigration lässt sich vier verschiedenen Diffusionspfaden zuordnen :

1. Gitter-Diffusion
2. Korngrenzen-Diffusion
3. Grenzflächen-Diffusion
4. Oberflächen-Diffusion

Das Phänomen der Elektromigration wird grundsätzlich durch das semiempirische Modell von Black (1969) beschrieben [37].

$$MTF = A \cdot j^{-m} \cdot e^{\left(\frac{E_A}{k \cdot T}\right)} \quad (\text{Gl. 11})$$

Die mittlere Ausfallzeit (*MTF*) oder t_{50} beschreibt die Zeit, zu der 50% der Teststrukturen einer Menge von identischen Strukturen ausgefallen sind. Das zu definierende Ausfallkriterium kann zum einen das vollständige Versagen der Leitbahn sein oder eine zuvor definierte Widerstandserhöhung, die als nicht akzeptabel anzusehen ist. Die Konstante *A* repräsentiert die geometrischen und physikalischen Eigenschaften der Leitbahn. Die experimentell verwendete

Stromdichte wird durch die Variable j vertreten. Der Stromdichteexponent m ist experimentell zu ermitteln und kann Werte zwischen 1 und 3 annehmen, wobei m in erster Linie von der Höhe der verwendeten Stromdichte abhängig ist. Die Aktivierungsenergie E_A kann abhängig vom Diffusionsmechanismus Werte von 0,2 eV bis 1,48 eV annehmen [38][39]. T ist die Temperatur in Kelvin und k die Boltzmann-Konstante.

Langjährige Erfahrung im Umgang mit dem Black'schen Modell rechtfertigt die Anwendung, auch wenn sich die Stromdichte in Folge fortschreitender Schädigung der Teststruktur im Verlauf der Untersuchung verändert [40]. Gerade bei Strukturen mit hohen Lebensdauern wirkt sich der Fehler nicht merklich aus [36].

7.2 Die verwendeten Verfahren und Werkzeuge der beschleunigten Lebensdauertests

Zunächst ist festzulegen, unter welchen Bedingungen getestet werden soll, welche Stressfaktoren und Verfahren verwendet und welche Modelle zu Grunde gelegt werden. Da die Hauptausfallursache für Leitbahnen in mikroelektronischen Schaltungen die Elektromigration ist, sind die Stressparameter bereits festgelegt. Beschleunigte Lebensdauertests, deren provoziertes Ausfallmechanismus die Elektromigration ist, erfolgen fast ausschließlich unter Verwendung von erhöhter Stromdichte und/oder Temperatur. Grundsätzlich geeignete Testverfahren sind das TRACE-Verfahren (**T**emperature-**R**amp **R**esistance **A**nalysis to **C**haracterize **E**lectromigration), das BEM-Verfahren (**B**reakdown **E**nergy of **M**etal) und das konventionelle Testverfahren. Bei dem TRACE-Verfahren wird mit einer Stromdichte von ca. 1 MA/cm² gearbeitet. Gleichzeitig wird die Temperatur rampenförmig mit einer Zunahme von 1 K/min erhöht. Die Temperaturerhöhung wird solange fortgesetzt, bis eine nichtlineare Widerstandsänderung bei den Teststrukturen einsetzt. Bei diesem Verfahren wird davon ausgegangen, dass der nichtlineare Widerstandsanstieg direkt mit der Elektromigration korreliert [41]. Beim BEM-Verfahren werden die Teststrukturen mit einem stufenförmig zunehmenden Strom gestresst. Die Erhöhung des Stromes erfolgt bis zum Ausfall der Teststrukturen. Dabei können sich Stromdichten von $> 10^7$ A/cm² ergeben. Eine zusätzliche externe Erwärmung der Strukturen erfolgt nicht, lediglich die Joule'sche

Eigenheizung bewirkt die Erwärmung. Die notwendige Temperaturbestimmung der Teststruktur erfolgt über die temperaturabhängige Widerstandsänderung [42]. Die Messzeit dieser Verfahren liegt zwischen einigen Minuten (BEM) und einigen Stunden (TRACE).

Die Belastung der Proben mit konstantem Stress, wie in den konventionellen Tests üblich, wird hier bevorzugt. Auch wenn Tests mit zunehmenden Stress zu erheblich geringeren Testzeiten führen, so wurden diese doch in der Vergangenheit noch als recht unzuverlässig beschrieben. Die Vor- und Nachteile dieser Testverfahren wurden von Hartmann [8] hinreichend diskutiert. Die zuverlässigsten Ergebnisse liefern Tests unter Verwendung von konstantem Stress und empirisch belegten Modellen. Diese Tests dauern in der Regel zwar Wochen oder Monate, die zu erwartende Genauigkeit steht jedoch der langen Messzeit gegenüber.

Die Analyse der aus den Lebensdauertests resultierenden Daten erfordert ein Lebensdauermodell. Ein solches Modell besteht aus einer Funktion, die die Verteilung der Fehlerrate über der Zeit beschreibt (Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, *pdf*) und aus einer Funktion, die die Beziehung zwischen der verkürzten Lebensdauer unter Testbedingungen und der Lebensdauer unter Betriebsbedingungen ausdrückt [43]. Diese Modelle basieren idealer Weise auf experimentellen Erfahrungen und statistischen Theorien. Die Lebensdauer-Stress-Zusammenhänge werden üblicherweise mit der Arrhenius-, der Eyring-Beziehung oder dem Inverse-Power-Law (IPL) ausgedrückt, um nur einige zu nennen. Die Wahl der Beziehung zur Beschreibung der Lebensdauer-Stress-Zusammenhänge hängt in erster Linie von der Art des verwendeten Stresses ab. Zur Beschreibung der Ausfallwahrscheinlichkeit kann die *Weibull*-, *Gamma*-, *Log-Normal*-, *Normal*- oder *Exponential*-Verteilung herangezogen werden. Die am weitesten verbreitete Funktion, welche eine Ausfallrate über der Zeit beschreibt, ist die *Log-Normal*-Verteilung (*LNV*). Sie ist geeignet für Halbleiterbauelemente im allgemeinen und für durch Elektromigration verursachte Ausfälle im speziellen [43][44][45].

Die *pdf* der *Log-Normal*-Verteilung wird durch (Gl. 12) beschrieben. In der Literatur wird für die *Log-Normal*-Verteilung der Logarithmus zur Basis 10 oder der natürliche Logarithmus zur Basis e verwendet. Generell wird dem natürlichen Logarithmus $\ln()$

der Vorzug gegeben, da sich hierdurch die mathematische Behandlung der Funktion vereinfacht.

$$f(t) = \frac{1}{t \cdot \sigma_{t'} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t' - \bar{t}'}{\sigma_{t'}}\right)^2} \quad (\text{Gl. 12})$$

t = Lebensdauer

t' = $\ln(t)$

\bar{t}' = $\ln(t_{50})$

$\sigma_{t'}$ = Standardabweichung des natürlichen Logarithmus
der Lebensdauer

t_{50} = mittlere Lebensdauer

Zur Beschreibung der Lebensdauer-Stress-Zusammenhänge wird hier zum einen die Arrhenius-Beziehung und zum anderen die Black'sche Gleichung herangezogen. Die Arrhenius-Gleichung ist das am weitesten verbreitete Modell zur Zeittransformation von Ergebnissen temperaturbeschleunigter Lebensdaueruntersuchungen. Mit seiner Hilfe können Degradations- und Fehlerraten von elektronischen Komponenten hinreichend gut dargestellt werden [44].

Die Gleichung der Arrhenius Reaktionsrate ist gegeben durch :

$$R(T) = A \cdot e^{-\frac{E_A}{k \cdot T}} \quad (\text{Gl. 13})$$

In (Gl. 13) ist R die Reaktionsrate, A eine unbekannte Konstante, E_A die Aktivierungsenergie in eV, k die Boltzmann-Konstante und T die absolute Temperatur in Kelvin.

Das Arrhenius Lebensdauer-Stress-Modell wurde unter der Annahme formuliert, dass sich die Lebensdauer umgekehrt proportional zur Reaktionsrate des fehlerverursachenden Prozesses verhält. Es resultiert die Arrhenius Lebensdauer-Stress-Beziehung zu,

$$t(T) = C \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (\text{Gl. 14})$$

in der t die von der Temperatur T abhängige Lebensdauer, C ein von der Temperatur unabhängiger Modellparameter und B der Quotient aus der Aktivierungsenergie E_A und der Boltzmann-Konstante k ist.

Aus der Verknüpfung der *Log-Normal*-Verteilung (Gl. 12) und der Arrhenius Lebensdauer-Stress-Beziehung (Gl. 14) folgt die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (probability density function, pdf) für das Arrhenius-Lognormal Modell (Gl. 15),

$$f(t, T) = \frac{1}{t \cdot \sigma_t' \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t' - \ln(C) - \frac{B}{T}}{\sigma_t'} \right)^2} \quad (\text{Gl. 15})$$

$$B = \frac{E_A}{k} \quad (\text{Gl. 16})$$

mit der Standard Abweichung σ_t .

$$\sigma_t = \sqrt{\left(e^{2(\ln(C) + \frac{B}{T}) + \sigma_t'^2} \right) \left(e^{\sigma_t'^2} - 1 \right)} \quad (\text{Gl. 17})$$

Die Standard-Abweichung des natürlichen Logarithmus der Lebensdauer ist gegeben durch :

$$\sigma_t' = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma_t^2}{t^2} + 1\right)} \quad (\text{Gl. 18})$$

Die Zuverlässigkeit zum Zeitpunkt t errechnet sich aus dem Integral der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion wie folgt :

$$R(t, T) = \int_t^{\infty} f(t, T) dt \quad (\text{Gl. 19})$$

Die Auswertung der Daten aus den beschleunigten Lebensdaueruntersuchungen wurde mit einem Computer-Programm der Firma ReliaSoft namens ALTA (Accelerated Life Test Analysis) durchgeführt [47]. Dieses Programm ermittelt die Parameter s_r , C und B mit Hilfe des Maximum-Likelihood-Verfahrens und extrapoliert die Daten auf Betriebsbedingungen. Jedoch werden von diesem Programm nur die temperaturabhängige Beschleunigung des Tests berücksichtigt. Zur weiteren Auswertung der Testergebnisse wird deshalb noch die Black'sche Gleichung (Gl. 11) herangezogen. Durch einfache Verhältnisbildung ergibt sich aus der Black'schen Gleichung :

$$t_B = t_T \left(\frac{j_T}{j_B} \right)^m \cdot e^{\left[\frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_T} \right) \right]} \quad (\text{Gl. 20})$$

t_B = Lebensdauer unter Betriebsbedingungen

t_T = Lebensdauer unter Testbedingungen

j_B = Stromdichte unter Betriebsbedingungen

j_T = Stromdichte unter Testbedingungen

m = Stromdichteexponent

E_A = Aktivierungsenergie

k = Boltzmann-Konstante

T_B = Temperatur unter Betriebsbedingungen

T_T = Temperatur unter Testbedingungen

Dieser Ausdruck kann weiter vereinfacht werden, da die verwendete Software in der Lage ist, die temperaturabhängigen Testergebnisse auf die Betriebstemperatur umzurechnen. Es folgt aus Gleichung (Gl. 20) mit $T_B = T_T$.

$$t_B = t_T \left(\frac{j_T}{j_B} \right)^m \quad (\text{Gl. 21})$$

Der sich aus (Gl. 21) ergebende Stromdichtebeschleunigungsfaktor stellt sich wie folgt dar :

$$a_j = \left(\frac{j_T}{j_B} \right)^m \quad (\text{Gl. 22})$$

Dem Stromdichteexponent m wird im Folgenden der Wert 2 zugewiesen. Dieser Wert hat sich in der Literatur bei Anwendung der Black'schen Gleichung zur Untersuchung von Elektromigration in Metallisierungen mikroelektronischer Schaltungen als optimal erwiesen [8][9][37][43].

7.3 Testdurchführung

Die in Kap. 5.5 beschriebenen Lebensdauerteststrukturen wurden den zwei Stressparametern Strom und Temperatur ausgesetzt. Zur Festlegung einer adäquaten Messzeit wurden einige Messreihen mit gleicher Temperatur aber unterschiedlichen Stromdichten durchgeführt. Ziel war die Bestimmung der optimalen Teststromdichte, bei der wenige oder keine Frühausfälle auftreten und bei der die Testzeit von einem Monat pro untersuchte Lebensdauerteststruktur nicht überschritten wird. Diese Voruntersuchungen wurden bei einer Temperatur von 200°C durchgeführt. Die ermittelten Belastungsströme betragen für LS₁₀ 50 mA und LS₁₂ 60 mA. Das entspricht einer Stromdichte in den 4 µm breiten und ca. 1 µm dicken Zuleitungen von 1,25 MA/cm² bzw. 1,5 MA/cm². Der geringere Teststrom für Struktur LS₁₀ ergibt sich aus dem etwas höheren Widerstand und dem folglich kleineren leitenden Querschnitt der Laserkontaktstruktur. Für den Belastungsparameter Temperatur wurden die Werte 200 °C, 230 °C, 250 °C und 280°C gewählt. Generell wäre die Bestimmung der Lebensdauer bei bekannter Aktivierungsenergie auch mit nur einem Temperatur-Level möglich, wie es zum Beispiel im MIL-STD-883 vorgeschlagen wird. Es ist jedoch verfahrenstechnisch nicht möglich, die Aktivierungsenergie für genau die Teststrukturen zu bestimmen, welche später auf ihre Lebensdauer untersucht werden, da die messtechnische Ermittlung der Aktivierungsenergie die Teststrukturen zerstört. Ebenso kann auch nicht zweifelsfrei angenommen werden, dass die für einen Probensatz ermittelte Aktivierungsenergie auf einen anderen Probensatz übertragen werden kann. Es ist möglich, dass die Aktivierungsenergie von einem Probensatz zum anderen oder sogar von einer Teststruktur zur anderen variiert [49]. Aus diesem Grund wurde mit mehreren Temperaturen gearbeitet. Rückwirkend ist die Ermittlung der Aktivierungsenergie aus dem temperaturabhängigen Verhalten der Lebensdauern jedoch möglich.

Zunächst wurden alle in der Kette enthaltenen Teststrukturen bezüglich ihres elektrischen Widerstandes geprüft. Für die Langzeitmessungen sind nur die Laserumschalter zugelassen worden, deren Widerstand kleiner war, als der der Vias des verwendeten Halbleiterprozesses. Nach dem Vorheizen der Teststrukturen auf die gewünschte Temperatur, wurde der Strom langsam bis auf den Sollstrom erhöht. Nach Erreichen aller Sollwerte wurde mit der automatischen Messwerterfassung begonnen. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte alle 120 s.

Bild 33 zeigt exemplarisch das Ausfallverhalten der in einer Kette angeordneten Laserumschalter im Verlauf der Lebensdaueruntersuchungen für eine Temperatur von 200°C und einen Strom von 50 mA. Jede einzelne Stufe der Graphik beschreibt die Messwerterfassung über eine konstante Anzahl von Teststrukturen innerhalb der Kette. Der exponentielle Widerstandsanstieg gegen Ende jeder einzelnen Stufe kündigt das Versagen des Kontaktes in der Laserumschalterstruktur an.

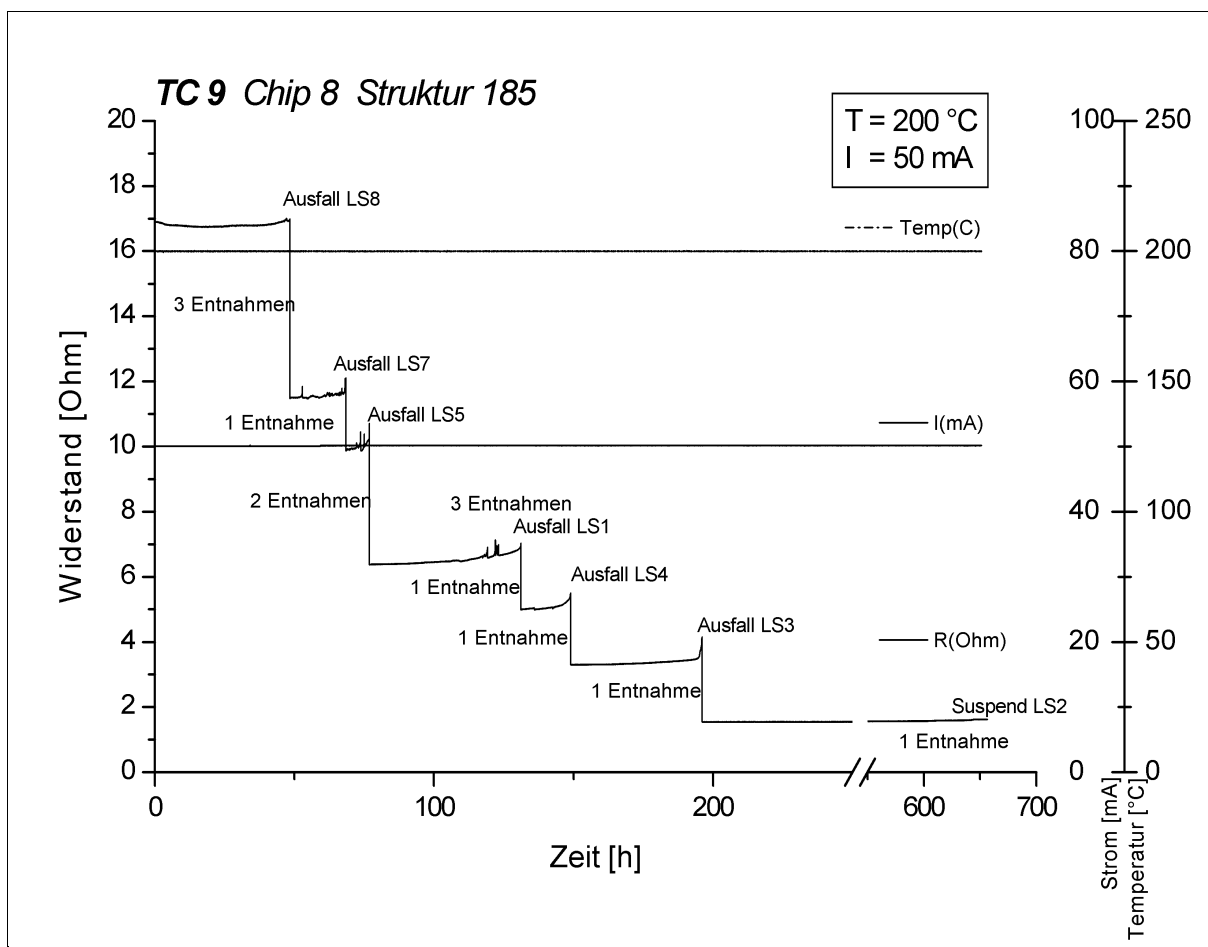


Bild 33 Typisches Widerstandsverhalten der Kontaktketten bei Belastungstests.

Als Abbruchbedingung der Belastungstests wurde das totale Versagen der Teststrukturen definiert, um einer gleichzeitigen Degradation mehrerer Teststrukturen in der Kette Rechnung zu tragen. Die Definition einer bestimmten Widerstandserhöhung als Abbruchbedingung könnte zu einer verfrühten Entnahme und dem zu Folge zu einer Fehleinschätzung der Lebensdauer führen. Die unterschiedliche Stufenhöhe kennzeichnet die Anzahl der Entnahmen nach einem Ausfall. In Folge der Kettenstruktur ist es nicht immer möglich, nur den defekten Laserumschalter aus der zu testenden Menge zu entnehmen. Die Messung wurde mit dem Kettenrest fortgesetzt, in dem noch die größte Anzahl von intakten Teststrukturen verblieben ist. Dieses Vorgehen führte zu mehrfach rechts zensierten Daten vom Typ II [43], welche auch fehlerzensierte Daten genannt werden. Die Laufzeiten von einigen defekten Teststrukturen gleichen denen von Entnahmen intakter Strukturen. Wurden die Testlaufzeiten zu groß, so sind die letzten intakten Laserumschalter ebenfalls entnommen und als *schwebend* gewertet worden.

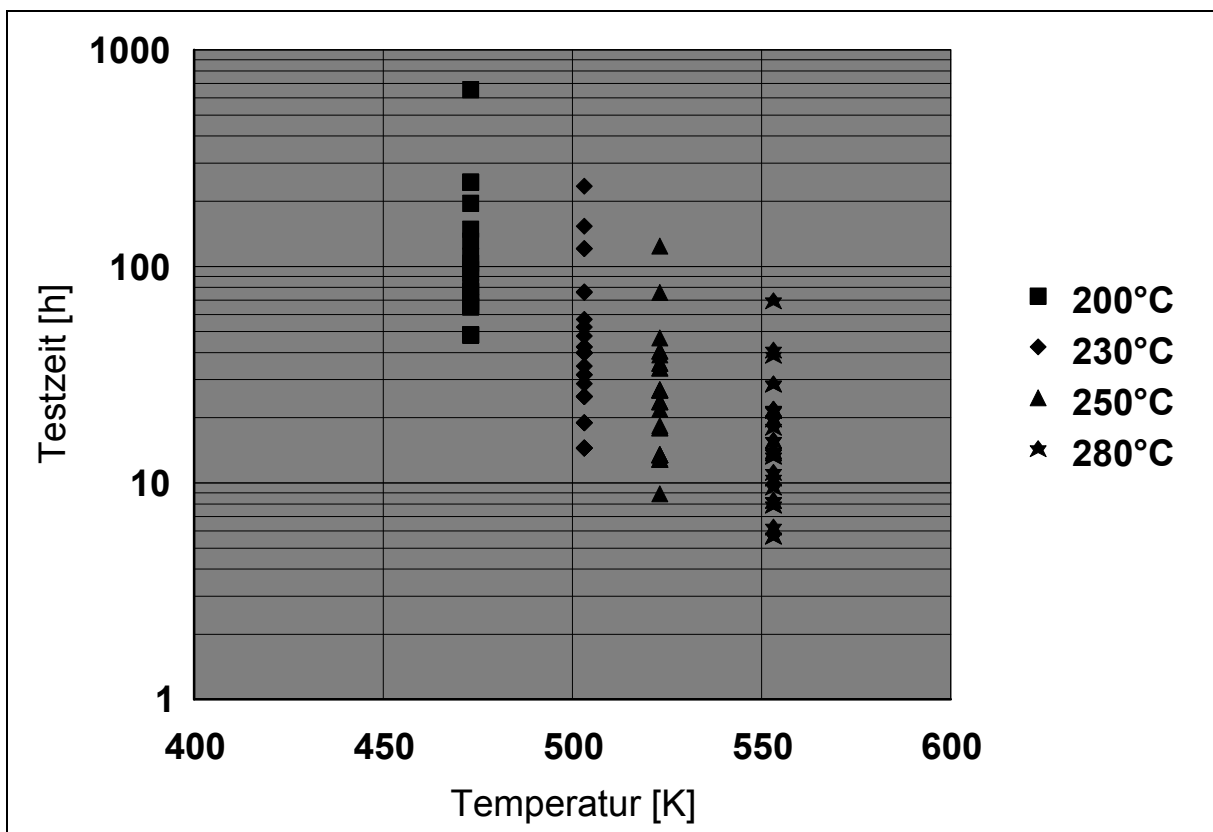


Bild 34 Graphische Darstellung der Lebensdauer testdaten für LS₁₀.

Die Graphiken in Bild 34 und Bild 35 zeigen die ermittelten Lebensdauern unter beschleunigten Testbedingungen in Form eines Streudiagramms. Es ist deutlich zu

erkennen, dass die Lebensdauer mit zunehmender Belastung abnimmt. Des Weiteren sind in den Diagrammen Bereiche zu erkennen, in denen die Dichte der Messpunkte zunimmt. An dieser Stelle befindet sich das Maximum der überlagerten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, die später als Basis für die statistische Auswertung dient.

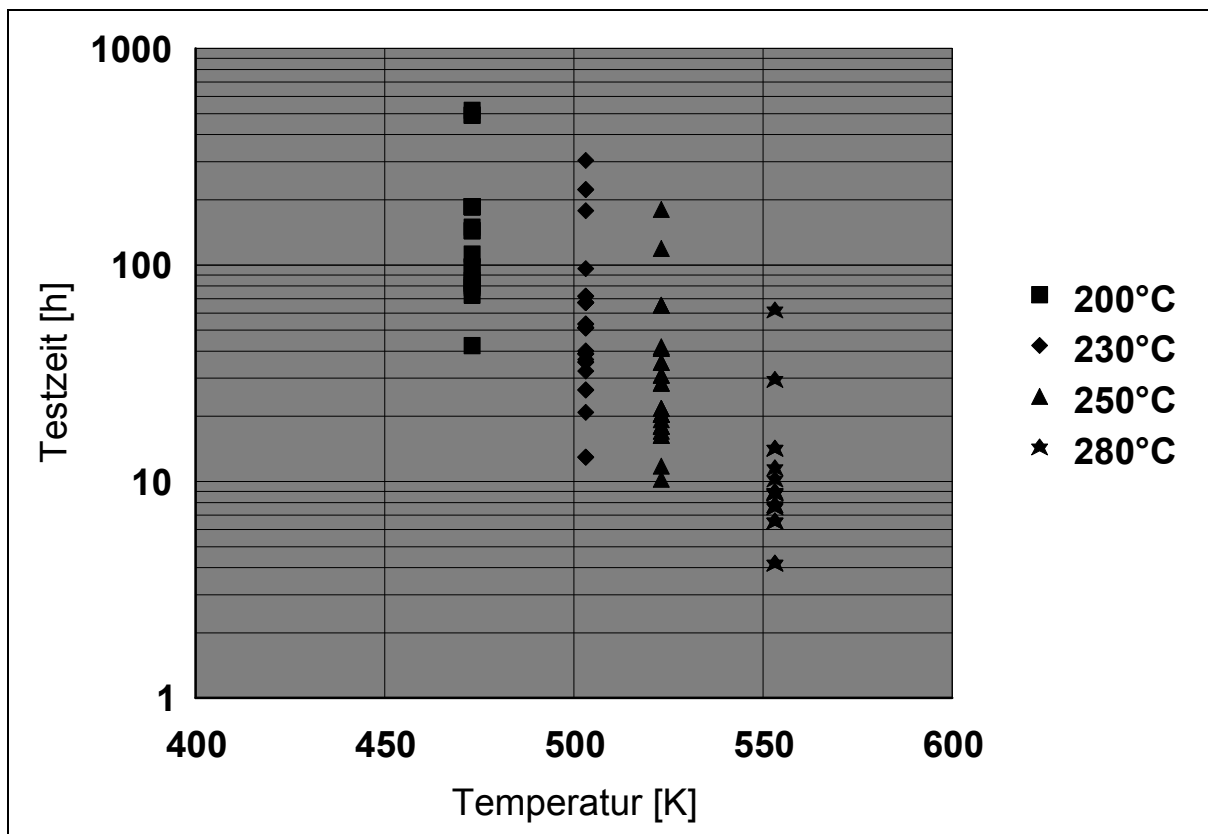


Bild 35 Graphische Darstellung der Lebensdauer testdaten für LS_{12} .

7.4 Statistische Auswertung der Lebensdauer messdaten

Die statistische Auswertung der Lebensdauer messdaten erfolgte mit dem Programm *ALTA* [47][48]. Jeder einzelne Messwert wird dem Programm in Tabellenform übergeben, anschließend erfolgt die Ermittlung der Parameter für das Arrhenius-Log-Normal-Modell mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode. Zur Verifizierung, ob die optimale Form der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion gewählt wurde, sind Wahrscheinlichkeitsplots für die Ergebnisse jeder Teststruktur angefertigt worden. Die Graphiken in Bild 36 und Bild 37 zeigen die nach der

kumulativen Binominal-Verteilung gewichteten Lebensdauerwerte (*Median Ranks*).

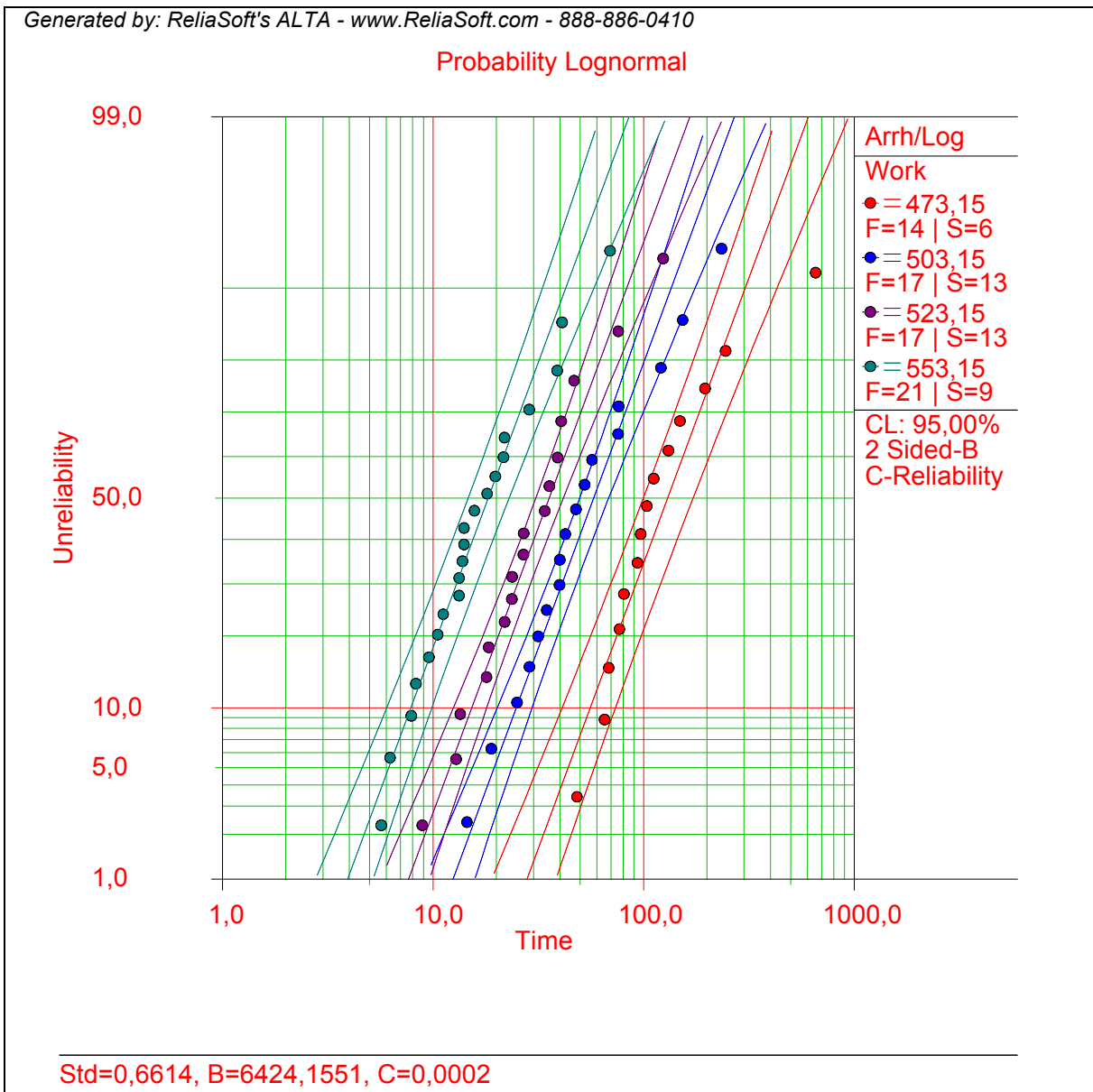


Bild 36 Log Normal Wahrscheinlichkeitsplot der Messdaten vom LS₁₀.

Mit Hilfe der gewichteten Messwerte kann die Unzuverlässigkeit bzw. die Zuverlässigkeit für die einzelnen Stress-Level abgeschätzt werden. Die Überprüfung des Fits der *Lognormal*-Verteilung für jeden Stress-Level weist eine gute Übereinstimmung der Messwerte mit der gewählten Verteilung auf. Die Streuung der Messwerte für die Teststruktur LS₁₀ (Bild 36) ist erheblich geringer, als die der Teststruktur LS₁₂ (Bild 37), was zu einer kleineren Standard-Abweichung von $\sigma_{t'} = 0,66$ und damit zu einem besseren Fit führt. Die Standard-Abweichung der Teststruktur LS₁₂ (Bild 37) beträgt $\sigma_{t'} = 0,82$.

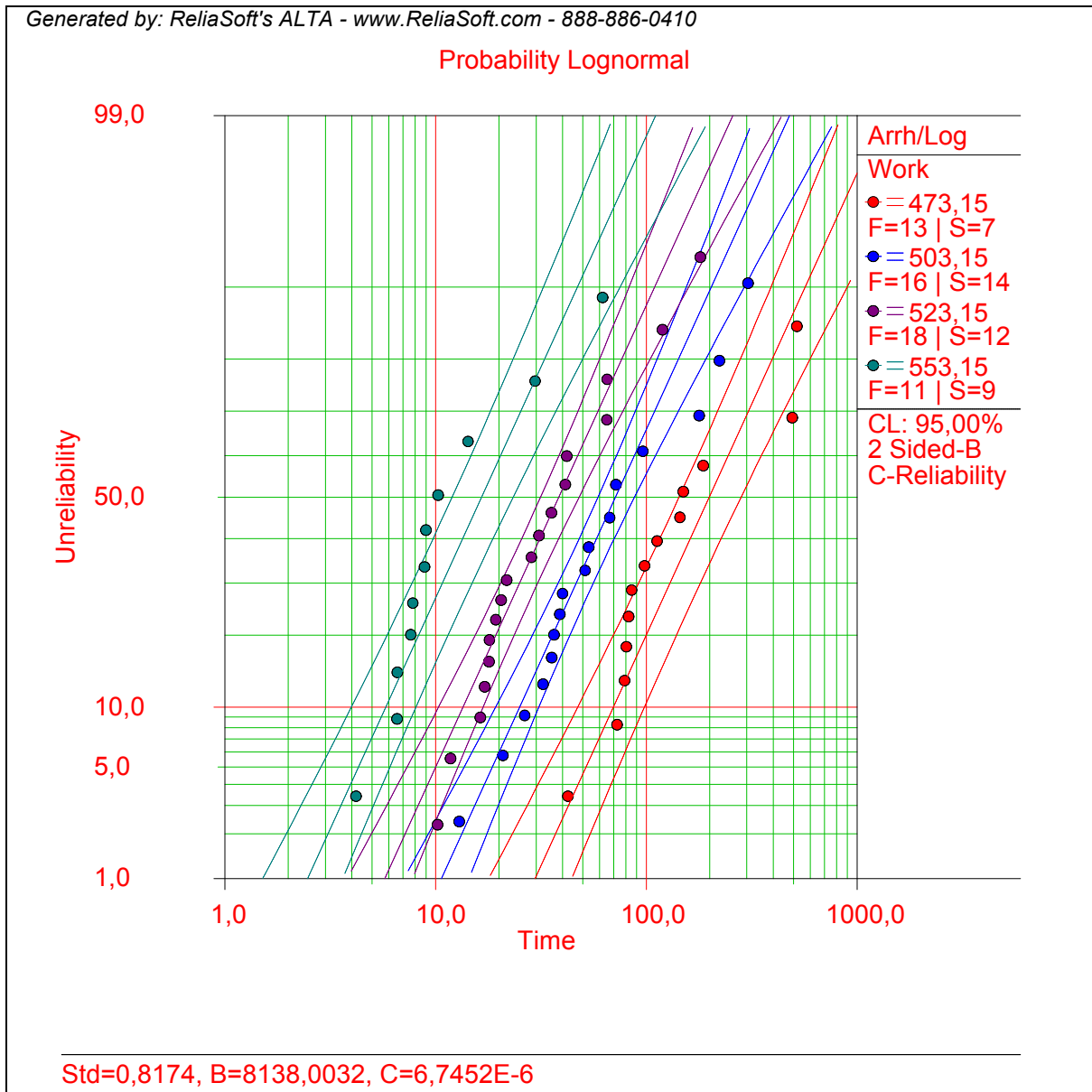


Bild 37 Log Normal Wahrscheinlichkeitsplot der Messdaten vom LS₁₂.

In Folge der größeren Standard-Abweichung bei der Struktur LS₁₂ wird sich die untere Grenze des Vertrauensbereichs in Richtung kürzerer auf Betriebsbedingungen extrapolierte Lebensdauern verschieben. Trotz der größeren Standard-Abweichung bei den Teststrukturen LS₁₂ ist der *Log-Normal* Fit auch hier noch akzeptabel.

Die Extrapolation auf Betriebsbedingungen mit den unter Belastung ermittelten Lebensdauern erfolgt mit der Arrhenius-Lognormal Lebensdauer-Stress-Beziehung, deren Parameter mit der Maximum-Likelihood-Methode ermittelt wurden. Als Betriebstemperatur wurde 100°C definiert. Im Allgemeinen tritt bei häufig schaltenden mikroelektronischen Schaltungen eine Betriebstemperatur von ca.

70-125°C auf. Die graphische Darstellung der im Folgenden präsentierten Ergebnisse erlaubt jedoch das Ablesen der Lebensdauer für den Bereich von 70°C bis zu den Belastungstemperaturen. Der Betriebsstrom wird mit 2,5 mA veranschlagt. Die Annahme dieses Wertes begründet sich durch die maximal zulässigen Ströme in den Leitbahnen des Prozesses B bei Verwendung der kleinstmöglichen entwurfsregelkonformen Abmessungen.

Bild 38 und Bild 39 repräsentieren die Arrhenius-Log-Normal Plots für die Teststrukturen LS₁₀ und LS₁₂. Der Stressparameter, hier die Temperatur in Kelvin, ist auf der X-Achse aufgetragen.

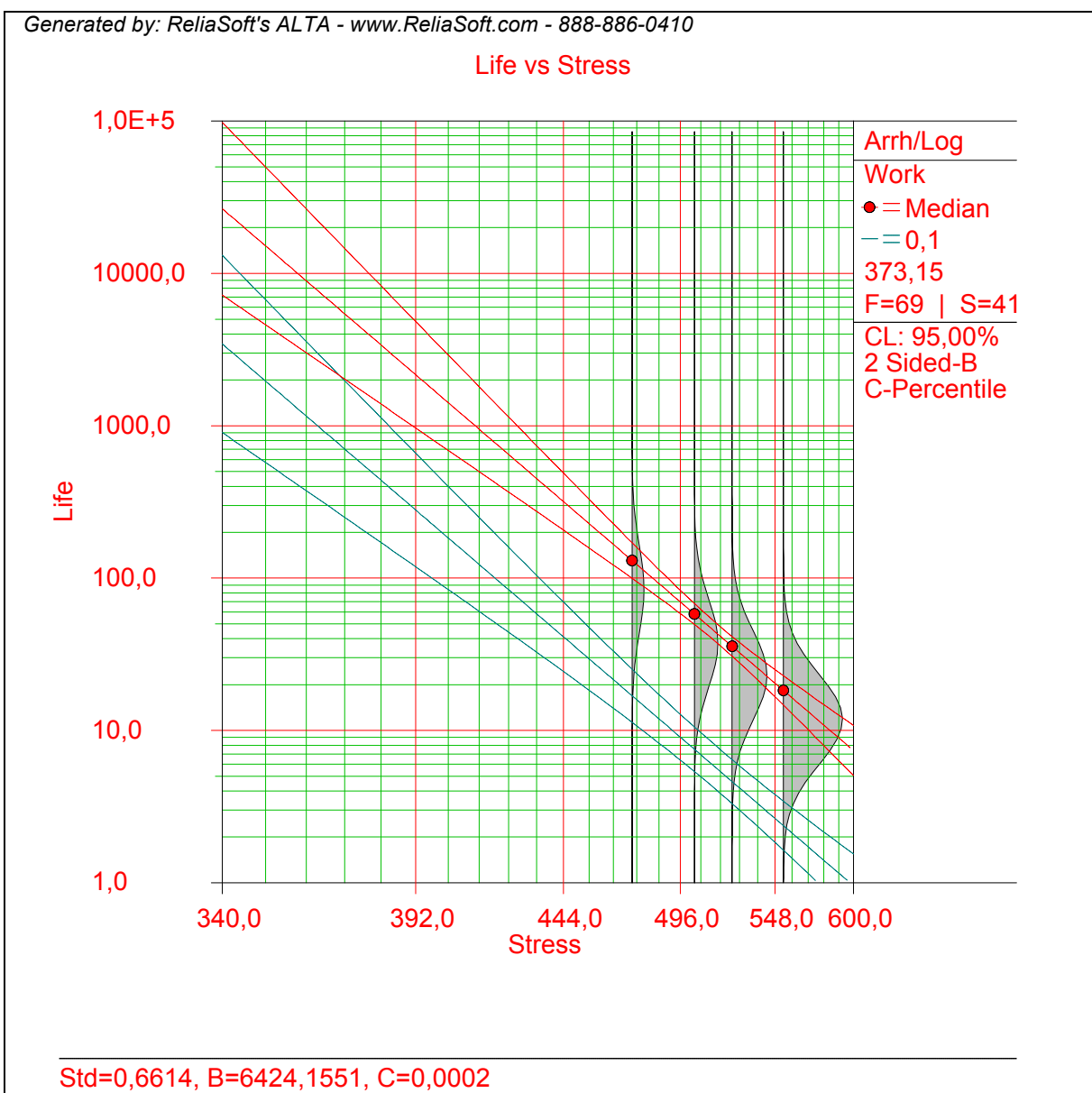


Bild 38 Arrhenius-Lognormal Plot für die Teststruktur LS₁₀.

Die Lebensdauer in Stunden wird durch die Y-Achse beschrieben. Die bei den Temperaturen 200°C, 230°C, 250°C und 280°C überlagerten Kurven sind die errechneten *Log-Normal* Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, durch welche die Fehlerverteilung für die entsprechenden Stress-Level visualisiert wird. Für jeden Stress-Level wurde t_{50} explizit als Punkt eingetragen. Die obere diagonal verlaufende Linie stellt die Extrapolation der Werte für t_{50} auf Betriebsbedingungen dar. Die Extrapolation für $t_{0,1}$ wird durch die untere Linie repräsentiert. $t_{0,1}$ wird als die Zeit definiert zu der 0,1 % aller Strukturen ausgefallen sind. Diese Definition gilt analog für t_{50} . Die Grenzen des 95-prozentigen Vertrauensbereichs werden durch die gestrichelten Linien, welche die durchgezogenen Linien der Extrapolation noch oben und unten einfassen, wiedergegeben. Die Extrapolationen in den Graphiken zeigen jedoch nur die Ergebnisse der beschleunigten Lebensdaueruntersuchungen, welche aus der erhöhten Temperaturbelastung resultieren. Die Strombeschleunigung wird anschließend mit Hilfe des aus der Black'schen Gleichung ermittelten Strombeschleunigungsfaktors (Gl. 22) berücksichtigt.

Die Auswertung des Arrhenius-Lognormal Plots aus Bild 38 liefert für die Teststruktur LS₁₀ für $t_{0,1} = 641,9$ h bei einer Betriebstemperatur von 100°C. Wird nun der Strombeschleunigungsfaktor

$$a_j = \left(\frac{50}{2,5}\right)^2 = 400$$

berücksichtigt, ergibt sich eine Lebensdauer unter Betriebsbedingungen von

$$t_{0,1_{\text{Betrieb}}} = 29 \text{ a.}$$

Die Berechnung der Lebensdauer $t_{0,1_{\text{Betrieb}}}$ an der unteren Grenze des 95%-Konfidenzintervalls ergibt eine Zeit von $t_{0,1_{\text{Betrieb}}} = 12,5$ a. Die Lebensdauer von 12,5 Jahren entspricht 9,13 FIT (Failure-in-Time). Die Zeiten für t_{50} am unteren Rand des Vertrauensbereichs sind im einzelnen der Tabelle 8 zu entnehmen.

Temperatur [°C]	100	200	230	250	280
t_{50}	2.196,92	104	50,82	31,44	15,18

Tabelle 8 Mittlere Lebensdauern für die Temperaturen von 200°C - 280°C und der extrapolierte Wert von t_{50} für 100°C der Struktur LS₁₀.

Des Weiteren gibt der Arrhenius-Plot (Bild 38) Aufschluss über die Aktivierungsenergie der Teststruktur LS_{10} . Sie kann mit Hilfe der (Gl. 16) und dem ermittelten Parameter $B=6424,1551$ zu $E_A = 0,5536$ eV bestimmt werden [49].

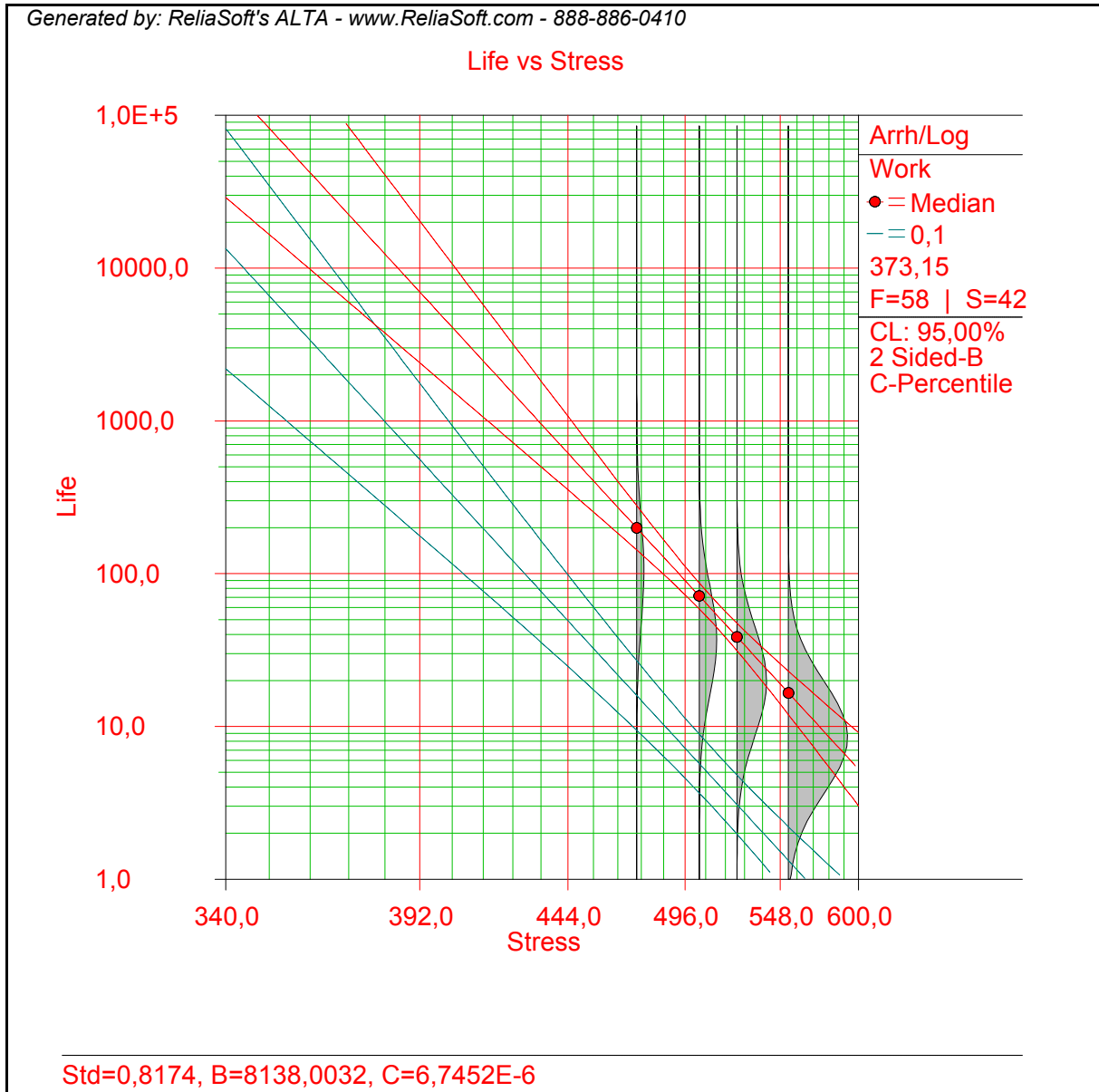


Bild 39 Arrhenius-Log-Normal-Plot für die Teststruktur LS_{12} .

Für die Teststruktur LS_{12} ergibt sich nach der Interpretation des Arrhenius-Plots in Bild 39 für $t_{0,1}$ ein Wert von 1597,3 h. Bei Berücksichtigung des Strombeschleunigungsfaktors von

$$a_j = \left(\frac{60}{2,5}\right)^2 = 576$$

ergibt sich eine Lebensdauer unter Betriebsbedingungen von

$$t_{0,1_{\text{Betrieb}}} = 105 \text{ a.}$$

Die Berechnung der Lebensdauer $t_{0,1_{\text{Betrieb}}}$ an der unteren Grenze des 95%-Konfidenzintervalls ergibt für LS₁₂ eine Zeit von $t_{0,1_{\text{Betrieb}}} = 33,42 \text{ a.}$

Temperatur [°C]	100	200	230	250	280
t_{50}	6.735,18	150,33	60,53	32,32	12,56

Tabelle 9 Mittlere Lebensdauern für die Temperaturen von 200°C - 280°C und der extrapolierte Wert von t_{50} für 100°C der Struktur LS₁₂.

Die Umrechnung dieser Lebensdauer in FIT ergibt 3,42 FIT. Die Zeiten für t_{50} sind im Einzelnen der Tabelle 9 zu entnehmen. Für LS₁₂ wurde mit $B = 8138,0032$ die Aktivierungsenergie E_A zu 0,7 eV berechnet.

Die Aufbereitung der temperaturabhängigen Ergebnisse aus den Arrhenius-Plots und die Überführung in eine Form, welche vom Belastungsstrom abhängig ist, unter Berücksichtigung von (Gl. 22), ist in den Diagrammen aus Bild 40 und Bild 41 erfolgt. Die Diagramme zeigen die Abhängigkeit von $t_{0,1}$ der Strukturen LS₁₀ und LS₁₂ vom Belastungsstrom für die drei typischen Betriebstemperaturen 70°C, 100°C und 125°C. Den Diagrammen kann entnommen werden, bei welchem Belastungsstrom $t_{0,1} > 10 \text{ a}$ ist. Diese Bedingung entspricht ungefähr einer Fehlerrate $\leq 10 \text{ FIT}$. In der Literatur werden 10 FIT als wünschenswert für Halbleiterbauelemente angegeben [50]. Dieser Wert wird von beiden Teststrukturen für jede der drei Temperaturen bei Betriebsströmen $< 1,8 \text{ mA}$ erreicht. LS₁₀ überschreitet die zulässige Fehlerrate von 10 FIT bei einem Belastungsstrom von 2,8 mA und einer Betriebstemperatur von 100°C. LS₁₂ hingegen erreicht die 10 FIT Grenze erst bei einem Strom von 4,5 mA und 100°C (Bild 41). Diese erheblichen Unterschiede im möglichen Belastungsstrom begründen sich in erster Linie durch die Anwendung von unterschiedlich großen Laserspots während der Laserprozessierung. So wurde LS₁₂ mit einem Laserspot mit den Dimensionen $7 \times 7 \text{ } \mu\text{m}^2$ bearbeitet, LS₁₀ jedoch nur mit einem $6 \times 6 \text{ } \mu\text{m}^2$ messenden. Im Kapitel 6.4 wurde die Abhängigkeit des Kontaktwiderstandes von der Größe des Laserspots erläutert und modelliert.

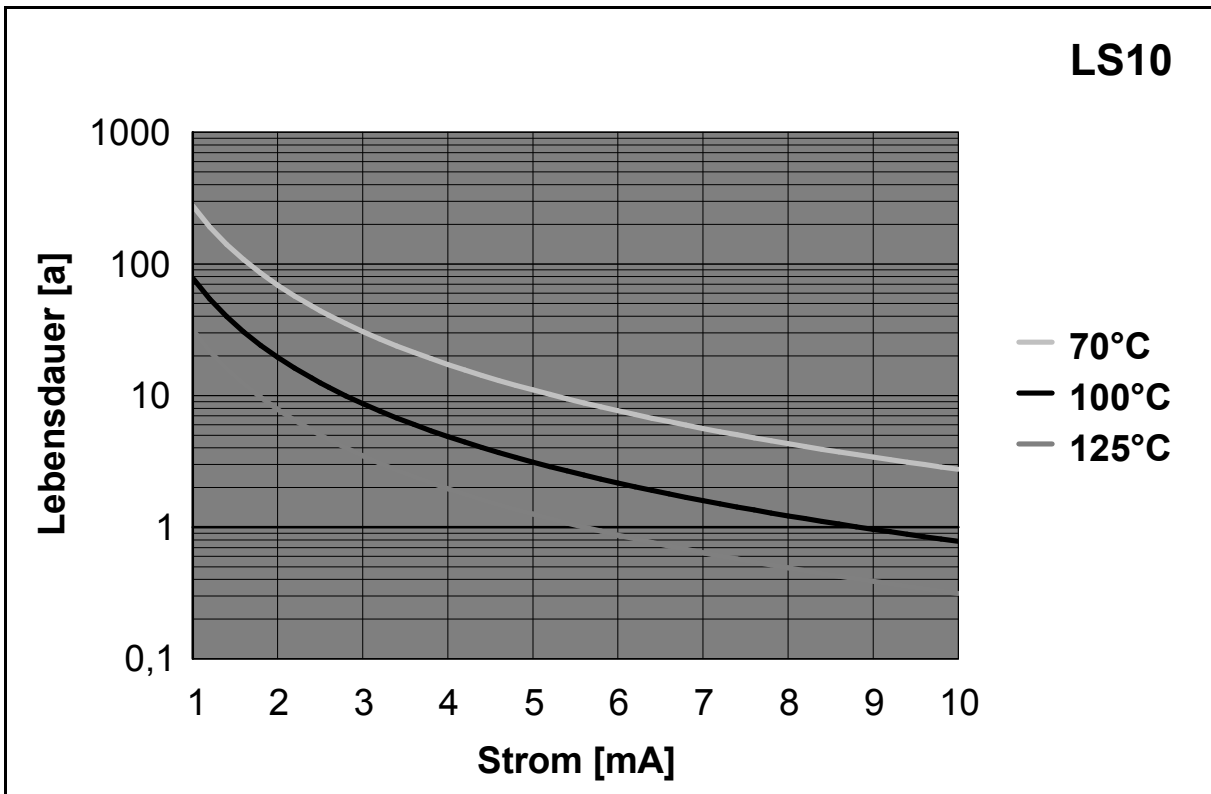


Bild 40 Die Lebensdauer $t_{0,1}$ von LS₁₀ in Abhängigkeit von der Höhe des Betriebsstroms.

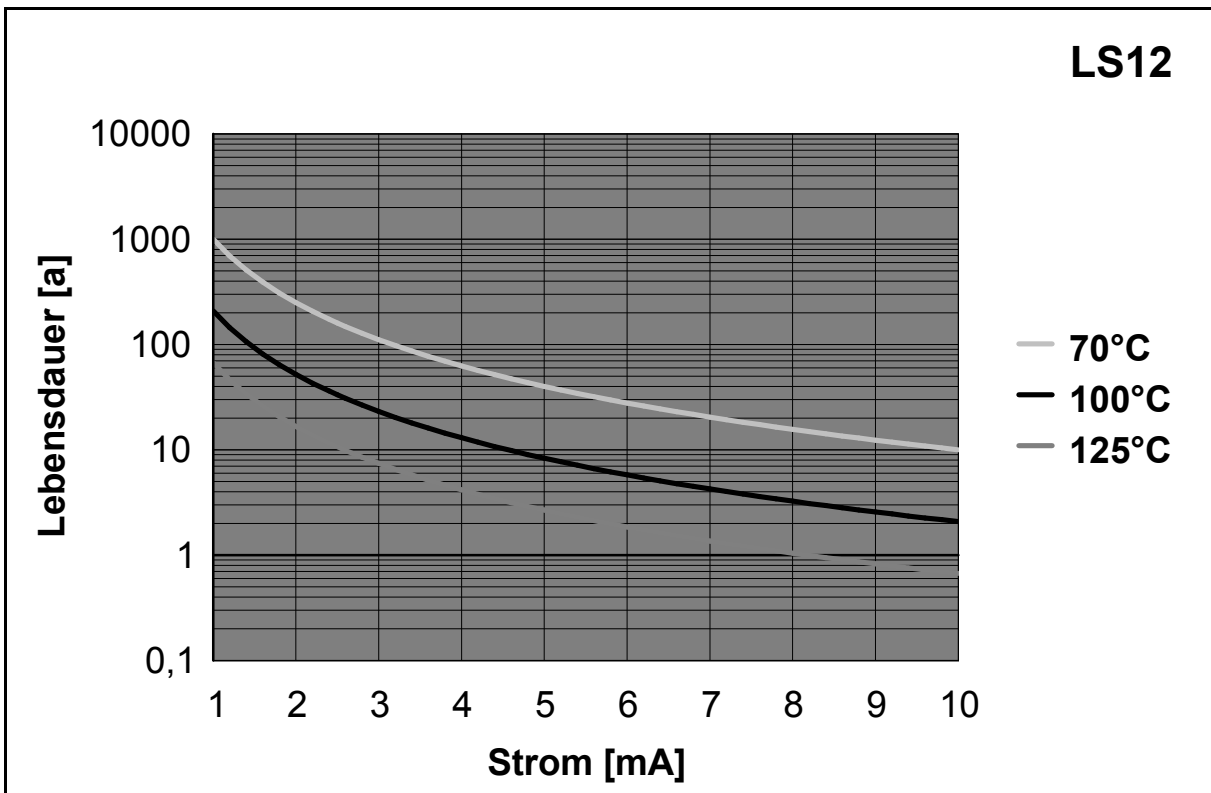


Bild 41 Die Lebensdauer $t_{0,1}$ von LS₁₂ in Abhängigkeit von der Höhe des Betriebsstroms.

Da die Höhe des Kontaktwiderstandes von der Größe des leitenden Querschnitts in der Kontaktstruktur geprägt wird, ist nun auch klar ersichtlich, warum die Lebensdauer von LS_{10} geringer ist als die von LS_{12} . Der kleinere leitende Querschnitt in Struktur LS_{10} führt zu größeren Stromdichten im Kontakt selbst, was wiederum zu einer Verkürzung der Lebensdauer führt. Eine genaue Bestimmung des leitenden Querschnitts ist leider nicht möglich, da die Kontaktformierung mit Hilfe des Lasers zu eher zufällig verteilten Metallablagerungen führt. Die Kontaktformierung selbst ist zwar mit Hilfe der ermittelten Parameter 100% zuverlässig, jedoch lassen sich keine genauen Aussagen über die Materialverteilung und die Geometrie des formierten Kontaktes machen. Lediglich eine rückwirkende Betrachtung der Geometrie mit Hilfe der messtechnisch ermittelten Widerstände ist möglich. Darauf beruht auch das Modell aus Kapitel 6.4.

8 Implementierung der Laserumschalter

Eines der größten Probleme bei der Herstellung von großflächig integrierten mikroelektronischen Schaltungen ist die sehr geringe Ausbeute bei der Fabrikation. Dies führt zu unwirtschaftlichen Produktkosten. Die Hauptursache für Ausbeuteeinbußen sind die zufällig verteilten Fehler bei der Halbleiterherstellung, die unter anderem zu fehlendem Material oder zu Kurzschlüssen zwischen benachbarten Leitbahnen führen können. Wird von einer Fehlerdichte von $1-2 \frac{\text{Defekten}}{\text{cm}^2}$ ausgegangen, ist leicht vorstellbar, dass die Wahrscheinlichkeit mit wachsenden Chipgrößen abnimmt, fehlerfreie Chips zu fertigen. Auch in zukünftigen Technologien werden hier keine einschneidenden Verbesserungen erwartet. Die minimalen Strukturgrößen in zukünftigen Technologien werden weiter abnehmen und die Anzahl der Transistoren pro Chip werden zunehmen, aber die Chipfläche bleibt weitestgehend konstant oder nimmt in geringem Maße sogar noch zu [51], so dass sich die Ausbeute weiter verringern wird. Aus diesem Grund sind gerade auch für *Large Area Integrated Circuits* (LAIC) defekttolerante Designs erforderlich, durch welche sich die Ausbeute steigern lässt und die Herstellung wirtschaftlicher wird. Eine typische Strategie in defekttoleranten Designs ist die Integration von Ersatzsystemen, die kritische Komponenten im Fehlerfall ersetzen. Dies können Speichermodule, Logikkomponenten oder Bussysteme sein.

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Laserumschalter eignen sich zur Rekonfiguration von Bussystemen, zum Umschalten zwischen einer defekten Logikkomponente und deren Ersatzsystem, zur Konfiguration statischer Signale und zur Speicherung von Konfigurationsdaten. Im Folgenden werden einige Anwendungsbeispiele für den Laserumschalter vorgestellt, durch welche sich die Ausbeute von großflächigen mikroelektronischen Schaltungen verbessern lässt. Zunächst werden die Möglichkeiten präsentiert, die sich aus einer Integration der Laserumschalter in ein Bussystem ergeben. Im Anschluss daran folgt die Erläuterung, wie mit Hilfe von zwei Laserumschaltern eine defekte Konfigurationslogik repariert werden kann. Abschließend wird eine Speicherzelle vorgestellt, in der die Information in einen Laserumschalter abgelegt wird.

8.1 Die Busrekonfiguration mit Laserumschaltern

In diesem Kapitel soll näher auf die Möglichkeiten der Busrekonfiguration eingegangen werden. In allen drei Vorschlägen für ein defekttolerantes Bussystem (Bild 42a-c) wird Metall $n+2$ als Verdrahtungsebene für die Ersatzbusleitungen verwendet. Die Signalleitungen des primären Bussystems sind in Metall $n+1$ für Bild 42a-b und in Metall n für Bild 42c geführt. Bild 42a stellt prinzipiell den Vorschlag eines rekonfigurierbaren Bussystems aus [52] dar. Dieses redundante Bussystem verwendet die vertikalen Laserkontakte, welche in Kap. 2.3 vorgestellt wurden. Die lateralen Abmessungen dieser Kontakte betragen $14 \times 14 \mu\text{m}^2$. Die Reparatur einer defekten Leitung nach dem Vorschlag aus Bild 42a erfordert die Prozessierung von zwei Laserkontakten und vier Lasertrennern. Im ersten Bearbeitungsschritt wird der defekte Abschnitt der Signalleitung unter Verwendung von zwei Lasertrennern aus dem primären Bussystem heraus getrennt. Der Aufbau des Bypasses erfolgt im zweiten Schritt durch die Bearbeitung von zwei Laserkontakten, die das primäre Bussystem mit dem Redundanten verbinden. Im letzten Prozessschritt wird der als Bypass dienende Teil der redundanten Leitung durch Prozessierung von zwei Lasertrennern vom Rest des Ersatzsystems abgetrennt. Dieses Vorgehen ermöglicht die weitere Nutzung der Ersatzleitung zur Reparatur von Fehlern in anderen Bereichen des primären Bussystems.

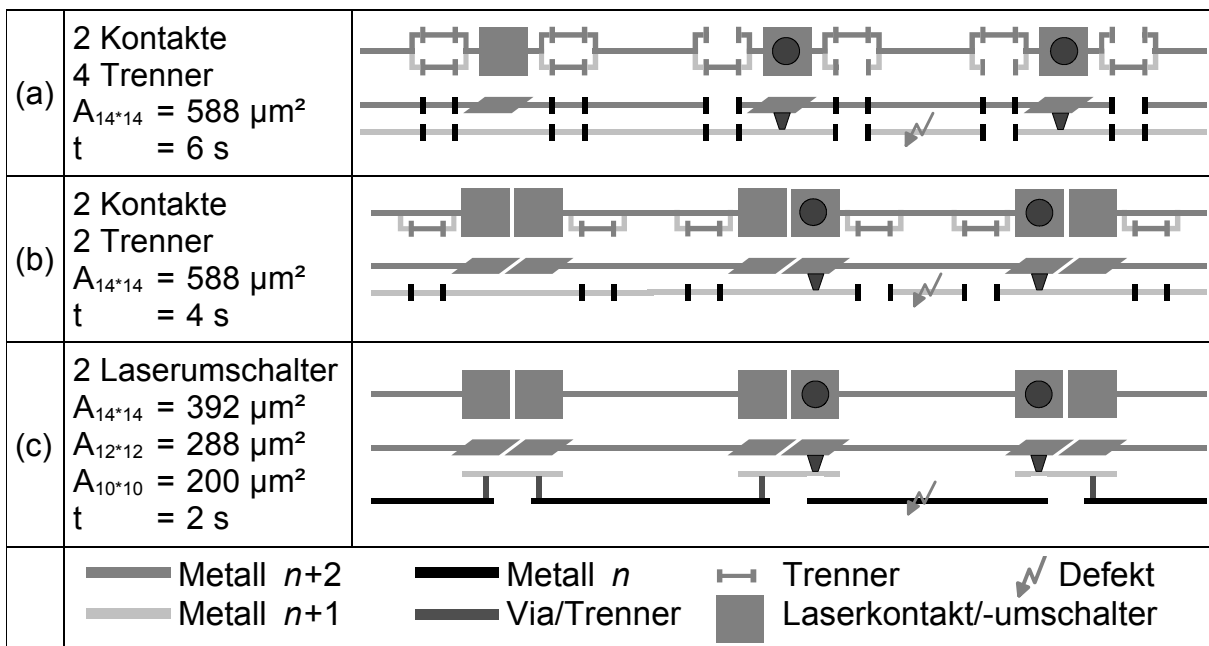


Bild 42 Schematische Darstellung defekttoleranter Bussysteme, beispielhaft für eine Leitung.

Der gesamte Zeitbedarf für die automatische Positionierung des Chips unter dem Laser und die Prozessierung dieses Vorschlages beträgt ca. 6s. Die erforderliche Bearbeitungszeit ist abhängig von der Länge des Fahrweges, der Geschwindigkeit des Positioniersystems und der Leistungsfähigkeit der Bildverarbeitung. Die reine Laserbearbeitungszeit beträgt weniger als 0,5 s. Sie resultiert aus der Pulsfolgefrequenz und der Pulsdauer.

Der eben beschriebene Bearbeitungsvorgang und dessen Zeitbedarf soll als Vergleichswert für die folgenden Betrachtungen dienen. Bild 42b zeigt einen ähnlichen Vorschlag wie in Bild 42a. Der Unterschied besteht in der vorseparierten redundanten Leitung. Dieses Layout reduziert die Anzahl der Bearbeitungsstellen um zwei Lasertrenner und verringert die Bearbeitungszeit pro Konfigurationsblock um 33 % bzw. 2 s. Der Flächenbedarf wird jedoch auf Grund der zusätzlichen Integration von zwei Laserkontakten nicht reduziert.

Werden hingegen die Laserumschalter für die Konfiguration des Bussystems eingesetzt, lassen sich die Anzahl der Bearbeitungsschritte und der Flächenbedarf weiter reduzieren. Bild 42c zeigt die schematische Darstellung einer möglichen Integration der Laserumschalter. In diesem Beispiel sind für die Reparatur einer Signalleitung nur noch zwei Laserumschalter notwendig. Der fehlerhafte Bereich des primären Bussystems wird durch die Prozessierung von zwei Laserumschaltern überbrückt. Bei der Laserbearbeitung eines Laserumschalters wird gleichzeitig eine elektrische Verbindung aufgebaut und eine andere an definierter Stelle unterbrochen. Dies setzt die Bearbeitungszeit um weitere 2 s herab. Die Anwendung der Laserumschalter verringert die Bearbeitungszeit um 66 % und reduziert den Flächenbedarf um 33 %. Die prozentuale Angabe für die Verringerung des Platzbedarfs bezieht sich auf Bild 42a. Die hier implementierten Laserkontakte haben eine Größe von $14 \times 14 \mu\text{m}^2$. Da im Rahmen dieser Arbeit die lateralen Abmessungen der Laserumschalter erheblich reduziert werden konnten, ergibt sich eine zusätzliche Platzersparnis, wenn Laserumschalter der Größe $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ eingesetzt werden. Es ist eine theoretische Flächenreduktion von 65 % zu erwarten. Die Werte für den Flächenbedarf basieren auf Berechnungen, die lediglich die Geometrien der Bauelemente berücksichtigen. Bedingt durch die Designrestriktionen und den Flächenzuwachs durch die Verdrahtung führt die Integration von $14 \times 14 \mu\text{m}^2$ Laserumschaltern lediglich zu einer Flächenreduktion von 20 %. Vorsichtige Schätzungen für den Einsatz von $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ Laserumschalter in

Konfigurationsmatrizen ergeben eine Platzersparnis von 35-40 %. Dies ist jedoch noch durch ein reales Layout zu bestätigen.

8.2 Überschreiben statischer Konfigurationssignale

Eine weitere interessante Applikation der Laserumschalter ist die Implementierung in defekttoleranten statischen Konfigurationsschaltungen. Moderne mikroelektronische Schaltungen verfügen häufig über Schaltungsmodule, mit deren Hilfe sich ein Chip selbst konfiguriert. Diese Selbstkonfiguration ist abhängig von der Umgebung, in der die Gesamtschaltung eingesetzt wird und erfolgt in der Regel nur einmal im Verlauf der Initialisierung [53]. Fehler in der statischen Konfigurationslogik führen zu einem Totalausfall des Chips. Die Integration von Laserumschaltern in statischer Konfigurationslogik ermöglicht das statische Setzen der Konfigurationsinformationen für eine bestimmte Arbeitsumgebung.

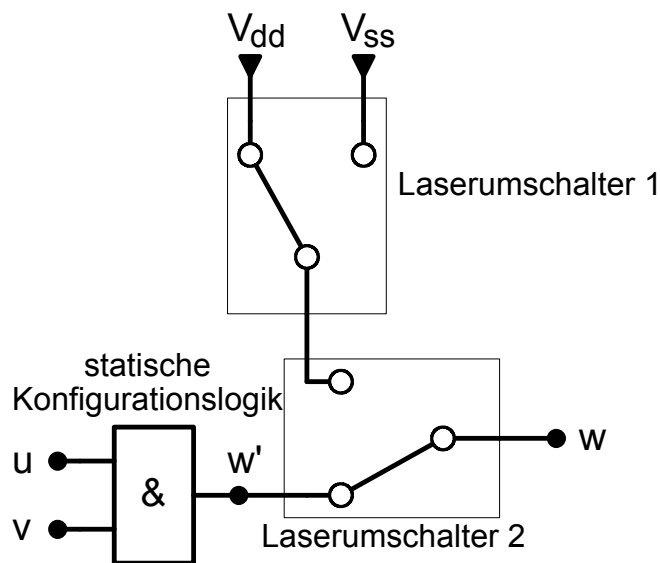


Bild 43 Anordnung der Laserumschalter zum Überschreiben statischer Konfigurationssignale.

Bild 43 zeigt beispielhaft die Anordnung von zwei Laserumschaltern zur Korrektur eines fehlerhaften Ausgangssignals einer statischen Konfigurationslogik. Weist der Ausgang w' der statischen Konfigurationslogik einen fehlerhaften Wert auf, so kann mit Hilfe der Laserumschalter 1 und 2 das fehlerbehaftete Signal w' überschrieben

werden. Am Ausgang w liegt nach der Bearbeitung der beiden Laserumschalter ein definiertes Potential.

8.3 Die *L*PROM-Zelle

Ebenfalls ist die Implementierung der Laserumschalter in kleinen *PROM*-Feldern denkbar. Die sich ergebenden *L*PROM Zellen (Bild 44) eignen sich zur dauerhaften Speicherung von Konfigurationsdaten.

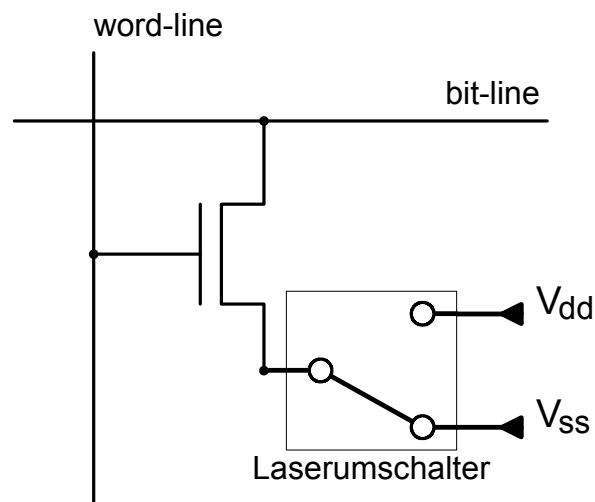


Bild 44 Schematische Darstellung einer *L*PROM-Zelle.

Das zu speichernde Bit wird über den Bearbeitungsstatus der Laserumschalters festgelegt und kann über die Bit-Line ausgelesen werden.

9 Diskussion

In dieser Arbeit wurde ein neuartiger Laserumschalter entwickelt. Er besteht aus einer Laserkontakt- und einer Lasertrennstruktur, die beide platzsparend vertikal in einem Bauelement vereint wurden. Dieses neue Bauelement ermöglicht erstmals das gleichzeitige Kontaktieren und Trennen von Leitbahnen in mikroelektronischen Schaltungen mit dem Excimer-Laser. Der Laserumschalter ist prädestiniert für den Einsatz in großflächig integrierten mikroelektronischen Schaltungen zur Rekonfiguration und Reparatur von Defekten mit dem Ziel der Ausbeutesteigerung.

Alle in der Vergangenheit entwickelten Bauelemente sind lediglich in der Lage, unter Verwendung eines Lasers eine leitende Verbindungen aufzubauen oder zu unterbrechen. Für jede dieser Teilaufgaben war ein gesondertes Bauelement erforderlich. Erstmals wurde ein Laserkontakt und ein Lasertrenner in einem Bauelement vereint. Das Ergebnis dieser Entwicklung ist der in dieser Arbeit präsentierte Laserumschalter.

Vergleichende Untersuchungen der Laserkontaktstruktur im Laserumschalter mit den am Anfang dieser Arbeit erläuterten Laserkontaktierungsverfahren zeigen eindeutig, dass die Laserumschalter interne Kontaktstruktur absolut konkurrenzfähig ist. Die hier erreichten hervorragenden Widerstandswerte für LS_{10} und LS_{12} von $R_m = 0,1 \Omega$ unterschreiten die Werte der alternativen Verfahren.

Das Verfahren der lasergestützten Diffusion von Dotierstoffen stellt sich auf Grund des hohen Kontaktwiderstandes von 100Ω und der langen Bestrahlungszeiten von einigen Mikrosekunden als ungeeignet für den Einsatz in mikroelektronischen Schaltungen dar. Alle anderen Verfahren verwenden kurze Pulse im Nanosekundenbereich zur Formierung der leitenden Verbindung. Dies erlaubt die Prozessierung einer großen Anzahl von Laserstrukturen in adäquater Zeit.

Der Kontaktwiderstand der lasergestützten Legierung von Aluminium und Silizium beträgt $1-10 \Omega$. Der laterale Laserkontakt nach Bernstein et al. und der vertikale Laserkontakt nach Hartmann et al., bestehend aus zwei Metalllagen, weisen einen Kontaktwiderstand $\lesssim 3 \Omega$ auf.

Eine adäquate Alternative zu der hier vorgestellten Laserumschalter internen Kontaktstruktur stellt der vertikale Laserkontakt nach Bernstein et al. dar. Diese

Strukturen konnten mit einem mittleren Widerstand von $0,8 \Omega$ zuverlässig prozessiert werden.

Maßgeblich für das Widerstandsverhalten der Laserumschalter internen Kontaktstruktur ist die Menge des für die Kontaktformierung zur Verfügung stehenden Materials. Je größer das zur Verfügung stehende Materialvolumen ist, desto geringer wird der Kontaktwiderstand sein. Bestimmend für das Materialvolumen ist zum einen die Schichtdicke der als Reservoir verwendeten Metalllage und zum anderen die Größe des Laserspots. Diese Aussage wird durch den Vergleich der Untersuchungsergebnisse von den Laserumschaltern der ersten und zweiten Generation und durch das entwickelte Widerstandsmodell bestätigt. Die Schichtdicke der als Reservoir dienenden Metalllage der Strukturen LS_1 und LS_2 beträgt 680 nm (Prozess A). Trotz des größer gewählten Laserspots von $9 \times 9 \mu\text{m}^2$ betragen die mittleren Widerstände für LS_1 $1,7 \Omega$ und für LS_2 $1,8 \Omega$. Die Laserumschalter LS_{10} und LS_{12} , die in einer Technologie gefertigt wurden, in der die Schichtdicke des Reservoirs 1030 nm beträgt, weisen einen mittleren Widerstand von $0,14 \Omega$ bzw. $0,07 \Omega$ auf. Auf Grund der Schichtdickenzunahme im Prozess B ist eine deutliche Verringerung des Kontaktwiderstandes zu erkennen. Die Unterschiede zwischen den Widerständen von LS_{10} und LS_{12} begründen sich durch die unterschiedliche Größe der verwendeten Laserspots. Der Einfluss der Spotgröße auf den elektrischen Widerstand beinhaltet wiederum auch ein großes Potenzial bzgl. der Adaptation des Laserprozesses an verschiedenen Halbleitertechnologien. So besteht die Möglichkeit, Schichtdickenschwankungen, die sich auf den Widerstand auswirken, durch Variation der Spotgröße zu kompensieren, um einen optimalen Widerstand zu erzielen.

Die Geometrie der Laserumschalter internen Trennstelle konnte mit Hilfe der Ergebnisse von LS_1 und LS_2 optimiert werden. Es hat sich klar heraus kristallisiert, dass die Dimensionen des integrierten Vias und die Breite der Leitbahn auf die das Via aufsetzt, erheblichen Einfluss auf das Verhalten der Trennstruktur haben. So wurden die anfänglich $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ und $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ großen Vias auf eine Größe von $0,4 \times 0,4 \mu\text{m}^2$ verkleinert. Die Bearbeitung dieser Laserumschalter internen Trennstelle unter Verwendung optimaler Laserprozessparameter konnte so mit sehr guter Zuverlässigkeit durchgeführt werden. Ebenfalls sind die lateralen Abmessungen des

Vias ein begrenzender Faktor für die weitere Strukturverkleinerung. Die Dimensionen des Vias bestimmen die erforderliche Fläche des Laserspots und damit die Gesamtgröße des Laserumschalters. Damit das Via ordnungsgemäß von Metall $n+1$ getrennt wird, muss der Laserspot sehr viel größer sein als das Via. Auf diese Weise wird ein ausreichend großer Sicherheitsabstand zwischen dem Via und Metall $n+1$ geschaffen, der nicht durch Metallresiduen überbrückt werden kann. Da jedoch in zukünftigen Technologien die Strukturverkleinerung weiter fortschreiten wird und damit auch die der Vias, ist ebenfalls mit einer Verkleinerung der Laserumschalter zu rechnen. Grundsätzlich lässt sich die Aussage treffen, dass sich der Flächenbedarf der Laserumschalter zunächst mit der Weiterentwicklung der Halbleitertechnologien weiter reduzieren lässt. Begrenzt wird die Strukturverkleinerung der Laserumschalter lediglich durch den Widerstandsanstieg bei kleiner werdenden Laserspots. Hier sind im Einzelnen jedoch die spezifischen Kontaktwiderstände der Vias des entsprechenden Halbleiterprozesses als Vergleichswerte heranzuziehen, um zu beurteilen, ob eine weitere Verkleinerung der Laserumschalter sinnvoll ist.

Ein weiteres entscheidendes Kriterium zur Beurteilung der Güte der Laserumschalter ist die zu erwartende Lebensdauer dieses Bauelements. Wie alle mikroelektronischen Bauelemente haben auch die Laserumschalter eine begrenzte Lebensdauer. Verantwortlich für das Versagen von Halbleiterbauelementen sind elektrostatische Entladungen, durch elektrische und magnetische Felder eingekoppelte Überspannungen, Fehlbedienung und die Elektromigration. Wird das Bauelement ordnungsgemäß, unter Ausschluss aller zufälligen Fehlermechanismen, eingesetzt, ist eine kontinuierliche Degradation zu beobachten, welche die Lebensdauer begrenzt.

Um die Lebensdauer unter Betriebsbedingungen zu ermitteln, wurden Belastungstests bei erhöhter Temperatur und Stromdichte durchgeführt. Die Lebensdaueruntersuchungen wurden an den Strukturen LS_{10} und LS_{12} vorgenommen. Die Laserumschalter LS_1 und LS_2 wurden nicht in die Lebensdaueruntersuchungen mit einbezogen, da an ihnen nur Voruntersuchungen bezüglich des grundsätzlichen Prozessverhaltens durchgeführt wurden. Die Extrapolation auf Betriebsbedingungen ist sehr vorsichtig erfolgt. So wurden Leitbahnausfälle (ca. 10% aller Fehler) in den Kontaktketten als Fehler in einem Laserumschalter bewertet. Dieses Vorgehen begründet sich durch die Tatsache,

dass elektromigrationsbedingte Ausfälle ihre Ursache in der Loch und Hügel Bildung haben. Die Löcher bzw. die Leitbahnunterbrechungen entstehen durch Materialabtrag. In den Hügel hingegen wird das in den Löchern abgetragene Material abgelagert und führt nicht selten zum Aufbrechen der darüber liegenden dielektrischen Schichten. Diese Brüche ziehen häufig das Bersten der betroffenen Leitbahn nach sich. Die Elektromigration ist in hohem Maße von der Geometrie der Leitbahn abhängig. Der Ausfallort muss nicht zwingend mit dem Ort der Elektromigrationsursache identisch sein. So besteht die Möglichkeit, dass ein Laserumschalter selber in Takt bleibt, aber die Ursache für den Fehler ist. Folglich wurden alle Ausfälle in der Kontaktkette als fehlerhafter Laserumschalter bewertet.

Die Betriebszuverlässigkeit der Laserumschalter LS_{10} und LS_{12} hat sich als sehr gut erwiesen. Die extrapolierten Lebensdauern der Strukturen betragen an der unteren Grenze des 95%-Konfidenzintervalls für LS_{10} 12,5 Jahre und für LS_{12} 33,42 Jahre. Innerhalb der angegebenen Zeitspannen sind 0,1 % der Laserumschalter ausgefallen. Als Betriebsbedingungen für die Extrapolation wurde eine Temperatur von 100°C und ein Strom von 2,5 mA angenommen.

Für beide Strukturen wurde die geforderte 10 FIT-Grenze bei einer Temperatur von 100°C und einem Betriebsstrom von 2,8 mA unterschritten. LS_{12} überschreitet die 10 FIT sogar erst bei einem Strom von 4,5 mA. Der kleinere leitende Querschnitt in der Kontaktstruktur von LS_{10} begründet die verkürzte Lebensdauer, da sich auf Grund des geringeren Querschnitts eine höhere Stromdichte einstellt. Die erhöhte Stromdichte führt zu einer schnelleren Degradation der Laserumschalter internen Kontaktstruktur. Die Abhängigkeit der Lebensdauer vom elektrischen Widerstand wird in [14] belegt.

Der Einsatz der Laserumschalter in Bussystemen mikroelektronischer Schaltungen führt zu einer weiteren Verbesserung der Lebensdauer, da durch den getakteten Betrieb die effektive Belastung reduziert wird [54][55][56].

Insgesamt konnte in dieser Arbeit deutlich gezeigt werden, dass sich die entwickelten Laserumschalter auf Grund ihrer sehr guten elektrischen Eigenschaften, der hohen Prozesssicherheit und der langen Lebensdauer in hohem Maße für den Einsatz in mikroelektronischen Schaltungen eignen. Sie sind prädestiniert für Rekonfigurations- und Reparaturzwecke. Ebenfalls sind Einsatzmöglichkeiten als Teil einer Speicherzelle denkbar.

10 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein neuartiger Laserumschalter entwickelt, der sich in hohem Maße für die Konfiguration und Reparatur von Defekten in mikroelektronischen Schaltungen zur Ausbeutesteigerung eignet. Der entworfene Laserumschalter erlaubt erstmals das gleichzeitige Kontaktieren und Trennen einer Leitbahn. Er entspricht in seinem Verhalten somit einem Umschalter. Dieser Laserumschalter ist kompatibel mit den modernen Standard CMOS-Prozessen, welche über mehr als drei Metalllagen verfügen. Die Integration der Laserumschalter erfordert keine zusätzlichen Prozessschritte im Halbleiterprozess.

Die vertikale Anordnung einer Laserkontaktstruktur und einer Trennstruktur in diesem neuen Laserumschalter führt zu einer erheblichen Flächen- und Bearbeitungszeitreduktion. Der Vergleich zweier Konfigurationsmatrizen, wobei eine durch eine Zwei-Bauelement-Lösung und die andere durch die Integration von Laserumschaltern, deren laterale Abmessungen denen der Laserkontakte entsprechen, verwirklicht wurde, zeigt, dass der Flächenbedarf um 20 % und der Zeitbedarf um 66 % reduziert werden konnte. Wird die zusätzliche Verkleinerung der Laserumschalter ebenfalls berücksichtigt, ist eine Reduktion des Flächenbedarfs um 35-40 % erzielbar.

Im Rahmen der Untersuchungen konnte ein Energieintervall von 24-30 J/cm² bestimmt werden, in dem die Prozessierung des neuen Laserumschalters mit drei Pulsen zuverlässig funktioniert. Der elektrische Widerstand der internen Kontaktstruktur aller mit optimalen Prozessparametern prozessierten Laserumschalter ist deutlich kleiner als 1 Ω. Für LS₁₀ konnte ein mittlerer Widerstand von $R_m = 0,14 \Omega$ ermittelt werden. Der mittlere Widerstand von LS₁₂ beträgt 0,07 Ω. Diese Widerstandswerte sind deutlich kleiner, als die der alternativen Kontaktierungsverfahren, welche zu Beginn dieser Arbeit vorgestellt wurden.

Zur Durchführung von konventionellen beschleunigten Lebensdaueruntersuchungen wurden die in Ketten angeordneten Teststrukturen Belastungen durch Strom und Temperatur ausgesetzt. Dabei wurden Stromdichten von 1,25 - 1,5 MA/cm² und Temperaturen von 200 - 280°C verwendet. Die Ergebnisse der Belastungstest wurden auf Betriebsbedingungen extrapoliert. Als Betriebsbedingungen sind eine

Temperatur von 100°C und ein Strom von 2,5 mA definiert worden. Die extrapolierten Lebensdauern $t_{0,1}$ der Laserumschalter betragen an der unteren Grenze des 95%-Konfidenzintervalls für LS_{10} 12,5 Jahre und für LS_{12} 33,42 Jahre. Beide für diese Laserumschalterstruktur ermittelten Ergebnisse unterschreiten die in der Literatur [50] geforderte 10 FIT-Grenze.

Als Werkzeug zur Bearbeitung der Laserumschalter wurde der ebenfalls entwickelte Laserkonfigurationsautomat eingesetzt. Er besteht aus einem Excimer-Laser, der Licht mit 308 nm Wellenlänge bei einer Pulsbreite von 20 ns emittiert, einem optischen Aufbau, einem Positioniersystem, einer Bildverarbeitung, einem Energiemonitor und einem Steuerrechner. Alle Komponenten wurden für die Prozessierung der Laserumschalter optimiert mit dem Ziel, bestmögliche Ergebnisse zu erzielen.

Abschließend ist festzustellen, dass mit dieser Arbeit ein Komplettsystem bereitgestellt wird, welches neben dem neuen Laserumschalter auch das Werkzeug zur Bearbeitung mikroelektronischer Schaltungen beinhaltet.

11 Literaturverzeichnis

- [1] W. Maly, W. R. Moore, A. J. Strojwas, "Yield Loss Mechanisms and Defect Tolerance", Research Report No. CMUCAD-88-18, Carnegie Mellon University, April, 1988
- [2] D. J. Ehrlich, J. Y. Tsao, "A Review of Laser-Microchemical Processing", Journ. Vac. Sci. Techn. B 1, S. 969ff, 1983
- [3] R. M. Osgood, H. H. Gilgen, "Laser Direct Writing of Materials", Ann. Rev. Mat. Sci. 15, S. 549ff, 1985
- [4] G. H. Chapman, "Laser-Linking Technology for RVLS", Wafer Scale Integration, Proc. of a Workshop held in Southhampton, Edited by : C. Jesshope, W. Moore, Published by Adam Hilger, Bristol and Boston, 1986
- [5] G. H. Chapman, J. M. Canter, S.S. Cohen, "The Technology of Laser Formed Interactions for Wafer-Scale Integration", Proc. Intern. Conf. On Wafer Scale Integr., San Francisco, CA, S. 21ff, 1989
- [6] S. S. Cohen, P. W. Wyatt, G. H. Chapman, J. M. Canter, "Laser-Induced Diode Linking for Wafer-Scale Integration", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 35, No. 9, S. 1533ff, September 1988
- [7] T. Hillmann-Ruge, H.-D. Hartmann, " Excimer Laser Formed Vertical Links of Standard CMOS Double Level Metallizations", Proc. Intern. Conf. On Wafer Scale Integr., San Francisco, CA, S. 207ff, 1991
- [8] H.-D. Hartmann, "Laserformierte, vertikale Kontakte für mikroelektronische Schaltungen mit redundanten Elementen", Dissertation, Universität Hannover, 1993
- [9] T. Hillman-Ruge, "Trennen und Kontaktieren von Leitbahnen mit dem Excimerlaser zur Ausbeutesteigerung großflächig integrierter Schaltungen", Dissertation, Universität Hannover, 1994

- [10] J.B. Bernstein, B.D. Colella, "Laser-Formed Metallic Connections Employing a Lateral Link Structure", IEEE Trans. Comp. Pack. and Manuf. Tech., Vol. 18, No. 3, September 1995
- [11] Roy L. Rasera and J. B. Bernstein, "Laser Linking of Metal Interconnect: Linking Dynamics and Failure Analysis", IEEE Trans. on Comp., Pack., and Manuf. Tech., Vol. 19, No. 4, December 1996.
- [12] Y.L. Shen, S. Suresh, and J.B. Bernstein, "Laser Linking of Metal Interconnects: Analysis and Design Considerations", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.43, No.3, March 1996
- [13] J. B. Bernstein, Wei Zhang and Carl H. Nicholas, "Laser Formed Metallic Connections", IEEE Trans. Comp. Pack. and Manuf. Tech., Part B: Advanced Packaging, Vol. 21, No. 2, pp.194, May 1998
- [14] Wei Zhang, Joo-Han Lee, Yuan Chen, Joseph B. Bernstein and John Suehle, "Reliability of Laser-Induced Metallic Vertical Links", IEEE Trans. Advan. Pack., Vol. 22, No. 4, pp.614-619, November 1999
- [15] Wei Zhang, Xiaoyan Xie, Joseph B. Bernstein, "Laser-Formed Vertical Link and Potential Implementation in Digital Logic Integration", Proc. MAPLD, MD, 1999
- [16] O. Mende, D. Niggemeyer, "A multifunctional laser linking and cutting structure for microelectronic circuits", Proc. European Materials Research Soc., Appl. Surf. Sci., Vol. 168, pp. 280-283, December 2000
- [17] F. Kohlrausch, "Praktische Physik", Band III (Tafeln), B. G. Teubner Verlag Stuttgart, 1968
- [18] O. Mende, D. Niggemeyer, "Principle and Application of a Bifunctional Laser Linking and Cutting Structure for Microelectronic Circuits in Standard CMOS-Technology," European Symp. Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis, Microelectronics Reliability, pp. 1437-1442, Elsevier Science Ltd., 2000

- [19] O. Mende, M. Redeker, M. Rudack, D. Treytnar, "A Multifunctional Laser Linking and Cutting Structure for Standard 0.25 μm CMOS-Technology," Proc. IEEE Intl. Symp. on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, pp. 114-122, 2000
- [20] Dr. K. Mann, "Messung von Zerstörschwellen an optischen Oberflächen und Materialien im UV-Spektralbereich", Abschlussbericht, Laser-Laboratorium Göttingen, April 1997
- [21] Robert A. Meyers (Editor), "Encyclopedia of Lasers and Optical Technology", Academic Press, Inc., 1991, ISBN 0-12-226693-5
- [22] Lambda Physik, "Excimer Laser LPX 100 Instruction Manual", Lambda Physik Göttingen, Germany, March 1991
- [23] Laser-Laboratorium Göttingen, "Schrittmotorgetriebener variabler Abschwächer für Laserstrahlung", Bedienungsanleitung, Göttingen, Germany
- [24] LaserProbe Inc., "Rm-3700 Universal Radiometer", Operating Instructions
- [25] LaserProbe Inc., "RjP-700 Series Energy Probes", Operating Instructions
- [26] Daniel J. Ehrlich (Editor), "Laser Microfabrication", Thin Film Processes and Lithography, Academic Press, Inc., 1989
- [27] Leonard Migliore, "Laser Materials Processing", Marcel Dekker, Inc., 1996, ISBN 0-8247-9714-0
- [28] Heinz Haferkorn, "Optik", Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen, Barth Verlagsgesellschaft mbH, 1994, ISBN 3-335-00363-2
- [29] James H. Richardson, "Handbook for the Light Microscope", A User's Guide, Noyes Publications, 1991, ISBN 0-8155-1269-4
- [30] Newport Corporations, "MM3000 Motion Controller/Driver", User's Manual, 1995

- [31] Rolf Bütje, "Abtragen von Metallen mit Excimer-Lasern als Verfahren zur Mikrobearbeitung", Dissertation, Laser Zentrum Hannover e. V., 1992, ISBN 3-18-144802-8
- [32] Aris Christou (Editor), "Electromigration & Electronic Device Degradation", John Wiley & Sons, Inc., 1994
- [33] F. M. D'Heurle, "Electromigration and Failure in Electronics : An Introduction", Proc. of the IEEE, Vol. 59, No. 10, 1971, pp. 409
- [34] J. R. Black, "Aluminium Conductor Failure by Mass Transport", Proc. of 3rd Int. Congr. on Microelec., München, Nov. 1968, pp. 141-162
- [35] J. R. Black, "Physics of Electromigration", Proc. IRPS, Vol. 12, 1974, pp. 142
- [36] Jörg-Oliver Weidner, "Charakterisierung der Zuverlässigkeit von sub- μm AlSiCu/TiN/Ti/n-Si-Kontakten bei hochbeschleunigten Lebensdauertests", Dissertation, Universität Hannover, 1999
- [37] J. R. Black, "Electromigration - A Brief Survey and Some Recent Results", IEEE Trans. ED, Vol. 16, No. 4, 1969, pp. 338
- [38] Roderick A. Augur, "Interface Diffusion During Electromigration in Al Lines", IEEE Proc. IRPS, 1994, pp. 266-273
- [39] Hans-Ulrich Schreiber, "Grundlagen der Elektrodifffusion zur Zuverlässigkeitsverbesserung von Al-Leitbahnen für hochintegrierte Schaltungen", Fortschrittsberichte VDI, Reihe 9, Nr. 54, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1985, ISBN 3-18-145409-5
- [40] W. Hasse, "Verhalten von TaSi₂/n⁺-Polysilizium Leitbahnen bei Belastung mit hohen Stromdichten", Hannover, 1987
- [41] R. W. Pasco, J. A. Schwarz, "Temperature-Ramp Resistance Analysis to Characterize Electromigration", Sol. State Electr., Vol. 26, No. 5, pp. 445, 1983

- [42] C. C. Hong, D. R. Crook, "Breakdown Energy of Metall (BEM) - A New Technique for Monitoring Metallization Reliability at Wafer Level", Proc. 23th IEEE Inter. Rel. Phys. Symp., pp. 108, 1985
- [43] W. Nelson, "Accelerated Testing", Statistical Models, Test Plans and Data Analyses, Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, USA, 1990, ISBN 0-471-52277-5#
- [44] W. Kuo, "Reliability, Yield, and Stress Burn-in", A Unified Approach for Microelectronics Systems Manufacturing and Software Development, Kluwer Academic Publishers, 1998
- [45] W. Q. Meeker, "Statistical Methods for Reliability Data", John Wiley & Sons, Inc., 1998
- [46] MIL-STD-883E, Method 1016
- [47] Reliasoft Corp., "Accelerated Life Testing Reference", Reliasoft Publishing, USA, 1998
- [48] Reliasoft Corp., "User's Guide", Reliasoft Publishing, USA, 1998
- [49] D. J. Groebel, A. Mettas, F. Sun, "Determination and Interpretation of Activation Energy Using Accelerated-Test Data", Proc. Annual Reliability and Maintainability Symp., pp. 58-63, 2001, ISBN 0-7803-6615-8
- [50] S. M. Sze, "VLSI Technology", Second Edition, McGraw-Hill Book Company, 1988
- [51] "International Technology Roadmap for Semiconductors", Edition 1999
- [52] H.-U. Schröder, J. Otterstedt, T. Hillmann-Ruge, "Yield Enhancement of a 16.6 cm² Monolithic Large-Area Integrated Multiprocessor System Using Laser Reconfiguration", IEEE Trans. Comp. Packag., Manufact. Tech. - Part C, vol. 19, no. 2, April 1996

- [53] M. Rudack, M. Redeker, D. Treytnar, O. Mende, K. Herrmann, "Self-Configuration of a Large Area Integrated Multiprocessor System for Video Applications", Proc. IEEE Intl. Symp. on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, pp. 78-86, 2000
- [54] K. Hiraoka, K. Yasuda, "Two-Step Improvement of Electromigration Lifetime Under High Frequency Pulsed Conditions", Proc. of the 7th Intern. VLSI Multilevel Interconn. Conf., pp. 120, Santa Clara, CA, 1990
- [55] D. G. Pierce, E. S. Snyder, S. E. Swanson, L. W. Irwin, "Wafer-Level Pulsed-DC Electromigration Response at Very High Frequencies", Proc. IEEE Intern. Reliability Phys. Symp., pp. 198-207, April, 1994
- [56] P. Waltz, L. Arnaud, G. Tartavel, G. Lormand, "Influence of Thermal Heating Effect on Pulsed DC Electromigration Result Analysis", Proc. 27th European Solid-State Device Research Conf., Stuttgart, September 1997
- [57] W. Koechner, "Solid-State Laser Engineering", Springer Series in Optical Science, Vol. 1, Springer Verlag, 1976

Lebenslauf

Name : Ole Mende
geboren : 20.05.1969 in Bremerhaven

Schulausbildung

1975 - 1988 Grundschule, Orientierungsstufe, Gymnasium (Abitur)

Wehrdienst

1988 - 1989 von Goeben Kaserne, Stade

Studium

1989 - 1996 Studium der Elektrotechnik an der TU Hannover;

31.05.1996 Abschluss des Studiums

Berufstätigkeit

1996 - 2002 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laboratorium für Informationstechnologie der Universität Hannover, Mitarbeit am Projekt "Architekturen für objektorientierte Bildverarbeitungsrechner" im Bereich HL-Technologie

Seit April 2002 Tätig im elektronischen Analysezentrum der technischen Entwicklung der Audi AG Ingolstadt
