

Möglichkeiten der Qualitätssicherung bei Halbleiterbauelementen

– Reckenfelderbäumer –

Die Entwicklung der Elektronik hat in den letzten drei Jahrzehnten hinsichtlich der Informationsverarbeitung weitreichende Fortschritte gemacht. Als vielleicht wichtigstes Glied in der Produktkette ist die Entstehung des integrierten Schaltkreises (IC=integrated circuit) zu nennen. Hier sind hinsichtlich Komplexität und Integrationsdichte Bauelemente entstanden, die bei nahezu konstantem Preis mehr als eine zehntausendfache Leistung in der Signalverarbeitung ermöglichen. Fanden 1960 nur wenige Schaltelemente auf einem Chip Platz, so sind es heute bei den sogenannten VLSI-Kreisen mehrere Millionen (VLSI=very large scale integrated).

Man sollte an dieser Stelle nicht dem Trugschluß erliegen, diese Entwicklung werde sich in gleicher Weise fortsetzen, so daß im Jahr 2020 10^{12} Bauelemente auf einem Chip Platz finden. Die Entwicklung mag sich weiter vorantreiben lassen, vom VLSI-Kreis zum GSI-Kreis (GSI=giga scale integrated), aber dabei wird man zunächst materialspezifische Grenzen überwinden müssen und schließlich an theoretische Grenzen stoßen. Diese lassen sich, ohne anerkannte Naturgesetze, nicht einfach erweitern oder beseitigen.

Ohne hierauf näher einzugehen, sei noch erwähnt, daß diese Grenzen erkennbar sind in Gesetzen der Thermodynamik, Quantenmechanik oder auch der Grenzgeschwindigkeit, mit der man Informationen übertragen könnte, der Lichtgeschwindigkeit $v \approx 3 \times 10^8$ m/s.

In viel größerer Nähe liegen aber wie gesagt materialspezifische Grenzen, die schon durch die zur Zeit verwendeten Halbleiter, vornehmlich Silizium, aber auch III/V-Verbindungen wie z.B. das Galliumarsenid (GaAs), gegeben sind.

Zurück zum gegenwärtigen Stand der Technik. Hier gibt es mit den bereits elektronischen Bauelementen, d.h. Verbindungen zwischen Elementen der III. und IV. Hauptgruppe mit Halbleitereigenschaften, Probleme, den Anwenderanforderungen an die Qualität und Zuverlässigkeit zu genügen. Daher ist eine zufriedenstellende Funktionssicherheit von elektronischen Baugruppen, die eine größere Anzahl IC's enthalten, oft nicht mehr gegeben.

*Dipl.-Ing. Reckenfelderbäumer
Westfälische
Provinzial-Feuersozietät
Fotografien: Firma SES-Electronics*

Gute Erfolge wurden durch Anstrengungen der Halbleiterhersteller erzielt, hier sind insbesondere deren Testverfahren und erstaunliche Sauberkeit bei der Technologie des Fertigungsprozesses zu nennen, aber dennoch zeigen sich insbesondere bei neuen, im Langzeitverhalten noch nicht erprobten Bauelementen Ausfallraten im Bereich von 0,1–2 %.

Damit steht dem berechtigten Wunsch der Entwickler, möglichst neue Technologien und deren Bauelemente zur Schaltungsrealisierung zu nutzen, das Ziel entgegen, hohe Zuverlässigkeit des Produktes zu erreichen.

Finden können wir diese Produkte mittlerweile in nahezu allen Bereichen unseres Lebens. Unterhaltungselektronik, Systeme zur Arbeitserleichterung bis hin zu diversen High-Tech-Produkten, überall begegnen uns integrierte Schaltungen. Der Stellenwert von Qualität und Zuverlässigkeit ist in den verschiedenen Einsatzbereichen von geringer bis zu erheblicher, sogar lebenswichtiger Bedeutung. Kann man bei Produkten der U-Elektronik mit Qualität und Zuverlässigkeit vorwiegend verkaufsorientiert argumentieren, sind diese bei Einsatz von Bauelementen in sicherheitsrelevanten Systemen ein Muß für Hersteller und verarbeitende Industrie. Man denke an Geräte aus dem medizinischen Bereich, für Kraftfahrzeuge (ABS, Airbag), Steuerungsanlagen in Industriebereichen oder auch Überwachungsanlagen, wie elektronische Einbruch- und Brandmeldeanlagen. Hier werden die unmittelbaren Auswirkungen auf die Unfall/Schadenquote von Leben und Sachwerten deutlich. Es steht außer Frage, daß man bemüht sein muß, die Ausfallrate solcher Anlagen so gering wie möglich zu halten. Neben sinnvoller und korrekter Installation sowie regelmäßiger Wartung durch anerkannte Fachbetriebe, kommt auch der Qualitätssicherung (QS) der eingesetzten Komponenten eine Bedeutung zu. Ebenso ist die vielbeklagte Häufigkeit von Fehlalarmen zu einem Teil auf den Ausfall in der Elektronik zurückzuführen. Durch häufige Fehlalarme aber wird ein Überwachungssystem ungläubwürdig und verfehlt seinen Zweck. Bei den technischen Fehlalarmen dürften Funktionsausfälle durch defekte Bauelemente mit an erster Stelle liegen, was die Ursachen angeht.

Im folgenden wird deutlich gezeigt, daß der oft zu hörende Einwand, die Kosten

bei Einsatz besonders qualifizierter Bauelemente seien zu hoch oder ein komplexer Baustein, wie etwa ein Speicher oder Mikroprozessor, sei sowieso nicht vernünftig oder „vollständig“ testbar, nicht gilt.

Worin liegt das Problem der Qualitätssicherung von Bauelementen?

Dazu soll zunächst definiert sein, was unter den schon mehrfach erwähnten Begriffen „Qualität“ und „Zuverlässigkeit“ verstanden werden soll.

Qualität*

Diejenige Beschaffenheit, die eine Ware oder eine Dienstleistung zur Erfüllung vorgegebener Forderungen geeignet macht.

Die vorgegebenen Forderungen ergeben sich im allgemeinen aus dem Verwendungszweck.

Zuverlässigkeit*

Fähigkeit einer Ware, denjenigen durch den Verwendungszweck bedingten Forderungen zu genügen, die an das Verhalten ihrer Eigenschaften während einer gegebenen Zeitdauer unter festgelegten Bedingungen gestellt werden.

Vereinfacht läßt sich also sagen: Qualität ist die Übereinstimmung mit den geforderten Spezifikationen zum Zeitpunkt t_0 (z.B.: Auslieferungszeitpunkt) und Zuverlässigkeit ist das Einhalten dieser Spezifikationen über eine längere Zeit.

Nun läßt sich in eine Ware, beispielsweise einen integrierten Schaltkreis, nach der Fertigstellung zwar keine Qualität oder Zuverlässigkeit mehr hineinprüfen. Aber es gibt Möglichkeiten, fehlerhafte oder potentiell fehlerhafte IC's (Frühausfälle) auszuschließen bzw. mit Lebensdauerprüfungen Aussagen über die Zuverlässigkeit zu treffen. Diese Selektionsmaßnahmen werden auch als Screening-Methoden bezeichnet. Bei Lebensdauerprüfungen findet keine Selektion nach guten und fehlerhaften Teilen eines Loses von Bauteilen statt. Hier wird durch die meist zerstörende Prüfung einer festgelegten Anzahl von Bauteilen eine Aussage über den Fertigungsprozeß bzw. den Bauteiltyp getroffen.

* entnommen aus: DGQ4 (DGQ = Deutsche Gesellschaft für Qualitätswesen), Begriffe und Formelzeichen im Bereich der Qualitätssicherung

1. Lebensdauer von Halbleitern und mögliche Fehlermechanismen.

Obwohl Technologiefortschritt und Erfahrung in der Halbleiterproduktion eine zunehmende Verbesserung der Qualität und Zuverlässigkeit bewirken, kann auch heute noch nicht von einer „Nullfehler“-Qualität (zero defects) gesprochen werden.

Untersucht man das Ausfallverhalten näher, stellt man eine charakteristische Abhängigkeit der Ausfälle pro Zeiteinheit (= Ausfallrate) gegenüber der Zeit fest.

Die Ausfallrate von Bauelementen wird mit λ bezeichnet und sieht im zeitlichen Verlauf qualitativ wie in Abbildung 1 gezeigt aus.

Den Kehrwert $1/\lambda$ bezeichnet man als mittlere fehlerfreie Betriebszeit (MTBF: mean time between failure). Bauelemente für Einbruchmelderzentralen müssen z. B. so ausgewählt werden, daß sich für die Geräte ein MTBF-Wert von mindestens 45.000 h ergibt, das entspricht einem λ -Wert von ungefähr $2 \cdot 10^{-5}/h$.

Im Bereich der konstanten Ausfallrate (II) kann man in guter Näherung folgenden Zusammenhang angeben.

$$i) \frac{dN(t)}{dt} = \lambda \cdot N(t)$$

wobei $N(t)$ die Anzahl der Bauelemente (BE) zu einem Zeitpunkt t angibt.

Integriert man über die Zeit, erhält man:

$$ii) N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda t}$$



($e \sim 2,718$; Euler'sche Zahl)

Der Verlauf der „Badewannen“-kurve ändert sich mit der Temperatur T , da auch im Halbleiter ablaufende Reaktionen mit steigender Temperatur beschleunigt verlaufen. In Abbildung 2 ist dieser Zusammenhang zu erkennen. Da man durch Erhöhung der Temperatur eine Zeitrafferwirkung erzielt, nähern sich die „Maxima“ der Frühausfälle und der Verschleißphase.

Danach wird die Reaktionsgeschwindigkeit durch die Zahl der Zusammenstöße der reagierenden Teilchen pro Zeiteinheit und dem Erfolgsquotienten (Maß = Aktivierungsenergie E_A) bestimmt. Das bedeutet, ein Zusammentreffen zweier Stoßpartner muß mit einer gewissen Mindestenergie (E_A) geschehen, damit eine Reaktion (Zustandsänderung) eintritt. Unterhalb dieser Energieschwelle prallen

Abb. 1: Lebensdauerkurve für Halbleiter
Die Bereiche I bis III sind zusammengefaßt auch als „Badewannen“-Charakteristik bekannt. Der Bereich I kennzeichnet die Frühausfälle, der Bereich II den der konstanten Ausfallrate, während mit III die „Verschleiß“phase beginnt.

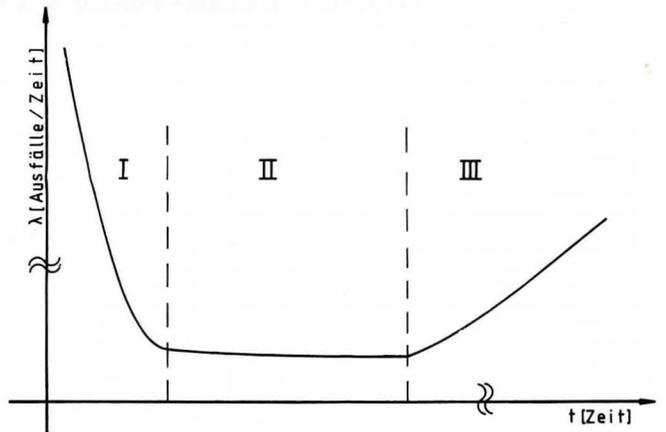
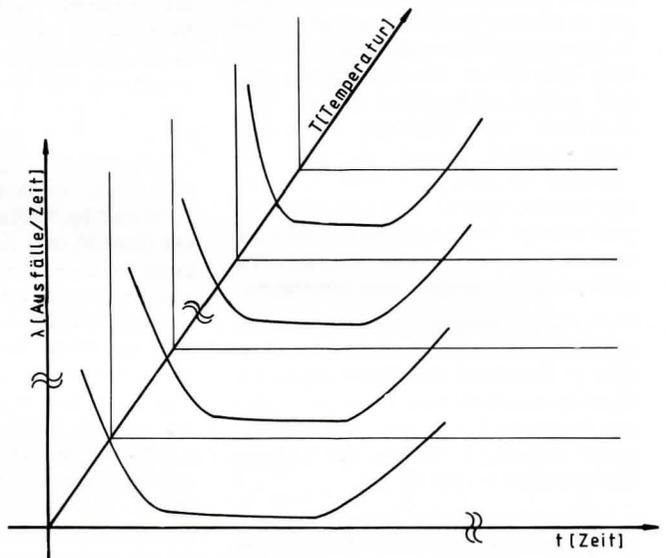


Abb. 2: λ in Abhängigkeit von Temperatur T und Zeit t
Durch eine Erhöhung der Temperatur um 10 K (Kelvin) läßt sich annähernd eine Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit erreichen. Besser wird dieser Zusammenhang durch die Arrheniusgleichung beschrieben. Sie läßt sich aus dem Reaktionsverhalten zweier oder mehrerer Reaktionspartner ableiten (Stoßtheorie).



beispielsweise zwei Teilchen einfach wieder voneinander ab (elastischer Stoß).

$$iii) V_R = c \cdot e^{-\frac{E_A}{kT}}$$

mit V_R = Reaktionsgeschwindigkeit [bestimmend auch für 2]

c = Reaktionskonstante (materialabhängig)

E_A = Aktivierungsenergie, [eV]

T = Temperatur, [K]

k = Boltzmann-Konstante; $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

Betrachtet man das Verhältnis zweier Reaktionsgeschwindigkeiten V_{R1} und V_{R2} bei den Temperaturen T_1 und T_2 ,

mit $T_2 > T_1$, dann ergibt sich:

$$iv) \frac{V_{R2}}{V_{R1}} = e^{-\frac{E_A}{kT} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} = b_F \text{ (dimensionslos)}$$

wobei b_F als Beschleunigungsfaktor bezeichnet wird.

Die Kenntnis der Reaktionsbeschleunigung durch Erhöhung der Temperatur wird gezielt für ein bekanntes Screening-Verfahren, den Burn In, genutzt. In Abschnitt 2 wird näher darauf eingegangen. An dieser Stelle sollen zunächst noch Fehler und bekannte Fehlermechanismen bei Halbleitern gezeigt werden.

Man schreibt auftretenden Fehlermechanismen, die zum Ausfall eines Bau-

elementes führen (können), formal bestimmte Aktivierungsenergien zu.

Über Beziehung iv) läßt sich bei Kenntnis der Reaktionsgeschwindigkeiten (über Messung der Reaktionsdauer) und der Temperaturen die Aktivierungsenergie E_A bestimmen.

$$v) E_A = -k \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)^{-1} \cdot \ln \frac{V_{R1}}{V_{R2}}$$

Beispiele hierfür sind aus der Abbildung 3 ersichtlich. Im wesentlichen liegen die Aktivierungsenergien in der Größenordnung von 0,5–1 eV.

Wie bereits erwähnt, zeigen Ausfallraten erkenntlich aus Statistiken der Hersteller, Anwender und Testhäuser, daß man von der Realisierung der ppm-Philosophie (ppm = part per million) oder Nullfehlerqualität (noch) nicht sprechen kann. Fehler schleichen sich ein während der Fabrikation (z.B.: Maskenversatz, schlechte Bondung, Packungsfehler), durch elektrische oder thermische Überbeanspruchung (Fehlbehandlung) oder durch Kristalldefekte.

Die nachfolgenden Abbildungen 4 bis 6 zeigen zunächst einen geöffneten IC in SMD-Technik (SMD = surface mounted device), danach zwei Fehlerarten, die bei IC's aus der „low power schottky-Serie“ gefunden wurden.

Abb. 4:
Geöffneter Schaltkreis, SMD-Technik
In der Mitte der Abbildung 4 erkennt man den Kristall, das Herzstück des IC's, der über dünne Golddrähte (Bondierung) mit den „Füßen“ (Pins) des IC's verbunden ist.

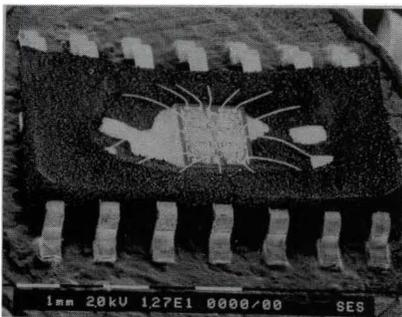


Abb. 5:
Kratzer auf einem Kristall eines 74LSXX

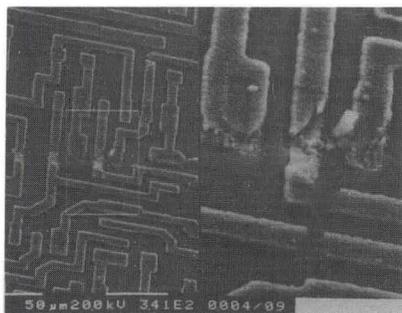
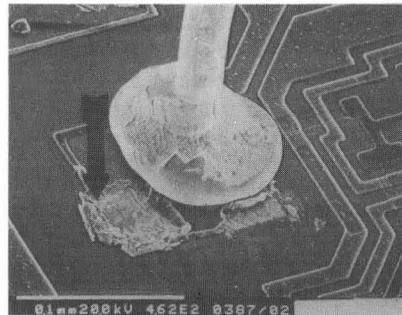


Abb. 3: Fehlermechanismen und dazugehörige Aktivierungsenergien

Aktivierungsenergie E_A [eV]	Fehlermechanismen
1.6	Metallwanderung in das Silizium
1,1	Kristaloberfläche, Kontamination, Instabilität
1,0	Leckströme (grobe)
1.0	Verunreinigung, Justierfehler, Ätzfehler
0.9	Instabile Leckströme in hermetischen Gehäusen
0.8	Korrosion
0.7	Metallische Verbindung Gold-Aluminium (Purpur-Pest)
0.7	Instabile Leckströme in Plastikgehäusen
0.6	Galvanische Bondkontaktstelle, Korrosion in Plastikgehäusen
0.6	Bit-Ladungsverluste bei EPROM
0.5	Diffusionsfehler
0.5	Elektromigration
0.3	Oxidfehler
0.3	Siliziumfehler

Abb. 6:
Fehlerhafte Bondierung eines 74LSXX



2. Burn In als effektive Screening-Methode

Angesichts der Lebensdauerkurve für BE (Abb. 1) erkennt man, daß es für einen möglichst störungsfreien Betrieb zweckmäßig wäre, wenn die elektronischen BE bereits die Phase der Frühausfälle verlassen hätten. Denn danach kommt man in einen Bereich geringer und über mehrere Jahre (Jahrzehnte) konstanter λ -Werte.

Da man über eine Erhöhung der Temperatur die Möglichkeit hat, Reaktionen beschleunigt ablaufen zu lassen (iv), liegt es nahe, elektronische BE einer erhöhten Umgebungstemperatur auszusetzen, um Fehlermechanismen zu aktivieren, die bei planmäßiger Betriebstemperatur (z.B. 323 K) erst nach Monaten als Feldausfälle in Erscheinung treten können. Dieses Voraltern von BE geschieht am effektivsten mit einer Schaltung, die den späteren Betrieb simuliert, um mögliche Frühausfälle zu provozieren. Eine einfachere Hochtemperaturlagerung (BE ohne Schaltung) bringt nur für einige Fehlermechanismen den gewünschten Erfolg.

Üblicherweise unterscheidet man zwischen dem statischen und dynamischen Burn In. Der Unterschied liegt in der Schaltung der BE. Beim statischen BI (Burn In) wird das BE mit Versorgungsspannungen und Ground geschaltet (vorwiegend SSI-Kreise,

SSI = small scale integrated), während beim dynamischen BI auch Pulse an das BE gelegt werden. Letzterer ist empfehlenswert für höher integrierte Schaltkreise, insbesondere Speicher, Mikroprozessoren, am möglichst viele einzelne Gatter zu belasten.

Um den Erfolg eines durchgeführten BI feststellen zu können, muß man über eine Prüfung der elektrischen Parameter nach Datenblatt die Nullstundenausfälle feststellen, bevor der BI durchgeführt wird. Eine analoge Messung nach dem BI gibt dann Auskunft über die durch den BI erreichten Frühausfälle.

Unter welchen Bedingungen soll ein BI durchgeführt werden? Wie hoch ist die Temperatur, wie die Zeitdauer zu wählen?

Die Antwort wird durch physikalisch-technische sowie in der Praxis durchführbare bzw. kostenmäßig effiziente Bedingungen gegeben. Die Temperatur des Chips, auch unter Berücksichtigung der Umgebungswärme und der Eigenerwärmung bei Betrieb, muß immer unterhalb der Sperrschichttemperatur des Halbleiters als obere Grenze liegen, da sonst die Sperrschicht zerstört werden kann. Temperaturen von etwa 400–435 K sind üblich. Des weiteren läßt sich ein BI eigentlich nur für einen bekannten Fehlermechanismus genau abstimmen. Da dieser aber nicht von vornherein bekannt oder leicht ersichtlich ist, gehört zur Auswahl eines geeigneten BI neben technischem know how eine lange Erfahrung mit entsprechenden BE und Technologien.

Ein Beispiel:

Nehmen wir an, es soll ein Zeitraum von 5.000 h Betrieb erreicht werden. Bei einer Aktivierungsenergie von $E_A = 0,7 \text{ eV}$ und einer Betriebstemperatur von $T_1 = 323 \text{ K}$ ergibt sich bei einer BI-Temperatur von $T_2 = 398 \text{ K}$ nach iv) ein Beschleunigungsfaktor b_f von ungefähr 110. Daraus ergibt sich eine BI-Dauer von ca. 45 Stunden. Wirtschaftlich vertretbare Standard

BI-Zeiten sind 24 h und vielfache davon. Hier würde also ein 48 h BI durchgeführt werden.

Ein BI ist also eine zweckmäßige Voralterung von BE, um Frühausfälle vor Einsatz der BE aufzudecken. Solche Frühausfälle können z. B. durch folgende Fehler bedingt sein:

- a) Migration von Kristallfehlern an die Schaltungsebene
- b) Metallisierungsfehler (falsche Temperatur des Trägers beim Aufdampfen \Rightarrow schlechter Kontakt, Haarrisse, Kontaminationsprobleme, Metallwanderung)
- c) Diffusionsfehler
- d) Oxidfehler

3. Elektrische Prüfung von BE

Diese kann, je nach Wunsch und Zweckmäßigkeit, bei verschiedenen Temperaturen von üblicherweise 233 K bis 343 K erfolgen. Grundsätzlich werden dabei die Parameter des Datenblattes oder es wird nach Kundenspezifikation (z. B. Selektion nach Parametervorgabe) geprüft.

Die Untersuchung auf elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) kommt hier oft zu kurz. Insbesondere für Gefahrenmeldeanlagen ist eine EMV-Untersuchung aller Anlagenteile vorgeschrieben, da man festgestellt hat, daß solche Anlagen auf elektromagnetische Erscheinungen (z. B. durch Blitz) empfindlich reagieren.

Anforderungen und Prüfmethode für die EMV sind in den VDS-Richtlinien 2110 aufgeführt. Im wesentlichen sind dies:

- Leitungswege werden mit Impulsen hoher Energie beaufschlagt und mit schnellen energiearmen Störungen
- statische Entladungen in Nähe der Anlagen
- statische Entladungen geringer Energie an Teilen der Anlage
- Erzeugung elektromagnetischer Felder und Magnetfelder in Nähe der Anlagen

Auch die Möglichkeit, komplexe BE, wie z. B. Speicher, „vollständig“ zu prüfen, ist aufgrund der sehr hohen Testzeit aus wirtschaftlichen Gründen nicht durchführbar. Daher wendet man aus Erfahrung bestimmte Prüfmuster an, um häufig auftretende Fehler aufzudecken, oder prüft nach vorgegebenen Kundenspezifikationen.

Wenn man hier von 100%-Prüfung spricht, ist nicht die vollständige Prüfung eines BE gemeint, sondern daß man im Gegensatz zur Stichprobenprüfung beispielsweise nach AQL (acceptable quality level) jedes BE prüft.

Für den Test von Speicherbausteinen gibt es eine Reihe von Prüfmustern

(Pattern) vom einfachen checkerboard (Schachbrett)-Muster bis hin zum aufwendigen galpat (galloping pattern).

Die Testzeit hängt neben der Prüftiefe auch von der Speichergröße und Zykluszeit ab.

Beim checkerboard-Test werden 10 n Zyklen durchlaufen, wobei n die Anzahl der Speicherzellen ist. Das galpat-Muster erfordert eine Zyklenzahl von $4n^2 + 2n$.

Für ein RAM (random access memory) mit 64 k Speichergröße und einer Zykluszeit von 200 ns ergeben sich daher folgende Testzeiten:

checkerboard: $t = 0,131$ s

galpat: $t = 3436$ s ≈ 1 h

Das bedeutet, die Kosten für den galpat-Test sind nur in Ausnahmen tragbar, denn sie übertreffen den Preis des BE mehrfach.

Die Kosten zum Testen von komplexen BE sind auch wegen der aufwendigen Testausrüstung entsprechend hoch. Ein Testsystem, das in der Lage ist, Speicher oder Prozessoren sinnvoll zu testen, kostet mehrere Millionen DM allein von der Hardware-Seite. Eine dazugehörige Softwarebibliothek kostet etwa noch einmal dasselbe. Unabdingbar ist die Forderung, qualifiziertes Personal zur Bedienung, Wartung und Erweiterung des Systems zu beschäftigen. Das macht die Faktoren für die Kalkulation einer Testminute sicherlich deutlich.

4. Weitere Untersuchungsmethoden

Wie bereits erwähnt, sind neben dem beschriebenen BI und der elektrischen Prüfung auch weitere Screening-Verfahren an BE von Bedeutung und je nach Anforderung, die man später beim Einsatz an bestimmte BE stellt, sinnvoll.

Hier sind zu nennen:

- interne/externe visuelle Prüfungen
- Hochtemperaturlagerung
- Temperaturzyklen
- thermischer Schock
- Feuchte/Wärme-Prüfung
- pressure cooker
- HAST-Verfahren (high accelerated stress test)
- Röntgen
- Dichtigkeitsprüfungen (Grob-/Feinleck)
- Lötbarkeitsuntersuchungen
- mechanische Untersuchungen (Vibration, Zentrifugalkraft, Biegetests, Schockprüfungen, Bondabreißkräfte)

Die genannten Verfahren dienen dazu, verschiedenartige Fehler aufzudecken, zu aktivieren oder die „Belastbarkeit“ derartiger BE vor dem Feld-

einsatz festzustellen. Diese Möglichkeiten werden meist im Rahmen von Freigabeuntersuchungen angewandt und sind zum großen Teil zerstörende Untersuchungen (Lebensdauerprüfungen). Da man aufgrund der relativ kurzen Einsatzzeit von elektronischen BE über die Lebensdauer unter „normalen“ Bedingungen kaum Erkenntnisse haben kann (und wenn man sie hätte, wären sie bereits nicht mehr relevant), verlangt man je nach Einsatzort und -art, daß die BE bestimmte Prüfungen bestehen. Erst dann verwendet man in der Applikation Bausteine dieses Typs und Herstellers.

Solche Freigabeprüfungen (Qualifikationen) sind i. a. sehr zeitaufwendig. Zeiträume von Monaten sind wegen der langen Lebensdauerprüfungen (Feuchte/Wärme) üblich. Bei einer 2000 h Prüfung mit $T = 358$ K und 85 % r.h. = relative humidity (r.f. = relative Feuchte) (sog. 85/85 Test) ergäbe sich über die Arrheniusgleichung (iv) ein Beschleunigungsfaktor von etwa 12 gegenüber einer Betriebstemperatur von 320 K. Bei einer täglichen Betriebszeit von etwa 10 h entspräche danach die 2000 h Prüfung einem Zeitraum von 6–7 Jahren. Bei dieser Betrachtungsweise hat man allerdings die Feuchtigkeit als entscheidende Größe außer acht gelassen. Das bedeutet, gegenüber dem „thermal testing“ (wie z. B. BI) ergeben sich bei Feuchtigkeitstests („humidity-testing“) zum Teil wesentlich größere Beschleunigungswerte, wenn man beispielsweise Haarrisse in plastikgekapselten Schaltkreisen vorfindet.

Mit dem sog. HAST-Test (high accelerated stress test) lassen sich hier noch wesentliche Zeiteinsparungen gegenüber der Dauer für Feuchte/Wärme-Prüfungen bei 85/85 erzielen. Temperatur und Feuchte werden vorgegeben und es stellt sich ein Druck entsprechend dem thermodynamischen Gleichgewicht ein.

Die Lebensdauer wird also stark von den Umgebungsparametern Temperatur und Feuchte beeinflusst. Der Einfluß der Temperatur läßt sich wie ausgeführt gut über die Arrheniusgleichung beschreiben, für die Wirkung der Feuchte gibt es empirisch ermittelte Funktionen, die den Einfluß auf die Lebensdauer beschreiben.

Will man zu einer Aussage über die Lebensdauer eines Systems kommen, stellt sich die Frage nach der Ausfallwahrscheinlichkeit der einzelnen Komponenten. Kann man diese mit den Ausfallraten λ_i angeben, läßt sich die Gesamtausfallrate als $\lambda_{ges} = \sum \lambda_i$ errechnen. Wobei man berücksichtigen muß, daß sich durch den Einbau einer Komponente in ein System

eventuell die zuvor isoliert ermittelte Ausfallrate ändern kann.

Wichtig sind ebenfalls die Umgebungsbedingungen, denen ein System unterliegt.

Eine elektronische Schaltung innerhalb eines Gehäuses mag für den Einsatz im klimatisierten Bürogebäude ein λ ges von $10^{-5}/h$ aufweisen, d.h. die mittlere fehlerfreie Betriebszeit solcher Systeme beträgt $100.000 h \approx 11$ Jahre (Dauerbetrieb). Dabei sei ein $\lambda_1 = 10^{-5}/h$ für die elektronische Schaltung und ein $\lambda_2 = 10^{-8}/h$ für das Gehäuse ermittelt worden. Unter anderen Umgebungsbedingungen (mechanische Schocks o.ä.) mag λ_1 den Wert beibehalten, während für λ_2 ein neuer Wert, vielleicht $10^{-3}/h$ anzusetzen ist. Das bedeutet nur noch eine mittlere fehlerfreie Betriebszeit von etwa 1000 h für das Gesamtsystem.

5. Fehleranalyse an Halbleiterbauelementen

In vielen Fällen ist es sinnvoll, fehlerhafte Schaltkreise auf ihre Ausfallursache hin zu untersuchen. Gründe für diese Notwendigkeit können beispielsweise in Garantieansprüchen (schuldhaftes Überbeanspruchung), Klärung von Feldausfällen (um dann evtl. korrigierende Maßnahmen zu ergreifen) oder dem Streben nach Produktverbesserung liegen.

Die Analysetechniken sind vielfältig und erfordern neben hoher technischer Ausstattung ein mindestens ebenso großes Maß an „know how“.

Man muß den defekten IC wie einen „Schatz“ behandeln, den es vorsichtig in Einzelschritten zu entdecken gilt. Dabei muß durch sorgfältige Arbeitsweise sichergestellt sein, daß man nicht einen Fehler analysiert, der selbst durch die Behandlung hervorgerufen wurde. Sorgfältige Dokumentation und Erfahrung mit Analysetechniken sind unabdingbar. Wichtig ist vor allem die Reihenfolge der beabsichtigten Untersuchungsmethoden und die Erfahrung, aus ersten Übersichtsprüfungen den Fehler grob lokalisieren zu können.

Denn hat man z.B. einen IC erst einmal geöffnet, sind Dichtigkeitsprüfungen natürlich nicht mehr durchführbar. Wichtig ist auch die „Historie“ des BE (Einsatzbedingungen, wie ausgefallen?) und eine durch Erfahrung geprägte Kenntnis von Präparationsmethoden.

An dieser Stelle soll nicht näher auf die Methodik und die Vielfalt einer Fehleranalyse eingegangen werden. Aber neben den elektrischen und optischen Kontrollen (Spitzenmeßplatz/ Interferenzkontrast) ergeben sich ins-

besondere mit rasterelektronenmikroskopischen Verfahren Möglichkeiten, einen Fehler aufzuspüren und darzustellen. Bei immer kleiner werdenden Schaltungsstrukturen bietet gerade der Elektronenstrahl mit seinem hohen Auflösungsvermögen Vorteile gegenüber der Lichtmikroskopie. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen eine Reihe von Fehlern, die bei Analysen gefunden wurden.

Abb. 7a: Zerstörung des Oxides durch fehlplatzierten Nallhead-Bond

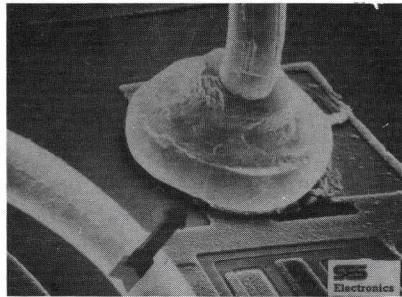


Abb. 7b: Loch im Oxid verursacht Kurzschluß zwischen Leiterbahn und Epitaxialebene

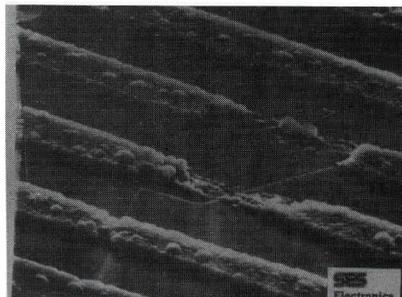


Abb. 7c: Nadelloch (pinhole) in Widerstandsstruktur

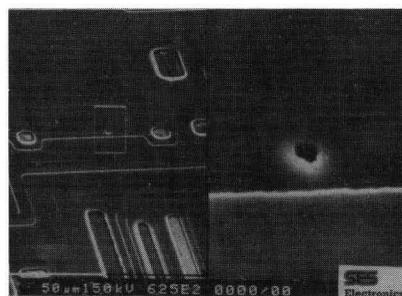


Abb. 7d: Metallisierungsfehler aufgrund unvollständiger Masken

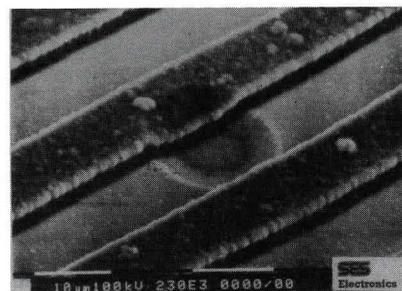


Abb. 7e: Kurzschluß zwischen Kollektor und Emitter durch Maskenversatz

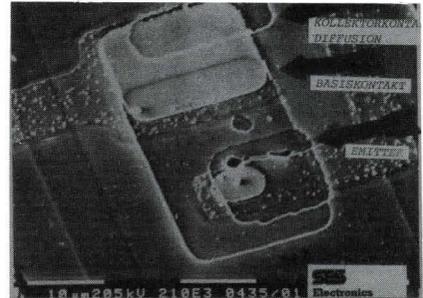


Abb. 7f: Überlappungsproblem (step coverage) an Oxidkante

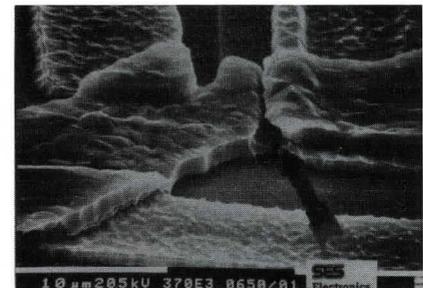
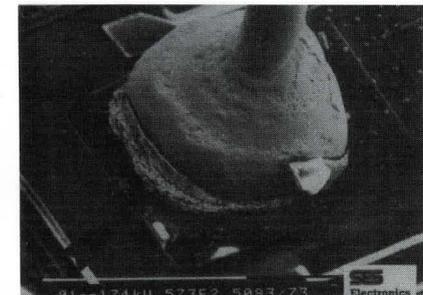


Abb. 7g: Purpurpest (purple plaque) durch thermische und elektrische Überbeanspruchung



6. Grundsätzliches zur Kostenseite

Anhand der Prüfung komplexer Speicher mit aufwendigen Testpattern wurde bereits deutlich, daß der Anwender elektronischer Schaltungen immer gezwungen ist, darüber nachzudenken, welchen Kompromiß er schließen kann oder muß zwischen optimaler Qualitätssicherung auf der einen Seite sowie Zeit und Kostenaufwand auf der anderen. Natürlich wird dieser Kompromiß auch durch das Produkt selbst mitbeeinflusst, so daß sich hier oft schon die Notwendigkeit bestimmter QS-Maßnahmen ergibt.

Andererseits zeigt folgende Überlegung, daß es in mehrfacher Hinsicht lohnend sein kann, geprüfte BE einzusetzen, weil die Kosten für die QS-Maßnahmen geringer sind als die, die sich durch Reparatur/Austausch etc. ergeben.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Leiterplatte (LP) hängt in folgender

Weise von der Anzahl der defekten IC's in einem Los ab.

$$vi) \quad W_A = 1 - \frac{(N-n)! \cdot (N-d)!}{N! \cdot (N-n-d)!}$$

wobei: W_A = Ausfallwahrscheinlichkeit einer LP mit,
 $1 \geq W_A \geq 0$
 N = Losgröße
 n = Anzahl IC's pro LP
 d = Anzahl defekter IC's im Los

Das bedeutet, daß man bei einer Fertigung von 200 Leiterplatten mit je 50 IC's eine Ausfallrate von etwa 14 % bei den Leiterplatten in Kauf nimmt, wenn nur 30 von den insgesamt 10.000 IC's defekt sind.

Die Kosten zur Beseitigung von Fehlern auf diesen Leiterplatten übersteigen meistens die für QS-Maßnahmen aufzuwendenden Mittel.

Dies gilt insbesondere dann, wenn Systeme bereits an Kunden geliefert wurden. Der damit verbundene Imageverlust, Qualität ist ja auch ein Verkaufsargument, ist hierbei unberücksichtigt geblieben.

Wie hoch die Kosten im einzelnen werden, hängt vom Stundensatz der eingesetzten Fachkräfte, von den im ein-

zelnen kalkulierten Kosten eines entsprechenden Arbeitsplatzes (Labor/Meßplatz) und vom Zeitaufwand für Fehlersuche und Fehlerbeseitigung ab.

Die Kosten für Qualitätssicherung ergeben sich aus dem Zeitaufwand für den Test der BE, aus Personalkosten und der dafür notwendigen Ausrüstung. Da dazu insbesondere für eine sinnvolle Prüfung von LSI-Schaltungen (large scale integrated) Beträge in Höhe von mehreren Millionen DM aufzuwenden sind, und zudem ein hohes Maß an Erfahrung unabdingbar ist, bieten sich die Dienste unabhängiger Prüfinstitute an. Sie prüfen BE nach Kundenspezifikationen oder nationalen und internationalen Standards (gemäß VDE, CECC, IEC-Bestimmungen) sowohl für die Großindustrie (Kapazitätsprobleme trotz eigener Ausrüstung und know how) als auch für Klein- und mittelständische Unternehmen, in denen entsprechende Prüfungen nicht möglich sind.

Schlußbemerkung:

Obwohl von Herstellern vielfach die Nullfehlerqualität propagiert wird, und sich ihrer Meinung nach die QS-Maßnahmen

von Anwendern damit erübrigen oder zumindest auf Stichprobenprüfungen reduzieren, bleibt die QS ein Instrument, mit dem der Anwender sich definitiv Klarheit über den Zustand seiner BE verschaffen kann. Zudem steht dem Bemühen, immer sauberer zu fertigen, reineres Material zu verwenden, bessere Selektionen schon beim Hersteller durchzuführen, um die Qualität zu verbessern, das Problem der ständig wachsenden Integrationsdichte entgegen.

Im Hinblick auf immer kleiner werdende ladungs-/informationserhaltende Strukturen (MOSFET → MESFET → MODFET)* werden auch die damit verbundenen Erscheinungen von Ionendrift, Tunneleffekt, Ladungstrapping, etc. immer bedeutsamer als Stör- oder auch sogar als Nutzfaktor (MODFET). Dadurch werden neue technologische Probleme und damit auch neue Probleme für die QS aufgeworfen.

* MOSFET = metal oxid semiconductor field effect transistor

MESFET = metal semiconductor fet

MODFET = modulationsdotierter fet

Für überlassene Fotografien sage ich der Firma SES-Electronics, CECC anerkanntes und unabhängiges Prüflaboratorium in Nördlingen, meinen Dank.

Fachforum '89 „Brandschutz in Hotels, Gaststätten und Diskotheken“

Brände in Hotels, Gaststätten und Diskotheken sorgen beinahe täglich für Schlagzeilen in den Medien. Menschen ersticken oder verbrennen, Millionenwerte fallen den Flammen zum Opfer. Wie aus den Schadenbilanzen der Versicherer hervorgeht, hat insbesondere die Zahl der Brände mit Totalschäden in den vergangenen Jahren zugenommen. Viele Brände mit ihren verheerenden Folgen für Menschen und Sachgüter wären vermeidbar gewesen. Oftmals lag es nur daran, daß die Brandgefahr nicht bekannt war, daß sie nicht rechtzeitig erkannt oder unterschätzt wurde.

Neben menschlichem Fehlverhalten stellen bauliche Mängel, wie z. B. das Fehlen

von Feuerschutztüren und inneren Brandwänden, die Verwendung leichtentflammbarer Wand-, Decken- und Fußbodenverkleidungen usw., ein weiteres Kernproblem bei Brandschäden dar.

Welche Maßnahmen zum vorbeugenden und abwehrenden Brandschutz getroffen werden können, darüber diskutierten Brandverhütungs- und Versicherungsexperten, Repräsentanten des Hotel- und Gaststättengewerbes sowie Hersteller brandschutztechnischer Einrichtungen auf dem 3. ÖMARK-Forum „Brandschutz in Hotels, Gaststätten und Diskotheken“ im März 1989 anlässlich der 63. InternorGa in Hamburg. Die Veranstaltung, von der ÖMARK im Auftrage und für die Gruppe öffentlicher Versicherer ausgerichtet, sollte den Verantwortlichen Gelegenheit

geben, ins Gespräch zu kommen, um gemeinsam Wege aufzuzeigen, wie die Feuersicherheit zum Schutz des Gastes, des Personals und des Betriebes verbessert werden kann.

Insbesondere behandelte das Fachforum neben anschaulich vorgetragenen Beispielen aus der Schadenpraxis den Brandschutz in Hotels, Gaststätten und Diskotheken aus der Sicht der Feuerwehr sowie aus der Sicht des Hotel- und Gaststättengewerbes. Darüber hinaus wurden damit zusammenhängende versicherungstechnische Aspekte dargelegt.

„schadenprisma“ greift diesen Problembereich auf und wird einige Vorträge vom ÖMARK-Fachforum veröffentlichen.

Brenner