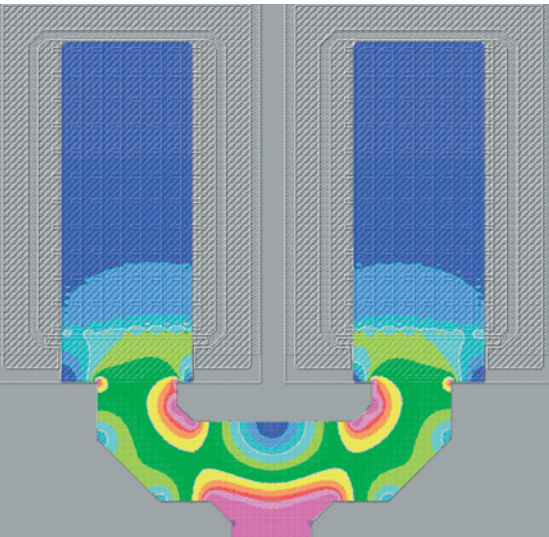


Elektromigration

Eine neue Herausforderung beim Entwurf elektronischer Baugruppen

Teil 1: Ursachen und Beeinflussungsmöglichkeiten

Jens Lienig, Dresden; Göran Jerke, Reutlingen



Zu hohe Stromdichten in Leiterbahnen von elektronischen Baugruppen können zu Schaltungsausfällen durch Elektromigration führen. Insbesondere der Zuverlässigkeitsanspruch elektronischer Geräte und Baugruppen erfordert eine intensive Auseinandersetzung mit diesem Thema. Der erste von drei Teilen der F&M-Serie geht daher den Ursachen der Elektromigration auf den Grund und diskutiert Möglichkeiten, sie zu vermeiden.

Die Zuverlässigkeit von elektronischen Baugruppen wie ICs und Leiterplatten ist eine zentrale Anforderung, die jeder Entwickler vor Augen hat. Diesem Zuverlässigkeitsanspruch tragen vielfältige konstruktive Maßnahmen Rechnung, zum Beispiel die Wahl von Materialien, die den zu erwartenden Benutzungsansprüchen gerecht werden. Mit den immer feineren Strukturen elektronischer Baugruppen kommen jedoch neue, die Zuverlässigkeit negativ beeinflussende Faktoren zum Tragen, die bisher vernachlässigbar waren. Insbesondere sind hier Materialmigrationsprozesse in elektrischen Leitungselementen zu nennen, die bei der Entwicklung elektronischer Baugruppen nicht mehr ignoriert werden können.

»Materialmigration« (abgeleitet vom lateinischen migrare, auswandern) ist ein Oberbegriff für verschiedene erzwungene Materialtransportprozesse in Festkörpern. Dazu gehören chemische Diffusion auf Grund von Konzentrationsgradienten sowie Materialwanderung, hervorgerufen von Temperaturgradienten, von mechani-

schen Spannungen oder auf Grund eines elektrischen Feldes. Für den zuletzt genannten Fall, welcher Gegenstand dieses Beitrags ist, wird oft der Begriff »Elektromigration« verwendet.

Materialwanderung in Leiterbahnen

Die Kupfer- oder Aluminium-Leiterbahnen einer elektronischen Baugruppe sind polykristallin, das heißt, sie bestehen aus

Körnern, die Kristallgitter identischer Bauart, aber unterschiedlicher Orientierung enthalten. Während des Stromflusses durch eine derartige Leiterbahn kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen den bewegten Elektronen – die man sich als eine Art »Elektronenwind« vorstellen kann – und den Metallionen in diesen Gitterstrukturen. Insbesondere die an den Korngrenzen anliegenden Atome werden verstärkt »Opfer« des Elektronenwinds; es kommt zum Herauslösen und einer er-

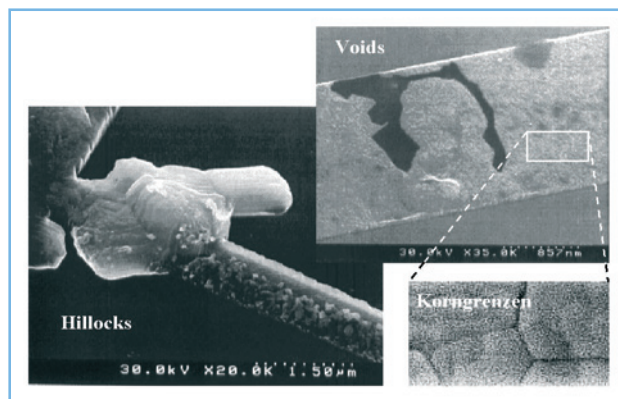


Bild 1. Materialansammlungen (Hillocks) und Hohlräume (Voids) auf Grund von Elektromigrationsprozessen sowie Korngrenzen in einer Leiterbahn (Quelle: G. H. Bernstein und R. Frankovic, University of Notre Dame, USA)

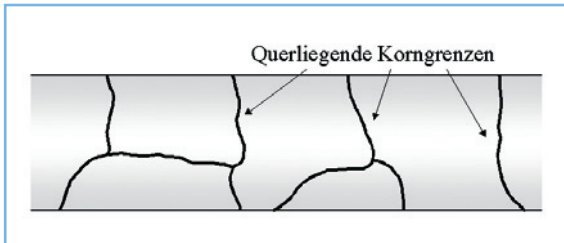


Bild 2. Bei der so genannten Bambusstruktur übertrifft der mittlere Korndurchmesser die Leiterbahnbreite, womit quer liegende Korngrenzen für eine erhöhte Elektromigrationsbeständigkeit sorgen

zwungenen Wanderung dieser Atome in Richtung des Elektronenflusses.

Damit werden im Laufe der Zeit Kupfer- oder Aluminium-Atome an einzelnen Korngrenzen in Stromflussrichtung angehäuft (so genannte »Hillocks«). Gleichzeitig können in der entgegengesetzten Richtung Hohlräume an den Korngrenzen entstehen (so genannte »Voids«). Während die Materialanhäufungen Kurzschlüsse zu den benachbarten Leiterzügen hervorrufen können, reduzieren die gleichzeitig entstehenden Hohlräume den Stromfluss stellenweise bis zur völligen Auftrennung des Leiterzugs (Bild 1).

Viele elektronische Baugruppen, etwa integrierte Schaltkreise, haben eine angestrebte mittlere Lebensdauer von mindestens zehn Jahren. Der durch Elektromigration bedingte Ausfall eines einzigen Leiterzugs zieht in der Regel den Ausfall der gesamten Baugruppe nach sich. Der amerikanische Physiker *J. R. Black* entwickelte Ende der 60er-Jahre ein empirisches Modell zur Abschätzung der mittleren Lebensdauer (MTTF, Mean Time to Failure) einer Leiterbahn unter Berücksichtigung der Elektromigration [1]:

$$MTTF = \frac{A}{J^2} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k \cdot T}\right) \quad (1)$$

Die Konstante A ist dabei eine Materialkonstante, J die Stromdichte, E_a die Aktivierungsenergie für den Schädigungseffekt der Elektromigration, k die Boltzmannkonstante und T die Temperatur im Leiterzug. Dabei wird offensichtlich, dass die im Rahmen des Entwurfsprozesses beeinflussbaren Faktoren im Wesentlichen die Stromdichte J und (eingeschränkt) die Temperatur T sind.

Dieser erste Teil der F&M-Beitragsserie konzentriert sich somit auf Möglichkeiten, die Stromdichte zu beeinflussen, um die negativen Auswirkungen der Elektromigration auf die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen gar nicht erst entstehen zu lassen. Der Folgebeitrag wird eine Verdrahtungsstrategie vorschla-

gen, um auftretende Stromdichten von vornherein durch angepasste Leiterbahnbreiten zu begrenzen. Der dritte Teil wird dann eine Verifikationsstrategie beschreiben, mit der sich auftretende Stromdichten in beliebig geformten Leiterbahnen effizient berechnen lassen.

Physikalische Ursachen der Elektromigration

Der Stromfluss durch eine Leiterbahn erzeugt zwei Kräfte, denen die einzelnen Metallionen in der Leiterbahn ausgesetzt sind: Zum einen wirkt eine elektrostatische Kraft auf die Metallionen, welche von der elektrischen Feldstärke im Leiterzug hervorgerufen wird. Auf Grund einer gewissen Abschirmung der positiven Metallionen durch die negativen Leitungselektronen ist diese Kraft in den meisten Fällen vernachlässigbar. Eine zweite Kraft entsteht nach heutigem

Wissensstand durch Impulsübertragung von bewegten Leitungselektronen auf die Metallionen im Kristallgitter. Diese Kraft wirkt in Richtung des Stromflusses und ist die wesentliche Ursache des Elektromigrationsprozesses.

In einer homogenen kristallinen Struktur treten wegen der gleichmäßigen Gitteranordnungen der Metallionen kaum Impulsübertragungen zwischen den Leitungselektronen und den Metallionen auf. Diese Symmetrieverhältnisse sind jedoch an den Korngrenzen nicht mehr gegeben, womit verstärkt Bewegungsimpulse von den Leitungselektronen auf die Metallionen übertragen werden. Da die Metallionen an den Korngrenzen deutlich schwächer eingebunden sind als in einem regulären Kristallgitter, werden ab einer gewissen Stärke des Elektronenwinds Atome von den Korngrenzen abgetrennt und in Richtung des Stromflusses bewegt. Die Bewegungsrichtung wird außerdem noch von der Korngrenze selbst beeinflusst, da Atome bevorzugt entlang der Korngrenzen wandern.

Wird die Stromrichtung über einen längeren Zeitraum konstant gehalten, entstehen dabei Hohlräume und Materialanhäufungen in der Leiterbahn. Damit sind analoge Schaltungen und die Stromversorgungsleitungen bei digitalen Schaltungen

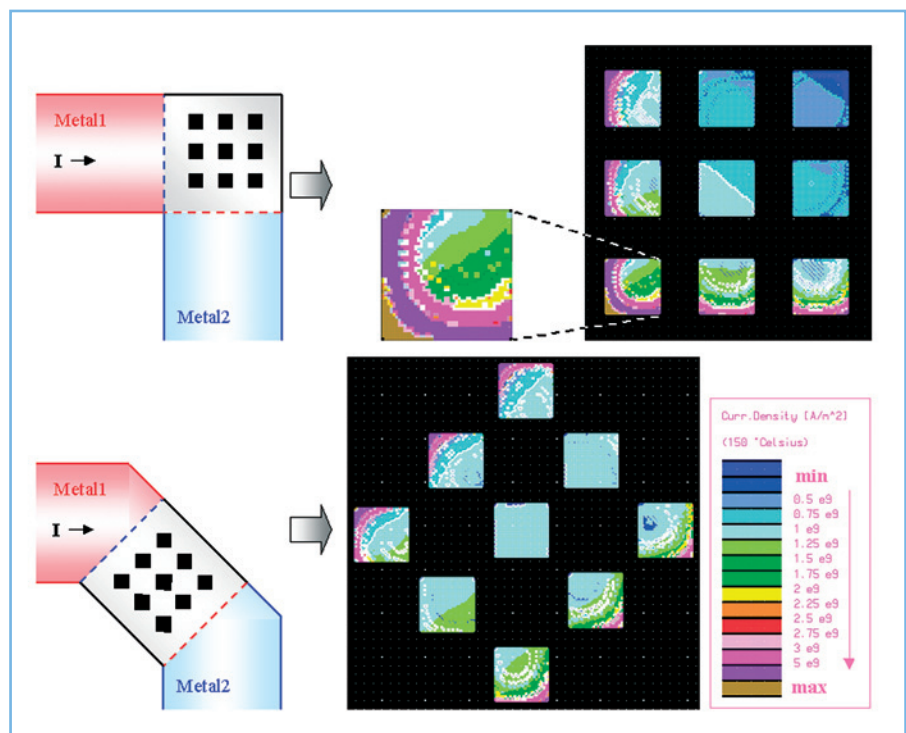


Bild 3. Stromdichteverteilung in den Vias innerhalb eines Vielfeldes. Im oberen Beispiel wird die schlechte Verteilung der Stromdichte sichtbar – während einige Vias kaum Strom tragen (rechts oben), wird insbesondere das Eck-Via (links unten) überlastet

gen besonders elektromigrationsgefährdet. Bei einer wechselnden Stromrichtung, wie bei digitalen Schaltungen mit ihren alternierenden kapazitiven Auf- und Entladungen von Leiterbahnen, tritt dieser Prozess auf Grund einer gewissen Kompensation nicht mit der gleichen Brisanz auf. Leiterbahnausfälle sind aber auch hier möglich, wobei die thermische Migration eine wesentliche Rolle spielt.

Kontaktlöcher und Vias als Schwachstellen

Die Anfälligkeit einer Leiterbahn für die Elektromigration ist daneben von der Korngröße und damit auch von der Korngrößenverteilung abhängig. Kleinere Körner begünstigen den Materialtransport, da hier mehr Transportkanäle als im grobkörnigen Material zur Verfügung stehen. Das hat zur Folge, dass sich an den Übergängen von grobkörniger zu feinkörniger Struktur verstärkt Hohlräume bilden, da hier Atome schneller ab- als zufließen. Umgekehrt treten an Übergängen von feinkörniger zu grobkörniger Struktur bevorzugt Materialansammlungen auf, da die ankommenden Atome nicht schnell genug durch die grobkörnige Struktur diffundieren können.

Derartige Korngrößenveränderungen treten in Leiterbahnen bei jedem Kontaktloch und Via auf. Da dort in der Regel auch noch Verengungen der Strombahnen anzutreffen sind, sind Kontaktlöcher und Vias besonders elektromigrationsanfällig.

In Gleichung (1) erscheint die Temperatur der Leiterbahn im Exponenten, das heißt, sie hat einen sehr starken Einfluss auf die mittlere Lebensdauer einer Leiterbahn. Die Temperatur einer Leiterbahn ergibt sich im Wesentlichen aus dem Selbsterwärmungseffekt auf Grund des Stromflusses, aus der Temperatur der benachbarten Leiterbahnen und Bauelemente sowie schließlich aus der thermischen Leitfähigkeit der umgebenden Materialien. Die Bedeutung der thermischen Leitfähigkeit wird an einem Beispiel deutlich: Während die normale Kupferverdrahtung im Haushalt bei Stromdichten von über 10^4 A/cm^2 sich selbst zerstören würde, können die Stromdichten auf einem gewöhnlichen Siliziumchip bis zu 10^{10} A/cm^2 betragen, ohne dass ein Schmelzprozess des Leiterzugs einsetzt [2]. Hierfür ist im Wesentlichen die deutlich bessere thermische Leitfähigkeit des Siliziumsubstrats verantwortlich.

Wie eingangs angeführt, muss neben der thermischen Leitfähigkeit die auf dem

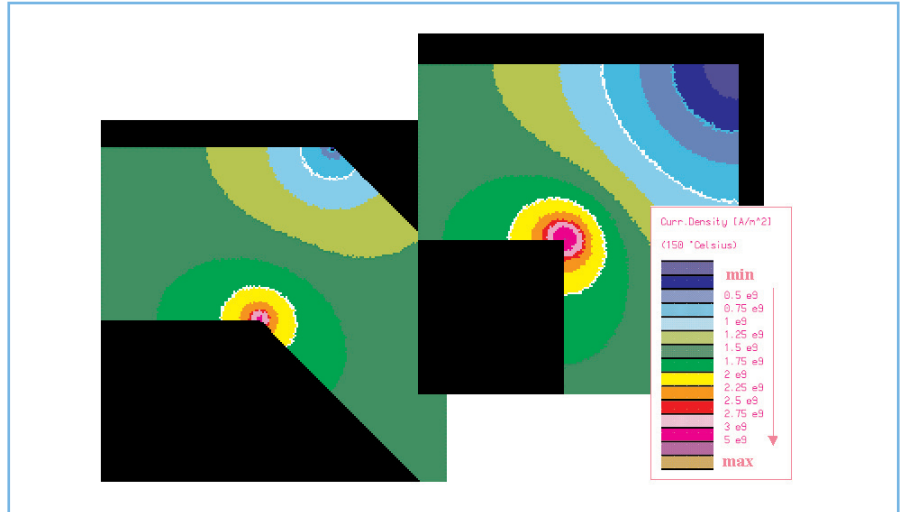


Bild 4. Stromdichteerhöhung in Leiterbahneckern, insbesondere bei rechtwinkligen Abknickungen

Selbsterwärmungseffekt beruhende Eigen- erwärmung der Leiterbahn berücksichtigt werden. Da diese im Wesentlichen eine direkte Folge der auftretenden Stromdichte ist, fällt ihre Betrachtung mit den nachfolgend genannten Punkten zusammen.

Querschnitt der Verdrahtungsleitungen

Wie aus Gleichung (1) ersichtlich, ist neben der Temperatur die auftretende Stromdichte der wesentliche Parameter, der die mittlere Lebensdauer einer Leiterbahn beeinflussen kann. Da sich die Stromdichte aus dem Betrag des Quotienten vom Strom I zur Querschnittsfläche A ergibt und bei den meisten Prozesstechnologien von einer festen Leiterbahnhöhe ausgegangen wird, ergibt sich eine direkte Beeinflussbarkeit der Stromdichte aus der Breite der Leiterbahn: Je breiter die Leiterbahn, um so geringer ist die auftretende Stromdichte und um so größer dem-

zufolge die Beständigkeit gegen Elektromigration.

Diese allgemein bekannte Weisheit kennt jedoch eine Ausnahme: Verringert man die Leiterbahnbreite unter die mittlere Korngröße des Leiterbahnmaterials, erhöht sich trotz Zunahme der Stromdichte plötzlich die Elektromigrationsbeständigkeit. Dieser scheinbare Widerspruch wird durch die Lage der Korngrenzen hervorgerufen, die sich bei derartigen Leiterbahnen wie bei einer Bambusstruktur quer über die gesamte Leiterbahnbreite erstrecken (Bild 2). Wie schon erwähnt, erfolgt der Materialtransport sowohl in Richtung des Stromflusses als auch bevorzugt entlang von Korngrenzen. Da Letztere bei einer derartigen Bambusstruktur quer zum Stromfluss angeordnet sind, ist diese wichtige Voraussetzung nicht mehr gegeben und der Materialtransport entsprechend eingeschränkt.

Via-Anordnungen und Leiterbahn-Abknickungen

Im Allgemeinen ist die Strombelastbarkeit eines Vias geringer als die einer Metallbahn. Daher werden oft Mehrfach-Vias eingesetzt, wobei der Geometrie des Viafeldes eine entscheidende Bedeutung zukommt: Mehrfach-Vias sollten so angeordnet sein, dass der resultierende Stromfluss durch alle Vias möglichst gleichmäßig erfolgt (Bild 3). Nur so wird durch die dabei erzielte gleichmäßige Aufteilung der Stromdichte auf alle Vias eine Überlastung weniger Einzelvias (bis hin zu deren Zerstörung) vermieden, und das ursprüngliche Ziel einer erhöhten Lebensdauer wird erreicht.

KONTAKT

Institut für Feinwerktechnik,
Technische Universität Dresden,
01062 Dresden,
Tel. 03 51 /4 63 -3 47 42,
Fax 03 51 /4 63 -3 71 83,
www.ifwt.et.tu-dresden.de

Robert Bosch,
Abteilung AE/DIC,
72762 Reutlingen,
Tel. 0 71 21 /35 -17 34,
Fax 0 71 21 /35 -26 87,
www.bosch.de

Abknickungen von Leiterbahnen erfordern ebenfalls besondere Beachtung. Insbesondere sind 90°-Winkel in Leiterbahnen möglichst zu vermeiden, da die Stromdichte in einem derartigen Eckpunkt deutlich über der Stromdichte von abgeflachten Ecken – etwa von 135°-Winkeln – liegt (Bild 4).

Struktur der Verdrahtungsleitungen

Wie bereits erwähnt, erhöht eine so genannte Bambusstruktur der Korngrenzen die Elektromigrationsbeständigkeit einer Leiterbahn. Neben dem bewussten Unterschreiten einer maximalen Leiterbahnbreite, bis zu der eine derartige Bambusstruktur aufrecht erhalten werden kann, wird bei integrierten Schaltungen oft mit gezieltem Erhitzen von schmalen Leiterbahnen während der Herstellung die Ausbildung einer Bambusstruktur angestrebt.

Die maximale Leiterbahnbreite, bis zu der eine Bambusstruktur möglich ist, ist jedoch sowohl für stromintensive Signalleitungen bei Analogschaltungen als auch für Stromversorgungsleitungen meistens

nicht ausreichend. Daher werden bei derart breiten Leiterbahnen oft »geschlitzte« Leiterbahnstrukturen benutzt. Hier liegen die Breiten der einzelnen Metallstrukturen zwischen den Schlitzen innerhalb des Breitenbereichs, in dem eine Bambusstruktur existiert, während die resultierende Gesamtbreite aller Metallstrukturen den Stromanforderungen entspricht.

Auf demselben Prinzip beruhend wird oft auch ein feinmaschiges Stromversorgungsnetz über die Schaltung gelegt, bei dem wegen der Vielzahl der Leitungen deren Einzelbreiten noch im Bereich einer Bambusstruktur liegen.

Fazit: Stromdichte schon beim Entwurf begrenzen

Elektromigration ist ein Zuverlässigkeitsproblem, welches nicht nur bei integrierten Schaltungen, sondern auch bei Hybridbaugruppen und Leiterplatten an Bedeutung gewinnt. Um schon beim Entwurf einer elektronischen Baugruppe elektromigrationsbedingten Problemen vorzubeugen, ist die Stromdichte zu begrenzen, wobei die Leiterbahnbreiten sowie Vias

und Abknickungen von Leiterbahnen besondere Aufmerksamkeit erfordern. Der nächste Teil dieser dreiteiligen Serie wird eine Strategie zur stromdichteabhängigen Verdrahtung von Leiterbahnen vorstellen, bevor der abschließende dritte Teil auf eine automatische Berechnungsmethode für Stromdichten in Leiterbahnen eingehen wird.

Literatur

- 1 J. R. Black: »Electromigration – A Brief Survey and Some Recent Results«; IEEE Transactions on Electronic Devices, April 1969, S. 338-347
- 2 R. Otten, P. Camposano, P. R. Groeneveld: »Design Automation for Deepsubmicron: Present and Future«; Proceedings DATE 2002, S. 650-657

Autoren

Prof. Dr. Jens Lienig wechselte nach langjähriger Industrietätigkeit im Jahre 2002 an die TU Dresden, wo er als Professor das Institut für Feinwerktechnik leitet.
Dipl.-Ing. Göran Jerke arbeitet zur Zeit an seiner Promotion bei Robert Bosch in Reutlingen.

VDE KONGRESS 2002

21. – 23. Oktober 2002 | Dresden

Schwerpunkte

- > Mikroelektronik / Mikrosystemtechnik
- > Informationstechnik / Mobilkommunikation
- > Medizintechnik / Telemedizin
- > Energietechnik / Automation

Kongresseröffnung

Gerd Tenzer

VDE-Vorsitzender, stellv. Vorsitzender der Deutschen Telekom AG

Prof. Dr. h.c. Lothar Späth

Vorsitzender des Vorstandes der JENOPTIK AG

Dr. Ulrich Schumacher

Vorsitzender des Vorstandes der Infineon Technologies AG

Erwin Staudt

Vorsitzender der Geschäftsführung der IBM Deutschland GmbH

NetWorlds

Leben und Arbeiten
in vernetzten Welten

Senden Sie mir das VDE Kongress-Programm

Name _____

Tel./Fax _____

Straße _____

E-Mail _____

Plz/Ort _____

www.vde.com • vde-conferences@vde.com

VDE