

Elektromigration und deren Berücksichtigung beim Layoutentwurf

Eingeladener Vortrag

Jens Lienig

Technische Universität Dresden

Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design (www.ifte.de)

01062 Dresden

Email: jens@ieee.org

Die Zuverlässigkeit von elektronischen Baugruppen (integrierte Schaltungen, Leiterplatten u.a.) ist eine zentrale Anforderung, die jeder Entwickler vor Augen hat. Diesem Zuverlässigkeitsanspruch wird durch vielfältige konstruktive Maßnahmen Rechnung getragen, z.B. durch die Wahl von Materialien, die den zu erwartenden Benutzungsansprüchen gerecht werden. Im Zuge der immer kleiner werdenden Strukturabmessungen kommen jedoch neue, die Zuverlässigkeit negativ beeinflussende Faktoren zum Tragen, die bisher vernachlässigbar waren. Insbesondere sind hier Materialmigrationsprozesse in elektrischen Leitungselementen zu nennen, die sich bei der Entwicklung elektronischer Baugruppen nicht mehr ignorieren lassen.

Der Begriff „Materialmigration“ (vom lateinischen *migrare*, auswandern, abgeleitet) ist ein Oberbegriff für verschiedene erzwungene Materialtransportprozesse in Festkörpern. Dazu gehören (1) die chemische Diffusion aufgrund von Konzentrationsgradienten, (2) die Materialwanderung hervorgerufen durch Temperaturgradienten, (3) die durch mechanische Spannungen induzierte Materialwanderung, und (4) die Materialwanderung aufgrund eines elektrischen Feldes. Für den zuletzt genannten Fall wird oft der Begriff *Elektromigration* verwendet, welcher Gegenstand dieses Vortrags ist.

Die Kupfer- oder Aluminium-Leiterbahnen einer elektronischen Baugruppe sind polykristallin, d.h. 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 Elektronenwindes, d.h. es kommt zum Herauslösen und einer erzwungenen Wanderung dieser Atome in Richtung des Elektronenflusses. Damit werden im Laufe der Zeit Kupfer- bzw. Aluminium-Atome an einzelnen Korngrenzen in Stromflussrichtung angehäuft („Hillocks“). Gleichzeitig können in der entgegengesetzten Richtung Hohlräume an den Korngrenzen entstehen („Voids“). Während die Materialanhäufungen Kurzschlüsse zu den benachbarten Leiterzügen hervorrufen können, reduzieren die gleichzeitig entstehenden Hohlräume den Stromfluss stellenweise bis zur völligen Auftrennung des Leiterzuges (Bild 1).

Zur Veranschaulichung der physikalischen Ursachen der Elektromigration sind die Kräfte zu betrachten, die auf Metallionen im Kristallgitter einer Leiterbahn wirken. Der Stromfluss durch eine Leiterbahn erzeugt zwei Kräfte, denen die einzelnen Metallionen ausgesetzt sind. Zum einen wirkt eine elektrostatische Kraft auf die Metallionen ein, welche durch die elektrische Feldstärke im Leiterzug hervorgerufen wird. Aufgrund einer gewissen Abschirmung der positiven Metallionen durch die negativen Leitungselektronen lässt sich diese Kraft in den meisten Fällen vernachlässigen. 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 (Bild 2).

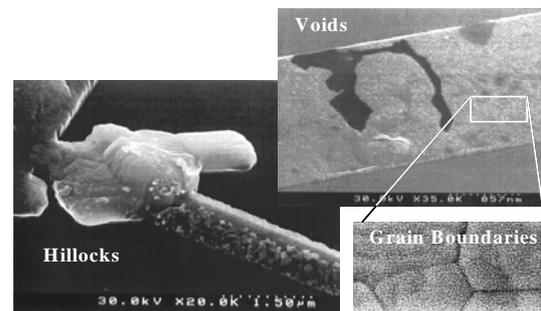


Bild 1. Hillock- und Void-Bildungen in Leiterbahnen aufgrund von Elektromigration (Foto: G. H. Bernstein und R. Frankovic, University of Notre Dame, USA)

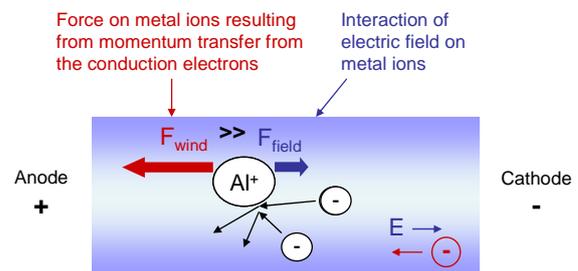


Bild 2. Metallionen, welche die Gitterstruktur einer Leiterbahn bilden, sind beim Stromfluss zwei Kräften ausgesetzt. Elektromigration resultiert aus der dominanten Kraft F_{wind} , die durch die Impulsübertragung von bewegten Leitungselektronen auf die Metallionen hervorgerufen wird.

In einer homogenen kristallinen Struktur treten aufgrund 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 Elektronenwindes 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 die bereits erwähnten Hohlräume (Voids) und Materialanhäufungen (Hillocks). Damit sind analoge Schaltungen bzw. die Stromversorgungsleitungen bei digitalen Schaltungen besonders elektromigrationsgefährdet. Bei einer

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

Viele elektronische Baugruppen, z.B. integrierte Schaltkreise, haben eine angestrebte mittlere Lebensdauer von mindestens 10 Jahren. Der durch Elektromigration bedingte Ausfall eines einzigen Leiterzuges zieht in der Regel den Ausfall der gesamten Baugruppe nach sich. Der 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 Temperatur T und die Stromdichte J sind.

- **Temperatur:** In Gleichung (1) erscheint die Temperatur der Leiterbahn im Exponenten, d.h. sie hat einen starken Einfluss auf die mittlere Lebensdauer einer Leiterbahn. Deren Temperatur ergibt sich im Wesentlichen aus dem Selbsterhitzungseffekt aufgrund des Stromflusses, der Temperatur der benachbarten Leiterbahnen bzw. Bauelemente, und schließlich der thermischen Leitfähigkeit der umgebenden Materialien. Da der Selbsterhitzungseffekt eine direkte Folge der auftretenden Stromdichte ist, fällt seine Betrachtung mit den nachfolgend genannten Punkten zusammen.
- **Querschnitt und Struktur der Leiterbahn:** Wie aus Gleichung (1) ersichtlich, ist die auftretende Stromdichte ein wesentlicher Parameter, mit dem sich die mittlere Lebensdauer einer Leiterbahn beeinflussen lässt. Da sich die Stromdichte aus dem Betrag des Quotienten von Strom I zu Querschnittsfläche A ermittelt, 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 diese ist, um so geringer ist die auftretende Stromdichte, und um so größer ist die Beständigkeit gegen Elektromigration.
Die sog. Bambusstruktur der Korngrenzen erhöht die Elektromigrationsbeständigkeit einer Leiterbahn. Neben der bewussten Wahl einer Leiterbahnbreite, bei der eine derartige Bambusstruktur existiert, wird bei integrierten Schaltungen oft durch gezieltes Erhitzen von schmalen Leiterbahnen während der Herstellung die Ausbildung einer Bambusstruktur angestrebt. Ebenfalls genutzt werden „geschlitzte“ Leiterbahnstrukturen, bei denen die geringen Breiten der einzelnen Metallstrukturen zwischen den Schlitzten die Ausbildung einer Bambusstruktur ermöglichen.
- **Leiterbahn-Abknickungen:** Abknickungen von Leiterbahnen erfordern eine besondere Beachtung. Insbesondere sollten 90-Grad-Winkel in Leiterbahnen vermieden werden, da die Stromdichte in einem derartigen Eckpunkt deutlich über der Stromdichte von abgeflachten Ecken (z.B. 135-Grad-Winkeln) liegt.
- **Via-Anordnungen:** Eine Beachtung der Vias und Kontaktlöcher ist notwendig, da im Allgemeinen die

Strombelastbarkeit eines Vias geringer als die einer Metallbahn ist. Daher werden oft Mehrfach-Vias eingesetzt, wobei der Geometrie des Viafeldes eine entscheidende Bedeutung zukommt: Mehrfach-Vias sind so anzuordnen, dass der resultierende Stromfluss durch alle Vias möglichst gleichverteilt ist.

Zusammenfassung

Elektromigration ist ein Zuverlässigkeitsproblem, welches nicht nur bei integrierten Schaltungen, sondern auch bei Hybridbaugruppen und Leiterplatten an Bedeutung gewinnt. Dieser Beitrag beschreibt das Wesen der Elektromigration, deren Ursachen sowie Möglichkeiten ihrer Beeinflussung. Damit sollen Layoutentwickler in die Lage versetzt werden, schon beim Entwurf elektromigrationsbedingte Probleme zu erkennen und zu ihrer Vermeidung beizutragen.

Eine ausführliche Betrachtung von Elektromigration und ihre Berücksichtigung beim Layoutentwurf ist im Paper vom gleichen Autor "Introduction to Electromigration-Aware Physical Design," Invited Talk. *Proc. of the International Symposium on Physical Design (ISPD'06)*, San Jose, USA; pp. 39-46, April 2006, dargelegt, welches unter www.ifte.de/mitarbeiter/lienig/ispd06_emPaper_lienig.pdf abrufbar ist.

Weiterführende Literatur

- [1] Black, J. R. Electromigration – A brief survey and some recent results. *IEEE Trans. on Electronic Devices* (April 1969), pp. 338–347.
- [2] Young, D. and Christou, A. Failure mechanism models for electromigration. *IEEE Trans. on Reliability*, vol. 43(2) (June 1994), pp. 186–192.
- [3] Blech, I. A. Electromigration in thin aluminum films on titanium nitride. *J. Appl. Phys.*, vol. 47 (1976), pp. 1203–1208.
- [4] Hau-Riege, Ch. S. An introduction to Cu electromigration. *Microel. Reliab.*, vol. 44 (2004), pp. 195–205.
- [5] Scorzoni, A., Caprile, C., and Fantini, F. Electromigration in thin-film inter-connection lines: models, methods and results. *Material Science Reports*, New York: Elsevier, vol. 7 (1991), pp. 143–219.
- [6] Li, B., Sullivan, T. D., Lee, T. C. et al. Reliability challenges for copper interconnects. *Microel. Reliab.*, vol. 44 (2004), pp. 365–380.
- [7] Hayashi, M., Nakano, N., and Wada, T. Dependence of copper interconnect electromigration phenomenon on barrier metal materials. *Microel. Reliab.*, vol. 43 (2003), pp. 1545–1550.
- [8] Vaigar, A. V., Mhaisalkar, S. G., and Krishnamoorthy, A. Electromigration behavior of dual-damascene Cu interconnects – Structure, width, and length dependences. *Microel. Reliab.*, vol. 44 (2004), pp. 747–754.
- [9] Liew, B. K., Cheung, N. W., and Hu, C. Electromigration interconnect lifetime under AC and pulse DC stress. In *Proc. Int. Reliab. Phys. Conf. (IRPS)*, 1989, pp. 215–219.
- [10] Maiz, J. A. Characterization of electromigration under bidirectional (BC) and pulsed unidirectional (PDC) currents. In *Proc. Int. Reliab. Phys. Conf. (IRPS)*, 1989, pp. 220–228.
- [11] Hunter, W. R. Self-consistent solutions for allowed interconnect current density—part II: application to design guidelines. In *IEEE Trans. on Electron Dev.*, vol. 44(2) (Feb. 1997) pp. 310–316.
- [12] Banerjee, K., Amerasekera, A., Cheung N. et al. High-current failure model for VLSI interconnects under short-pulse stress conditions. In *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 18(9) (Sept. 1997) pp. 405–407.
- [13] Lienig, J., and Jerke, G. Current-driven wire planning for electromigration avoidance in analog circuits. In *Proc. Asia and South Pacific Design Automation Conf. (ASP-DAC)*, 2003, pp. 783–788.
- [14] Jerke, G., and Lienig, J. Hierarchical current-density verification in arbitrarily shaped metallization patterns of analog circuits. In *IEEE Trans. on CAD*, vol. 23(1) (Jan. 2004), pp. 80–90.
- [15] Jerke, G., Lienig, J., and Scheible, J. Reliability-driven layout decompaction for electromigration failure avoidance in complex mixed-signal IC designs. In *Proc. Design Automation Conf. (DAC)*, 2004, pp. 181–184.