光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260303001

光电探测芯片内高密度金属互连电迁移噪声多分形研究

陈春霞*，李洪玉
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 针对光电探测器芯片内部高密度小线宽金属互连电迁移失效现象，文章基于金属互连电迁移的噪声原理，结合多分形的数学方法，对其内部高密度小线宽金属互连电迁移噪声多分形特性进行研究。研究结果表明，电迁移噪声时间序列具有多分形特性。在电迁移前期，电迁移内部表现仅是空位扩散与聚集，此时噪声时间序列的主奇异值处于潜伏期。随着电迁移加剧，当空位浓度达到饱和浓度时，空洞瞬间成核长大，导致电迁移失效。这一过程伴随着总散射截面显著增加，使得电迁移噪声时间序列的主奇异值突增，并且该变化趋势与其电阻值变化趋势一致。该研究通过探索和验证光电探测器芯片内部高密度小线宽金属互连电迁移噪声的多分形特性，对高性能光电探测芯片内的金属互连电迁移失效问题和芯片可靠性的提升具有指导意义。

关键词： 金属互连；电迁移；噪声；多分形
中图分类号： TN406　**文章编号：** 1001－5868(2026)03－0449－06

Study on the Multifractality of Electromigration Noise in High-Density Metal Interconnects of Photodetector Chips

CHEN Chunxia, LI Hongyu
(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: Based on the principles of electromigration noise in metal interconnects, this study employed a multifractal mathematical approach to investigate the multifractal characteristics of electromigration noise within the high-density, narrow-linewidth metal interconnects of photodetector chips, with the aim of addressing electromigration failure. The results indicated that the time series of electromigration noise exhibited multifractal properties. In the early stage of electromigration, only vacancy diffusion and aggregation occurred within the interconnect, during which the principal singular value of the noise time series remained in a latent state. As electromigration progressed and the vacancy concentration reached saturation, voids rapidly nucleated and grew, leading to electromigration failure. At this point, surges in the total scattering cross-section caused a sharp increase in the principal singular value of the electromigration noise time series. This variation trend was consistent with the change in electrical resistance. By exploring and validating the multifractal characteristics of electromigration noise in high-density, narrow-linewidth metal interconnects within photodetector chips, this study provides valuable guidance for addressing electromigration failure in metal interconnects and enhancing the reliability of high-performance photodetector chips.

Key words: metal interconnects; electromigration; noise; multifractality

收稿日期：2026－03－03.

*通信作者：陈春霞

0 引言

金属互连电迁移是指在电流作用下,互连薄膜中的金属原子受运动电子的影响而引起的物质输运现象。随着光电探测芯片向高集成度、小型化及低功耗方向发展,尤其是在高数据吞吐率、高集成系统等应用场景中,对高性能光电探测器芯片的集成度和小尺寸化要求日益提高。这一趋势导致芯片内部走线的密度不断增加、线宽持续减小,目前光电探测器线宽已发展到深亚微米级别。因此,深入研究高密度金属互连线的电迁移、电流密度等物理参量的变化机理和表征机制具有重要意义。

文献[1]报道,随着制造工艺的进步,金属互连线的宽度不断减小、层数不断增加,这直接导致互连线中的电流密度急剧增大,从而使电迁移引发的失效问题更加显著。电迁移过程伴随着空位的扩散、聚集、空洞成核及长大等一系列微观结构变化[2]。电阻是传统表征电迁移损伤的参量[3],可以反映空洞成核和长大期间的内部微观结构[4],但无法表征电迁移前期电阻潜伏期的内部微观结构。为克服上述局限,Vossen等提出采用低频噪声进行金属互连可靠性评估[5],该方法因检测条件接近实际工作状态、具备非破坏性及高灵敏度等优点而获得广泛关注,但其1/f噪声频谱只能反映噪声信号的全局特性,而不能反映局部奇异性[6-7],且噪声表征参量仍未能突破电阻局限。近年来,Cher等将时间序列分析方法用于电迁移数据的分析中[6-8]。考虑到电迁移演变过程中晶粒间界的微观几何结构具有分形形貌特征[9-11],而1/f噪声[12]除具有频率特性外,还具有分形特性[13]。Panin等将分形理论用于电迁移分析[14-15],但仅限于对互连线内部微观结构的描述。2007年,本研究团队应用分形及渗流理论,建立了电迁移噪声时间序列分形维数与晶粒间界分形维数之间的关系,并确定了噪声时间序列分形维数在电迁移演变中的变化趋势[16]。随着电迁移机理研究的深入,其应用范畴亦不断拓展,例如利用电迁移效应实现微纳结构的自生长[17]。近年来,Hong等通过原位原子尺度观察,揭示了钨、钼等纳米互连中表面原子的电子流方向迁移现象,该研究对经典电迁移理论提出挑战。

噪声分析方法因其无损检测等显著优势,已被广泛应用于光电器件等产品研究中[18-20]。在金属互连电迁移中,内部微观结构、缺陷状态及失效机制的变化往往会在噪声信号中表现为奇异特征。鉴于噪声信号的局部奇异性蕴含丰富的内在信息,又因多分形分析方法可以分析信号的全局及局部奇异性,可深入挖掘噪声信号蕴含的内在物理机制。基于此,本文采用多分形方法对金属互连电迁移内部及其噪声信号的奇异性进行研究,为高密度小线宽的高性能光电探测器芯片内部电迁移现象的研究提供新的表征和探究方向。

1 电迁移空间奇异性研究

在金属铝互连电迁移过程中,空位在晶粒间界处扩散、聚集的同时,空位形貌也在不断发生变化[4]。不同时刻不同位置处空位对电子散射不同,使得该过程极其复杂。为建立理论模型,假设在电迁移初期,空位均匀分布,且空位的体积、形貌保持不变。随着电迁移的进行,空位向晶粒边界扩散并聚集,导致晶粒边界处的空位浓度逐渐变大。当空位达到饱和时,空位瞬间凝聚成空洞,形成临界晶核;当晶粒边界形成一个相对无限大空洞时,最终导致铝条断路失效。

设单个空位对电子散射的奇异性贡献值为h_i,其与单个空位的散射界面σ_v存在如下的转换关系:

$$\sigma_v=\beta h_i \tag{1}$$

式中,β为转换因子。电子与单个空位的散射数n_{coll}可表示为:

$$n_{coll}=n_e v_e \sigma_v \tag{2}$$

式中,n_e是电子浓度,v_e是电子平均速度。对于散射过程,电子将动量全部传给空位,散射后空位速率v_v可表示为:

$$n_{coll} m_e v_e = m_v v_v \tag{3}$$

式中,m_v,m_e分别是空位和电子的有效质量。设μ为空位迁移率,D为空位扩散率,可表示为[21]:

$$\mu=\frac{v_v}{|E|}$$
$$D=\mu\frac{kT}{Z^*e} \tag{4}$$

式中,Z^*e为空位的有效电荷数。由空位扩散方程可得空位浓度C_v[22]:

$$C_v=C_0 t v_v^2/D \tag{5}$$

将式(1)~(4)代入式(5)可得:

$$C_v=\alpha h_i t \tag{6}$$

式中,$\alpha=C_0\frac{|E|Z^*e m_e v_e n_{coll}\beta}{kTm_v}$。总奇异值$h$可表

示为：

$$h=\int_0^w C_v ab\mathrm{d}w\times\beta h_i=abw\alpha\beta h_i^2 t \tag{7}$$

式中，a，b，w分别为晶粒间界的长、宽和厚。晶粒间界体积$V=abw$，上式可变换为：

$$h=\alpha\beta V h_i^2 t \tag{8}$$

晶粒间界电阻率可表示为[23]：

$$\rho=\frac{m_e}{n_e e^2\tau}=\frac{m_e}{n_e e^2}v_e C_v\sigma_v \tag{9}$$

将式(1)和(6)代入式(9)可得：

$$\rho=\alpha\beta\frac{m_e v_e}{n_e e^2}h_i^2 t \tag{10}$$

将式(8)与式(10)比较可得：

$$\rho=\frac{hm_e v_e}{Vn_e e^2} \tag{11}$$

由此可见电阻率与总奇异值成正比，则电阻也与总奇异值成正比。电阻的相对变化可表示为：

$$\frac{\Delta R}{R_0}=\frac{\Delta h}{h_0} \tag{12}$$

当空位浓度达到饱和浓度时，空洞瞬间成核长大。由于总奇异值正比于总空位散射截面，成核前瞬间总散射界面$S=\pi nr^2$，其中n为成核前瞬间空位个数。由如图1所示的空位向空洞转变的刚性小球模型可知，成核后空洞散射截面大于成核前总空位散射截面S，并且成核瞬间由空位散射变为空洞散射，导致散射体发生突变。这一突变直接表现为电子散射和噪声时间序列的奇异值跃变，电阻也将发生突变。



图1　空位向空洞转变的钢性小球模型

2　电迁移噪声奇异性多分形特性

在金属互连电迁移内部，缺陷体积的微小变化将引起散射强度的突变，导致噪声信号中将出现奇异点。将噪声信号看作一个时间序列，设空位半径由r_0到$r_0+\mathrm{d}r$的变化引起噪声的一个奇异点t_0，可以表示为[24]：

$$f(t)_{t_0}=a_0+a_1(t-t_0)+\cdots+a_n(t-t_0)^n+c(t-t_0)^{h(t_0)}=P_{n+1}(t)+\varepsilon_{n+1}(t) \tag{13}$$

该函数的前$n+1$项是一个泰勒展开式，其每阶幂指数均为整数，可以看作是该点信号中的光滑部分；最后一项是奇异部分，代表泰勒级数逼近的误差项，其幂指数$h(t_0)$可以为一个非整数，称为局部奇异性指数或局部hölder指数，可用于度量局部奇异性强度的大小。

将$n+1$阶高斯函数的导数作为母小波并对函数式(13)进行子波变换，其变换模值为：

$$|W^n f(s,t_0)|=\left|\frac{1}{s}\int c(t-t_0)^{h(t_0)}\Psi\left(\frac{t-t_0}{s}\right)\mathrm{d}x\right|=\left|cs^{h(t_0)}\int t'^{h(t_0)}\Psi(t')\mathrm{d}t'\right| \tag{14}$$

其中，当$t'=(t-t_0)/s$，$t\to t_0$时，$t'\to 0$，$\exp\left(-\frac{t'^2}{2}\right)\leqslant 1$，所以$\int t'^{h(t_0)}\exp\left(-\frac{t'^2}{2}\right)\mathrm{d}t'\leqslant 1$，公式(14)的模极大值表示为：

$$\left|W^n f(s,t_0)\right|_{\max}=\left|cs^{h(t_0)}\right| \tag{15}$$

计算配分函数$Z(q,s)$：

$$Z(q,s)=\sum_i\left|W^n f(s,t_i)\right|^q=\sum_i\left|cs^{h(t_i)}\right|^q=\left|c^q s^{q\sum_i h(t_i)}\right|=\left|c^q s^{qH}\right| \tag{16}$$

式中，$H=\sum_i h(t_i)$。

在金属互连电迁移前期，空位由晶格向晶粒间界处扩散。假设晶格中空位总量恒定，则空位向晶粒间界的扩散为有限源扩散，其空位扩散分布满足指数分布，即与空位为参数的局部hölder指数也服从指数分布。假设其服从q阶指数分布，则：

$$\Phi_h=q\exp(-qh) \tag{17}$$

$$H=\sum_i h(t_i)=\int h\Phi_h\mathrm{d}h=-\left(h+\frac{1}{q}\right)\exp(-qh) \tag{18}$$

令$\tau(q)=qH=-(qh+1)\exp(-qh)$，用于度量$Z(q,s)$随尺度$s$的渐进衰减性，则存在如下的幂定律：

$$Z(q,s)\propto s^{\tau(q)} \tag{19}$$

由Legendre变换计算出Hausdorff维数$D(h)$[25]：

$$D(h)=qh-\tau(q) \tag{20}$$

其中，$h=\frac{\mathrm{d}\tau(q)}{\mathrm{d}q}$，代入公式(20)可得：

$$D(h)=(qh^2-h+1)\exp(-qh) \tag{21}$$

根据公式(21)可得出此刻信号的多分形奇异谱，从而得出主奇异值，该值就是此刻空位对电子散射的奇异值。通过求解电迁移过程中不同时刻

噪声信号的主奇异值，即可获得不同时刻空位对电子散射的总奇异值，进而根据奇异值变化和电阻变化验证模型中随h值变化的电阻值R变化关系。

从信号分析可看出噪声信号随奇异点的变化是一个多分形信号，噪声信号是对电迁移过程的真实反映。这一结果提示，若在理论分析时不对过程进行简化处理，电迁移内部随奇异性强弱变化的过程可能是一个多分形过程。

3 试验方案

为得到金属互连电迁移内部奇异性和电噪声的变化规律，并验证上述理论的正确性，采用电迁移加速失效实验来改变晶粒间界形貌。本实验样品是在国内专用CMOS工艺平台上制作的标准四端引出金属铝互连测试结构，并采用塑料双列直插封装。

为确保实验的正确性和可对比性，设计并实施了两组实验。第一组：电迁移加速失效退火实验。对已具有一定老化程度的样品S1，首先在180℃下进行1小时热应力老化，然后断开控温装置电源，在烘箱密闭保温条件下，以10分钟为间隔连续测量其噪声信号随温度的变化过程，直至恢复至室温。该组实验用于表征电迁移不同时刻是否具有多分型特性。第二组：常温、大电流的恒定应力加速失效实验。为在较短时间内获得充分的电迁移损伤数据，对已老化一定程度的样品E06先施加35 mA恒定电流应力，持续15小时；随后将电流提升至40 mA并继续老化，直至样品发生断路失效。两组实验的应力条件和样品参数如表1所示。

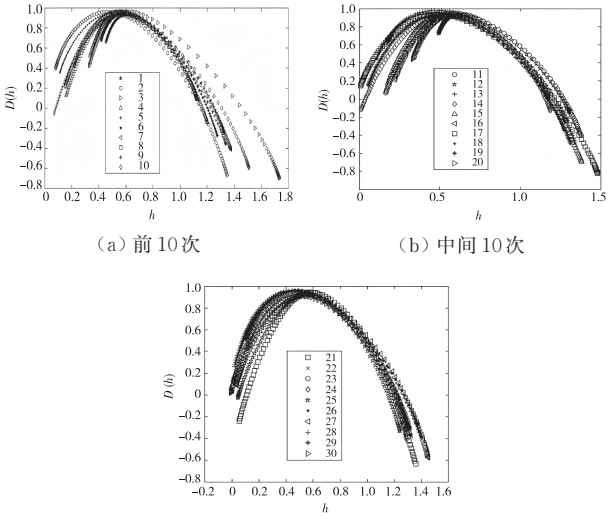
表1 电迁移加速失效实验的应力条件和样品参数

样品编号	老化温度/℃	老化电流/mA	测试电流/mA	样品电阻/Ω	样品宽、长和厚/μm
S1	180	0	20	65.4	2/1 325/0.5
E06	20	35/40	20	74.9	1.7/1 335/0.5

试验过程由老化与噪声测试两部分组成，其中老化试验部分由恒流源KEITHLEY 238及台式烘箱组成，噪声测试部分由NF-SA-200F3低噪声放大器、EG & G PARC113低噪声前置放大器及HP3528A型双通道频谱分析仪组成。

4 试验结果及讨论

如图2为样品S1在电迁移加速失效退火实验中的多分形谱。从图中可知，电迁移噪声时间序列与公式(21)呈现出相符合的特性，具有多分形特性。在电迁移前期退火阶段，其奇异值在0.54左右波动。这说明在电迁移前期空位聚集阶段，噪声时间序列的奇异性主要由空位散射导致，散射体未发生变化，奇异值处于潜伏期，而在某值附近发生波动，该试验结果与理论分析相符合。

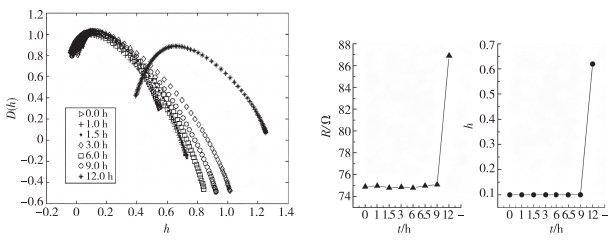


(a) 前10次 (b) 中间10次

(c) 最后10次

图2 样品S1在电迁移加速失效退火实验中的多分形谱

如图3所示为样品E06_40 mA时所采集的实验数据分析图。从图中可知，在电迁移前期阶段，噪声时间序列的奇异值处于0.1附近，成核后奇异值突增到0.62左右。此变化趋势与其电阻值变化趋势相同，表明了理论分析的正确性。在电迁移前期，空位处于不断聚集阶段，电子散射以空位为主，电迁移中的奇异值h在某值附近波动，即处于潜伏期；而在成核的瞬间，根据空位向空洞转变的钢性小球模型，空洞瞬间成核，电子散射变为空洞散射，散射体发生突变，进而电子散射和噪声时间序列的奇异值跃变，与散射截面相关的电阻也将随之发生突变。上述整个过程和规律符合理论分析的结果。



(a) 噪声时间序列的多分形谱 (b) 奇异值h和电阻值R变化

图3 样品E06_40 mA多分形谱及电阻和奇异值在电迁移失效过程中的变化

5　结论

为研究光电探测器芯片内部高密度小线宽的金属互连电迁移失效现象，本文基于金属互连电迁移的噪声原理，采用多分形的数学方法，对金属互连电迁移噪声多分形表征参量进行分析。研究结果表明，噪声时间序列具有多分形特性。在电迁移前期阶段，电子散射以空位散射为主，此时噪声时间序列的奇异值处于潜伏期，在某值附近波动；当电迁移中空位浓度达到饱和浓度时，空洞瞬间成核长大，电子散射变为空洞散射，导致奇异值发生突变，该变化趋势与电阻变化趋势相同。通过实验验证了理论的正确定性，为分析电迁移现象提供了新的无损表征研究方向。后续工作考虑将电迁移前期空位的尺寸、形状以及空洞成核后电子在空洞处的分形奇异性散射纳入模型中，有望发展出更好的多分形奇异性表征参量，建立更详细的多分形表征模型，从而对高密度、小线宽的高性能光电探测器芯片制造过程中的金属互连电迁移失效问题及芯片可靠性提升，具有较好的指导意义与应用价值。

参考文献：

[1] Oates A S. Electromigration failure of contacts and vias in sub-micron integrated circuit metallizations [J]. Microelectronics Reliability, 1996, 36(7/8): 925-953.

[2] Rosenberg R, Berenbaum L. Resistance monitoring and effects of nonadhesion during electromigration in aluminum films [J]. Applied Physics Letters, 1968, 12(5): 201-204.

[3] Pierce D G, Brusius P G. Electromigration: a review [J]. Microelectronics Reliability, 1997, 37(7): 1053-1072.

[4] Doan J C, Bravman J C, Flinn P A, et al. Direct measurement of nucleation times and growth rates of electromigration-induced voids [J]. AIP Conference Proceedings, 1999, 491(1): 15 - 26.

[5] Vossen J L. Screening of metal film defects by current noise measurements [J]. Applied Physics Letters, 1973, 23(6): 287-289.

[6] Tan C M, Lim S Y. Application of Wigner-Ville distribution in electromigration noise analysis [J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2002, 2(2): 30-35.

[7] 张贤达. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京：国防工业出版社, 1998.
Zhang Xianda. Non-Stationary Signal Analysis and Processing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.

[8] Qian S, Chen D. Joint time-frequency analysis [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1999, 16(2): 52-67.

[9] 熊兆贤. 陶瓷材料的分形研究[M]. 北京：科学出版社, 2000.
Xiong Zhaoxian. Fractal Study of Ceramic Materials [M]. Beijing: Science Press, 2000.

[10] 马建军, 徐光亮. 分形在陶瓷微观结构中的应用[J]. 中国陶瓷工业, 2004, 11(1): 55-57.
Ma Jianjun, Xu Guangliang. The application of fractal theory in ceramic microstructure[J]. China Ceramic Industry, 2004, 11(1): 55-57.

[11] Takahashi M, Nagahama H. The sections' fractal dimension of grain boundary[J]. Applied Surface Science, 2001, 182(3-4): 297-301.

[12] 杜　磊, 庄奕琪, 薛丽君. 金属薄膜电迁移1/f噪声与1/f^2噪声统一模型[J]. 物理学报, 2002, 51(12): 2836-2841.
Du Lei, Zhuang Yiqi, Xue Lijun. A unified model for 1/f noise and 1/f^2 noise due to electromigration in metal film[J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(12): 2836-2841.

[13] Gao J B, Cao Y, Lee J M. Principal component analysis of 1/f^{α} noise[J]. Physics Letters A, 2003, 314(5/6): 392-400.

[14] Panin A, Shugurov A, Schreiber J. Fractal analysis of electromigration-induced changes of surface topography in Au conductor lines [J]. Surface Science, 2003, 524 (1/3): 191-198.

[15] Panin A V, Chun H G, Shugurov A R, et al. Numerical characterization of current induced changes in surface morphology of thin Ag films [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2003, 16(4): 249-255.

[16] 陈春霞, 杜　磊, 何　亮, 等. 金属互连电迁移噪声的分形特征[J]. 物理学报, 2007, 56(11): 6674-6679.
Chen Chunxia, Du Lei, He Liang, et al. Fractal character of noise in electromigration in metel interconnection [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(11): 6674-6679.

[17] 陈　研, 刘大治, 邬宇彤, 等. 电迁移现象的机理及其应用研究进展[J]. 微纳电子技术, 2026, 63(3): 36-45.
Chen Yan, Liu Dazhi, Wu Yutong, et al. Research progress on electromigration phenomenon mechanism and applications [J]. Micronanoelectronic Technology, 2026, 63(3): 36-45.

[18] 姜　健, 邹吉炜, 陈茂胜, 等. 多通道TDICCD卫星遥感相机图像噪声分析与处理[J]. 半导体光电, 2022, 43(2): 389-394.
Jiang Jian, Zou Jiwei, Chen Maosheng, et al. Analysis and suppression of imaging noise of multi-TDICCD remote sensing camera[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(2): 389-394.

[19] 张腾飞, 王　伟, 华文渊. GaN基Micro-LED芯片低频噪声特性研究[J]. 半导体光电, 2025, 46(2): 226-231.
Zhang Tengfei, Wang Wei, Hua Wenyuan. Low-frequency noise characterization of GaN-based micro-LED chips [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(2): 226-231.

[20] 张　兴, 王品红, 但　伟, 等. 光电探测器组件辐照后性能退化的噪声表征[J]. 半导体光电, 2011, 32(5): 634-635, 727.

Zhang Xing, Wang Pinhong, Dan Wei, et al. Noise characterization on degradation of photodetector module under TID[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(5): 634-635, 727.

[21] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生, 等. 半导体物理学[M]. 4版. 北京: 国防工业出版社, 1994.
Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng, et al. Semiconductor Physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1994.

[22] 宗兆翔, 杜 磊, 庄奕琪, 等. 超大规模集成电路互连电迁移自由体积电阻模型[J]. 物理学报, 2005, 54(12): 5872-5878.
Zong Zhaoxiang, Du Lei, Zhuang Yiqi, et al. Modeling of resistance changes based on the free volume in VLSI interconnection electromigration [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(12): 5872-5878.

[23] 文志英, 井竹君. 分形几何和分维数简介[J]. 数学的实践与认识, 1995, 25(4): 20-34.

[24] Vicsk T. Fractal Growth Phenomena[M]. Singapore: World Scientific, 1993.

[25] Brown G, Michon G, Peyrière J. On the multifractal analysis of measures[J]. Journal of Statistical Physics, 1992, 66(3): 775-790.

作者简介:

陈春霞(1982—),女,高级工程师,主要从事光电子器件与材料的设计及可靠性研究。