

# 金属薄膜电迁移 $1/f$ 噪声与 $1/f^2$ 噪声统一模型

杜 磊<sup>†</sup> 庄奕琪 薛丽君

(西安电子科技大学, 西安 710071)

(2002 年 2 月 20 日收到, 2002 年 4 月 23 日收到修改稿)

应用晶粒边界自由体积的概念建立了能够统一描述金属薄膜  $1/f$  噪声与  $1/f^2$  噪声的模型. 该模型表明, 结构完整的多晶金属薄膜产生的电噪声为  $1/f$  噪声, 当金属薄膜受到电迁移损伤而形成空洞时就会引入  $1/f^2$  噪声的成分. 在电迁移应力实验中, 观察到金属薄膜  $1/f^\gamma$  噪声在空洞成核前  $\gamma$  约为 1.0, 一旦发生空洞成核, 即突增至 1.6 以上, 这一规律与本模型的预测相符合.

关键词: 金属薄膜,  $1/f^\gamma$  噪声, 电迁移, 自由体积

PACC: 7360D, 6630Q

## 1. 引 言

随着超大集成电路特征尺寸的不断缩小, 由电迁移效应引起的 Al 基金属薄膜互连失效问题日益显著<sup>[1]</sup>. 近年来发现, 金属薄膜的固有  $1/f^\gamma$  噪声对于电迁移过程非常敏感, 有可能成为金属互连电迁移的一种有效的监测手段<sup>[2,3]</sup>. 与传统的以金属互连电阻为表征参量的电迁移评价方法相比,  $1/f^\gamma$  噪声检测方法具有快速、非破坏性、灵敏度高等优点, 因此倍受人们关注<sup>[4-6]</sup>.

$1/f^\gamma$  噪声通常用它的功率谱幅度和频率指数 (即  $\gamma$  值) 两个参量来表征<sup>[7]</sup>. 对于 Al 基金属薄膜, 实验观察到  $\gamma$  值的范围为 0.8—2.5<sup>[5]</sup>,  $\gamma < 1.5$  的常被称为  $1/f$  噪声,  $\gamma > 1.5$  的则称为  $1/f^2$  噪声. 在电迁移噪声表征方法的研究中, 一般认为这两种噪声是由不同的物理机理引起的, 在电迁移演变过程中  $\gamma$  值的变化与金属薄膜微观结构的变化息息相关<sup>[5,8,9]</sup>. 然而, 能够将两种噪声联系起来的统一机理及其理论模型尚未见报道. 本文从新提出的晶粒边界自由体积概念<sup>[10,11]</sup>出发, 建立了一个能够统一描述金属薄膜  $1/f$  噪声与  $1/f^2$  噪声的模型, 用于分析电迁移过程的演变, 并通过实验予以验证.

## 2. 理论模型

### 2.1. 自由体积的定义

金属薄膜中的  $1/f^\gamma$  噪声起源于杂质或缺陷的随机运动, 这些随机运动会改变它们的散射截面, 从而引起被散射载流子运动的涨落<sup>[12]</sup>. 对于多晶态薄膜而言, 对载流子散射的主要贡献来自晶粒边界<sup>[10]</sup>. 材料微观分析和激活能分析表明, 金属薄膜的电迁移也主要发生在晶粒边界<sup>[1]</sup>. 而研究表明, 金属薄膜  $1/f$  噪声与  $1/f^2$  噪声也都起源于晶粒边界, 而且它们的行为与晶粒边界的缺陷运动有关. 例如, 文献 [13] 的作者将  $1/f^2$  噪声归因于晶粒边界周围空位扩散的涨落, 文献 [8] 的作者认为  $1/f$  噪声是晶粒边界空位与原子之间的平衡交换引起的.

从结构上看, 晶粒边界与晶粒内部的差别在于离子排列不规则, 缺陷多, 离子间距疏松, 因此在晶粒边界附近的离子运动自由度更大. 为了表征这一特点, 可以给位于晶粒边界的每个离子赋予一个与离子相关的、离子可以在其中自由运动的区域, 称之为自由体积. 在完美的金属晶体结构中, 处于晶格格点上的离子, 只能在其平衡位置附近作热振动, 除了声子散射外, 对于传导电子没有散射作用, 而偏离了平衡格点的离子就会对电子有附加的散射作用. 因此, 可以将能够自由运动的离子看作是离子与其附近的自由体积组成的电子散射中心. 这一思想是受到文献 [11] 研究晶粒边界的电阻所建立的空位-离

<sup>†</sup>E-mail: jdu@mail.xidian.edu.cn

子复合散射中心模型的启发而产生的,这里只是将其扩展到有可能包括比空位体积更大的空间范围而已。

散射中心的自由体积可以用它的线度  $\lambda$  来描述,其物理意义由下式所定义<sup>[14]</sup>:

$$S = d\lambda, \quad (1)$$

式中  $S$  为散射截面,  $d$  为离子直径。

设自由体积为  $\lambda$  的散射中心的浓度为  $n(\lambda)$ , 散射电子的弛豫时间可以表示为<sup>[14]</sup>

$$\tau = \frac{l}{u} = \frac{l}{uSn(\lambda)}, \quad (2)$$

式中  $l$  为电子的平均自由程,  $u$  为电子的平均速度。将(1)式代入(2)式,得到

$$\tau = \frac{l}{ud} \frac{1}{\lambda n(\lambda)}. \quad (3)$$

具有特定弛豫时间的电子散射引起的噪声功率谱密度呈现为 Lorentz 谱<sup>[15]</sup>, 即

$$S_{\tau}(\omega) = \frac{\tau}{1 + (\tau\omega)^2}. \quad (4)$$

当具有不同弛豫时间的散射事件的分布函数为  $g(\tau)$  时, 多个 Lorentz 谱叠加得到的噪声功率谱为

$$S(\omega) = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{\tau}{1 + (\tau\omega)^2} g(\tau) d\tau, \quad (5)$$

式中  $\tau$  的分布范围为  $[\tau_1, \tau_2]$ 。下面分两种情况进行分析。

## 2.2. 电迁移损伤之前的薄膜噪声

假设金属薄膜在未受到电迁移损伤时, 晶粒边界呈现较完整的非晶态结构。采用类似于 Maxwell-Boltzmann 平衡统计方法, 可以得到散射中心按自由体积的分布函数<sup>[11]</sup>为

$$p(v_f) = \frac{N}{V_f} \exp\left(-\frac{N}{V_f} v_f\right), \quad (6)$$

式中  $N$  和  $V_f$  分别为晶粒边界的离子总数和总的自由体积,  $v_f$  为单个散射中心的自由体积。引入平均自由体积  $v$ , 则有  $V_f = Nv$ 。代入(6)式, 得到

$$p(v_f) = \frac{1}{v} \exp\left(-\frac{v_f}{v}\right). \quad (7)$$

对于二维薄膜的晶粒边界, 体积可以换成面积。设  $\lambda$  为自由体积的线度, 分布函数可表示为

$$p(\lambda) = \frac{1}{a^2} \exp\left(-\frac{\lambda^2}{a^2}\right), \quad (8)$$

式中  $a$  为自由体积线度的平均值。自由体积-离子散射中心服从同样的分布, 所以自由体积为  $\lambda$  的散

射中心浓度可以表示为

$$n(\lambda) = np(\lambda) = \frac{n}{a^2} \exp\left(-\frac{\lambda^2}{a^2}\right), \quad (9)$$

式中  $n$  为散射中心的总浓度。散射事件按自由体积的分布函数为

$$g(\lambda) = \frac{n\lambda}{a^2} \exp\left(-\frac{\lambda^2}{a^2}\right), \quad (10)$$

代入(5)式, 有

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{nd(2\lambda^2 - a^2) \exp(\lambda^2/a^2)}{(dnu\lambda)^2 + (a^2\omega)^2 \exp(2\lambda^2/a^2)} d\lambda \\ &= \frac{1}{u\omega} \left[ \arctan\left(\frac{\omega a^2}{dnu\lambda_2} \exp\left(\frac{\lambda_2^2}{a^2}\right)\right) \right. \\ &\quad \left. - \arctan\left(\frac{\omega a^2}{dnu\lambda_1} \exp\left(\frac{\lambda_1^2}{a^2}\right)\right) \right]. \quad (11) \end{aligned}$$

令  $k_2 = \frac{a^2}{dnu\lambda_2} \exp\left(\frac{\lambda_2^2}{a^2}\right)$ ,  $k_1 = \frac{a^2}{dnu\lambda_1} \exp\left(\frac{\lambda_1^2}{a^2}\right)$ , 且假设  $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ,  $k_1\omega \ll 1$ ,  $k_2\omega \gg 1$ , 则(11)式可化为

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \frac{B}{\omega} [\arctan(k_2\omega) - \arctan(k_1\omega)] \\ &= \frac{B}{\omega} \arctan \frac{\omega(k_2 - k_1)}{1 + \omega^2 k_1 k_2} \\ &\approx \frac{B}{\omega} \arctan \frac{\omega k_2}{1 + \omega^2 k_1 k_2}, \quad (12) \end{aligned}$$

式中  $B = u^{-1}$ 。在不同的频率范围(12)式可以简化成不同的形式。当  $k_1\omega k_2\omega \gg 1$  时,

$$\begin{aligned} S(\omega) &\approx \frac{B}{\omega} \arctan \frac{\omega k_2}{\omega^2 k_1 k_2} \\ &= \frac{B}{\omega} \arctan \frac{1}{\omega k_1} \\ &\approx \frac{B}{\omega} \arctan \infty = \frac{B\pi}{2\omega}; \quad (12a) \end{aligned}$$

当  $k_1\omega k_2\omega \approx 1$  时,

$$S(\omega) \approx \frac{B}{\omega} \arctan \frac{\omega k_2}{2} \approx \frac{B}{\omega} \arctan \infty = \frac{B\pi}{2\omega}; \quad (12b)$$

当  $k_1\omega k_2\omega \ll 1$  时,

$$S(\omega) \approx \frac{B}{\omega} \arctan \frac{\omega k_2}{1} \approx \frac{B}{\omega} \arctan \infty = \frac{B\pi}{2\omega}; \quad (12c)$$

在上述三种情况下得到的都是  $1/f$  噪声。因此, 在电迁移过程尚未发生, 晶粒间界结构较完整的条件下, 一般不会出现  $1/f^2$  噪声。

## 2.3. 电迁移损伤之后的薄膜噪声

当金属薄膜经历了一定时间的电热应力作用之

后,空位开始在晶粒边界处聚集,逐渐形成空洞核.相应地,晶粒边界空洞周围的散射中心的自由体积开始增加.散射中心按自由体积的分布函数将发生改变,偏离如(6)式所描述的平衡分布.将(3)和(8)式按 $\lambda$ 展开,分别取一级近似,得到 $\tau \approx \frac{1}{\xi\lambda}$ (其中 $\xi = udn$ , $n$ 为散射中心总浓度)和 $g(\lambda) \approx n\lambda/a^2$ ,代入(5)式,得到

$$S(\omega) = - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{n}{a^2 [(\xi\lambda)^2 + \omega^2]} d\lambda$$

$$= \frac{n}{a^2 \xi^2 \omega} \left[ \arctan\left(\frac{\xi\lambda_2}{\omega}\right) - \arctan\left(\frac{\xi\lambda_1}{\omega}\right) \right]. \quad (13)$$

设 $\xi\lambda_1 \ll \omega \ll \xi\lambda_2$ ,即 $\xi\lambda_1/\omega \ll 1$ , $\xi\lambda_2/\omega \gg 1$ ,代入(13)式,则(13)式等号右边方括号中第一项的反正切函数在 $\xi\lambda_1/\omega = 0$ 附近表示为

$$\arctan \frac{\xi\lambda_1}{\omega} = \left( \arctan \frac{\xi\lambda_1}{\omega} \right)' \frac{\xi\lambda_1}{\omega}$$

$$= \frac{1}{1 + (\xi\lambda_1/\omega)^2} \frac{\xi\lambda_1}{\omega} \approx \frac{\xi\lambda_1}{\omega}. \quad (14)$$

(12)式等号右边方括号中第一项的反正切函数

$$\arctan \frac{\xi\lambda_2}{\omega} \approx \arctan \infty \approx \frac{\pi}{2}. \quad (15)$$

将(14)和(15)式代入(13)式,就会发现在噪声功率谱中即有 $1/f^2$ 项,也有 $1/f$ 项.这就是说当电迁移给金属薄膜带来不可逆转的损伤,使得散射中心按自由体积的分布偏离平衡分布,就会在原来的 $1/f$ 噪声基础上又引入了 $1/f^2$ 噪声分量.

### 3. 实验验证

#### 3.1. 实验方案

为了验证散射中心按自由体积分布变化时金属薄膜电噪声的变化规律,一方面需要人为改变金属薄膜中散射中心的分布,另一方面需要跟踪测量电噪声.前者可以采用加速电迁移损伤的办法实现.如前所述,在制造工艺完善的多晶薄膜中,可以认为晶粒边界是较为理想的非晶态结构,其中虽然存在大量空位或离子非严格晶格格点的排列,但是空位等自由空间与离子处于热动平衡状态,所以散射中心按自由体积分布遵守类似平衡分布的(7)式<sup>[11]</sup>.按照上述模型,这时金属薄膜的电噪声应以 $1/f$ 噪声为主.在较高的应力作用下,电迁移效应导致薄膜结构的变化,加速了空位的扩散、聚集乃至形成空洞.

一旦出现了以空洞成核为标志的不可逆转的电迁移损伤,则散射中心按自由体积分布将会明显偏离平衡分布,相应的噪声也应出现 $1/f^2$ 噪声的成分.

实验样品为标准四端引出 Al 基金属互连线测试结构,采用 $1\mu\text{m}$ 标准 CMOS 工艺制作,具体尺寸和实验应力条件见表 1.实验采用了高温、大电流的恒定应力加速寿命试验方法,以便在较短的时间内有控制地获得一定程度的电迁移损伤的样品.在试验前和试验过程中,对试验样品的电阻和噪声进行监测,每隔 10h 测量 1 次,测量在室温下进行.试验总时间为 140h.

噪声测量采用标准的 DC 噪声测试系统.其中噪声匹配采用 EG&G PAR1900 低噪声阻抗匹配变压器,前置放大采用 EG&G PARC113 低噪声前置放大器,频谱分析采用 HP3582A 型双通道频谱分析仪.噪声测量条件为电流密度 $2.88\text{MA}\cdot\text{cm}^{-2}$ (1#和2#样品)和 $3.33\text{MA}\cdot\text{cm}^{-2}$ (3#和4#样品),环境温度为 $25^\circ\text{C}$ ,测量的频率范围为 $2\text{—}200\text{Hz}$ .每组试验有四个样品,实测数据取四个样品测量值的算术平均值.

表 1 加速寿命实验应力条件与样品数

实验编号	实验样品编号	环境温度 $T/^\circ\text{C}$	温度修正 $T/^\circ\text{C}$	电流密度(样品宽/长) $J/\text{MA}\cdot\text{cm}^{-2}$	样品数 $L(\mu\text{m}/\mu\text{m})$	样品数
1#	a, b, c, d	130	6.63	1.9	2/1325	4
2#	e, f, g, h	130	9.72	2.5	2/1325	4
3#	i, j, k, l	130	10.83	1.9	1.7/1335	4
4#	m, n, o, p	130	14.61	2.5	1.7/1335	4

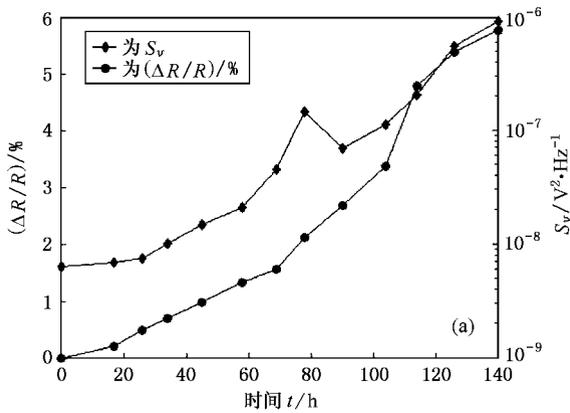
#### 3.2. 实验结果与讨论

金属薄膜电阻和噪声功率谱密度的幅值在加速寿命试验过程中的变化如图 1 所示.电阻的相对变化是常用的电迁移表征参量<sup>[16]</sup>.从图 1 可以看出,电阻与噪声功率谱密度随试验时间同步增长,但后者的增长幅度远大于前者(注意电阻变化为线性坐标,而噪声功率谱为对数坐标).也就是说,电迁移损伤引起的噪声变化要比电阻变化显著得多.

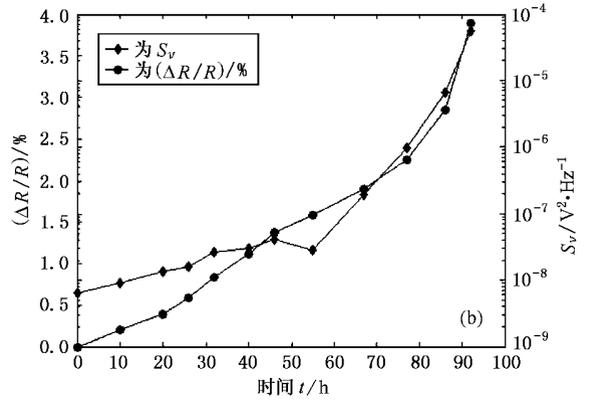
电迁移过程可以分为三个阶段:早期电阻变化阶段,此时电迁移仅仅使空位扩散和聚集,尚未有空洞成核,电阻相对变化在 $1\%—2\%$ 之间;空洞成核阶段,这时不可逆的电迁移诱发结构变化开始出现,此阶段的电阻相对变化不超过 $5\%$ ;空洞长大且电阻急剧增加阶段,电阻相对变化可达 $30\%$ <sup>[17]</sup>.从图 1 可见,在本试验时间内,电迁移处于前两个阶段.大约在电阻相对变化 $1.3\%$ 的时刻,电阻随时间的变

化曲线出现了较明显的斜率突变点,这与文献 [17] 的报道相似.正如该文献所分析的,这一点对应于第

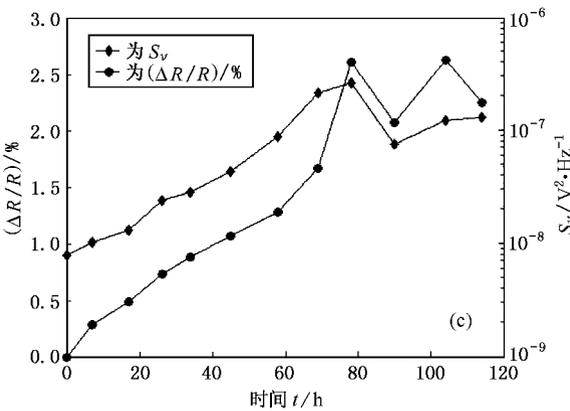
一个空洞成核的时间.对于实验 1# 和 3# ,第一个空洞成核时间为 78h ,对于实验 2# 和 4# ,则为 54h.



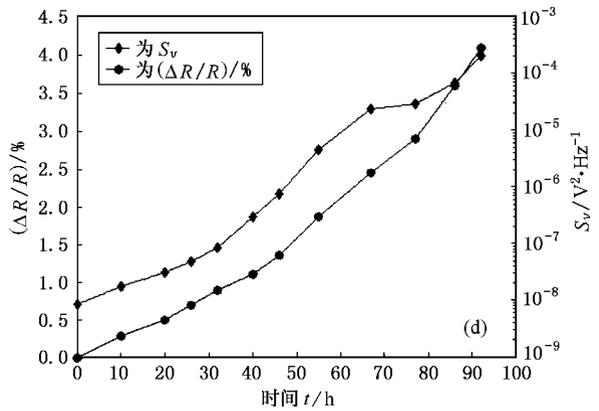
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1 金属薄膜电阻值与噪声功率谱密度幅值 ( $f=3\text{Hz}$ ) 在加速寿命试验过程中的变化 (a)(b)(c)和(d)分别对应于 1# 2# 3# 和 4# 四组实验

图 2 给出了测量得到的金属薄膜  $1/f^\gamma$  噪声频率指数  $\gamma$  随试验时间的变化曲线.由图 2 可见,对于 1# 和 3# 实验,在 78h 以前,频率指数  $\gamma$  在 1.0 左右;对于 2# 和 4# 实验,在 54h 以前,频率指数  $\gamma$  也在 1.0 左右.这就是说,在空洞成核之前,金属薄膜的噪声只有  $1/f$  噪声成分.两组实验分别达到各自的第一次空洞成核时间之后,噪声频率指数  $\gamma$  均出现了较为明显的跃变,都达到了 1.6 左右.这表明金属薄膜的噪声中出现了  $1/f^2$  噪声的成分.这一实验结果是对本文第二节提出的理论模型的大力支持.

将上述实验结果与文献 [17] 结果对比可知,频率指数  $\gamma$  突变的时刻,也就是  $1/f^2$  噪声出现的时

刻,对应于空洞成核的时刻.在空洞成核之前,尽管存在空位的扩散和聚集,自由体积还是以空位的形式出现,自由体积的分布仍以空位尺度的为主,属于平衡分布.当空洞成核后,会出现尺度大的自由体积,将破坏平衡分布,而使自由体积的分布转变为非平衡分布.按照上述自由体积模型的预测,自由体积-散射中心的分布为非平衡分布时将产生  $1/f^2$  噪声.所以,空洞成核可以作为  $1/f^2$  噪声出现的标志和判据,因空洞是实验可以观测的物理量<sup>[17]</sup>.空位的扩散和聚集可以看作是自由体积的量变过程,而空洞成核则可以看作自由体积分布出现质变.这一过程似乎可以与相变过程类比,是一个十分有趣而

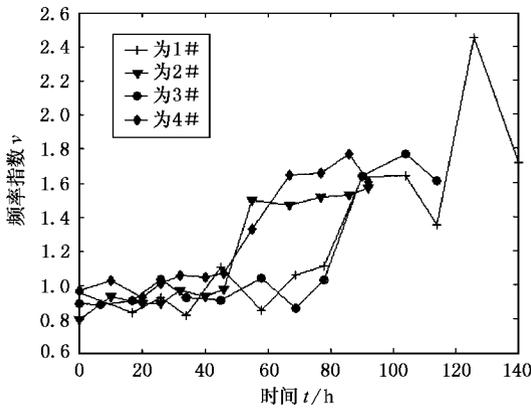


图2 金属薄膜噪声的频率指数随试验时间的变化

且值得深入研究的课题。

电迁移过程中空洞核的形成需要克服一定的能量势垒。成核前,在空洞的部位集聚了巨大的张应力。在克服能量势垒成核之后,这个张应力立即驱动空洞迅速长大,直到空洞的直径增长到一定尺度之后,才会释放完毕。此后空洞的进一步长大需要依赖长程质量迁移,因而增长速度相对缓慢。因此,噪声频率指数的突变发生在空洞成核的时刻,而在成核前和成核后,它的变化均不十分明显。这样对图2中噪声频率指数的跃变是不难理解的。不过,在整个电迁移过程中,随着损伤不断加剧,空洞数将不断增加,因此频率指数  $\gamma$  变化的总趋势是不断增加。

Smith 等<sup>[9]</sup>曾对  $1/f^\gamma$  噪声频率指数与薄膜材料微观结构和组织之间的关系进行过研究。他们的实验结果表明频率指数大小与薄膜的寿命成反比,并认为频率指数与晶粒边界原子运动的自由度有关。这一结果也与本文的分析相符合,因为薄膜材料微观组织结构的变化不难用离子自由体积的变化来描述。

## 4. 结 论

基于晶粒边界自由体积概念,建立了能够统一描述金属薄膜  $1/f$  噪声与  $1/f^2$  噪声的模型。该模型表明,在未产生电迁移损伤、结构较完整的金属薄膜晶粒边界上,只要电子散射中心按自由体积的分布满足平衡分布,所产生的电噪声为  $1/f$  噪声;当金属薄膜遭受电迁移应力损伤、产生不可逆转的空洞等缺陷时,散射中心按自由体积分布将偏离平衡分布,就会引入  $1/f^2$  噪声的成分,甚至会引起  $1/f^3$  噪声。通过对金属薄膜实施电迁移加速寿命试验,发现其  $1/f^\gamma$  噪声的频率指数在空洞成核点发生突变,由 1.0 上升到 1.6 左右。这一现象可以用本文提出的上述模型给予合理的解释。

本文所建立的模型和分析尚显粗糙,例如对于离子-自由体积散射中心仅考虑经典散射截面近似,这有待于更细致的分析与完善。

[1] Young D 1994 *IEEE Trans. Reliability* **43** 186  
 [2] Vandamme L K J 1994 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **41** 2176  
 [3] Chen T M and Abdullah M Y 1994 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **41** 2165  
 [4] Jones B K 1994 *Adv. Electron. Electron Phys.* **87** 201  
 [5] Simoen E and Claeys C 1999 *Semicond. Sci. Technol.* **14** 61  
 [6] Dagge K, Frank W, Seeger A and Stoll H 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 1198  
 [7] Neri B Diligenti A and Bagnoli P E 1987 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **34** 2317  
 [8] Butler Z C, Yang W Y, Hoang H H and Hunter W R 1991 *Solid-State Electron.* **34** 185  
 [9] Smith R G, Biery G A and Rodbell K P 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 315

[10] Dannenberg R and King A H 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 2623  
 [11] Zallen R 1983 *The Physics of Amorphous Solids* (New York: A Wiley-Interscience Publication)[[美]R 泽仑著 黄钧等译 1988 非晶态固体物理学(北京:北京大学出版社)第 247 页]  
 [12] Weissman M B 1988 *Rev. Mod. Phys.* **60** 537  
 [13] Cottle J G and Klonaris N S 1990 *J. Electron. Mater.* **19** 1201  
 [14] Jyefu 1985 *Semiconductor Physics* (Jinan: Shandong Electro-nic Institute Press) p409 (in Chinese)[(苏)基耶夫著 王家俭等译 1985 半导体物理学(济南:山东电子学会出版)第 409 页]  
 [15] Dutta P and Horn P M 1981 *Rev. Mod. Phys.* **53** 497  
 [16] Pierce D G and Brusius P G 1997 *Microelectron. Reliab.* **37** 1053  
 [17] Doan J C, Bravman J C, Flinn P A and Marieb T N 2000 *Microelectron. Reliab.* **40** 981

# A unified model for $1/f$ noise and $1/f^2$ noise due to electromigration in metal film

Du Lei Zhuang Yi-Qi Xue Li-Jun

( Xidian University , Xi 'an 710071 , China )

( Received 20 February 2002 ; revised manuscript received 23 April 2002 )

## Abstract

Based on the concept of free volume in grain boundary , a unified model for  $1/f$  noise and  $1/f^2$  noise in metal film is proposed . It is shown from the model that the noise in the metal film with perfect polycrystalline structure appears to be  $1/f$  type , while  $1/f^2$  component is introduced when the film is subjected to a certain electromigration stress and the voids thus induced . It is observed in the electromigration stress test conducted by present authors that  $\gamma$  is 1.0 or so for the measured  $1/f^\gamma$  noise in the metal film in the initial stages of the test , but  $\gamma$  abruptly increased to over 1.6 as soon as the voids are formed . This agrees with the prediction of the developed model .

**Keywords** : metal film ,  $1/f^\gamma$  noise , electromigration , free volume

**PACC** : 7360D , 6630Q