

考虑晶粒尺寸效应的超薄 (10—50 nm) Cu 电阻率模型研究*

王宁[†] 董刚 杨银堂 陈斌 王凤娟 张岩

(西安电子科技大学微电子所, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2011年5月7日收到; 2011年7月1日收到修改稿)

结合 Marom 模型与实验数据, 给出了晶粒尺寸与金属薄膜厚度的关系式. 基于已有的理论模型, 针对厚度为 10—50 nm Cu 薄膜, 考虑到表面散射与晶界散射以及电阻率晶粒尺寸效应, 提出一种简化电阻率解析模型. 结果表明, 在 10—20 nm 薄膜厚度范围内, 考虑晶粒尺寸效应后的简化模型与现有实验数据符合得更好. 相对于 Lim, Wang 与 Marom 模型, 所提模型的相对标准差分别降低 74.24%, 54.85%, 78.29%.

关键词: 表面散射, 晶界散射, 晶粒尺寸效应, 平均自由程

PACS: 68.49.Jk, 73.63.-b, 73.23.-b, 72.10.Fk

1 引言

随着集成电路特征尺寸的不断减小, 金属薄膜已接近甚至小于电子平均自由程 (室温下电子在 Cu 薄膜中的平均自由程为 39 nm^[1-5]), 因此尺寸效应对其电阻率的影响已成为不得不考虑的因素之一^[6,7]. 薄膜内晶粒直径减小、晶界增多, 自由电子运动受到晶粒、晶界的限制, 发生散射碰撞, 改变电子的平均自由程, 导致更为明显的尺寸效应. 考虑集成电路中互连线宽或线高的工艺波动, 电子散射机制对其电阻率的影响变得愈发严重, 这会给集成电路的延时、功耗、可靠性等带来一系列不利影响^[8-11].

传统 Fuchs-Sondheimer (FS) 模型考虑了金属薄膜表面散射效应, 仅适用于单晶薄膜并未涉及到晶界散射对电阻率的贡献^[12]. Mayadas Shatzkes (MS) 模型假设晶粒形状从底到顶为圆柱形的多晶薄膜, 晶粒尺寸与薄膜厚度相等, 提出了一种考虑内部晶界散射效应的模型^[13,14], 但是, 当薄膜厚度下降到 100 nm 以下时, 该模型与实验数据偏离严重. Marom 和 Eizenberg^[15] 提出的兼容模型综合考虑了表面散射与晶界散射对薄膜电阻率的影响, 并着重研究了金属薄膜电阻率的温度依赖特性. 上述模型在分析薄膜电阻率模型的过程中均基于晶粒

尺寸与薄膜厚度相等的假设. 然而, 对于 25—45 nm 互连线宽, 晶粒尺寸从 30—800 nm 不等, 由此所引起的晶粒尺寸效应不容忽视, 上述相关模型必然导致误差^[16]. 文献 [12] 中的模型基于晶界尺寸正比于薄膜厚度, 且比例系数不固定, 结果在 20—40 nm 范围内与实验数据较为符合, 但在小于 20 nm 时误差较大. Wang 等^[17] 和 Emre 等^[18] 用 Scherrer's 方程得出薄膜厚度与晶粒尺寸的关系, 提出了一种新的模型, 并用实验验证了 10—500 nm 范围内该模型的有效性, 但尚未考虑其他材料对界面的影响.

针对上述问题, 基于已有模型, 结合实验数据, 本文给出了晶粒尺寸与金属薄膜厚度的关系式; 在考虑表面散射与晶界散射后, 对于 10—50 nm 超薄 Cu 薄膜, 基于分段函数, 提出简化近似兼容模型; 并在相同的条件下, 对几种模型与实验数据进行了分析比较, 验证了所提模型的有效性.

2 相关模型

2.1 MS 模型与 Marom 模型

多晶金属薄膜中存在晶界散射效应, 造成金属电阻率相对于体电阻率的增加. 传统的 MS 模型引

* 国家自然科学基金 (批准号: 60606006) 和国家杰出青年基金 (批准号: 60725415) 资助的课题.

[†] E-mail: xxkch841215@163.com

入 α 参数描述晶界散射对电阻率的贡献^[14], 有

$$\alpha = \frac{R\lambda_B}{D_g(1-R)}, \quad (1)$$

其中, λ_B 为金属材料电子的平均自由程; R 为晶界反射系数, $0 < R < 1$, 用来表征晶界散射强度; D_g 为平均晶粒尺寸. $f(\alpha)$ 为 α 的函数:

$$f(\alpha) = 1 - \frac{3}{2}\alpha + 3\alpha^2 - 3\alpha^3 \ln\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right), \quad (2)$$

考虑晶界散射后的金属电阻率 ρ_g 可表示为

$$\rho_g = \frac{\rho_B}{f(\alpha)}, \quad (3)$$

ρ_B 为体电阻率. 上述模型仅仅考虑晶界散射对电阻率的贡献, 忽略了表面散射效应. 然而, 当电子到达金属材料的表面或边缘时, 会发生不同程度的散射现象. Marom 等^[15] 对不同散射源进行量化, 集晶界散射与表面散射机制于一体, 综合考虑了两种散射机制对金属电阻率的影响, 给出了改进的电阻率表达式为

$$\rho = \frac{\rho_B}{f(\alpha) - g(k, p, \alpha)}, \quad (4)$$

$$g(k, p, \alpha) = \frac{6(1-p)}{\pi k} \int_0^{\pi/2} d\varphi \int_0^{\pi/2} \times \frac{\cos\theta \sin^3\theta \cos^2\varphi (1 - e^{-kH/\cos\theta})}{H^2(1 - pe^{-kH/\cos\theta})} d\theta, \quad (5)$$

$$H = 1 + \frac{\alpha}{\cos\varphi \sin\theta}, \quad (6)$$

其中, $k = d/\lambda_B$; d 为薄膜厚度, $0 < p < 1$ 为散射概率, 依赖于材料特性.

当发生完全弹性散射后, 电子的动量大小不变, 此时 $p = 1$, 对电阻率的变化不构成影响. 当发生部分散射或者完全慢散射后, 电子在原来的方向上停止或重新在随机的方向上运动. 完全漫散射会引起电阻率最大程度的增加.

2.2 Lim 模型

Marom 模型集指数、对数、三角函数于一体, 并且包含二重积分, 表达式较为繁琐. Lim 和 Isshiki^[13] 在观测采用离子束淀积方式生长 Cu 薄膜的扫描电子显微镜与透射电子显微镜图像后, 计算出平均晶粒尺寸与薄膜厚度的比例系数. 对 FS-MS 模型进行了简化, 为

$$\frac{\rho_{s+g}}{\rho_B} = 1 + \frac{3}{8k}(1-p) + \frac{3}{2}\alpha \quad (k \gg 1, \alpha \ll 1), \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{R\lambda_B}{D_g(1-R)} \quad (R = 0 - 1), \quad (8)$$

修正后的模型参数为 $p = 0, R = 0.24$.

2.3 Wang 模型

在真空环境下 Wang 等采用射频磁控溅射系统淀积 10—500 nm 多层 Cu/Ta 薄膜, 通过 X 射线衍射扫描所得参数, 经 Scherrer's 方程计算得出每层晶粒尺寸, 给出了晶粒尺寸与薄膜厚度关系图. 对于 10—500 nm 多层 Cu/Ta 薄膜, 采用标准四点探针法测量薄膜电阻率, 通过对 FS 模型和 MS 模型分析比较, 结合实验数据提出模型:

$$\frac{\rho}{\rho_B} = 1 + (1-p)e^{-kt} \frac{\lambda_B}{d} + \frac{3R\lambda_B}{2D_g(1-R)}. \quad (9)$$

Lim 模型对 Marom 模型进行了简化, 修正了晶粒尺寸与薄膜厚度的关系, 给出了一种考虑两种散射效应的简化模型, 但所述模型忽略了 Ta 材料对表面散射效应的影响. 当金属薄膜较薄时, 该模型存在一定的误差. 同时, Lim 模型和 Marom 模型均未考虑晶粒尺寸效应对电阻率的影响.

3 晶粒尺寸效应与电阻率模型

3.1 晶粒尺寸效应

在研究电阻率晶界散射效应的过程中, 很多模型简单地假设晶粒尺寸与金属薄膜厚度相等^[13,15,19]. 但对于 25—45 nm 互连线宽, 晶粒直径从 30 到 800 nm 不等, 晶粒大小并不受限于互连界面, 往往大于互连线高和线宽^[16].

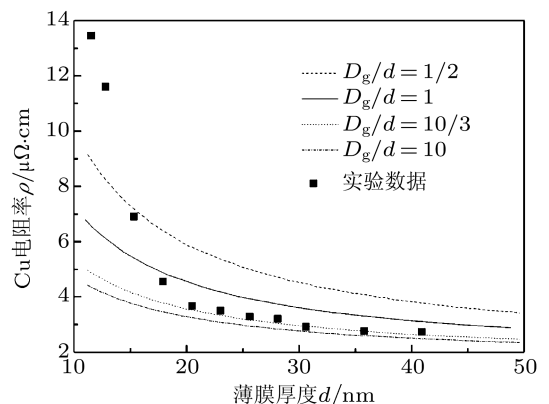


图1 MS模型与Cu电阻率实验结果比较

文献 [12] 基于 500 nm 厚 SiO₂ 衬底生长 Si (晶向 100) 外延层, 在真空压力达到 5×10^{-10} Torr 超高真空 (UHV) 腔体内, 室温条件下, 以每分钟 2.56 ± 0.2 nm 的速率, 电子轰击铜箔片淀积薄膜层. 采用共线四点探针法测量金属材料, 由方块

电阻与电阻率的相关关系 $R = \rho/d$, 进而得到金属薄膜电阻率. 图 1 给出了不同晶粒尺寸与金属薄膜厚度比 (晶厚比 D_g/d) 情况下 MS 模型 [14] 与实验数据的比较. 可以看出, 不同晶粒尺寸对电阻率的影响很大. 在薄膜厚度与晶粒尺寸相等的条件下, 文中所述模型与实验结果存在一定的偏差, 而在 $D_g/d = 10/3$ 的条件下, 模型与实验所得数据符合较好, 但在 10—20 nm 范围内, MS 模型在不同晶厚比的条件下与实验仍存在较大偏差. 原因在于传统 MS 模型仅仅考虑晶界散射对电阻率的影响, 忽视了表面散射效应, 特别是对于 10—20 nm 厚金属薄膜, 表面散射作用对电阻率的贡献表现得更为明显.

考虑晶粒尺寸效应对电阻率的影响非常有必要, 而忽略表面散射或晶界散射会对电阻率造成一定程度的低估. 观测大量 Cu 薄膜的晶粒尺寸来给出平均晶粒尺寸分布较为困难 [20]. 为了量化晶粒尺寸, 很多文献基于晶粒剖面为圆形的假设, 计算剖面面积从而给出晶粒直径与薄膜厚度的关系 [3,21,22], 但大多针对 50 nm 以上的较厚薄膜. 而对 50 nm 以下 Cu 薄膜的实验较少. 本文通过考虑两种散射效应, 结合 Marom 模型与文献 [12] 中的实验数据, 在相同条件下 ($p = 0.05, R = 0.24$) 求解不同实验数据点超越方程组, 最终计算出晶粒尺寸. 为了与实验数据好符合, 不论是 FS 模型, 还是 MS 模型, 修正后参数 p 值均为 0.05, 见文献 [12,23], 取 $R = 0.24$, 见文献 [12,14,23]. 为了在同样的条件下给出晶粒分布, 本文也取上述参数值. 图 2 给出了晶粒尺寸与薄膜厚度的关系, 可以看出, 10—20 nm 厚的薄膜与晶粒尺寸呈指数函数关系, 而薄膜厚度在 20—50 nm 范围内, 二者呈线性关系. 经过拟合, 它们的确定系数 R^2 和相关系数 R 都为 0.99, 表明具有很好的拟合精度. (10) 式给出了它们之间的分段函数表达式:

$$D_g(d) = \begin{cases} 3.70159 \times 10^{-10} e^{d/5.16371 \times 10^{-9}} \\ -0.27489 \times 10^{-9} \quad (10 \leq d \leq 20 \text{ nm}), \\ 1.30144d + 9.73973 \times 10^{-9} \\ (20 \leq d \leq 50 \text{ nm}). \end{cases} \quad (10)$$

对于 10—50 nm 超薄 Cu 薄膜, 表 1 给出了不同实验条件下薄膜结构、对应于 10—50 nm 厚薄膜的晶粒大小、电阻率实验数据. 同时, 图 3 也给出了本文方法与表 1 中实验晶粒尺寸的比较结果. 可以看出所提方法的晶粒计算结果与实验较为符合, 验证了本文方法的有效性和可行性. 但由于受

实验材料、薄膜结构、退火温度与时间等因素的影响, 不同实验的晶粒尺寸会相差较大, 表现为图 3 中的离散点.

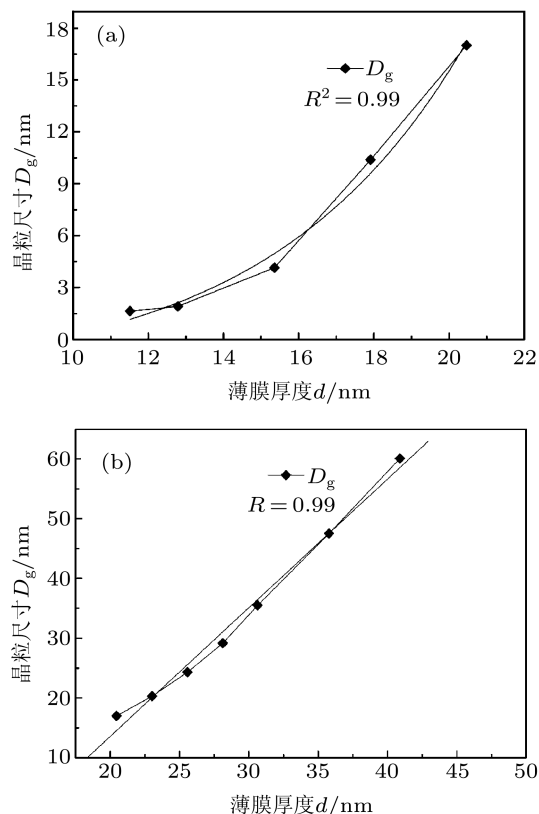


图 2 不同薄膜厚度与晶粒尺寸的关系 (a) 10—20 nm 厚的薄膜; (b) 20—50 nm 厚的薄膜

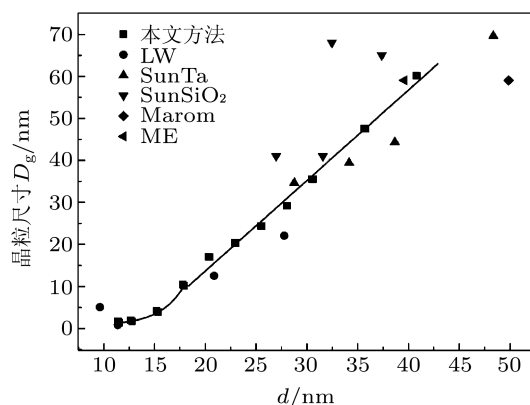


图 3 10—50 nm 厚的薄膜本文所得晶粒数据与实验比较

3.2 本文模型

利用所推导出的金属薄膜厚度与晶粒的尺寸之间的关系, 考虑晶粒尺寸效应, 修正 Marom 模型. 将 (10) 式代入 (1) 式, 有

$$\alpha_g = \frac{R\lambda_B}{D_g(d)(1-R)}, \quad (11)$$

此时, (5) 和 (6) 式变为

$$\times \int_0^{\pi/2} \frac{\cos \theta \sin^3 \theta \cos^2 \varphi (1 - e^{-kH_g / \cos \theta})}{H_g^2 (1 - pe^{-kH_g / \cos \theta})} d\theta, \quad (12)$$

$$g(k, p, \alpha_g) = \frac{6(1-p)}{\pi k} \int_0^{\pi/2} d\varphi \quad H_g = 1 + \frac{\alpha_g}{\cos \varphi \sin \theta}. \quad (13)$$

表 1 不同实验条件下的晶粒大小与电阻率

实验来源	实验条件	薄膜结构	薄膜厚度 <i>d</i> /nm	晶粒直径 <i>D_g</i> /nm	电阻率 (300 K) $\rho/\mu\Omega\cdot\text{cm}$
Sun-Ta ^[3,24]	600 °C 退火0.5 h	SiO ₂ /Ta/Cu/Ta/SiO ₂	28.9	34.6	3.99
			34.3	39.4	3.87
			38.8	44.3	3.49
			48.5	69.6	2.95
			27.1	41	4.22
			31.7	41	3.55
Sun-SiO ₂ ^[24]	150 °C 退火0.5 h	SiO ₂ /C Cu/SiO ₂	37.5	65	3.26
			45.3	101	2.80
			41.2	88	2.81
			32.6	68	2.84
			37.5	81	2.81
			46.4	113	2.50
LW ^[25,26]	见文献 [4,27,28]	Cu/Cu/SiO ₂ /Si	9.76	5.01	11.40
			21	12.5	7.09
			27.9	22	6.59
			11.57	—	12.45
			12.83	—	10.98
			15.30	—	6.50
			17.91	—	4.34
			20.57	—	3.53
Liu ^[12]	UHV 腔体热蒸发	Cu/SiO ₂ /Si	23.06	—	3.38
			25.61	—	3.18
			28.12	—	3.11
			30.75	—	2.84
			35.84	—	2.70
			40.96	—	2.67
Marom ^[23]	300 °C 退火1 h	Cu/Ta/TaN/SiO ₂ /Si	50	59	2.77
ME ^[29]	刻蚀 50 nm Cu 薄膜	Cu/Ta/TaN/SiO ₂ /Si	39.7227	—	2.86997
			47.5264	59	2.71306
			56.8876	—	2.51963
Barnat ^[4]	高真空环境溅射	Cu/SiO ₂	10.243	—	11.3182
			11.422	—	10.0327
			12.5191	—	9.18294
			13.8184	—	8.78055
Wang ^[17,30]	采用 PVD 在 Si 样本上淀积 Cu	Cu/Si	15.4836	—	8.23397
			8.86	—	9.55
			18.80	—	5.81
			49.45	—	3.08

对于 10—50 nm 厚度金属薄膜, 积分变量 $1 - e^{-kH_g/\cos\theta}$ 在积分范围近似等于 1, 同时, 由于 p 值较小, 近似等于 0, 上式可以化简为

$$g(k, p, \alpha_g) = \frac{6(1-p)}{\pi k} \int_0^{\pi/2} d\varphi \int_0^{\pi/2} \frac{\cos\theta \sin^3\theta \cos^2\varphi}{H_g^2} d\theta, \quad (14)$$

将 (13) 式代入 (14) 式中, 变换积分区间并化简, 有

$$g(k, p, \alpha_g) = \frac{6(1-p)}{\pi k} \int_0^{\pi/2} d\varphi \int_0^1 \frac{\psi^5 \cos^4\varphi}{(\alpha_g + \psi \cos\varphi)^2} d\psi. \quad (15)$$

由于晶界散射参数 α_g 主要在 (2) 式中 $f(\alpha_g)$ 起主导作用, 且在 10—50 nm 范围内 (15) 式中 α_g 较小, 为了简化模型, 忽略 α_g , 引入薄膜厚度参数 d , 经过拟合, 修正积分表达式, 最终可得

$$g(k, p, d) = \begin{cases} \frac{(1-p)(6.99e^{10^9 d/4} - 19)}{5000\pi k} & (10 \leq d \leq 20 \text{ nm}), \\ \frac{(p-1)(978e^{-10^{10} d/353} - 978)}{1000\pi k} & (20 \leq d \leq 50 \text{ nm}). \end{cases} \quad (16)$$

将 (16) 式代入 (17) 式, 得到最终的薄膜电阻率 ρ_{gs} 解析表达式为

$$\frac{\rho_B}{\rho_{gs}} = f(\alpha_g) - g(k, p, d). \quad (17)$$

4 结果分析与讨论

为了验证所提模型的有效性, 在同样的参数条件下, 分别对上述模型和所提模型与实验数据进行了比较分析, 如图 4 所示. 图 4(a) 中可以看出, 对于 20—50 nm 厚的金属 Cu 薄膜, Wang 模型与实验结果及其他模型偏离较为严重, 这是由于多层 Cu/Ta 薄膜的淀积, 模型忽略了多层 Ta 材料对 Cu/Ta 界面的影响, 因而高估了实际情况. 而对于厚度小于 20 nm 的金属薄膜, 由于未考虑晶粒的尺寸效应, Marom 模型与 Lim 模型所得结果均小于实验数据. 同时当薄膜厚度从 10 nm 生长至 15 nm, 实验所测电阻率结果呈快速下降趋势, 原因在于金属 Cu 薄膜在 SiO₂ 介质上生长存在着不连续性^[31], 由一些尺寸较小的独立晶岛 (< 10 nm) 构成^[12]. 当薄膜厚度生长超过 10 nm 时, 晶岛开始合并形成晶岛链. 此时, 电子在晶岛链之间的跳跃变得频繁起

来, 从而导致薄膜电阻率显著下降. 当薄膜厚度生长至一定程度时 (20 nm), 电子到达薄膜表面的几率变小, 晶岛的生长越来越缓, 单位体积内电子与晶界的碰撞次数变少, 电阻率下降趋势不再明显. 图 4(b) 给出了所提模型与表 1 中实验数据的比较结果. 数据的零散分布表明, Cu 薄膜电阻率与制造工艺具有很大的相关性, 即便如此, 所提模型仍能较好地表示电阻率与薄膜的关系. 同时可以看出, 对于 27 nm 以上的 Cu 薄膜, 与 Cu/SiO₂ 界面相比, Cu/Ta 界面由于存在高温退火以及高电阻率 Ta 材料所引起的表面粗糙度等因素, 造成其相应电阻率更大, 同时也解释了 Wang 模型^[17] 对电阻率高估的原因. 大量电阻率实验数据表明, 考虑晶粒尺寸效应后, 所提电阻率模型与实验较为符合, 验证了该模型的有效性.

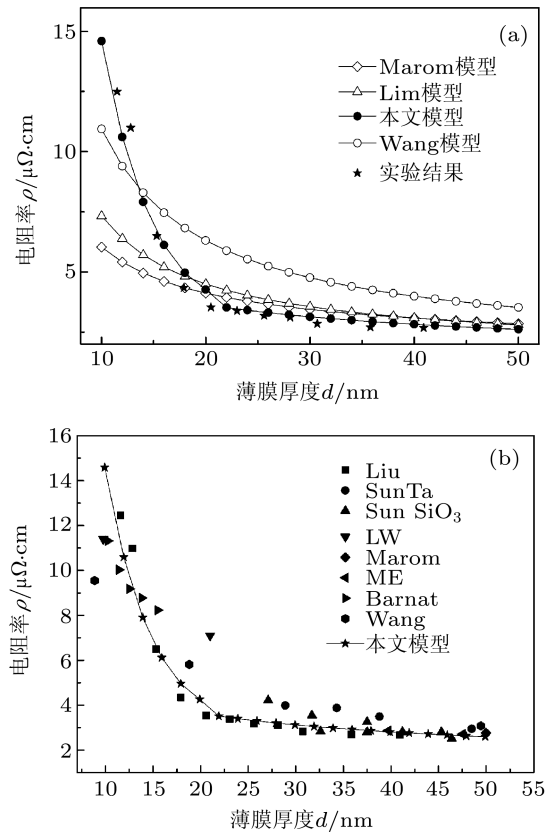


图 4 (a) 不同 Cu 电阻率模型比较; (b) 所提模型与实验比较

表 1 中晶粒直径与电阻率的对应关系如图 5 所示. 当晶粒由 10 nm 生长至 40 nm 时, 电阻率呈显著下降趋势, 而超过 40 nm 后不再明显. 这是由于晶粒较小时, 晶界散射占主导作用, 此时晶粒直径均小于电子平均自由程 (39 nm), 晶界散射作用明显; 而随着晶粒尺寸的不断变大, 晶界散射作用减弱, 表面散射作用较强, 然而此时薄膜厚度变大, 电阻率下降不再明显.

这里, 定义相对标准差 s 作为表征两条曲线数据点的相近程度, 即

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i - b_i)^2}, \quad (18)$$

其中 a_i, b_i 分别为在同一横坐标下两曲线纵坐标取值, N 为所取数据点个数. 可以看出, N 越大, 待测数据越密, 相对标准差越精确. 类似于标准差, s 越小, 表明两条数据曲线靠得越近.

在实验数据横坐标点对各模型进行取样, 表 2 和表 3 给出了 4 种模型计算结果以及与实验数

据的最大误差和相对标准差. 在 10—20 nm 部分, 与 Lim, Wang 和 Marom 模型相比, 本文所提模型的相对标准差降幅明显, 分别为 74.24%, 54.85%, 78.29%, 最大误差不及其他模型的 1/3, 保证了所提模型的精度. 而当薄膜厚度超出 20 nm, 本文所提模型与实验结果的最大误差不超过 10%, 相对标准差仅达 0.1631, 与其他三种模型相比均有不同程度的降低. Wang 模型 s 较大, 究其原因在于电子在电场的作用下运动至多层 Cu/Ta 薄膜界面时, 由于 Cu 薄膜较薄而 Ta 薄膜较多, 电子发生表面漫反射的几率增大, p 减小, 从而造成电阻率偏大.

表 2 相同参数条件下几种模型与实验结果比较

d/nm	实验	Lim 模型		Wang 模型		Marom 模型		本文模型	
		电阻率 $\rho/\mu\Omega \cdot \text{cm}$	误差	电阻率 $\rho/\mu\Omega \cdot \text{cm}$	误差	电阻率 $\rho/\mu\Omega \cdot \text{cm}$	误差	电阻率 $\rho/\mu\Omega \cdot \text{cm}$	误差
11.57	12.45	6.58	5.86	9.73	2.71	5.54	6.90	11.46	0.98
12.83	10.98	6.08	4.88	8.91	2.06	5.20	5.76	9.39	1.57
15.30	6.50	5.36	1.13	7.73	-1.23	4.71	1.78	6.66	-0.16
17.91	4.34	4.82	-0.48	6.85	-2.51	4.35	-0.01	5.01	-0.67
20.57	3.53	4.42	-0.89	6.19	-2.66	4.07	-0.54	3.61	-0.08
23.06	3.38	4.12	-0.74	5.70	-2.32	3.85	-0.47	3.46	-0.08
25.61	3.18	3.87	-0.69	5.29	-2.11	3.67	-0.49	3.32	-0.14
28.12	3.11	3.68	-0.57	4.96	-1.85	3.53	-0.42	3.21	-0.10
30.75	2.84	3.51	-0.67	4.69	-1.85	3.40	-0.56	3.10	-0.26
35.84	2.70	3.24	-0.54	4.26	-1.56	3.20	-0.50	2.93	-0.23
40.96	2.67	3.05	-0.38	3.93	-1.26	3.05	-0.38	2.79	-0.12

注: 表中误差均为绝对误差

表 3 相同参数条件下几种模型与实验结果误差分析

d/nm		不同模型与实验的相对标准差与最大误差				所提模型降低相对标准差		
		Lim	Wang	Marom	本文模型	Lim	Wang	Marom
10—20	相对标准差	3.86	2.20	4.58	0.99	74.24%	54.85%	78.29%
	最大误差	47.08%	57.84%	55.46%	15.53%			
20—50	相对标准差	0.66	1.99	0.48	0.16	29.06%	76.40%	75.43%
	最大误差	25.47%	75.44%	20.00%	9.37%			

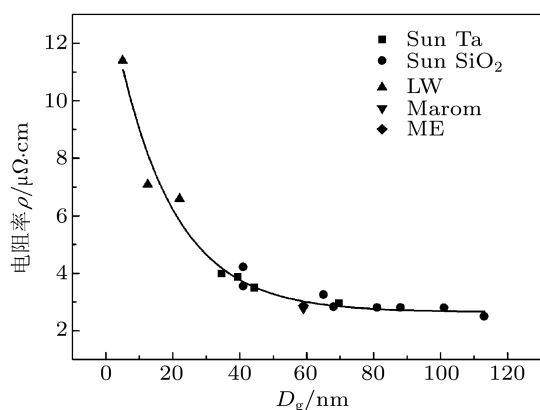


图 5 晶粒直径与电阻率关系

5 结论

传统 FS/MS 电阻率模型均忽略了晶粒的尺寸效应, 针对 10—50 nm 厚的 Cu 薄膜, 本文从考虑电子表面散射和晶界散射 Marom 模型出发, 结合电阻率实验结果, 得到了晶粒尺寸与薄膜厚度的关系表达式. 同时, 考虑晶粒尺寸后, 提出一种电阻率简化解析模型, 给出了分段函数表达式. 与现有实验数据相比, 本文所提模型较其他模型误差更小. 利用本文所提模型可以快速全面地估计芯片互连电阻率, 可用于研究和改善互连延迟、串扰及功耗等方面的模型估算, 给纳米级集成电路设计优化提供了一种有效手段.

- [1] Sun T, Yao B, Warren A P, Barmak K, Toney M F, Peale R E, Coffey K R 2010 *Phys. Rev. B* **81** 155454
- [2] Feldman B, Dunham S T 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 222101
- [3] Sun T, Yao B, Warren A P, Barmak K, Toney M F, Peale R E, Coffey K R 2009 *Phys. Rev. B* **79** 41402
- [4] Barnat E V, Nagakura D, Wang P I, Lu T M 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 1667
- [5] Zhu Z M, Wang D J, Yang Y T 2010 *Chin. Phys. B* **19** 097803
- [6] Bid A, Bora A, Raychaudhuri A K 2006 *Phys. Rev. B* **74** 35426
- [7] Steinh Ogl W, Schindler G U, Steinlesberger G, Engelhardt M 2002 *Phys. Rev. B* **66** 75414
- [8] Feldman B, Deng R, Dunham S T 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 113715
- [9] Dong G, Yang Y, Chai C C, Yang Y T 2010 *Chin. Phys. B* **19** 110202
- [10] Dong G, Xue M, Li J W, Yang Y T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 036601 (in Chinese) [董刚, 薛萌, 李建伟, 杨银堂 2011 物理学报 **60** 036601]
- [11] Dong G, Liu J, Xue M, Yang Y T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 046602 (in Chinese) [董刚, 刘嘉, 薛萌, 杨银堂 2011 物理学报 **60** 046602]
- [12] Liu H D, Zhao Y P, Ramanath G, Murarka S P, Wang G C 2001 *Thin Solid Films* **384** 151
- [13] Lim J W, Isshiki M 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 94909
- [14] Mayadas A F, Shatzkes M 1970 *Phys. Rev. B* **1** 1382
- [15] Marom H, Eizenberg M 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 3319
- [16] Graham R L, Alers G B, Mountsier T, Shamma N, Dhuey S, Cabrini S, Geiss R H, Read D T, Peddetti S 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 42116
- [17] Wang M, Zhang B, Zhang G P, Yu Q Y, Liu C S 2009 *J. Mater. Sci. Technol.* **25** 699
- [18] Emre Yarimbiyik A, Schafft H A, Allen R A, Vaudin M D, Zaghoul M E 2009 *Microelectron. Eng.* **49** 127
- [19] Mayadas A F, Shatzkes M, Janak J F 1969 *Appl. Phys. Lett.* **14** 345
- [20] Barmak K, Sun T, Coffey K R 2010 *AIP Conference Proceedings Stress-induced Phenomena in Metallization: 11th International Workshop* Bad Schandau, Germany April 12–14, 2010 p12
- [21] Onuki J, Khoo K, Sasajima Y, Chonan Y, Kimura T 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 44302
- [22] Carpenter D T, Rickman J M, Barmak K 1998 *J. Appl. Phys.* **84** 5843
- [23] Marom H, Ritterband M, Eizenberg M 2006 *Thin Solid Films* **510** 62
- [24] Sun T, Yao B, Warren A, Kumar V, Barmak K, Coffey K R 2008 *2008 IEEE International Interconnect Technology Conference* Burlingame, United States, June 1–4, 2008 p141
- [25] Liu W, Yang Y, Asheghi M 2006 *Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems -Proceedings of the Intersociety Conference*, San Diego, United States, May 30–June 2, 2006 p1171
- [26] Shojaei Zadeh S, Zhang S, Liu W, Yang Y, Sadeghipour S M, Asheghi M, Sverdrup P 2004 *Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems-Proceedings of the Intersociety Conference* Las Vegas, NV United States, June 1–4, 2004 p575
- [27] Fenn M, Akuetey G, Donovan P E 1998 *J. Phys.: Condens Matter* **10** 1707
- [28] Fenn M, Petford Long A K, Donovan P E 1999 *J. Magn. Magn. Mater.* **198** 231
- [29] Marom H, Eizenberg M 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 123705
- [30] Rossnagel S M, Kuan T S 2004 *J. Vac. Sci. Technol. B* **240**
- [31] Messaadi S, Medouer H, Daamouche M 2010 *J. Alloys Compd.* **489** 609

Study of the grain size effects on electrical resistivity model for ultrathin (10–50 nm) Cu films*

Wang Ning[†] Dong Gang Yang Yin-Tang Chen Bin Wang Feng-Juan Zhang Yan

(Key Laboratory of Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Microelectronics Institute, Xidian University, Xian 710071, China)

(Received 7 May 2011; revised manuscript received 1 July 2011)

Abstract

A relation between grain size and metal film is given by combining the Marom model with experiment data. Based on available theory model, taking into account the surface scattering, boundary scattering and grain size effect, an analytical resistivity model is presented for the 10–50 nm thick Cu films. In particular, within a range of 10–20 nm, the findings show that the proposed model with consideration of grain size effects is in good agreement with experimental results. Compared with Lim, Wang and Marom' models, the proposed method can reduce the relative standard deviations by 74.24%, 54.85% and 78.29%, respectively.

Keywords: surface scattering, boundary scattering, grain size effects, mean free path

PACS: 68.49.Jk, 73.61.–r, 72.15.–v

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60606006) and the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 60725415).

[†] E-mail: xxkch841215@163.com