

文章编号:1001-9014(2004)03-0221-04

## 3mm 涂层隐身材料的天线温度模型

缪晨, 娄国伟, 李兴国

(南京理工大学毫米波、光波近感技术研究所, 江苏 南京 210094)

**摘要:**根据电磁场理论导出了 3mm 涂层隐身材料的辐射率. 在此基础上建立了涂层隐身材料的辐射计天线温度模型. 给出了天线温度与涂层材料的厚度、相对介电常数、相对磁导率之间的定量关系. 并将数值计算结果与实际测量值进行了比较, 其结果的一致性说明了该模型的有效性.

**关键词:**毫米波辐射计; 天线温度; 建模; 隐身材料

**中图分类号:** O59; Q631 **文献标识码:** A

## ANTENNA TEMPERATURE MODEL OF 3MM COATING STEALTH MATERIAL

MIAO Chen, LOU Guo-Wei, LI Xing-Guo

(Research Institute of Millimeter Wave and Light Wave Near-sensing Technology,  
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Based on the theory of electromagnetic field, the emissivity of 3mm coating stealth material was deduced. Then the radiometer antenna temperature of coating stealth material was modeled. This model proposes the quantitative relations among the antenna temperature, material thickness, material relative permittivity and material relative permeability. The results of numerical calculation agree well with the measured results. So this model is effective.

**Key words:** millimeter wave radiometer; antenna temperature; modeling; coating stealth material

### 引言

隐身技术作为电子战与信息化战争的重要组成部分, 已受到高度重视. 对毫米波隐身材料特性的研究与测量也逐渐引起广大学者的重视<sup>[1-2]</sup>. 利用毫米波辐射计对隐身材料的特性进行测量具有测试方便、测试系统价格便宜等优点, 具有广阔的前景.

已有文献一般都只给出了辐射率与天线温度之间的关系, 并未见公开报导涂层材料的各物理参数与天线温度之间定量关系. 若单从实验出发研究这些参数对天线温度的影响, 无疑工作量大, 耗资多, 具有盲目性. 因此有必要进行理论研究. 本文利用电磁场理论及辐射计相关知识, 建立了辐射计对涂层材料测量时的天线温度模型. 这一模型确立了涂层材料的厚度、相对介电常数、相对磁导率与天线温度之间的关系, 从而为毫米波辐射计测量涂层隐身材料特性提供了理论基础.

### 1 3mm 涂层隐身材料辐射率

3mm 涂层材料结构示意图如图 1 所示,  $d$  为厚度,  $\epsilon_1, \mu_1$  分别为涂层材料的复相对介电常数和复相对磁导率. 为得到其辐射率, 先根据电磁场理论推导出其反射率.

对均匀平面波, 任意极化的电场  $E$  都可分解为与入射面(入射线与法线构成的面)平行和垂直的两个分量. 为简单起见, 只对电场平行于入射面情况进行讨论. 如图 1, 当电磁场入射到涂层表面时, 一部分反射, 一部分入射. 在第  $i$  层中( $i=0$  表示自由空间,  $i=1$  表示涂层), 合成电场可以表示为  $E_i = E_{ix} \hat{e}_x + E_{iz} \hat{e}_z$ ,  $E_i^+$  与  $E_i^-$  分别为  $i$  层中入射波和反射波的振幅, 略去时间因子  $\exp(j\omega t)$ , 则自由空间和涂层中的电场可分别表示如下: 自由空间中:  $E_0 = E_{0x} \hat{e}_x + E_{0z} \hat{e}_z$ , 涂层中:  $E_1 = E_{1x} \hat{e}_x + E_{1z} \hat{e}_z$ , 其中:  
$$E_{0x}(x, z) = E_0^+ \cos\theta_0 \cdot a - E_0^- \cos\theta_0 \cdot b,$$

收稿日期: 2003-03-24, 修回日期: 2004-02-15

作者简介: 缪晨(1978-), 男, 江苏如东人, 南京理工大学在读硕士, 硕士, 主要从事目标毫米波辐射特性研究.

Received date: 2003-03-24, revised date: 2004-02-15

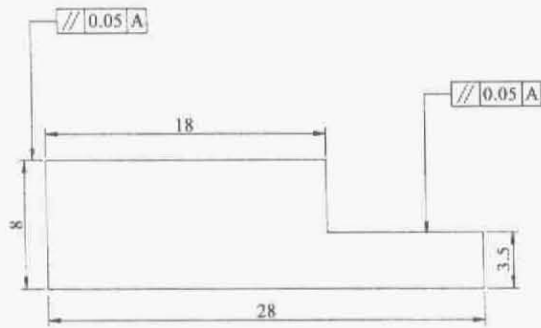


图1 剪切实验卡具设计图  
Fig. 1 The design of fixture for shear test

钢凸点的强度与它的微观组织密切相关。由于无法用通常的金相方法获得钢的组织<sup>[2]</sup>，所以本文采用物理手段分析研究钢的组织结构与剪切强度的关系，进而探索如何提高钢凸点的剪切强度。实验发现钢凸点的剪切强度和织构密切相关。

## 1 实验

### 1.1 样品制备

本文研究的钢凸点有2种形式：蒸发的钢柱和回流的钢球。钢柱采用正胶剥离法制作，先在衬底上用RC-8厚胶匀胶机甩 $20\mu\text{m}$ 左右的正胶，光刻出钢柱图形。然后热蒸发制作出 $10\mu\text{m}$ 高的钢层，并进行正胶剥离，得到钢柱。钢球是在正胶剥离得到的钢柱的基础上，加以回流得到。

用MA-8倒装焊机，采用压焊温度为 $148^\circ\text{C}$ 和压焊时间为10s的工艺条件对芯片进行焊接。

### 1.2 In凸点结构的测量

使用加极图附件的日本理学D/max-3A衍射仪，测量In的晶粒和组织。实验条件为35kV、30mA、衍射范围 $20^\circ \sim 90^\circ$ 。所测结果均为正极图，以样品的外形坐标系为准。

### 1.3 In凸点剪切强度的测量

互焊后用Dage4000实验机测试剪切强度。由于压焊后，两片芯片的总厚度约1mm。无法直接用卡具卡住试样，所以利用改性丙烯酸脂胶粘剂将芯片

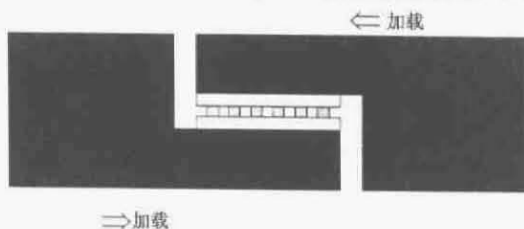


图2 剪切测试示意图  
Fig. 2 The schematics of shear method

粘在卡具上进行测试。这种卡具设计保证了测试凸点的剪切数值是严格剪切变形的结果，与凸点高度无关。剪切强度的卡具设计见图1，测试方法见图2。

## 2 实验结果及分析

钢柱的形貌如图3a所示，钢球的形貌如图4所示。钢柱形状为长方体，尺寸为 $40 \times 40\mu\text{m}^2$ ，高度为 $8\mu\text{m}$ ，节距为 $50\mu\text{m}$ ；钢球呈球形，直径为 $28.7\mu\text{m}$ ，高度为 $24\mu\text{m}$ ，节距为 $50\mu\text{m}$ 。钢柱和钢球对应的Au焊盘均为 $20 \times 20\mu\text{m}^2$ 的正方形。

将两片布好钢柱或者钢球的Si片压焊在一起，然后测量它们各自的剪切强度。测得的钢柱和钢球的剪切强度见表1。钢球的剪切强度5.6MPa相同焊接条件下钢柱的剪切强度1.9MPa的2.9倍。

钢柱断裂的部位在钢凸点内部。如图5所示，整个钢柱发生较大的塑性变形，断口上布满了韧窝特征。如图6所示，钢球的断裂部位也发生在钢凸点内部造近UBM的部位，而且压焊的两个钢球还连接在一起。

表1 钢柱和钢球的剪切强度对比  
Table 1 The comparison between the shear strength of column-shaped In bump and sphere-shaped In bump

钢凸点形式	样品组	剪切强度 (MPa)
钢柱	1	1.9
	2	2.1
	3	1.8
	平均	1.9
钢球	1	3.66
	2	7.8
	3	5.3
	平均	5.6

### 2.1 织构对剪切强度的影响

钢柱所测极图见图7a和图7b，图7a中极密度

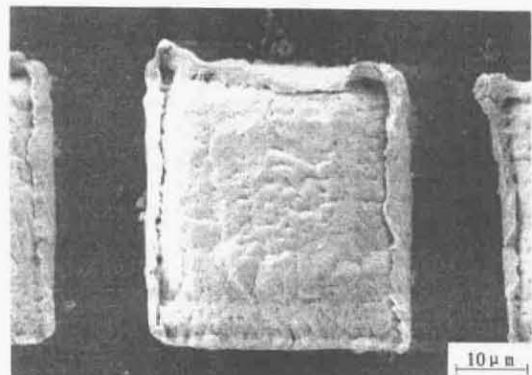


图3 钢柱形貌  
Fig. 3 The column-shape In bumps

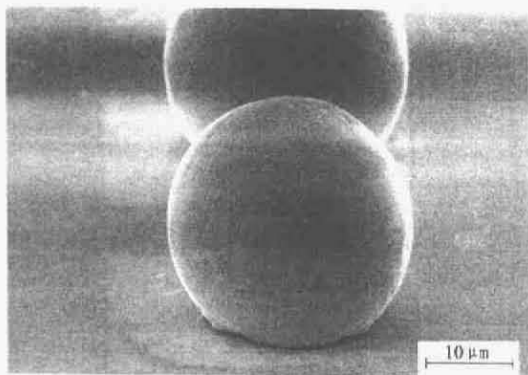


图 4 钢球形貌

Fig. 4 The ball-shape In bumps

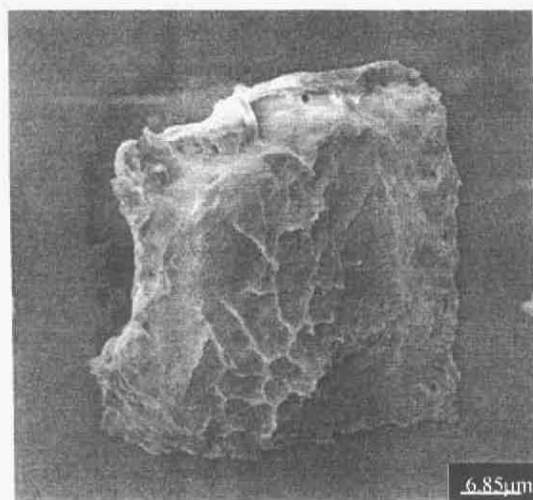


图 5 钢柱断面形貌

Fig. 5 The fracture of column-shape In bumps

集中于  $0^\circ \sim 6^\circ$  的极角范围. 钢柱的织构模式为理想的 (101) 丝织构, 即多晶钢大部分晶粒的 (101) 晶面择优取向, 平行于衬底面. 同时, 其它晶向绕 (101) 面法线随机转动.

织构结果解释了钢柱剪切强度低的原因. 首先,

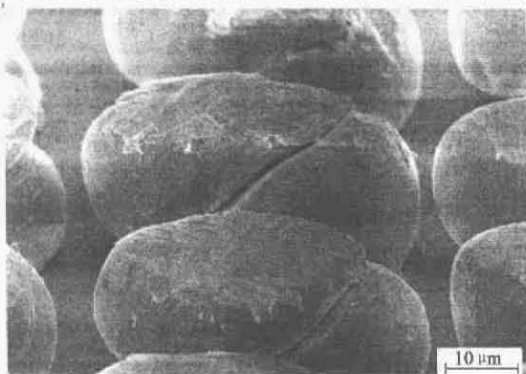


图 6 钢柱断面形貌

Fig. 6 The fracture of ball-shaped In bumps

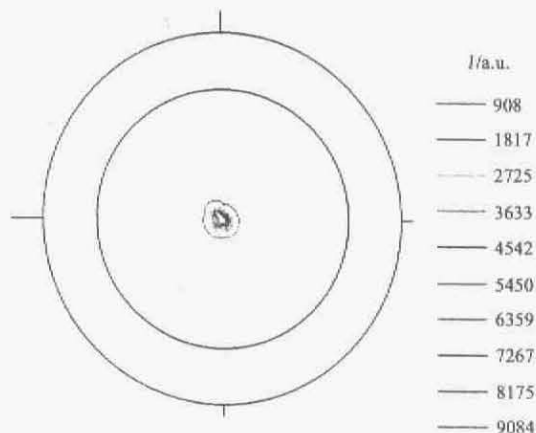


图 7a 钢柱的 (101) 极图

Fig. 7a (101) pole figure of In columns

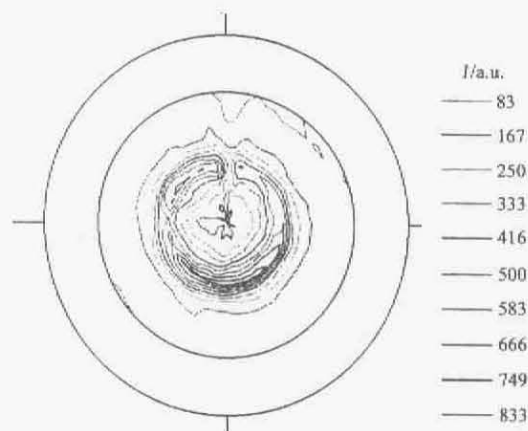


图 7b 钢柱的 (112) 极图

Fig. 7b (112) pole figure of In columns

织构结果证明各个晶粒的 (101) 晶面平行或接近平行于衬底表面. 其次, 钢的最密排面 (101) 和次密排面 (110) 也正是金属钢的位错滑移面<sup>[3]</sup>. 最后, 金属的变形是微观上位错开动的结果. 钢凸点的剪切强度对应于剪切力下位错开动难易程度.

(101) 丝织构使得 (101) 滑移面上的位错在很小的切应力作用下就易于开动, 从而导致了钢柱剪切强度低. 单位长度位错开动所需要的力, 即临界分切应力, 对特定晶体而言是个固有的物理常量. 当单位长度位错所受的力达到它的临界分切应力时, 位错开始运动. 单位长度位错受到的力为  $f = \tau \cdot b$ . 其中  $b$  是位错的柏格斯矢量, 对钢而言为  $1/2 \langle 111 \rangle$ <sup>[3,4]</sup>;  $\tau$  是作用于 (101) 滑移面上的分切应力. 由于有 (101) 丝织构存在, (101) 晶面近似平行于衬底, 使得 (101) 晶面上的分切应力数值接近于外加的名义剪切应力的数值. 这样作用很小的外

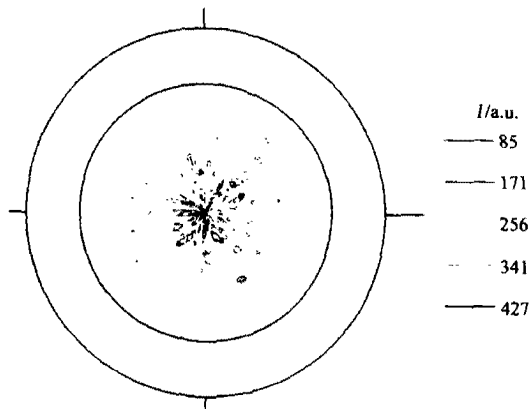


图 8a 钢球的(101)极图

Fig. 8a (101) pole figure of ball-shaped bumps

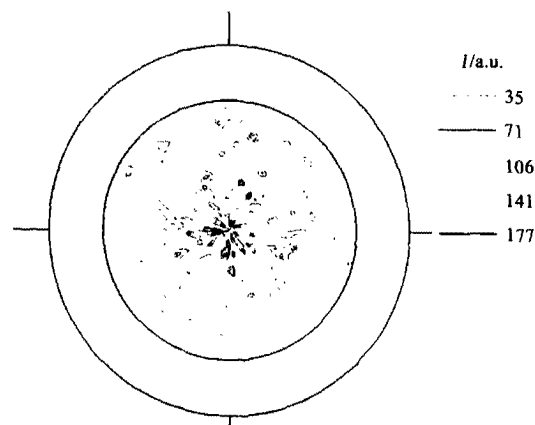


图 8b 钢球的(112)极图

Fig. 8b (112) pole figure of ball-shaped bumps

加切应力就使得位错开动,结果表现为钢柱具有很小的剪切强度.

但是,在焦平面器件的后道减薄工艺中,钢柱的剪切强度低很容易使已焊好的钢柱破坏,造成器件成品率下降并导致器件的可靠性降低,因此必须探索提高钢柱的剪切强度的途径.

很明显,避免了(101)理想丝织构的钢凸点可以具有更高的剪切强度.一个最简单而可行的方法是利用回流工艺改变钢柱的织构模式.回流后钢球

的织构分析结果见图 8a 和图 8b. 图 8a 中的大部分极密度分布在  $0^\circ \sim 37^\circ$  的极角范围,少部分极密度甚至分布到近  $37^\circ \sim 50^\circ$  的极角范围内. 尽管钢球仍有一定程度的(101)丝织构,但是织构倾向较钢柱而言已经大为弱化. 该织构模式也与钢球的高剪切强度值相一致. 而且经 X 光分析,钢柱和钢球的晶粒尺寸分别为 980nm 和 1050nm 左右,十分接近. 这也排除了晶粒尺寸强度的影响,加之钢柱和钢球都是单相纯金属,所以可以将二者的强度差异归因于织构所致.

### 3 结论

通过分析,测试,我们得出结论:1) 钢柱的剪切强度为 1.9MPa,回流后得到的钢球具有高的剪切强度 5.6MPa;2) 蒸发法生长的钢柱上存在(101)理想丝织构,回流后的钢球的(101)丝织构倾向已经大为减弱;3) 钢柱的(101)理想丝织构导致倒装焊接后钢柱的剪切强度很小,容易导致后道减薄工序中钢柱断裂;4) 回流后的钢球具有高的剪切强度,这是由于钢球所具有的织构模式不同于钢柱的(101)理想丝织构,从而避免了(101)丝织构导致的剪切强度的弱化.

### REFERENCES

- [1] Reed R P, McCowan C N, Walsh R P, *et al.* Tensile strength and ductility of indium[J]. *Mater. Sci. Eng.*, 1988, **102**(2): 227—236.
- [2] LIU Yu-Dong, ZHANG Gang, ZHU Ji-Man, *et al.* Microstructure study of magnetron-sputtered indium using EBSP method[J]. *Rare Metal* (刘豫东,张钢,朱继满,等. EBSP 对磁控溅射钽的组织研究. *稀有金属*), 2002, **18**(4): 226—229.
- [3] Blind Jean Mary, George Amand, Champier Georges. Left bracket X-Ray topographic study of dislocations in indium right bracket[J]. *Acta Metal*, 1979, **27**(3): 471—481.
- [4] Blind J M, George A, Champeier G. Dislocations and slip systems in indium single crystals[C]. In: *proceedings of the 5<sup>th</sup> international conference*, New York: Pergamon Press, 1979: 175—179.