文章编号　2095-1531(2014)01-0131-06

# 基于 ZnS 金属网栅制作工艺的改进

陈　赟*,李艳茹,张红胜
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

**摘要**:为了制作基于 ZnS 的对雷达波高效电磁屏蔽的金属网栅,采用了一种新型的先胶后镀的光刻复制工艺。但在制作过程中,发现影响金属网栅成品率的主要因素为 ZnS 材料的颜色,即由于多晶 ZnS 的颜色和所用光刻胶的颜色相似,很难判断网栅是否显影彻底,进而影响真空镀膜过程中金属网栅膜的形成。结合金属网栅的制作工艺,通过采用镀一层过渡膜的方式,即采用镀膜、涂胶、显影、腐蚀、镀膜、去胶、腐蚀的工艺,有效地解决了 ZnS 颜色带来的影响。实验表明,采用该工艺一次性成功制作出线宽为 8 μm、周期为 400 μm 的金属网栅。该工艺使基于 ZnS 金属网栅的成品率在 90% 以上。

**关　键　词**:金属网栅;多晶 ZnS;光刻复制工艺;光刻胶
**中图分类号**:TN305.7; TN972　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20140701.0131

# Improvement on fabrication technology of metallic mesh based on ZnS

CHEN Yun*, LI Yan-ru, ZHANG Hong-sheng
(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: tutorchy*@163.*com*

**Abstract**: In order to fabricate metallic meshes based on ZnS which can shield electromagnetic wave, a new type of photolithography copy technology process is adopted, in which photoresist is coated firstly and then plated in vacuum machine. But the color of polycrystalline ZnS resembles that of photo-resist, it is hard to estimate the developing degree of meshes during the process of making metallic meshes, which affects the preparation of metallic meshes film in the process of vacuum plating. A new method by plating a transition film is proposed, in which the processes including vacuum coating, spin-coating, developing, etching, vacuum coating, removing, etching are adopted combining the fabrication technology of metallic meshes. The testing results indicate that the metallic meshes with the line width of 8 μm and the line period of 400 μm are fabricated successfully. With this technology, the yield of metallic meshes is improved up to 90%.

**Key words**: metallic mesh; polycrystalline ZnS; photolithography copy technology; photoresist

**收稿日期**:2013-10-11;**修订日期**:2013-12-15
**基金项目**:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新资助项目(No. Y00332H100)

## 1 引 言

近年来，隐身技术以其独特的优点在军工领域得到广泛的应用，在现代战争中受到越来越多的关注[1-2]。金属网栅是一种无源谐振单元在介质层上按二维周期排列构成的单层或多层平面结构，对电磁波具有一定的频率选择特性，能有效地控制电磁波的反射和传输特性，它是采用光刻复制工艺在某些材料上刻制出具有一定线宽和周期的网格，通过真空镀膜把特定的材料蒸发到网栅，经过相应的处理，在所用材料上形成特定的金属网栅膜，起到对雷达波高效电磁屏蔽的作用，在隐身技术中得到了广泛的应用[3-4]。因此，国内外越来越重视对它的特性研究与应用。

国外对金属网栅的研究起步较早，形成较为完整的网栅理论，实验研究也比较成熟，特别是在美国、俄罗斯、德国等科技技术发达的国家，金属网栅已成功应用于工程中并取得较为理想的效果[5-6]。

国内对金属光栅的研究较晚，主要是对金属网栅的参数设计和光学特性进行研究，对其制作工艺很少提及。本文结合成熟的计量圆光栅光刻复制工艺[7]，采用一种新型的基于正性光刻胶的光刻复制工艺成功制作出基于 ZnS 的金属网栅。但在制作金属网栅的过程中，发现其存在的缺陷，即光刻胶的颜色和多晶 ZnS 的颜色相似，很难判断网栅在显影工艺中是否显影透彻，进而影响后续的镀膜工艺，造成金属网栅成品率下降。本文提出了改进措施，经过验证，改进的工艺更适合金属网栅的制作。

## 2 金属网栅的光电特性

金属网栅是形状不同的透明导电膜层，它对雷达电磁波有较好的电磁屏蔽作用，同时对红外线透过率有一定的影响。因此，金属网栅的光电特性参数主要包括电磁屏蔽效率和红外透过率。

### 2.1 金属网栅的电磁屏蔽率

按照 Ulrich 等人的等效电路方法对金属网栅的电磁屏蔽作用进行分析[8-10]，在网栅厚度 $t \ll 2a$，$2a \ll g$ 的情况下，对于垂直入射的雷达波，电磁屏蔽为：

$$y = f_0\left(\ln \sin \frac{\pi a}{g}\right)\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)^{-1}, \tag{1}$$

式中：$g$ 为平面金属网栅周期；$2a$ 为平面金属网栅线宽，$f_0$ 为标准化谐振频率，$f = g/\lambda$，$\lambda$ 为雷达波长。

当雷达波垂直入射金属网栅时，电磁透过率为：

$$T(0,0) = \frac{4y^2}{1 + 4y^2}. \tag{2}$$

由于金属网栅的周期 $g$ 近似于谐振波的波长，所以 $f_0 \approx 1$；对于 2 ~ 18 GHz 的雷达波段，网栅周期为 200 ~ 400 μm 时，$y \ll 1$，$\lambda \gg g$，由式(1)和式(2)可得金属网栅的电磁透射率为：

$$T(0,0) \approx \frac{4g^2}{\lambda^2}\left(\ln \sin \frac{\pi a}{g}\right)^2. \tag{3}$$

通常，用分贝为单位表示电磁屏蔽效率：

$$S = -10\lg T. \tag{4}$$

另外，金属网栅的厚度也会对电磁透过率有影响，随着厚度的增加，网栅的电阻值减小，而电阻值越小，对雷达波的屏蔽效果越好。

### 2.2 金属网栅的红外透过率

在红外光学频率范围内，金属网栅起到衍射光栅的作用，其透过率可简单由遮拦比（开口总面积的份额）给出[11]：

$$T_{\text{total}} = \left(\frac{g - 2a}{g}\right)^2 = \left(1 - \frac{2a}{g}\right)^2. \tag{5}$$

由式(3)和式(5)可知，金属网栅的电磁透射率和红外透过率是相互矛盾的，即电磁透射率随网栅线宽与周期的比值的增加而增加，红外透过率则相反，这对设计金属网栅的线宽 $2a$ 和周期 $g$ 提供了依据。因此，在设计金属网栅时，应综合考虑电磁透射率和红外透过率。

## 3 基于 ZnS 金属网栅的制作工艺及改进

光学玻璃由于制造工艺成熟、品种齐全而得

到广泛的应用。通常,金属光栅的基底多采用光学玻璃,但光学玻璃对波长超出 0.35 ~ 2.5 μm 的光会强烈吸收,而雷达波及红外波的波长一般都超出上述波长;另外,作为窗口材料必需能够承受恶劣的环境条件,特别是能够承受气动加速,因此它必须具有较高熔点,在高温下具有良好的力学性能、耐热冲击、耐高低温交变、耐振动、耐粒子侵蚀和化学稳定性好等特点[12-13]。采用常规的光学玻璃材料作为基底将无法满足上述要求。

多晶 ZnS 是在高温真空条件下用纯 ZnS 为原料压制而成,是一种使用波段宽的红外光学材料,具有优良的红外透光特性(厚度为 6 mm,波段为 3 ~ 5 μm 时透过率≥69%;波长为 7.5 ~ 10.5 μm 时透过率≥70%)、较低的热膨胀系数、良好的耐冲击性及机械性能(洛氏硬度为 210 ~ 240 kg/mm$^2$,抗弯强度为 90 ~ 100 MPa)和热学性能(熔点为 1 830 ℃)[14-15]。因此,红外窗口或头罩式隐身多采用 ZnS 作为金属光栅的基底。而 ZnS 的缺点是易溶于酸,即遇酸变色。因此,必须采用新型的光刻工艺,否则,无法制作出 ZnS 金属网栅。

考虑到 ZnS 对酸类物质的敏感性等因素,采用先胶后镀膜的新型制作工艺,避免了在研制过程中和酸类物质的接触,具体工艺如下:

涂胶—前烘—曝光—显影—后烘—真空镀膜—去胶。制作工艺图如图 1 所示。但在制作过程中,发现 ZnS 的颜色和所用正性光刻胶的颜色相似,如图 2 所示,因此,很难判断网栅是否显影彻底,进而影响金属网栅膜的牢固度,最终导致金属网栅的制作失败。而 ZnS 无法按照常规玻璃去除金属网栅膜再利用,只能重新进行光学加工,而且 ZnS 及其加工费用昂贵,影响了金属网栅工程化的推进。通过实验,发现通过镀膜的方式可以

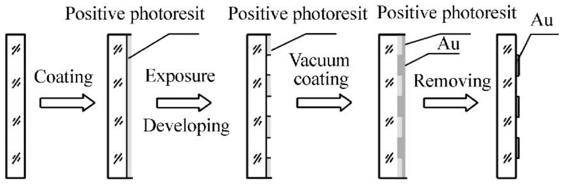
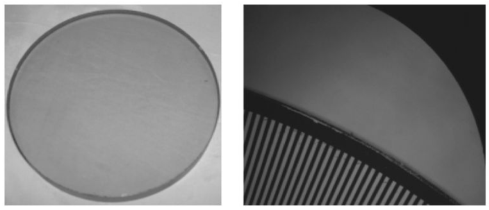



图 1　金属网栅制作工艺

Fig. 1　Fabrication technology diagram of metallic meshes

解决 ZnS 和正性光刻胶颜色带来的问题。具体工艺如下:

清洗—镀膜—涂胶—前烘—曝光—显影—后烘—真空镀膜—去胶—腐蚀。制作工艺图如图 3 所示。



(a) Color of ZnS　　(b) Color of positive photoresist

图 2　ZnS 和正性光刻胶的颜色对比

Fig. 2　Contrast of ZnS and positive photoresist

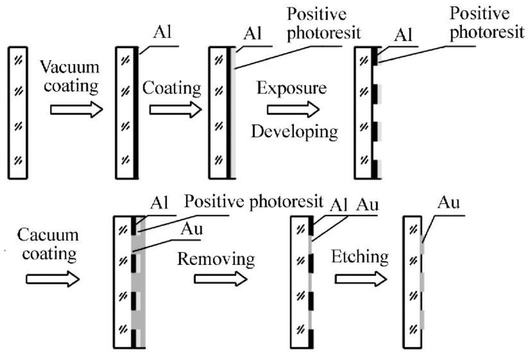



图 3　改进的金属网栅制作工艺图

Fig. 3　Diagram of improved fabrication technology of metallic meshes

## 4　实　验

按照上述改进的新型工艺,制作了线宽为 8 μm,周期为 400 μm,对角长度为 350 mm 的四边形 ZnS 金属网栅。首先把清洗好的 ZnS 放在 DM-700C 镀膜机中真空镀 Al,真空度为 $1\times10^{-3}$ Pa,蒸发电压为 250 V,然后涂胶、前烘 90 ℃,曝光后显影,显影液为 5% 的 NaOH 溶液,如图 4 所示。由于 ZnS 耐碱,Al 和碱反应,通过 Al 膜便可以比较容易确定是否显影彻底,因为显影是否彻底影响后续工艺,最终影响 ZnS 金属网栅成品率。制作的 ZnS 网栅在没有镀制增透膜的

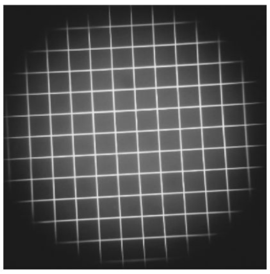


图4 带有 Al 膜层的 ZnS 显影图

Fig. 4 Development picture of ZnS with Al film

情况下,通过测试,其红外透过率为 69%,如图 5 所示。

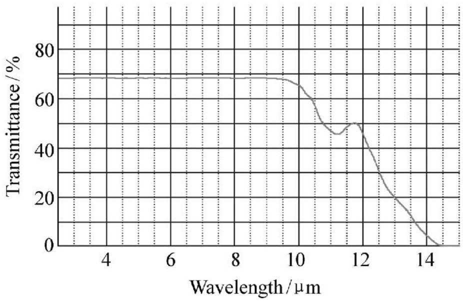



图5 制作的金属网栅红外波透过率

Fig. 5 Infrared transmittance of fabricated metallic meshes

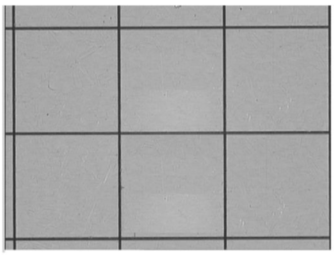


图6 显微镜下的金属网栅

Fig. 6 Micrograph of metallic meshes

通过 45 倍显微镜测得的金属网栅的图像如图 6 所示。可以看出,采用该种工艺制作的金属网栅线条边缘陡直,无断线,符合设计要求。

## 5 结果与讨论

最初制作 ZnS 金属网栅是采用涂胶—曝光—显影—镀膜—去胶,但随着制作次数的增加,发现脱膜的次数越来越多,而且每次只能通过抛光工艺去掉 ZnS 表面的金膜,增加了制作时间和成本。分析发现脱膜是显影不彻底造成的,从而使得光刻胶和 ZnS 的颜色接近,比较难判断是否显影完全,为了解决该问题,在上述工艺的基础上增加了一道工序,即先镀一层非常薄的过渡膜后,在显微镜下便可以比较容易区分光刻胶和 ZnS,同时又可以很容易用碱溶液去除,最后选用铝作为过渡膜。通过实验,发现可以较好地解决因显影不彻底造成的脱膜现象,即使出现脱膜,还可以通过碱液去除,不用重新进行抛光,减少了制作时间和成本。但对过渡膜的厚度要控制,因为厚膜需要显影的时间长。过渡膜的厚度和显影时间均是后续制作过程需要解决的问题。

## 6 结 论

通过对金属网栅光电特性的分析,给出了制作的金属网栅的结构参数,在采用新型的光刻复制工艺制作金属网栅的过程中发现了 ZnS 晶体材料的颜色成为影响成品率的一个主要因素。经过分析与实验,给出了改进的制作工艺,即在 ZnS 晶体先镀一层和光刻胶颜色差别较明显的膜层,这样就可以较好地解决显影过程中是否因显影完全所带来的膜层脱落问题,使成品率提升至 90%。并以线宽为 8 μm,周期为 400 μm 成功制作了 3 块 ZnS 金属网栅,说明该工艺是行之有效的;而且,若出现脱膜,还可以通过碱液去除,减少了制作时间和成本,加快了金属网栅的工程化进程。

**参考文献:**

[1] 张兴德,刘 琳,李荣刚. 机载光电设备红外窗口技术[J]. 红外与激光工程,2010,39(4):600-606.
ZHANG X D,LIU L,LI R G. Infrared optical window for airborne photoelectric equipments[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2010,39(4):600-606. (in Chinese)

[2] 王长伟.金属网栅用于隐身技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
WANG CH W. Research on the metallic mesh for stealth technology[D]. Harbin:Harbin institute of Technology,2006. (in Chinese)

[3] 李凤友,卢振武,谢永军,等.激光直写方法制作透明导电金属网栅[J].光子学报,2002,31(10):1270-1272.
LI F Y,LU ZH W,XIE Y J,*et al*.. Transparent conductive metallic film mesh fabricated by laser direct writing technique [J]. *Acta Photonica Sinica*,2002,31(10):1270-1272. (in Chinese)

[4] 范有余,羊毅,姜雄伟,等.一种新型中红外材料及其隐身功能研究[J].红外与激光工程,2010,39(1):12-16.
FAN Y Y,YANG Y,JIANG X W,*et al*.. New mid-infrared material and its radar stealth function[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2010,39(1):12-16. (in Chinese)

[5] 申振峰,冯晓国,高劲松,等.用于红外窗电磁屏蔽的电感性网栅薄膜[J].红外技术,2008,30(8):468-471.
SHEN ZH F,FENG X G,GAO J S,*et al*.. The inducting mesh coating used for electromagnetic shielding of the infrared windows[J]. *Infrared Technology*,2008,30(8):468-471. (in Chinese)

[6] 冯晓国,方 梁,孙连春.金属网栅结构参数设计与制作[J].光学 精密工程,2005,13(1):59-64.
FENG X G,FANG L,SUN L CH. Characteristic dimension design and fabrication of metallic mesh[J]. *Opt. Precision Eng.*,2005,13(1):59-64. (in Chinese)

[7] 陈赟,李艳茹,张红胜.计量圆光栅的制作工艺及质量参数研究[J].长春理工大学学报(自然科学版),2012,35(3):40-43.
CHEN Y,LI Y R,ZHANG H SH. The research on manufacture and quality parameter of metrology circular grating[J]. *J. Changchun University of Science and Technology*(Natural Science Edition),2012,35(3):40-43. (in Chinese)

[8] ULRICH R. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure[J]. *Infrared Physics*,1967,(7):37-57.

[9] 刘小涵,赵晶丽,冯晓国,等.高透光率感性网栅膜的电磁屏蔽 [J].光学 精密工程,2012, 20(1):80-86.
LIU X H,ZHAO J L,FENG X G,*et al*.. Electromagnetic shielding of highly transparent inductive mesh[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(1):80-86. (in Chinese)

[10] 朱新华,冯晓国,赵晶丽,等.ZnS光窗上增透与带通频率选择表面组合膜设计[J].光学学报,2010,30(9):2766-2770.
ZHU X H,FENG X G,ZHAO J L,*et al*.. Design of antireflection and band-pass frequency selective surface combining coatings for zns optical window[J]. *Acta Photonica Sinica*,2010,30(9):2766-2770. (in Chinese)

[11] 张运强,潘国庆,李福巍.金属网栅电磁屏蔽薄膜在红外空空导弹上的应用研究[J].红外技术,2010,32(7):395-398.
ZHANG Y Q,PAN G Q,LI F W. Research of metallic mesh in improving electromagnetic shielding of air-to-air missile [J]. *Infrared Technology*,2010,32(7):395-398. (in Chinese)

[12] 李跃龙,黎建明,苏小平,等.红外窗口和整流罩材料研究现状与发展趋势[J].人工晶体学报,2007,36(4):877-884.
LI Y L,LI J M,SU X P,*et al*.. Research trends and current status in infrared window and dome materials[J]. *J. Synthetic Crystals*,2007,36(4):877-884. (in Chinese)

[13] 么艳平,刘景和.ZnS红外窗口材料的性能及其制备[J].人工晶体学报,2006,35(1):183-187.
YAO Y P,LIU J H. Property and fabrication of ZnS infrared window material[J]. *J. Synthetic Crystals*,2006,35(1):183-187. (in Chinese)

[14] 谢启明,李奕威,潘顺臣.红外窗口和整流罩材料的发展和应用[J].红外技术,2012,34(10):559-567.
XIE Q M,LI Y W,PAN SH CH. The development and application of the materials and infrared windows and domes[J]. *Infrared Technology*,2012,34(10):559-567. (in Chinese)

[15] 熊远鹏,吴 波,温翠莲,等.透红外晶体材料的研究现状[J].红外,2012,33(11):1-7.
XIONG Y P,WU B,WEN C L,*et al*.. Current status of infrared transmission crystal material[J]. *Infrared*,2012,33(11):1-7. (in Chinese)

作者简介：

陈 赟（1976—），男，山东郓城人，博士，副研究员，1999年、2002年于长春光学精密机械学院分别获得学士、硕士学位，2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位，主要从事码盘、光栅盘的精密刻划、真空镀膜和检测及光电编码器方面的研究。E-mail：tutorchy@163.com

张红胜（1961—），男，吉林长春人，实验师，主要从事计量圆光栅检验方面的研究。E-mail：zhanghs19610502@163.com

李艳茹（1963—），女，吉林长春人，实验师，主要从事计量圆光栅复制方面的研究。E-mail：tutorye@163.com