

用于 $10.6 \mu\text{m}$ CO_2 激光的小孔径 Ge-Ag-Ni 空心波导*

叶玉堂 叶莉娜 王瑞峰 陈冠华 沈晓 洪永和

(电子科技大学光电子技术系, 成都 610054)

提要 给出了作为波导半径函数的弯曲损耗, 讨论了小透光孔径波导的优越性, 提出了射频(RF)溅射镀膜的一种新方法, 然后用这种方法作成长度相同、导光孔径不同的几个样品, 最后测定了几个样品的光透射率, 并对其进行了分析比较。

关键词 Ge-Ag-Ni 空心波导, 小孔径波导

1 引言

高功率 $10.6 \mu\text{m}$ 波导在精密机械加工、颅内、腔内疾病的激光治疗及红外军事装备等领域都有广泛的应用前景, 因此, 近 20 年来, 世界上各发达国家都积极开展这方面的研究^[1~4], 尤其是可弯曲内镀膜金属软波导(如 Ge-Ag-Ni 波导和 ZnSe-Ag-Ni 波导)研究得最广泛, 最深入, 技术最成熟。但迄今为止, 报道的都是通光孔径在 $\phi 1.5 \text{ mm}$ 以上的大孔径波导, 对 $\phi 1.0 \text{ mm}$ 以下的小孔径波导还未见报道。而小孔径波导在某些应用中较大孔径波导更优越。第一, 如图 1 所示, 在波导弯曲的曲率半径较小 ($R = 0.2 \text{ m}$) 时, 在导光孔半径 $r = 0.3 \text{ mm}$ 附近弯曲损耗取极小值^[5](图中光的透射率取极大值), 之后, 随 r 的增加, 波导的弯曲损耗明显增加。第二, 在颅内、腔内手术等应用中, 大孔径光波导的输出端常需附加聚光系统, 这会导致设备的复杂及操作的不便。为满足医疗器械等方面的特殊应用, 我们研制成 $\phi 0.8 \text{ mm}$ 的小孔径 $10.6 \mu\text{m}$ Ge-Ag-Ni 内镀膜空心波导。

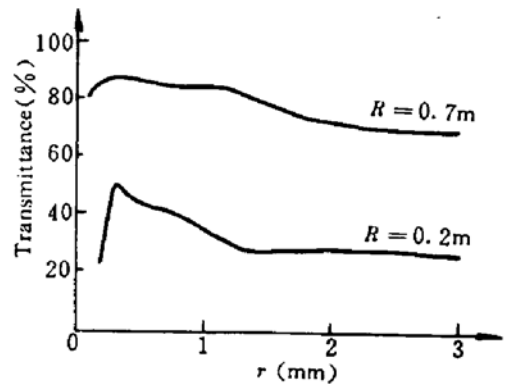


Fig. 1 Transmittance in a Ag hollow waveguide covered inside with a dielectric film of Ge, as a function of waveguide radius, for various radii of curvature R

2 小孔径波导射频溅射镀膜时铝管的应力

对于内镀膜 $10.6 \mu\text{m}$ Ge-Ag-Ni 空心波导, 镀膜的均匀性对波导损耗特性影响极大。为使

* 国防科工委和电科院资助项目。

收稿日期: 1994年9月21日; 收到修改稿日期: 1994年11月21日

Ge(或 Ag)膜厚度均匀,一般都用图 2 所示的方法^[6],在射频溅射淀积时,使铝管骨架一边沿轴向移动,以保证轴向均匀性,一边绕心轴转动(需要注意的是,这里驱动转矩只加于 S 端, Q 端由 S 端带动且必然存在一定的阻力矩),以保证在圆周方向上的膜厚均匀。射频溅射时铝管处于约 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温状态,以下简称此法为高温转动法。这种方法可以作出高品质的大孔径波导(如 $\phi 1.5\text{ mm}$),但难于作成高质量的小孔径波导,其原因在于作为镀膜骨架的小孔径铝管难于承受较大的扭矩,镀膜时容易发生扭曲,使镀膜质量受到严重影响。

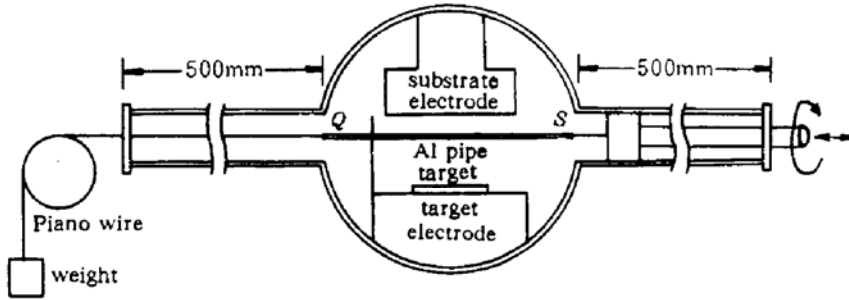


Fig. 2 Schematic view of the Sputtering apparatus used to form Ge and Ag layers

利用材料力学的理论可以证明,在相同的设备、工艺条件下,不同孔径的铝管在射频镀膜时可能承受的最大切应力之比为

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{D_1(D_2^2 - d_2^2)}{D_2(D_1^2 - d_1^2)} \quad (1)$$

式中 D_1, d_1, τ_1 分别是管 1 的外径、内径及其所受的最大切应力, D_2, d_2, τ_2 是管 2 的外径、内径及其所受的最大切应力。作为实例,考察 $\phi 1.5\text{ mm}$, $\phi 0.8\text{ mm}$ 两种波导的铝管。设壁厚都为 0.2 mm ,将 $D_1 = 1.5\text{ mm}$, $d_1 = 1.1\text{ mm}$, $d_2 = 0.4\text{ mm}$, $D_2 = 0.8\text{ mm}$,分别代入(1)式,即得

$$\tau_2 = 5\tau_1 \quad (2)$$

上式表明, $\phi 0.8\text{ mm}$ 铝管所受最大切应力达 $\phi 1.5\text{ mm}$ 铝管相应切应力的五倍之多。如前面所述,溅射淀积区铝管的温度又高达 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$,加上大幅度增加的切应力,必然导致铝管的严重扭曲。我们的实验也证实了这一点。

为避免高温转动的铝管扭曲对镀膜质量的影响,我们提出低温转动镀膜这一新方法,射频镀膜时(温度高)铝管只作轴向移动,不再绕轴心转动,待轴向移动到位即镀完一面之后,关掉射频电源,在低温状态同时将转动力矩加于铝管 Q, S 两端,使其翻面,然后再镀另一面。与高温转动法相比,低温转动镀膜法有以下两个方面的优越性:(1) 铝管转动时处于低温状态,必然具有较高温状态更高的机械强度;(2) 高温转动时,驱动转矩只加于 S 端, Q 端则由 S 端带动而发生转动,因而整个铝管所受扭矩较大;低温转动时,转矩可同时施于 Q, S 两端,使铝管实际所受力矩非常小。这样,即使孔径很小的铝管,也不会产生明显的扭曲。

3 低温转动小孔径波导镀膜厚度的均匀性

在低温转动镀膜法避免铝管扭曲的同时,能否保持镀膜厚度沿圆周方向足够均匀?下面先就简化模型作一理论估算。

设铝管外径为 a ,溅射淀积区的 Ge 离子平均自由程为 λ ,溅射靶在铝管的上方。图 3 是垂直于铝管心轴的剖面图,正对靶的点 O 和背对靶的点 O' 分别具有最高淀积速率和最低生长速

率,这两点的生长速率相差最大,其比值当能表征镀膜厚度的均匀性。 GF , AC 分别为过圆上 O , O' 的切线。下面以 O 点邻域 ds 和 O' 点邻域 ds' 的淀积速率之比来表示镀膜厚度的均匀性。显然,只有在 GF 之上和 AC 之下发生碰撞的 Ge 粒子,才分别对 ds , ds' 的 Ge 膜淀积有贡献。设 $d\omega$ 与 ds 面的角度为 θ ($\theta \in [0, \pi]$), 上半圆绕 GF 旋转的角度为 φ ($\varphi \in [-\pi/2, \pi/2]$, 图 3 中未画出), 同时, 设单位时间内在单位体积的空间中发生的 Ge 粒子碰撞次数为 n , 根据合理的假设和适当的简化, 可以计算得到单位时间里 ds 上的淀积分子总数

$$N_1 = \frac{n\lambda ds}{4\pi} \int_0^\pi \sin^2\theta d\theta \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos\varphi d\varphi = \frac{n\lambda ds}{4} \quad (3)$$

假设不存在铝管时, 管下 $ABEDC$ 绕 AC 旋转所围成的区域对 ds' 淀积的贡献为 N , 容易得到

$$N = 2 \times \frac{n\lambda ds}{4\pi} \int_{\pi/2 - \sin^{-1}(a/2\lambda)}^{\pi/2 + \sin^{-1}(a/2\lambda)} \sin^2\theta d\theta \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos\varphi d\varphi = \frac{nads'}{2} \quad (4)$$

记单位时间内在 ds' 上淀积的粒子数为 N_2 , 不失普遍性, 设 $ds = ds'$, 不难看出

$$N_2 = N_1 - N \quad (5)$$

由(3)~(5)式

$$N_2 = \frac{n\lambda ds'}{4} - \frac{nads'}{2\pi} \quad (6)$$

定义射频溅射镀膜的淀积速率 G 为单位面积上单位时间的淀积粒子数, 由(3), (6) 式得到 ds , ds' 的淀积速率 G_1 , G_2 分别为

$$G_1 = n\lambda/4 \quad (7)$$

$$G_2 = n\lambda/4 - na/2\pi \quad (8)$$

其比值则为

$$K = G_2/G_1 = 1 - 2a/\pi\lambda \quad (9)$$

对于 Ge 膜溅射淀积的工艺条件, 可以计算出其碰撞自由程为 $\lambda \simeq 2.5 \text{ mm}$, 代入(9)式, 如果要求 K 能达到 0.8, 容易求出波导孔径 a 应小到 $a \simeq 0.8 \text{ mm}$ 。

由(9)式容易看出, 波导孔径 a 越小, 或淀积粒子的碰撞自由程 λ 越大, G_2 越接近于 G_1 , 即沿圆周方向的镀膜厚度越均匀。由此可知, 低温转动镀膜方法不仅可以避免小孔径波导的扭曲, 而且同样能使镀膜厚度在圆周方向也足够均匀, 这只需波导孔径足够小, 或 Ge 粒子的碰撞自由程足够长。显然, 低温转动镀膜法特别适于制作小孔径波导。

必须提及的是, 实际镀膜的厚度可能较(9)式估算的更均匀, 因为导出该式时假定淀积管下的空间 (λ 范围内) 不存在 Ge 粒子的碰撞, 对 ds' 淀积无贡献, 而实际上在管下区域也一定会存在一定频度的 Ge 粒子碰撞, 而且必然对 ds' 的膜淀积有一定贡献, 这使得 ds' , ds 的淀积速率之差较(9)式估算的会更小。

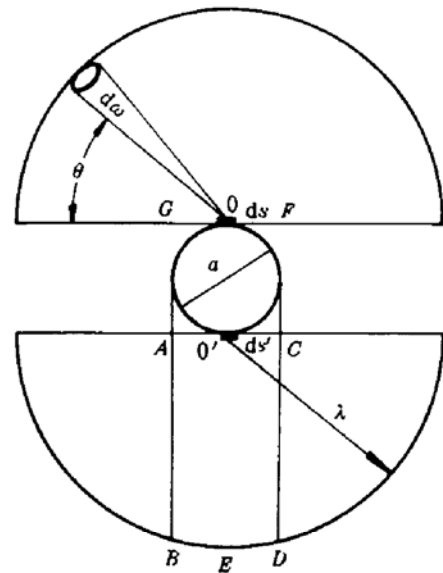


Fig. 3 Uniformity of the deposition rate

4 实验结果

我们用不同外径的铝管作骨架,经 Ge 膜、Ag 膜的低温转动溅射淀积,制作出 $\phi 0.8$ mm, $\phi 1.0$ mm 和 $\phi 1.2$ mm 的空心内镀膜软波导。首先对铝管进行去污、去油、抛光等处理,再利用射频镀膜技术,在其表面镀上 Ge 薄膜,继而镀上银膜,然后利用化学镀镍技术镀上镍层作为外壳,最后利用化学腐蚀的方法将作为骨架的铝管腐蚀掉,即作成空心的 Ge-Ag-Ni 波导。除波导孔径不等之外,其余工艺条件都相同。空心波导作成之后,用 Ge 透镜聚焦的方法,将 CO₂ 激光耦合进入 Ge-Ag-Ni 波导,分别测出波导的入射光功率、出射光功率,进而求得波导的透射率。几只样品的导光孔径、波导长度及透射率测试结果列于表 1。不难看出, $T_{0.8} > T_{1.0} > T_{1.2}$, 这里 $T_{0.8}$, $T_{1.0}$, $T_{1.2}$ 分别表示导光孔径分别为 0.8, 1.0, 1.2 mm 的波导透射率。值得注意的是,我们这里测定的是波导的直传透射率。对于等长度的光波导,如果波导镀膜品质相同,光透射率会随波导孔径的增加而增加,因而当有 $T_{1.2} > T_{1.0} > T_{0.8}$ 。用低温转动法作成的波导则与此相反,如表 1 所示,波导孔径增加时,其直传透射率反而降低。这说明低温转动镀膜得到的小孔径波导镀膜质量最好,波导品质最高。这也与(9)式预期的结果相吻合:透光孔径越小,低温转动镀膜的厚度越均匀。此外,从表 1 还可以看出,长 600 mm 的 $\phi 0.8$ mm 10.6 μm Ge-Ag-Ni 空心内镀膜波导光透过率已达 70%,这表明用低温转动镀膜法作成的的小孔径光波导具有相当好的性能。据我们所知,这是首次报道透光孔径小到 0.8 mm 的 10.6 μm Ge-Ag-Ni 镀膜空心软波导。

Table 1 Transmittance of the Ge-Ag-Ni hollow waveguide

Sample's number	Diameter (mm)	Length (mm)	Transmittance (%)
1	1.2	600	64
2	1.0	600	66
3	0.8	600	70

致谢 电子科技大学光电子技术系的陈铮教授、光电记录技术中心的陈小洪教授、陈宏猷教授及信息材料工程学院的睦松山副教授曾对本课题的研究给予溅射镀膜设备、膜厚测试等方面的支持与帮助,谨此一并表示谢意。

参 考 文 献

- 1 Akihito Hongo, Ken-Ichi Morosawa, Tsuneo Shiota *et al.*. Transmission Characteristics of Germanium Thin-Film-Coated Metallic Hollow Waveguides for High-Powered CO₂ Laser Light. *IEEE J. of Quant. Electr.*, 1990, QE-28 (9):1510
- 2 N. Croitoru, J. Dror, I. Gannot. Characterization of hollow fibers for the transmission of infrared radiation. *Appl. Opt.*, 1990, 29(12):1805
- 3 James A. Harrington, Christopher C. Gregory. Hollow sapphire fibers for the delivery of CO₂ laser energy. *Opt. Lett.*, 1990, 15(10):541
- 4 James A. Harrington. Crystalline and hollow infrared fiber optics. *SPIE*, 1991, 1591:2
- 5 D. Mendlovic, E. Goldenberg, S. Ruschin *et al.*. Ray model for transmission of metallic-dielectric hollow bent cylindrical waveguides. *Appl. Opt.*, 1989, 28(4):708
- 6 Y. Matsuura, M. Miyagi, A. Hongo. Loss reduction of dielectric-coated metallic hollow waveguides for CO₂ laser light transmission. *Optics & Laser Technology*, 1990, 22(2):142

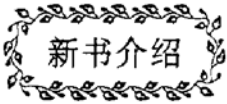
10.6 μm Ge-Ag-Ni Hollow Waveguides with Small Cross-sectional Radii

Ye Yutang Ye Lina Wang Ruifeng Chen Guanhua Shen Xiao Hong Yonghe

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract The bending loss in Ge-Ag-Ni waveguide as a function of waveguide radius is discussed. The advantages of the small-sectional radius waveguide are described, and a novel method of RF sputtering for fabrication of hollow waveguides with small diameters is proposed. Finally, some samples have been fabricated using the method and the transmittances of the samples with different waveguide diameters are presented and compared.

Key words Ge-Ag-Ni hollow waveguide, waveguide with small diameter



新书推荐

强光光学及其应用

由刘颂豪、赫光生二位先生合著的“强光光学及其应用”一书，经由广东优秀科技专著出版基金会推荐，并已由广东科技出版社正式出版发行。本书全面深入地论述了强光光学(非线性光学)这一新兴分支学科的基本原理、实验技术、最新成果和今后应用发展展望。该书包含了许多作者自己的研究成果和学术创见，内容丰富，论述清晰，数学描述简洁严谨。

二位作者的名字，对本学科领域许多读者并不陌生，他们都是本学科领域国内外知名的学者。从 60 年代至 80 年代，他们长期在中科院从事激光和强光光学有关的基础研究。由于他们坚实的理论基础和在实践中长期不懈地积累的丰富经验，所以对本领域内的一些重要研究课题做出了有学术新意的贡献。这些贡献，部分地反映在书中所引用的作者本人及其同事们的文献中，也比较集中地反映在本书的有关章节如：简并和部分简并四光子参量混频(第三章第 5 节)、双光束共振耦合引起的折射率变化(第四章第 1 节)、产生相干拉曼辐射的两种不同物理机制和拉曼自聚焦(第五章第 3 节)、受激克尔散射效应(第五章第 6 节)、反向受激散射产生相位共轭波的新物理解释(第七章第 4 节)等。特别值得一提的是，本书作者是受激克尔散射效应的发现者和该课题研究的开拓者。

80 年代以后，美欧学者曾先后出版了多本非线性光学方面的书著。其中，沈元壤(Y. R. Shen)教授所著(非线性光学原理”一书影响较广。由刘、赫合著的这本书，集众家所长，除特别重视基础理论外，又增添了这一领域的不少最新成就方面的内容以及作者自己的研究成果和学术见解。除收集内容丰富外，本书对某些重要课题作了更详尽、更深入的论述。全书精装，共分 12 章计约 57 万字，并附有十组彩色科学照片，直观地显示一些典型非线性光学效应的表现形态。阅读本书后，不仅可对这一分支学科的主脉和精义获得系统、深刻了解，对这一领域的最新成就及动向也能收洞观全貌之功。

刘颂豪与赫光生两位先生，长期以来热心于激光技术与非线性光学知识的普及与提高。发表过多篇综合性评述文章，出版过多本著作，还曾应邀到多所高等院校(包括我校在内)为有关师生开设专题系列讲座。这本新著的出版，既是他们多年心血的结晶，也是对他们长期努力的报偿。深信本书是对同行们和诸多读者们的有益奉献。

(东南大学 杨正名)