

激光扫描制备大尺寸超导薄膜的理论分析*

安承武 宋文栋 陆冬生 范永昌 李再光

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 提出了利用激光扫描剥离靶材, 沉积膜厚分布均匀的大尺寸高温超导薄膜分析模型。利用这模型取得的结果表明: 激光扫描方法沉积的薄膜厚度分布依赖于激光扫描半径、靶面与基片的间距。对于一定均匀性程度要求的薄膜, 存在一个能获得最大尺寸薄膜的最佳激光扫描半径。实验结果与理论分析基本一致。

关键词: 大尺寸超导薄膜 激光扫描沉积

Theoretical analysis for deposition of HTSC films over large area by laser scanning ablation

An Chengwu, Song Wendong, Lu Dongsheng, Fan Yongchang, Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, HUST)

Abstract: A method, laser scanning ablation, for deposition of well-distributed high T_c superconductivity (HTSC) films over large area was presented, and a mathematical model for the method was established. By means of mathematics analysis, it was shown that the distribution of film thickness depended on the laser scanning radius and the distance between substrate and target. Also indicated by the analysis results, there was an optimum scanning radius for achieving a maximum film in the range of requisite uniformity. And the results were agreed with experiments.

Key words: large size superconducting films laser scanning ablation for deposition

* 国家自然科学基金资助。

由上表我们可以明显看出, 采用基模的 CO_2 激光器进行薄板切割要比采用多模 CO_2 激光器好的多, 切缝也要小得多。通过这两组实验, 我们认为可以采用光束传输因子 M^2 值衡量此类加工方式的光束质量。

四、结 论

通过上面的分析, M^2 参数可以很好地评价穿透加工方式的光束的优劣, 但对表面加工方式的质量评价不适用。由此可见, M^2 参数虽然具有深刻的物理意义, 并表征了光束偏离最佳衍射极限的程度, 但 M^2 参数的大小并不一定能够充分反映光束的实际应用优劣。而对于穿透加工方式的光束, 提高 M^2 参数的途径只可能提高谐振腔的性能或采用非成像光学系统, 如空间滤波器, 相位板等。

参 考 文 献

- 1 Siegman A E. New developments in laser resonators. in Laser Resonators, D. A. Holmes, Ed. Proc SPIE, 1990; 1224: 2~14
- 2 Inter Organization for Standardization. Terminology and test methods for lasers. ISO/TC 172/SC 9/WG 1
- 3 王家金主编. 激光加工技术. 北京: 中国计量出版社, 1992

尽管利用脉冲激光沉积技术很难得到膜厚均匀的大尺寸优质薄膜。为克服这一困难, Davis 等采用基片扫描方法^[1]、Foltyn 等采用基片旋转方法^[2]以及 Sajjadi 等提出了靶材倾角旋转方法^[3], 我们探索了一种新的方法——激光扫描法^[4]。本文是从理论上对此方法的分析。

一、数学描述

激光剥离材料产生的喷射粒子束是沿着靶材表面法线方向飞行, 其发散度可用与法线的夹角 θ 描述, 在空间的分布为 $\cos^n\theta$ ($n > 4$, 甚至 > 11)^[2]。如果定义分布函数为 $Z(\theta)$, 并在全空间归一化, 则有

$$Z(\theta) = (n + 1)/(2\pi) \cdot \cos^n\theta \quad (1)$$

式中, n 为空间分布指数。

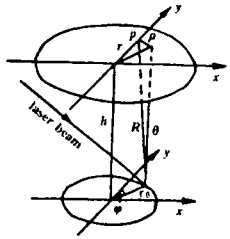


Fig. 1 Geometric description for laser scanning ablation for deposition of HTSC films

如图 1 所示, 当激光束以直径为 $2r_0$ 。在靶面上扫描时, 为了分析的方便, 忽略了粒子沉积到基片上时生长成膜过程中的迁移运动因素, 也不考虑后续射到基片的粒子对已沉积到基片上粒子的作用产生再蒸发的效应, 则激光束在每单位长度 dl 上剥离产生的粒子对基片上 $p(r)$ 点处沉积的膜厚的贡献为

$$dD(r, r_0) = A(n + 1)\cos^{n+1}\theta/R^2 dl \quad (2)$$

式中, A 是一个对膜厚相对分布没有影响的常数, R 是激光在靶面上入射点与基片上 $p(r)$ 点间距离。于是, 激光扫描一周产生的粒子对 $p(r)$ 点沉积薄膜厚度贡献为

$$D(r, r_0) = \oint_l dD(r, r_0) = \oint_l A(n + 1)\cos^{n+1}\theta/R_2 dl \quad (3)$$

根据图 1 所示, 则有

$$dl = r_0 d\varphi \quad (4)$$

$$\cos^2\theta = h^2/R^2 = h^2/(h^2 + \rho^2) \quad (5)$$

$$\rho^2 = r_0^2 + r^2 - 2r \cdot r_0 \cos\varphi \quad (6)$$

式中, h 是基片到靶面垂直距离。将(4), (5), (6)式代入(3)式, 则有

$$D(r, r_0) = A \frac{(n + 1)}{h} \frac{r_0}{h} \int_{-x}^{+x} \left[1 + \frac{r_0^2 + r^2 - 2r \cdot r_0 \cos\varphi}{h^2} \right]^{-\frac{n+3}{2}} d\varphi \quad (7)$$

若令 $\bar{r}_0 = r_0/h$, $\bar{r} = r/h$, 那么, (7)式变成

$$D(\bar{r}, \bar{r}_0) = A \frac{(n + 1)}{h} \bar{r}_0 \int_{-x}^{+x} \left[1 + \bar{r}_0^2 + \bar{r}^2 - 2\bar{r} \cdot \bar{r}_0 \cos\varphi \right]^{-\frac{n+3}{2}} d\varphi \quad (8)$$

为了方便, 在以后的表达式中, 仍用符号 r_0 和 r 表示归一化量 \bar{r}_0 和 \bar{r} 。在这种情况下, 令

$$L = (n + 3)/2 \quad (9)$$

$$a = (1 + r_0^2 + r^2)/(2r_0 r) \quad (10)$$

将它们代入(8)式中, 得到

$$D(r, r_0) = A \frac{2(L - 1)}{h} \frac{r_0}{(2r_0 r)^L} \int_{-x}^{+x} (a - \cos\varphi)^{-L} d\varphi \quad (11)$$

(11)式所描述的就是当激光以归一化半径为 r_0 在靶面上扫描剥离时, 基片上沉积的薄膜的厚度分布, 它表明膜厚分布与激光扫描半径以及基片与靶面的间距有关。

二、讨 论

1. 有条件解

如果(11)式中 L 为整数, 则有解析解, 在这种情况下, 令

$$t = \operatorname{tg}(\varphi/2) \quad (12)$$

代入(11)式, 则有

$$D(r, r_0) = A \frac{2(L-1)}{h} \frac{r_0}{(2r_0r)^L} \frac{2}{(a+1)^L} \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{i=0}^{L-1} \frac{b_i}{(t+c)^{L-(i+1)}} dt \quad (13)$$

式中, $c = (a-1)/(a+1) = [1 + (r-r_0)^2]/[1 + (r_0+r)^2]$

$$b_i = C_{L-1}^i (1-c)^i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, L-1$$

如果引入符号 I_L 表示无穷积分, 即

$$I_L = \int_{-\infty}^{+\infty} (t^2 + C)^{-L} dt \quad (14)$$

那么, 不难证明有下列关系:

$$I_L = \frac{2(L-1)-1}{2c(L-1)} I_{L-1}, \quad L \geq 2 \quad (15)$$

$$I_1 = \pi/\sqrt{c} \quad (16)$$

将(14), (15)和(16)式代入(13)式, 就得到了所沉积薄膜的厚度分布与激光扫描归一化半径的关系的解析表达式为

$$D(r, r_0) = A \frac{4\pi(L-1)}{h} r_0 [1 + (r_0+r)^2]^{-L} \frac{1}{\sqrt{c}} \cdot \left\{ 1 + \sum_{i=2}^L C_{L-1}^{i-1} (1-c)^{i-1} \prod_{j=2}^i \left[\frac{2j-3}{2c(j-1)} \right] \right\} \quad (17)$$

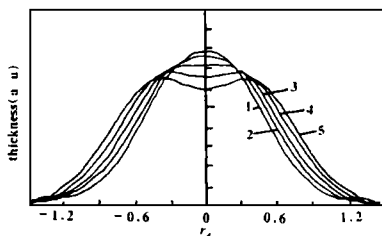


Fig. 2 Profiles of the films with $n = 7$ theoretically
1 - $r_0 = 0.35$
2 - $r_0 = 0.40$ 3 - $r_0 = 0.45$
4 - $r_0 = 0.50$ 5 - $r_0 = 0.55$

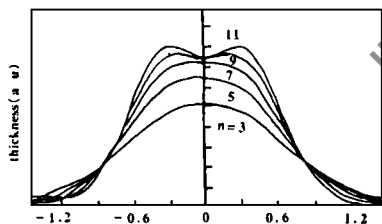


Fig. 3 Profiles of the films with $r_0 = 0.45$ theoretically

将(17)式画出曲线(如图2和图3)。图2是在分布指数 n 确定的情况下膜厚分布与激光扫描归一化半径的关系; 图3是在激光扫描归一化半径确定时膜厚分布与分布指数的关系。

上述结果的应用可能性之一就是根据沉积膜厚的分布情况来估算空间粒子的分布指数 n 。例如, 通过比较实验测出的膜厚分布与理论上的分布, 就可得到该实验条件下的 n 值。

2. 最佳扫描半径与最大薄膜尺寸

对于大尺寸薄膜, 认真地说, 人们所关注的是应用中可容许的不均匀性程度。设容许的膜厚分布不均匀性程度为 Q , 对于确定的激光扫描半径 r_0 , 总存在一尺寸 r_f , 使得薄膜的尺寸 r 在小于 r_f 的范围内, 能够保证膜厚的不均匀度小于 Q 。这就是说, 对于确定条件下的激光扫描沉积, 总是存在一个最佳扫描半径 r_{opt} , 使所沉积的薄膜在满足均匀性条件下具有最大尺寸 r_{max} 。而且, r_{opt} 和

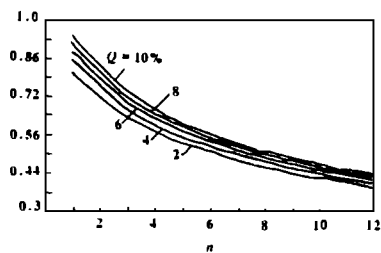


Fig. 4 Dependence of optimum scanning radius on the value of the distribution exponent n

r_{\max} 均依赖于分布指数 n 的大小(图4,图5)。这一有趣的分析结果,对于激光扫描沉积大尺寸高温超导薄膜的实验研究具有很好的参考价值。

三、实 验

进行激光扫描沉积大尺寸超导薄膜的实验方法与装置已在文献[4]和[6]中介绍,这里主要介绍由于激光扫描半径的改变对所沉积薄膜均匀性的影响。在其它实验条件相同的情况下,调节激光扫描归一化半径

分别为0.0,0.08,0.13,0.18,0.23制备薄膜样品。将全部样品从沉积中心到边沿依次编号制成小样品,再把样品上的薄膜刻蚀出线条台阶,然后利用6JA干涉显微镜测量出每个编号小样品的薄膜厚度,于是就得到了所沉积的大尺寸的薄膜的厚度分布(图6)。它表明,随着激光扫描半径的扩大,薄膜的均匀性得到了很好的改善。

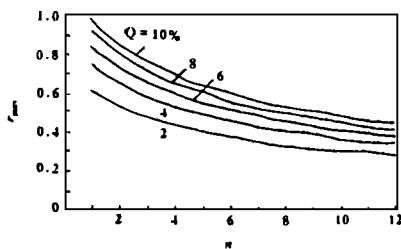


Fig. 5 Dependence of maximum size of uniform films on the value of distribution exponent n

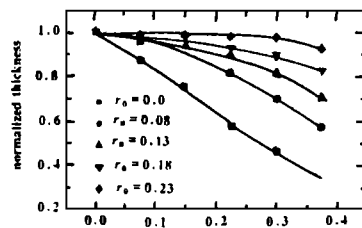


Fig. 6 Film thickness distribution from experiment by different laser scanning radius

将图6与图2进行比较,我们看到,理论分析结果与实验结果是相符合的。然而,从实验结果来看,随着激光扫描半径的扩大,实验制取的薄膜均匀性的改善程

度要比理论预期的要大。这里由于在分析模型中忽略了沉积粒子在基片上迁移运动的因素和后续射到基片上的粒子引起再蒸发的效应所致。尽管如此,分析结果的确表明,利用激光扫描方法能够很好地改善所沉积薄膜的均匀性,而且可为实验研究提供很好的参考。

参 考 文 献

- 1 Davis M F, Wosik J, Forster K *et al.* J A P, 1991;69(10):7182
- 2 Foltyn S R, Muenchausen R E, Dye R C *et al.* A P L, 1991;59(11):1374
- 3 Sajjadi A, Lau K K, Saba F *et al.* Appl Surf Sci, 1990;46(1):86
- 4 Song W D, An C W, Lu D S *et al.* A P L, 1993;63(24):3370
- 5 Venkatesan T, Wu X D, Inam A *et al.* A P L, 1988;52(14):1193
- 6 安承武,宋文栋,陆冬生 *et al.* 低温物理学报, 1993;(15)(增):323

请向邮局订阅 1996 年度《激光技术》

国内刊号:CN51-1125/TN, 邮发代号:62-74