

# 小型封离式陶瓷TEA CO<sub>2</sub>激光器的特性研究

## (第一部分：理论分析)

屈乾华 侯天晋 江 东 王兴邦 杨遂东

(西南技术物理研究所)

**摘要：**本文从理论上分析了小型TEA CO<sub>2</sub>激光器的各主要参数的选择。给出了我们研制的小型封离式陶瓷TEA CO<sub>2</sub>激光的实验结果：该器件尺寸为 $\phi 62 \times 190\text{mm}$ ，其基模输出能量 $>20\text{mJ}$ ，脉宽 $<50\text{ns}$ ，使用寿命 $>10^8$ 次，储存寿命大于10年。装在测距机上经一年的使用表明，性能稳定可靠。

Mini ceramic sealed-off TEA CO<sub>2</sub> laser

( Part 1: theoretical analysis )

Qu Qianhua, Hou Tianjin, Jiang Dong, Wang Xingbang, Yang Suidong

( Southwest Institute of Technical Physics )

**Abstract:** The selection of parameters for mini TEA CO<sub>2</sub> laser is analysed. The experimental results for mini ceramic sealed-off TEA CO<sub>2</sub> laser are given. The size of the device is  $\phi 62 \times 190\text{mm}$ , the output energy of TEA<sub>00</sub> mode  $>20\text{mJ}$ , pulse width  $<50\text{ns}$ , the operation life  $>10^6$  times, the shelf life is longer than 10 years. The experiment in which the laser is mounted in a CO<sub>2</sub> laser rangefinder has been carried out over one year. The experiment shows the performance of the laser is reliable and stable.

### 一、引 言

众所周知，工作在 $10.6\mu\text{m}$ 波长的CO<sub>2</sub>激光器较 $1.06\mu\text{m}$ 波长的YAG激光器，在军事上有明显的优势。因为它穿透烟云，霾雾的能力较高，对人既安全，又保密，效率高，并与红外热成像兼容，使得近年来在军事上倍受重视<sup>[1]</sup>。

就CO<sub>2</sub>激光器本身而言，它比固体激光器具有两个优点<sup>[2]</sup>：光谱纯度高，空间相干性好，因而对相干激光器雷达很有吸引力。

对于一定放电体积的CO<sub>2</sub>激光器，每个脉冲能量与气体压强成正比，而激光脉冲峰值功率与气体压强平方成正比。因此，激光器在高压强下工作，就能在小体积内获得高功率，大能量的窄脉冲，而横向放电就使得工作电压相对低，放电等离子电阻较小，这样就能快速抽运而得到高功率的“调Q”脉冲。

国内外有许多厂所从事TEA CO<sub>2</sub>激光器的研制工作，这种器件主要用于测距机，多数属于军用目的。

本文首先从理论上分析TEA CO<sub>2</sub>激光器的基本参数的选择，然后论述实验和结果。

## 二、理论分析与计算

### 1. TEA CO<sub>2</sub>激光器的动力学方程

我们从解TEA CO<sub>2</sub>激光速率方程出发，得到激光的输出脉冲波形、脉宽、功率和能量与气体混合比、压强及耦合系数、放电参数等的关系。另外我们还要计算束散角、贮存寿命、电极形状。由这些计算得到结果：需要使注入电流增大，输出镜片反射系数约在80~85%之间。选用平-平腔虽然能得到较小的束散角，但基于难于调节而未采用。用三维Chang电极是保证获得均匀辉光放电的条件。窗口的金属密封以及零件严格真空处理是保证贮存寿命的必须条件。

图1说明CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>系统中分子模型的主要过程。我们直接按公式<sup>[3]</sup>来进行计算。

$$\begin{aligned}
 dA/dt = & [e]_{000} K_{e-CO_2}^{001} (1-A) \\
 & + [N_2]_1 K_{N_2-CO_2}^{001} [(1-D)(1-A)^3(1+AD)/(1-AD)^3] \cdot D \\
 & + \phi \sigma (1-A)^3 B - \{ [e]_{000} K_{e-CO_2}^{001} (1-A) \cdot \exp(\epsilon_{001}/U_0) \\
 & + [N_2]_1 K_{N_2-CO_2}^{001} [(1-D)(1-A)^3(1+AD)/(1-AD)^3] \\
 & + \phi \sigma (1-A)^3 + [M]_{001} K_{M-CO_2}^{030} (1-A)^3 \} A
 \end{aligned} \quad (1)$$

其初始条件为： $A(t=0) = A_0 = \exp(-\epsilon_{001}/kT_0)$ 。

$$\begin{aligned}
 dB/dt = & \phi \sigma [A - B] - [M]_{100} K_{M-CO_2}^{020} \{ B - C^2 \} \\
 = & \phi \sigma A + [M]_{100} K_{M-CO_2}^{020} C^2 - \{ \phi \sigma + [M]_{100} K_{M-CO_2}^{020} \} B
 \end{aligned} \quad (2)$$

其初始条件为  $B(t=0) = B_0 = \exp(-\epsilon_{010}/kT_0) = C_0^2$ ， $[M]_{100} K_{M-CO_2}^{020}$  为CO<sub>2</sub>(100)-CO<sub>2</sub>(020)碰撞去激发的有效速率。

$$\begin{aligned}
 dc/dt = & \{ 3[M]_{001} K_{M-CO_2}^{030} A + 2[M]_{100} K_{M-CO_2}^{020} B \\
 & + [e]_{000} K_{e-CO_2}^{1m0} + [M]_{010} K_{M-CO_2}^{000} C_0 \} (1-C)^2 \\
 & - \{ (2[M]_{100} K_{M-CO_2}^{020} C + [M]_{010} K_{M-CO_2}^{000}) [M] (1-C^2) \} C
 \end{aligned} \quad (3)$$

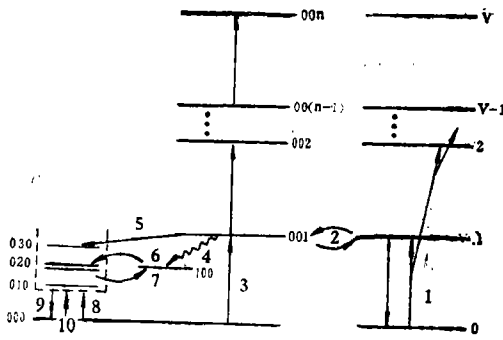


图1 CO<sub>2</sub>激光器动力学模型

- 1— $e + N_2(0) \rightleftharpoons e + N_2(\nu) \quad \nu = 1 \cdots 8$
- 2— $N_2(\nu) + CO_2[00(n-1)] \rightleftharpoons N_2(\nu-1) + CO_2(00n)$
- 3— $e + CO_2[00(n-1)] \rightleftharpoons e + CO_2(00n)$
- 4— $h\nu + CO_2(001) \rightarrow CO_2(100) + 2h\nu$
- 5— $CO_2(001) + M \rightarrow CO_2(030) + M$
- 6— $CO_2(100) + M \rightarrow CO_2(020) + M$
- 7— $CO_2(020) + M \rightarrow CO_2(100) + M$
- 8— $e + CO_2(000) \rightarrow CO_2(010) + e$
- 9— $CO_2(010) + M \rightarrow CO_2(000) + M$
- 10— $CO_2(000) + M \rightarrow CO_2(010) + M$

$$dT_9/dt = \{ [CO_2] (1-A) / [1+C(1-A)] \tilde{C}_v \} [A_{001} K_{M-CO_2}^{030} e_{13} + C_{010} K_{M-CO_2}^{000} e_{010}] \quad (5)$$

式中， $\tilde{C}_v$  为每种气体分子的体比热有效常数， $\tilde{C}_v = \left( \frac{3}{2} X_{He} + \frac{5}{2} X_{N_2} + \frac{7}{2} X_{CO_2} \right)$

$k_B$  为 Boltzman 常数； $X_M$  为气体 M 的摩尔比例数。初始条件为  $T_9(t=0) = T_{90} = 300K$ 。

图2为光学谐振腔光提取的原理图。我们推导出光强的公式。

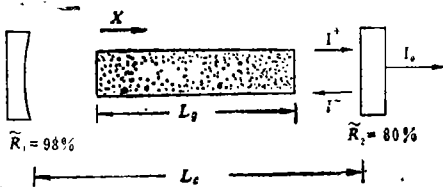


图2 光提取原理图

其初始条件  $C(t=0) = C_0 = \exp(-\varepsilon_{010} / kT_9)$ ， ${}_{000}K_{e-CO_2}^{lmo}$  为电子直接碰撞激励多重  $lmo$  的有效速率，而  ${}_{010}K_{M-CO_2}^{000}$  为  $CO_2(010)$  碰撞去激活的有效速率。

$$dD/dt = \{ [e]_0 \bar{K}_{e-N_2}^\nu + [CO_2] {}_1K_{N_2-CO_2}^{001} (1-A)(1+AD)A / [1+C(1-A)] \cdot (1-AD)^3 \} \cdot (1-D)^3 - \{ [e]_0 \bar{K}_{e-N_2}^\nu \exp(\varepsilon_\nu / U_e) + [CO_2] {}_1K_{N_2-CO_2}^{001} (1-A)(1+AD) / [1+C(1-A)] (1-AD)^3 \} \cdot (1-D)^3 D \quad (4)$$

式中， $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  分别表示有关能级的特征变量； $\bar{K}_{e-N_2}^\nu$  为激发氮振动能级的合成速率。其初始条件为  $D(t=0) = D_0 = \exp(-\varepsilon_\nu / kT_9)$

参照图2，第  $k$  次和  $(k-1)$  次通过光腔的光强为：

$$I_k = \exp(2aL_a) \exp(-2\gamma L_c) \tilde{R}_1 \tilde{R}_2 I_{k-1}$$

式中， $a$  为增益系数； $\gamma$  为损耗系数； $L_a$  为活性区长度； $L_c$  为光腔长度； $\tilde{R}_1$  和  $\tilde{R}_2$  为腔镜功率反射率。

$$dI/dt = I(d \ln I / dt) \approx I(\Delta \ln I / \Delta t) \approx I((\ln I_k - \ln I_{k-1}) / \tau_{RT})$$

式中,  $\tau_{RT}$  为光行进谐振腔一周所需时间,  $\tau_{RT} = 2L_c / C$ 。

令  $R_1 = \exp(-2\gamma L_c) \cdot \tilde{R}_1$ ,  $R_2 \equiv \tilde{R}_2$ , 则有:

$$\ln I_k - \ln I_{k-1} = 2\alpha L_g + \ln(R_1 R_2)$$

定义  $\varphi = I / (h\nu)$ , 则有:

$$d\varphi/dt = \bar{c} \bar{a} \varphi \quad (6)$$

式中,  $\bar{a} = (L_g / L_c) \alpha + \ln(R_1 R_2) / (2L_c)$

初始条件为  $\varphi(t=0) = S_\varphi$ 。

由图2可知, 输出光强为:

$$\tilde{I}_{out} = [(1 - \tilde{R}_2) / (1 + \tilde{R}_2)] h\nu \varphi = I_{out}$$

式中,  $I_{out} \equiv [(1 - R_2) / (1 + R_2)] h\nu \varphi$ , (7)

$h$  为普朗克常数,  $\nu$  为激光频率。

上述几个公式中某些符号意义以及某些参数如下:

$$A \equiv \exp(-\varepsilon_{001} / kT_{00n})$$

$$B \equiv \exp(-\varepsilon_{100} / kT_{100})$$

$$C \equiv \exp(-\varepsilon_{010} / kT_{0m0})$$

$$D \equiv \exp(-\varepsilon_v / kT_v)$$

$\varepsilon_{001}$ ,  $\varepsilon_{100}$ ,  $\varepsilon_{010}$ ,  $\varepsilon_v$  分别为  $\text{CO}_2$  振动能级和  $\text{N}_2$  振动能级的能量,  $T_{00n}$ ,  $T_{100}$ ,  $T_{0m0}$ ,  $T_v$  分别为相应能级的特征温度,  $\sigma_{001} K_e^{-1} e^{-\varepsilon_{001} / kT_e}$  为电子把  $\text{CO}_2$  ( $00n$ ) 能级碰撞激励到  $00(n+1)$  能级上的速率, 其它以此类推。

$\sigma$  为  $\text{CO}_2$  从  $001$  跃迁至  $100$  能级的碰撞截面。

$U_e = (2/3) \int_0^\infty U^3 f^e(U) dU$  为电子平均速度。

$V_d = -(2e/m) \int_0^\infty U \frac{\partial f}{\partial U} \cdot (\Sigma X_i Q_{ei}(U))^{-1} dU$  为电子漂移速度。

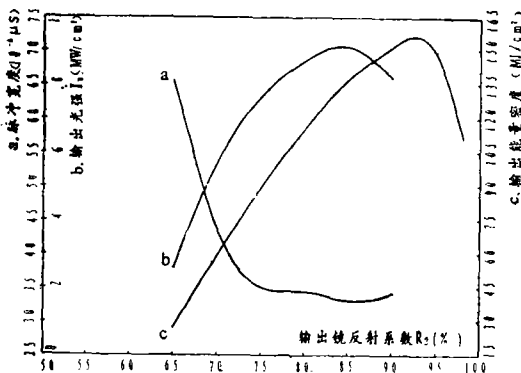


图3 脉冲宽度(a)、和输出光强(b)、输出能量密度(c)与输出镜反射率的关系

气体组分为  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 3$

$(E/N)_{max} = 1 \times 10^{-16} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$ ;  $J_{OM} = 128 \text{ A/cm}^2$ ;  $64 \text{ A/cm}^2$ 。

由式(1)~(7)构成的方程组, 以及给定的初始条件、各种参量, 由计算机解出, 其结果如图3。

由图中可看出: 输出功率最大发生在  $R_2 = 84\%$ , 能量最大值在  $R_2 = 92\%$ 。当  $R_2 > 75\%$  以后, 脉宽小于  $40 \text{ ns}$ 。

从功率及脉宽方面考虑, 选取  $R_2 = 85\%$  较合适。对我们的器件该参数应是最佳值。

由图4可看出：随着抽运的进行，上能级集居的粒子数增加，增益亦同时增加。在增加到最大值时激光就开始振荡，随之上能级粒子数亦减少，与此同时，增益也随之减少。当光腔内的光子达到最大值时，增益也最小。在尾部的振荡是由于典型的氮分子与CO<sub>2</sub>能量发生共振转移的结果。该图还表明：我们的器件，理论上可得到输出脉冲0.871MW/cm<sup>2</sup>的功率密度，其脉冲宽度为34.5ns。同时亦看到激光滞后于激励电脉冲约1μs才出现。

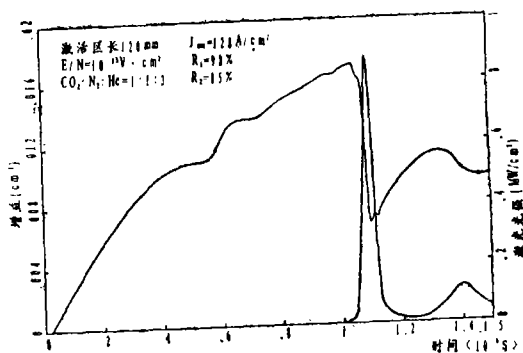


图4 激光光强和增益随时间的变化

腔参数— $L_c = 190\text{mm}$   $L_g = 120\text{mm}$

$R_1 = 98\%$   $R_2 = 98\%$

电参数— $E/N = 10^{15} \text{V} \cdot \text{cm}^{-2}$

$J_{OM} = 128 \text{A} / \text{cm}^2$

配气比— $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 3$

## 2. 三维Chang电极的计算

TEA CO<sub>2</sub>激光器的首要难题是保证在高气压强下的均匀辉光放电。为此，在放电空间的平坦区，其电场强度应是均匀的。由于电极是有限空间，因此势必电极的边缘效应会引起场强的不均匀性。对军用紧凑型TEA CO<sub>2</sub>激光器，一般采用Chang<sup>[4]</sup>电极，而且是三维的。

以下是三维Chang电极的计算。图5是计算中所采用的坐标。

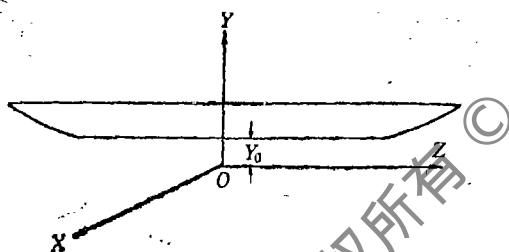


图5 三维Chang电场计算坐标

### (1) 二维Chang电极计算

电场强度E为：

$$E^{-2} = (1 + K \cos V \cdot \cosh U)^2 + (K \sin V \cdot \sinh U)^2 \quad (8)$$

式中，K为参数，V、U由下列复变函数定义：

$$S = \omega + K \sinh \omega = X + iY$$

$$\omega = U + iV$$

$$\text{故 } Z = U + K \cos V \cdot \sinh U \quad (9)$$

$$Y = V + K \sin V \cdot \cosh U \quad (10)$$

为使在电极间平坦区的场强为最大值，则要求  $\partial^2 E / \partial^2 U = 0$

$$\text{所以 } V_m = \arccos(-K) \quad (11)$$

由上式可得到：

$$Y = \cos^{-1}(-K) + K(1 - K^2)^{1/2} \cosh U \quad (12)$$

$$Z = U - K^2 \sinh U \quad (13)$$

由给定的电极尺寸，即电极长度  $\Delta Z$ ，电极宽度  $\Delta Y$ ，代入(12)和(13)式，可求出U、K。这样以U为参量，就可求出Y-Z关系曲线及相应数据。

### (2) 三维Chang电极计算

与二维相似，列出公式：

$$Y = [\cos^{-1}(\dots L_c) + L_z (1 - L_z^2)^{1/2} \cosh t] \quad (14)$$

$$X = t - L_z^2 \sinh t \quad (15)$$

$$\cdot \{ (M (1 - 0.64M)) / (1 - 0.64M - 0.36M^2) \}^6$$

$$\cdot \{ \cosh (X_m(z) / 2Y_0(z)) - 1 \}^2 = 1 / (\delta_m - 1) - 1 \quad (16)$$

$$M = L_z^{1/3}$$

$$X_m(z) / Y_0(z) = (X_m(0) / Y_0(0)) (Y_0(0) / Y_0(z))^{3/2} \quad (17)$$

$$\text{式中, } \delta_m = (E(0) - E) / E(0), \text{ 一般取 } 0.01 \text{ 左右。} \quad (18)$$

由二维计算出来的Y-Z对应值,在(17)式中就能找到 $(Y_0(0)/Y_0(z))^{3/2}$ 值,从而定出 $X_m(z)/Y_0(z)$ 及 $L_z$ 值。再由(14)和(15)式求出Y-X关系及其数据、曲线。下面是几种电极尺寸计算曲线。

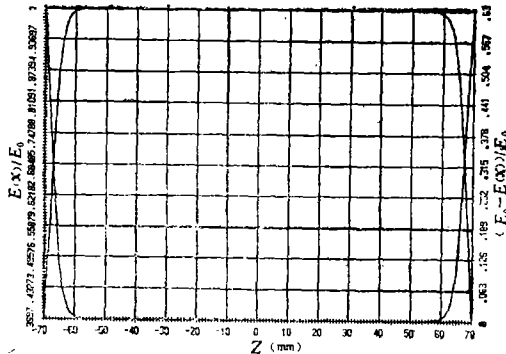


图6 三维Chang电场及电场均匀性随X的变化

$$X = 0 \quad K = 0.1415 \times 10^{-8}$$

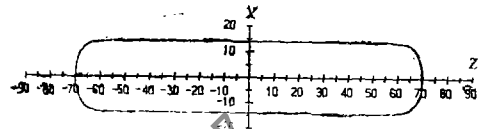


图7 三维Chang电极在 $Y_m = 13\text{mm}$ 时的轮廓

电极参数— $\Delta Z = 140\text{mm}$   $\Delta X = 28\text{mm}$   $\Delta Y = 8\text{mm}$   $Y_0 = 5\text{mm}$   
 $\Delta X$ —电极宽度  $\Delta Y$ —电极厚度  $\Delta Z$ —电极长度

### 3. 谐振腔和束散角的考虑与计算

首先考虑的是军用。因此谐振腔应稳定可靠,调整容易,故选用平凹腔。另外尽可能使模体积大,故选用大曲率半径的平凹腔。基于实际情况,我们选用的是 $R = 20\text{m}$ 的平凹腔。

由于TEA  $\text{CO}_2$ 激光峰值功率较大,但又是低重复率或单次运行。因此,用Ge为基底的凹面镀金作为全反射镜,为便于光学准直,用80%~85%的ZnSe平面镜作为输出耦合镜。不言而喻,此镜的输出面是镀了抗反射膜的。

图8是用于计算的原理图。

$$W_1^4 = (2/H)^2 (R-d)d \quad (19)$$

$$2\theta = 2 \times 0.939 \times (\lambda/d)^{1/2} \{ (1-g) / 4g \}^{1/4} \quad (20)$$

式中,  $R$  为凹面全反射镜之曲率半径,

$R = 20\text{m}$ ;  $\lambda$  为激光波长,  $\lambda = 10.6\mu\text{m}$ ;  $d$  为腔长,  $d = 0.190\text{m}$ ;  $g = 1 - d/R = 1 - 0.190/20 = 0.905$ 。

将已知数据代入到上式可得到:

$2\theta = 3.104\text{mrad}$ ;  $2W_2 = 5.10\text{mm}$ 。此时的衍射极限为 $2.535\text{mrad}$ 。

计算表明:在基模运转下,该激光器束散角为 $3.10\text{mrad}$ 。

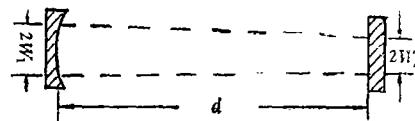


图8 光学谐振腔

## 参 考 文 献

- (1) C.R.Thoms & P.J.Chynoweth, TEA CO<sub>2</sub> laser for military application.
- (2) Успехи Физических Наук, 1969, Vol.97, No.4, P.697.
- (3) R.T.Brown, TEA CO<sub>2</sub> laser kinetics, R83-926182-1.
- (4) Rev.Scient.Instrum., 1973, Vol.44, P.405.

\*

\*

\*

作者简介: 屈乾华, 男, 1937年5月出生。高级工程师。现从事CO<sub>2</sub>激光技术工作。

侯天晋, 男, 1956年出生。工程师。现从事CO<sub>2</sub>激光技术工作。

收稿日期: 1989年7月3日。

· 简 讯 ·

### '89国际光学薄膜会议在上海召开

由中国光学学会主办、美国光学学会协办召开的1989年国际光学薄膜会议, 于1989年5月23日到25日, 在我国上海举行。

来自美国、加拿大、西德、东德、苏联、波兰、保加利亚、法国、瑞典、日本和香港等18个国家和地区以及我国(包括台湾省)近200名中外代表(其中国外代表约60名)出席了这次盛会, 进行了学术交流。

会议主席王大珩教授(中国光学学会理事长、我国著名的光学专家)主持了这次会议。担任这次会议的副主席及节目委员会共主席的国外成员、国际光学薄膜界权威A. J. 泰伦; J. A. 杜勃罗沃斯基; H. A. 麦克劳德等都出席了会议。会议的特邀报告共15篇(其中国外10篇)。

会议录用的论文共131篇(其中宣读62篇, 张贴69篇)。

光学薄膜是光学领域的一个重要分支技术。现代光学薄膜技术是集光、机、电、算的一种高、精、尖技术。建国后, 我国光学薄膜技术, 从无到有, 从少数地区、少数单位, 迅速发展在全国许多地区、数以千百计的单位。而且许多项目已达国际先进水平。目前我国已能研制计算机辅助设计的高水平真空镀膜设备与测试装置。掌握复杂的多层镀膜技术, 以及制造从紫外到红外的各种波段的光学薄膜器件。

在光学薄膜的前沿研究课题方面, 我国科技人员进行了大量的探索和研究, 并取得了显著的成绩。例如, 为我国高功率激光核聚变“神光”装置解决了抗高功率破坏的系列薄膜滤光片; 为我国发射多种型号人造卫星用的超窄带系列薄膜滤光片; 为光信息处理及光计算技术应用的光学双稳薄膜器件等高技术中所需的光学薄膜元、器件。

光学薄膜技术已广泛用于电影摄影、电视放映、光谱分析、工业监测、激光技术、空间技术、集成光学、光通讯、光信息等众多技术领域, 具有巨大的经济价值。

会议期间还举办了小型非贸易性展览会, 近十家国内、外厂商参加了展出。展品中有较新的薄膜元、器件; 镀膜设备和装置等。

这次会议得到中、外学者的一致好评, 认为会议组织得很好, 具有充分的国际性, 学术水平也很高。

(乙民 供稿)