



聚焦重离子束溅射技术制备同位素核反应靶



中国原子能科学研究院 核物理研究所

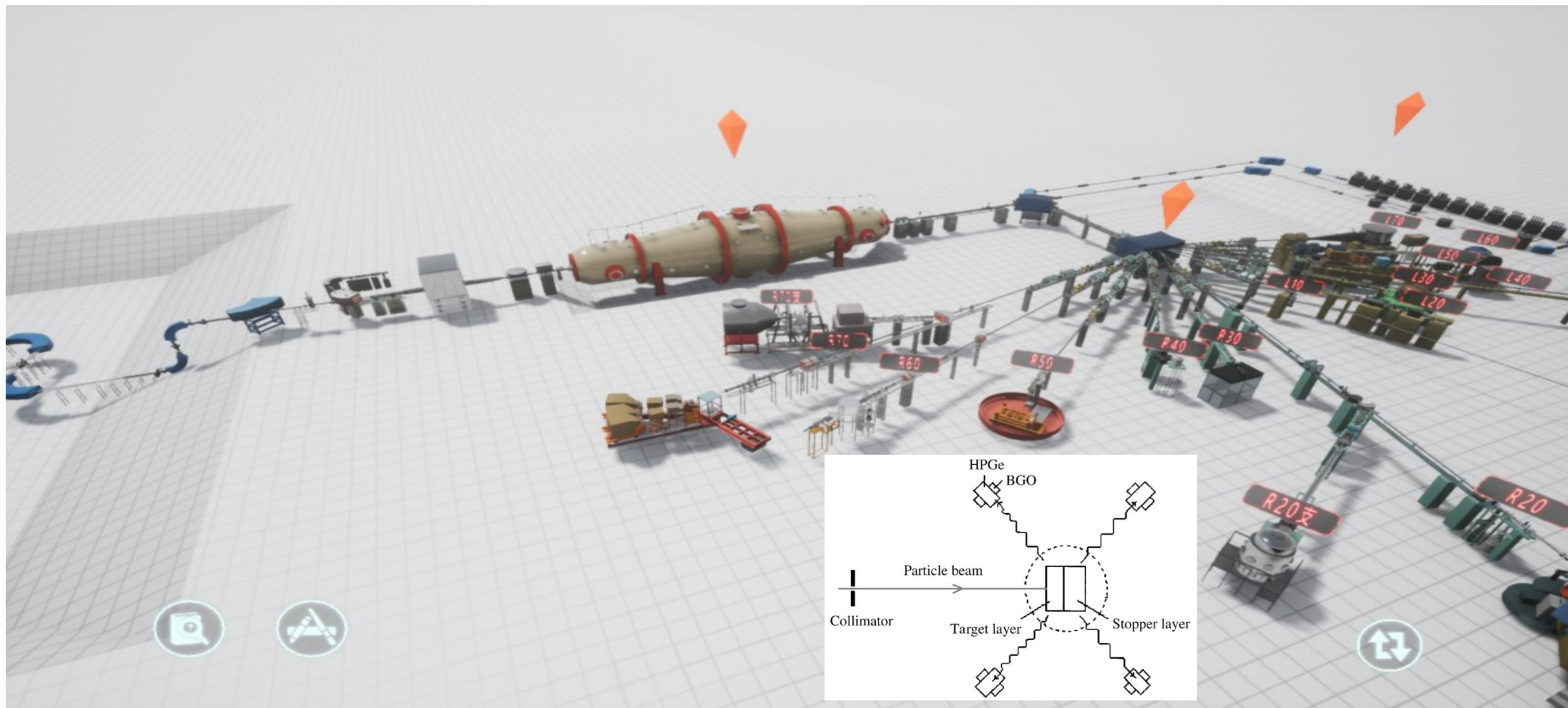
Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy

汇报人：樊启文

以身许国
敢为人先 严谨求实

2026年7月16日 湖南衡阳

同位素靶在加速器物理实验上的应用





报告提纲

- 基本情况及特点
- 装置和原理
- 制靶工艺与结果
- 对核物理基础研究的支撑



一、基本情况及特点



- 1971年，G.SLETTEN在第三次国际制靶会议上首次介绍这种制靶技术。
- 1984年，团队前辈在国内率先建立了基于**双等离子体源**的聚焦重离子束溅射装置。
- 2004年，新建装置，离子源更换成电离效率更高更稳定的**潘宁源**。
- **效率高**：束斑可聚焦到 $\Phi 1.5\text{mm}$ ，极少量的材料即可制靶。
- **材料适用性强**：粉末、颗粒、块体，同位素金属及非金属单质、同位素化合物，低熔点材料、高熔点材料、升华材料。



二、装置及原理



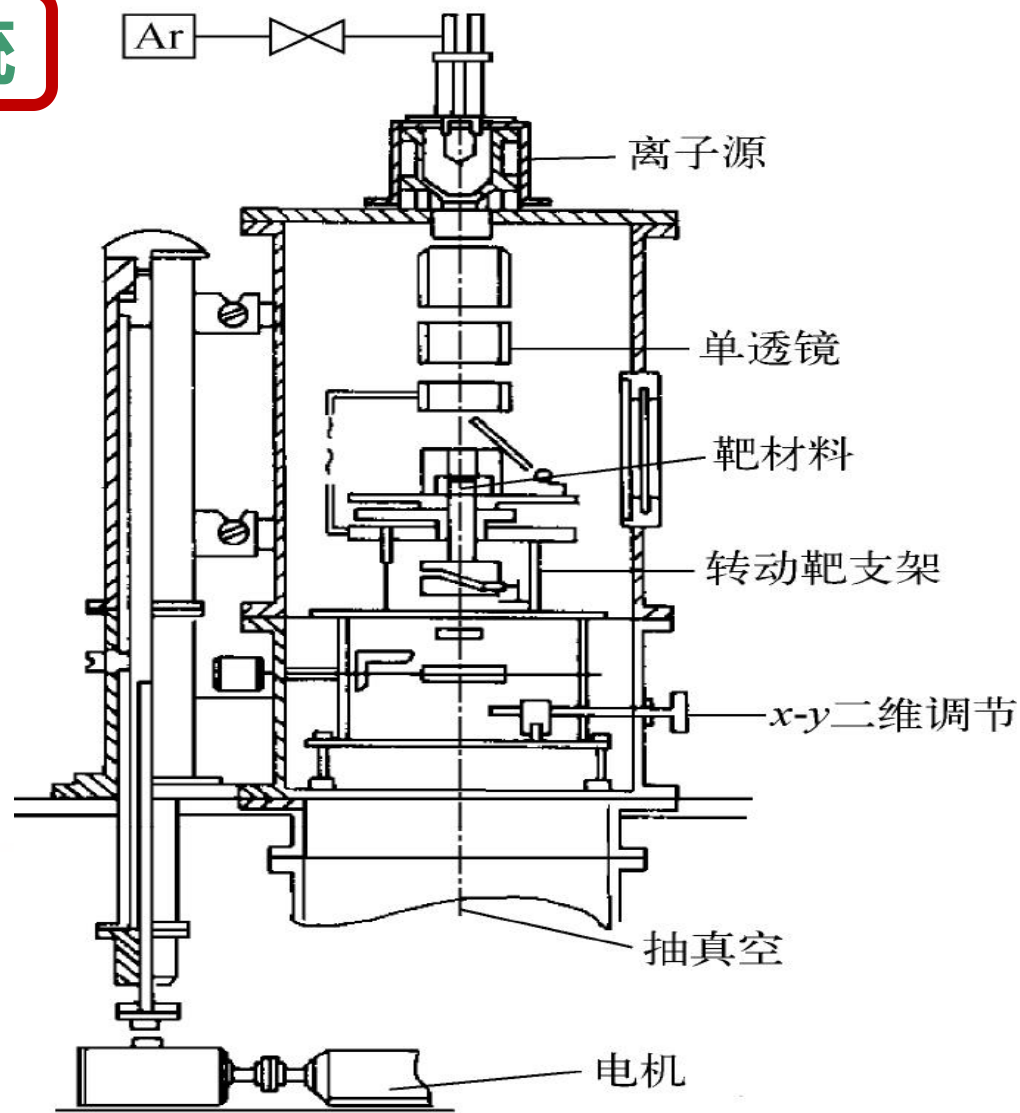
聚焦重离子溅射装置及原理介绍

供气系统

离子源

透镜

靶阴极



阴极转动及二维调节系统

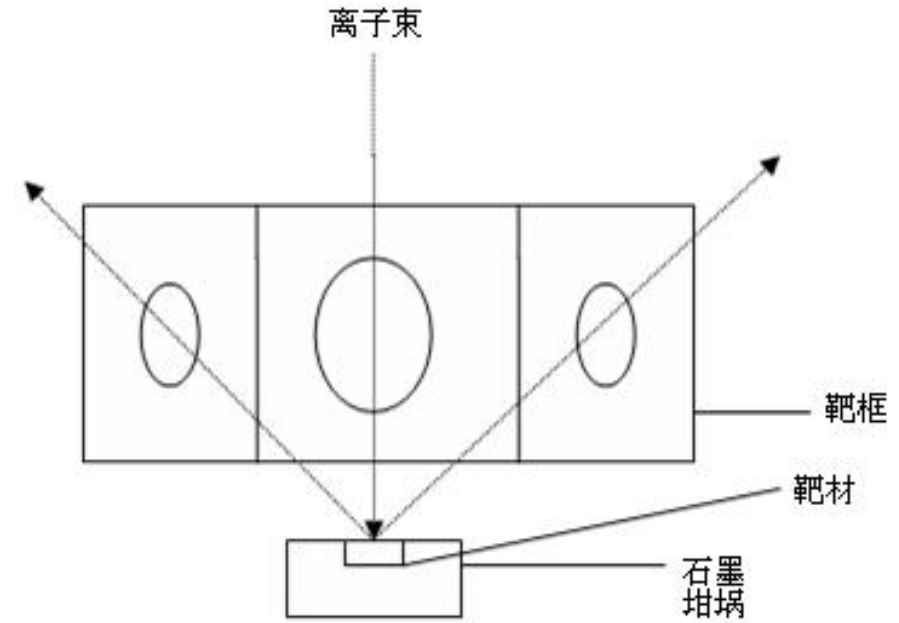
真空系统

控制系统

◆ 溅射角度、溅射距离

◆ 溅射速率、溅射参数

◆ 均匀性、材料利用率



溅射参数

离子种类	Ar ⁺
加速电压	5-10 KV（主要根据靶材料的熔点、饱和蒸气压选择）
聚焦电压	100-700 V（影响束斑/溅射速率等）
离子源气压	5.5-6.5 Pa
磁场电压	8-10 V（离子源状态）
放电电压	0.8-1.2 KV（离子源状态）
溅射室真空	<5×10 ⁻⁴ Pa



➤ 源-衬距离与材料利用率及均匀性的关系

三、制靶工艺与结果



➤ 不同材料的溅射沉积速率

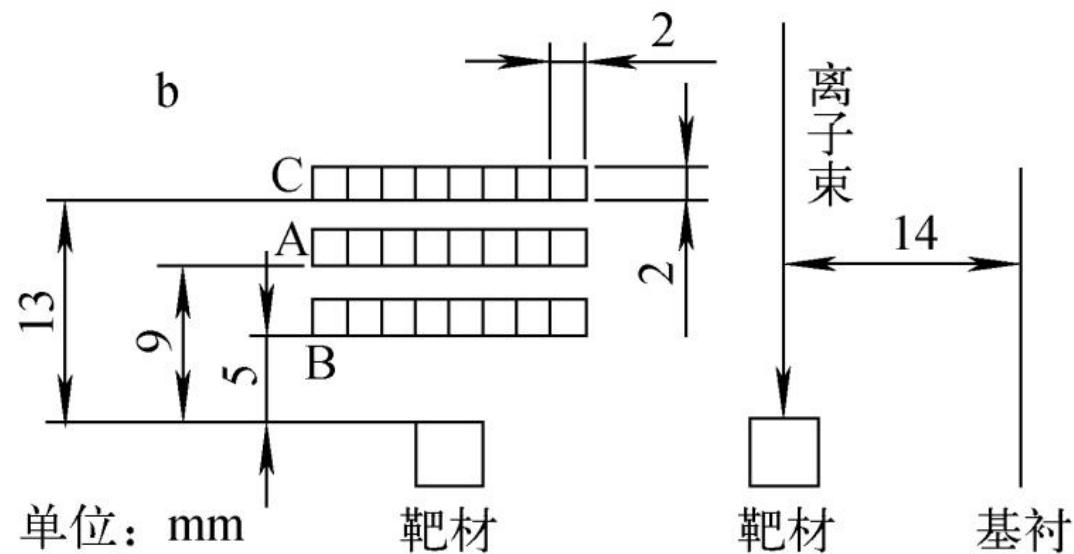
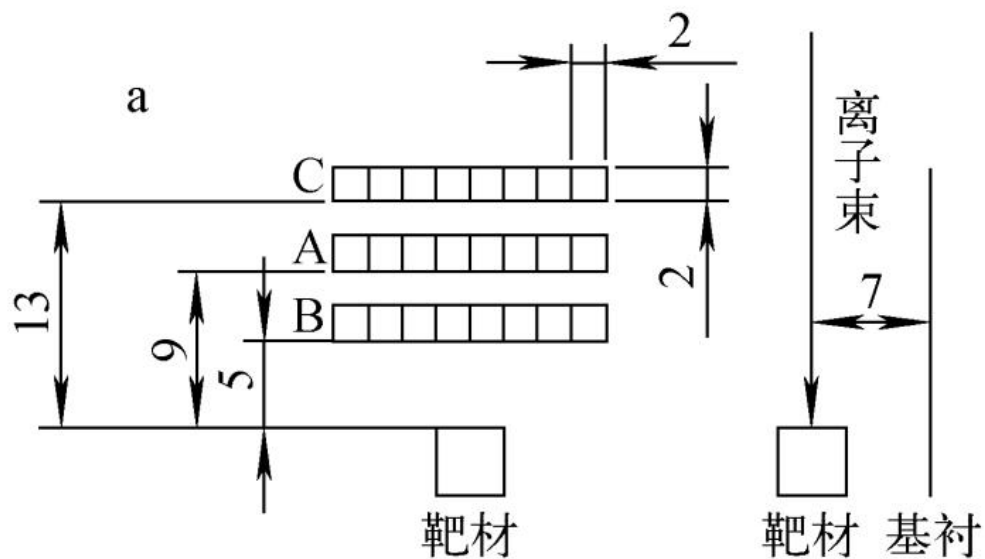
材料	溅射沉积速率($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}$)		材料	溅射沉积速率($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}$)		材料	溅射沉积速率($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}$)	
	源衬距7mm	源衬距14mm		源衬距7mm	源衬距14mm		源衬距7mm	源衬距14mm
Cu	125.3	32.3	Mg	6237.4	1455.5	Pb	143.8	45.6
Fe	93.2	27.5	Zr	77.6	21.2	Mn	233.7	59.2
Co	95.5	27.0	Nb	72.8	20.1	Pd	89.6	23.7
Ni	92.1	20.8	Mo	83.1	23.6	Ru	18.9	5.1
V	83.6	23.3	W	18.9	4.9	Ag	131.8	32.5
C	8.9	2.3	Au	105.6	25.6	In	1576.4	404.0
Zn	5893.7	1521.3	Pt	74.7	20.1	Sn	99.3	24.3
Cd	5379.9	1393.6	Bi	137.9	38.7	Hf	21.1	4.8
Re	23.3	4.9	Os	14.4	3.5	Sb	545.5	157.7
Ta	57.6	15.7	Ir	16.3	3.8	Rh	20.2	5.3
Cr	49.9	14.8	Ti	61.3	14.3	Al	56.6	13.4
Sb	568.5	167.1	Te	833.5	247.6	Sc	111.3	35.5
Yb	101.2	26.6	Sm	93.3	25.5	Gd	90.5	27.3
Dy	90.0	24.1	Tb	105.6	28.1	Ho	84.6	20.9
Tm	92.3	23.8	Lu	79.3	16.7	Er	77.7	18.8

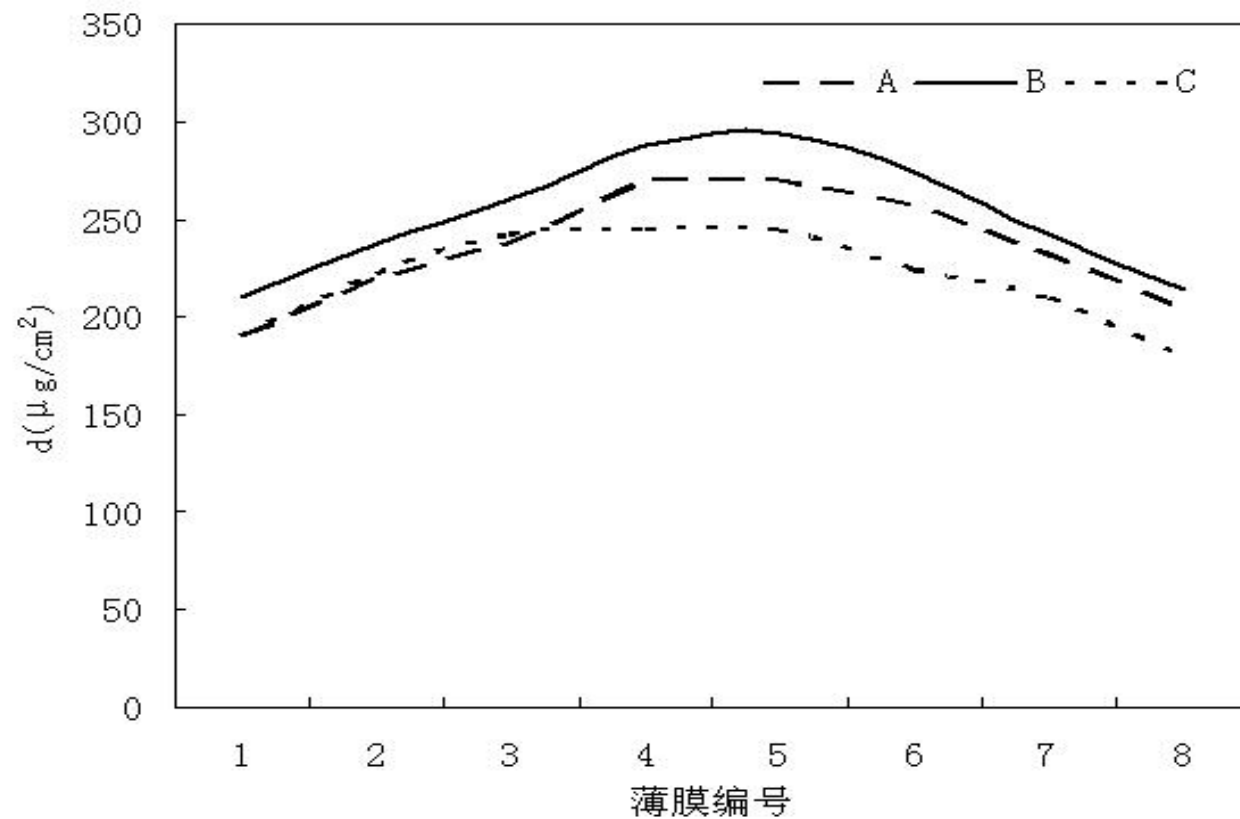
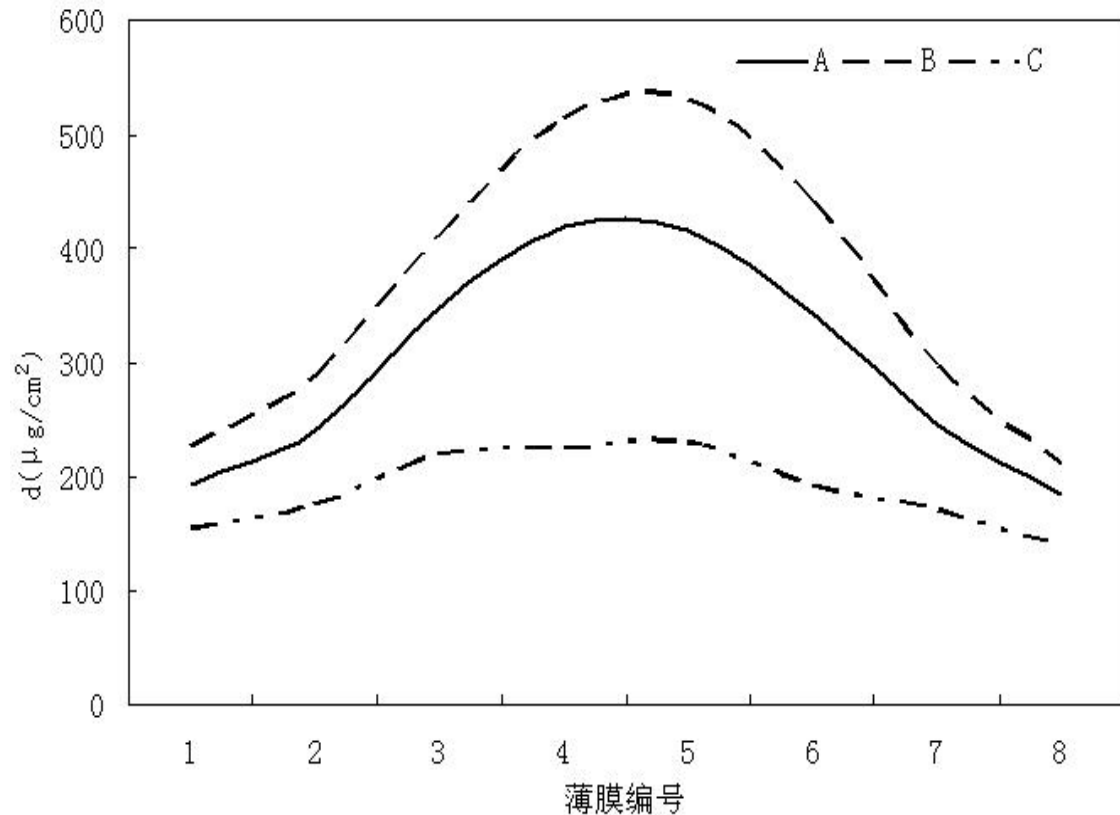
➤ 不同材料的溅射沉积速率

材料	溅射沉积速率($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}$)		材料	溅射沉积速率($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}$)		材料	溅射沉积速率($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}$)	
	源衬距7mm	源衬距14mm		源衬距7mm	源衬距14mm		源衬距7mm	源衬距14mm
Yb ₂ O ₃	29.2	7.7	Eu ₂ O ₃	31.4	6.9	MoO ₃	237.4	63.8
Sm ₂ O ₃	30.5	7.7	La ₂ O ₃	32.5	7.8	ZrO ₂	33.7	7.2
Gd ₂ O ₃	28.7	8.0	Ce ₂ O ₃	33.1	8.1	WO ₃	237.2	68.5
Dy ₂ O ₃	26.4	7.1	TeO ₂	688.7	168.9	ZnO	88.4	23.6
Tb ₂ O ₃	26.8	6.7	HfO ₂	24.6	5.5	CdO	92.3	26.1
Ho ₂ O ₃	25.9	6.8	In ₂ O ₃	43.7	6.7	MgO	94.4	23.7
Tm ₂ O ₃	27.8	7.0	SnO ₂	105.6	24.7	LiF	431.6	120.9
Lu ₂ O ₃	29.9	7.1	Li ₂ O	55.4	15.1	BN	17.1	3.8
Er ₂ O ₃	31.1	6.6	Cr ₂ O ₃	22.2	4.2	Ba ₂ CO ₃	447.3	118.7

源-衬距离与材料利用率及均匀性的关系

横向分布

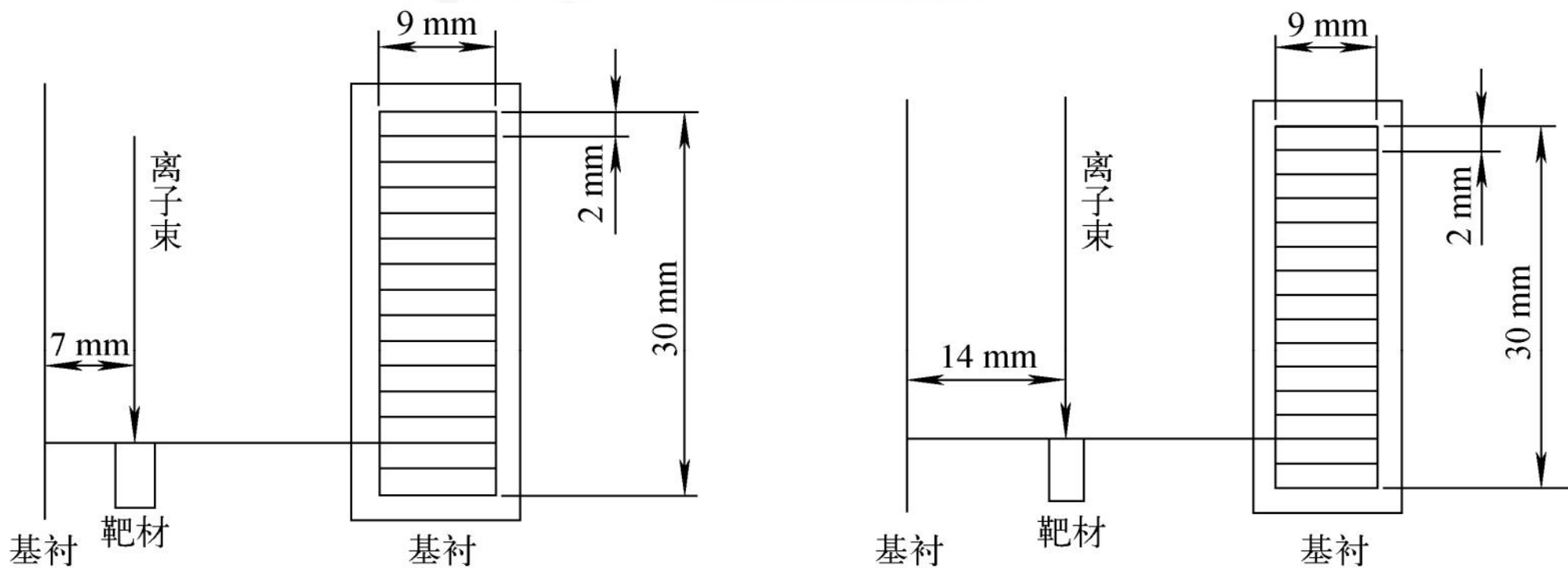


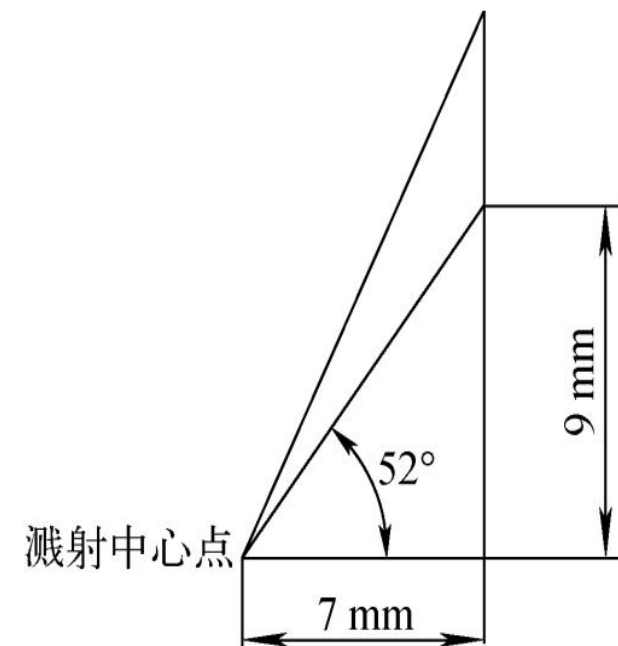
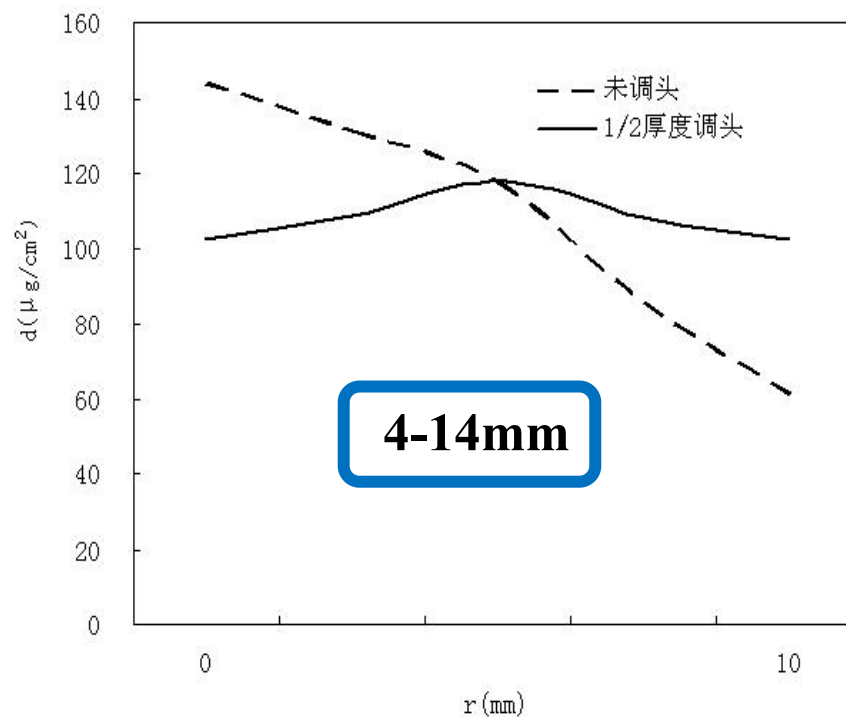
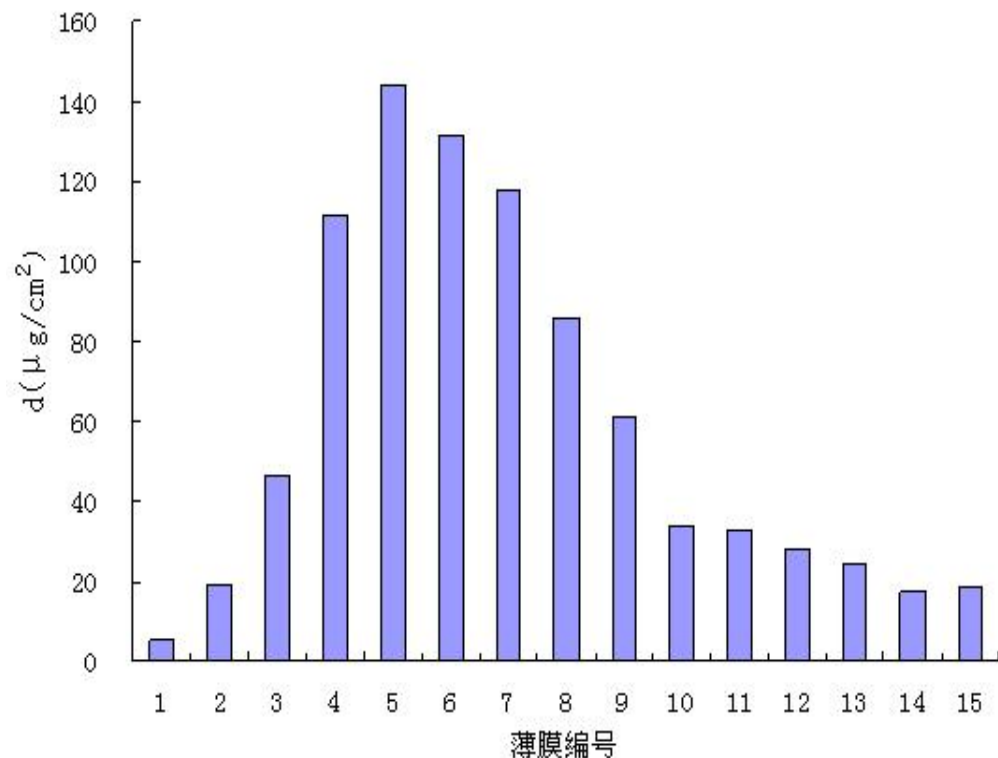


- (1) 横向中间10mm区域, 材料的利用率最大;
- (2) 当源-衬距离为7mm时, 横向中间10mm区域, C位置对应的均匀性最好, ~88% ;
- (3) 当源-衬距离为14mm时, 横向中间10mm区域, C位置对应的均匀性最好, ~93% ;

➤ 源-衬距离与材料利用率及均匀性的关系

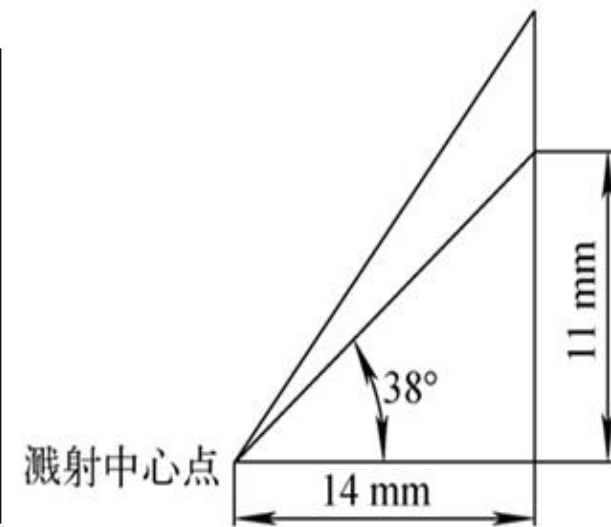
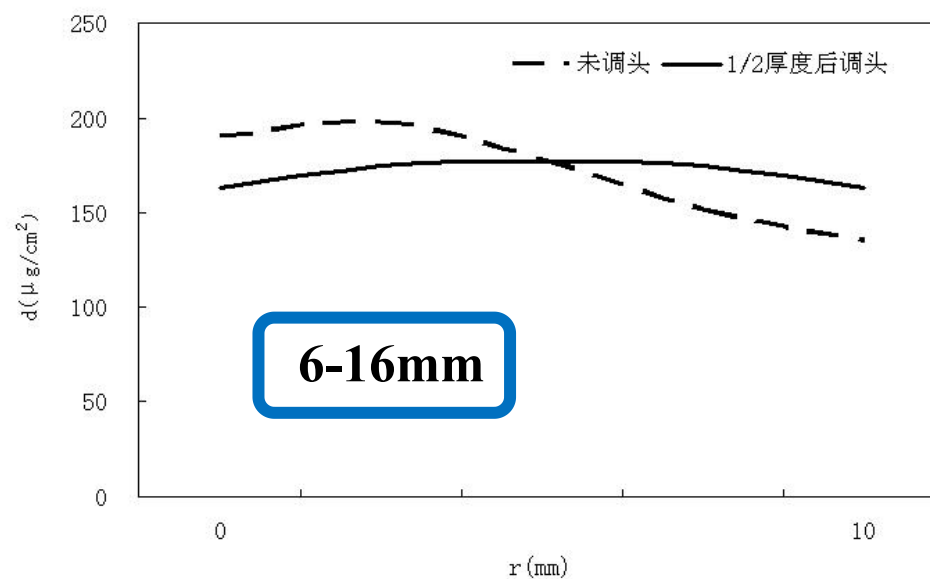
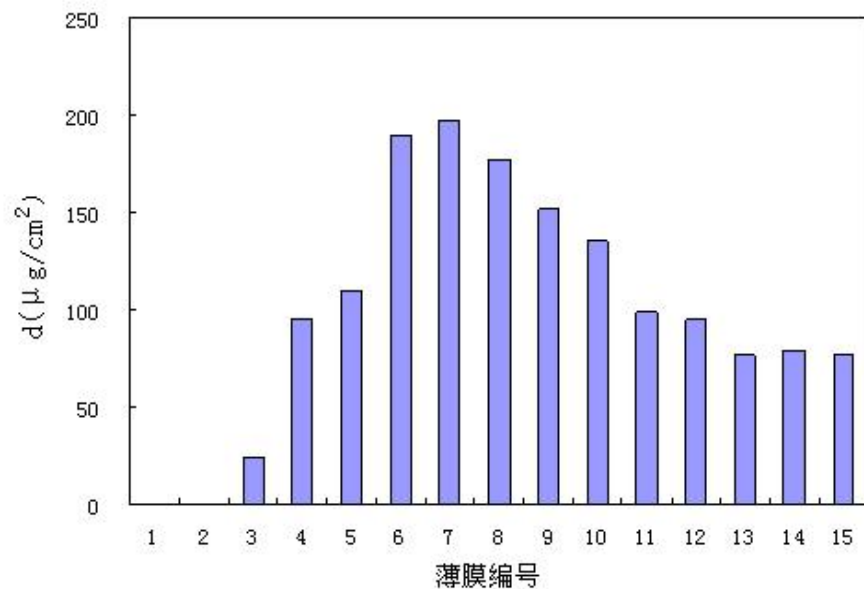
纵向分布





当源-衬距离为7mm（取4-14mm的 $\Phi 10\text{mm}$ 范围）：

- (1) 基衬中心与源材料水平界面成52°，材料利用率最高；**
- (2) 基衬架转动、空间180翻转，均匀性为从56%提高至95%。**



当源-衬距离为14mm（取6-16mm的Φ10mm范围）：

- (1) 基衬中心与源材料水平界面成38°，材料利用率最高；
- (2) 基衬转动、空间180翻转，均匀性为从79%提高至96%。

脱膜——衬底腐蚀

Al箔：NaOH溶液、 HNO_3 溶液

NaCl抛光片：去离子水

单晶硅片：HF酸

有机薄膜：丙酮等有机溶剂

Cu箔：三氯醋酸铵溶液、 HNO_3 溶液

溅射制靶的测厚方法

在线：时间控厚。 关键：标定各种材料的溅射速率

离线：天平称重

破坏性/厚衬靶/比较片



0.1 μg

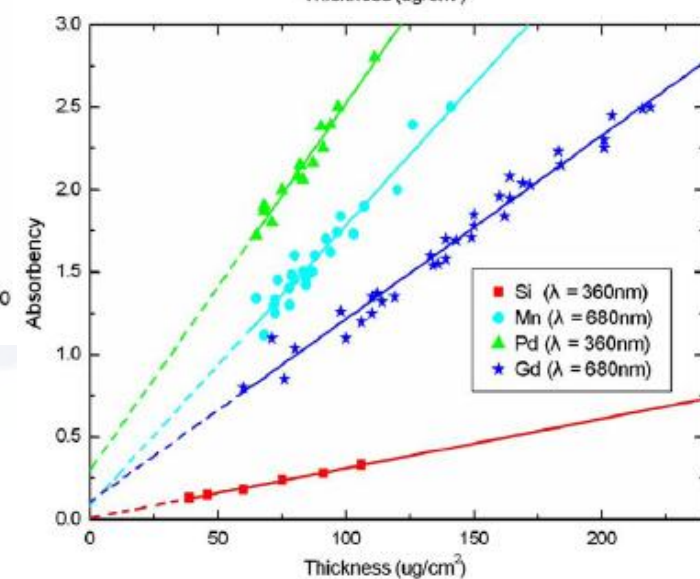
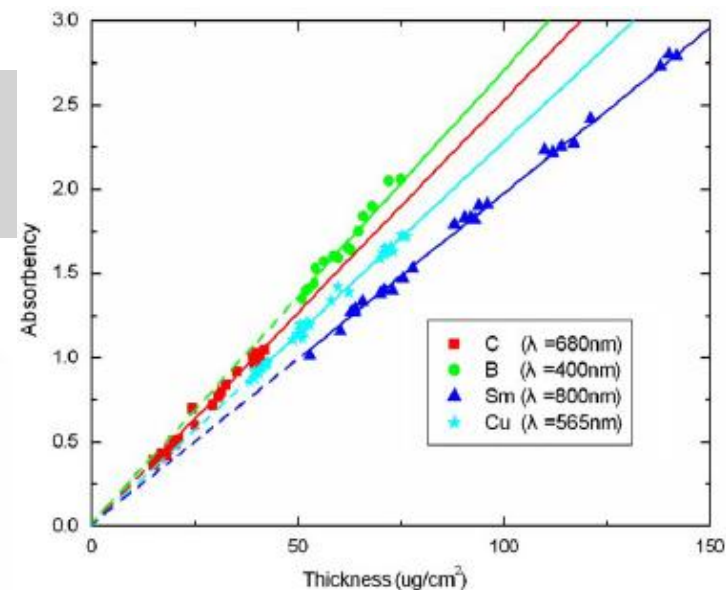
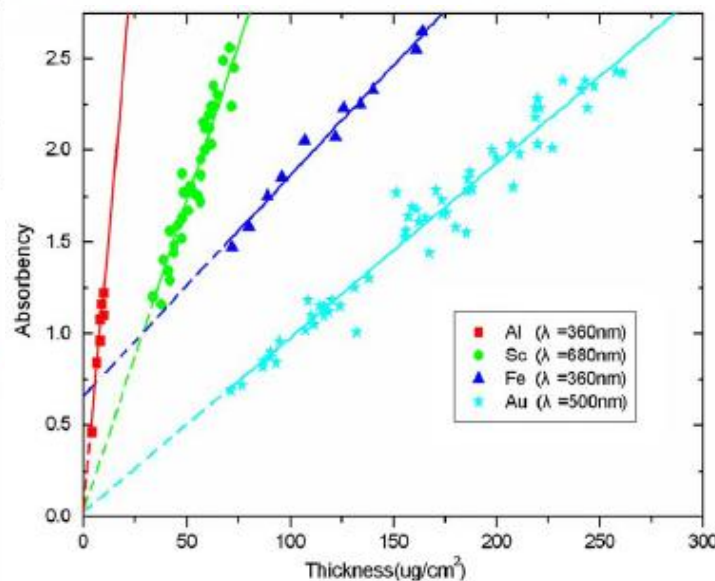
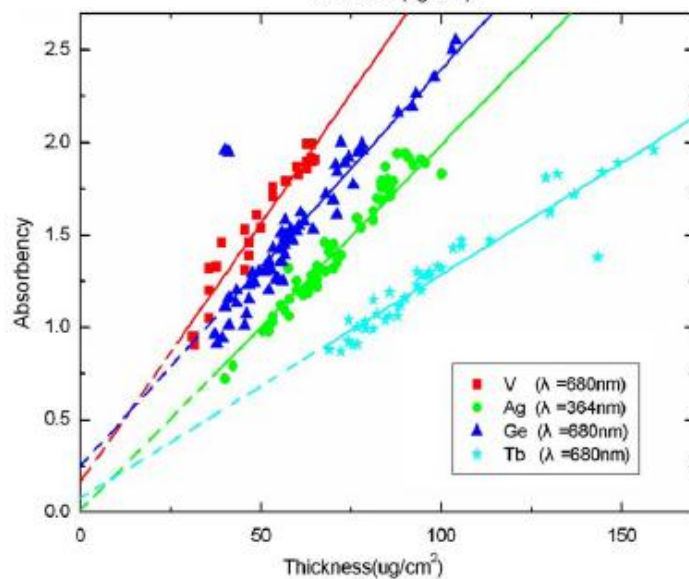
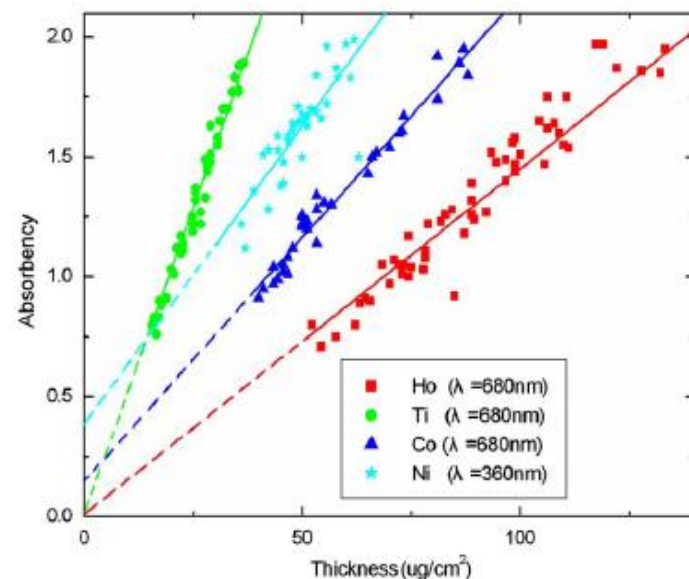
光吸收法——非破坏性

<200 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 自支撑靶厚度标定



关键：刻度各种材料的A-d曲线

质量厚度与吸光度的关系 (A-d)



➤ 制靶结果：<100μg/cm²自支撑靶

元素	腐蚀溶液	厚度 (μg/cm ²)	元素	腐蚀溶液	厚度 (μg/cm ²)
Ir	HNO ₃	50	Fe	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	48
Rh	HNO ₃	40	Dy	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	44
Zr	HNO ₃	44	Lu	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	50
Ta	HNO ₃	60	Er	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	40
Hf	HNO ₃	70	Sm	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	60
Nb	HNO ₃	20	Y	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	73
Ru	HNO ₃	20	Sb	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	55
Cr	HNO ₃	30	Co	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	40
Si	HNO ₃	12	Mg	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	45
C	HNO ₃	16	Pb	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	50
Re	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	65	Os	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	50
Ni	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	37	Pt	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	64
Ti	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	44	V	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	40
Pd	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	40	Yb	CCl ₃ CO ₂ NH ₄	60

➤ 制靶结果： 自支撑同位素靶

核素	腐蚀溶液	厚度 (μg/cm ²)	核素	腐蚀溶液	厚度 (μg/cm ²)
¹⁸⁶ W	HNO ₃	200-1020	¹⁰² Ru	HNO ₃	220-850
¹⁸⁴ W	HNO ₃	150-900	¹⁰¹ Ru	HNO ₃	210-810
¹⁸² W	HNO ₃	180-850	⁹⁹ Ru	HNO ₃	180-900
¹⁸⁰ W	HNO ₃	210-650	¹⁰⁰ Ru	HNO ₃	170-720
¹⁸⁰ Hf	HNO ₃	120-800	¹⁹⁶ Pt	HNO ₃	130-900
¹⁷⁶ Hf	HNO ₃	175-850	¹⁹⁵ Pt	HNO ₃	180-910
¹⁷⁸ Hf	HNO ₃	130-870	¹⁹⁴ Pt	HNO ₃	190-850
¹⁹² Os	HNO ₃	165-820	¹⁹⁸ Pt	HNO ₃	180-880
¹⁹⁰ Os	HNO ₃	150-760	¹¹⁰ Pd	HNO ₃	160-1000
¹⁸⁹ Os	HNO ₃	145-830	¹⁰⁸ Pd	HNO ₃	205-830
¹⁸⁸ Os	HNO ₃	200-920	¹⁰⁶ Pd	HNO ₃	180-970
¹⁸⁵ Re	HNO ₃	190-780	¹⁰⁵ Pd	HNO ₃	110-1050
¹⁸⁷ Re	HNO ₃	150-850	¹⁰⁴ Pd	HNO ₃	200-1250
¹⁰⁴ Ru	HNO ₃	135-910	¹³ C	HNO ₃	25-300

➤ 制靶结果：有衬同位素靶

基衬	核素	厚度 (μg/cm²)	核素	厚度 (μg/cm²)	核素	厚度 (μg/cm²)	核素	厚度 (μg/cm²)
C: 30~2300 μg/cm² Pb: 8~20 mg/cm² Au: 2~15 mg/cm²	186W	50-2000	102Ru	300-1800	98Mo	500-3000	152Sm₂O₃	500-2300
	184W	50-2000	101Ru	300-1800	97Mo	500-3000	154Sm₂O₃	500-2300
	182W	50-2000	99Ru	300-1800	96Mo	500-3000	148Sm₂O₃	500-2300
	180W	50-2000	100Ru	300-1800	92Mo	500-3000	171Yb₂O₃	500-2200
	180Hf	300-2200	196Pt	650-2300	96ZrO₂	300-2000	172Yb₂O₃	500-2200
	176Hf	300-2200	195Pt	650-2300	94ZrO₂	300-2000	173Yb₂O₃	500-2200
	178Hf	300-2200	194Pt	650-2300	92ZrO₂	300-2000	174Yb₂O₃	500-2200
	192Os	80-2000	198Pt	650-2300	91ZrO₂	300-2000	176Yb₂O₃	500-2200
	190Os	80-2000	110Pd	600-2000	90ZrO₂	300-2000	151Eu₂O₃	500-2000
	189Os	80-2000	108Pd	600-2000	142Nd₂O₃	800-2000	153Eu₂O₃	500-2000
	188Os	80-2000	106Pd	600-2000	150Nd₂O₃	800-2000	115In₂O₃	300-1500
	185Re	500-2500	105Pd	600-2000	144Sm₂O₃	500-2300	138BaCO₃	750-2300
	187Re	500-2500	104Pd	600-2000	147Sm₂O₃	500-2300	156Gd₂O₃	500-2000
	104Ru	300-1800	100Mo	500-3000	150Sm₂O₃	500-2300	160Gd₂O₃	500-2000

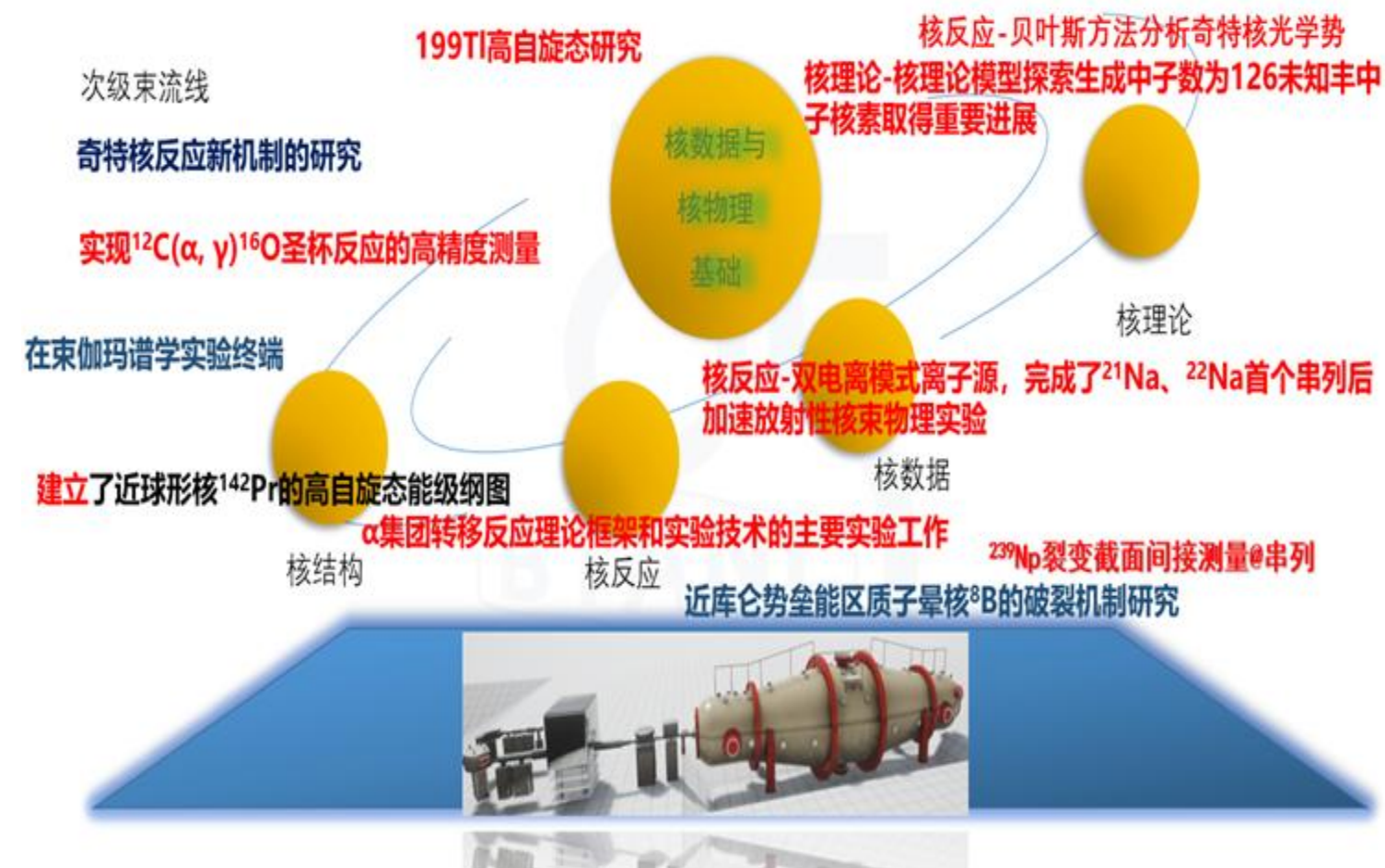


➤ 源-衬距离与材料利用率及均匀性的关系

四、对核物理基础研究的支撑



➤ 聚焦重离子束溅射制备同位素靶对基础研究的支撑作用



支撑物理研究发表500余篇高水平文章

- (1) Physical Review Letters 116, 112501 (2016);
- (2) Astrophys. J. 848:98 (2017);
- (3) Physics Letters B 751 (2015) 1-6;
- (4) Physics Letters B 755 (2016) 43-46;
- (5) Physics Letters B 766 (2017) 107-111;
- (6) Physics Letters B 734 (2014) 308-313;
- (7) Physical Review C 94, 015814 (2016);
- (8) Physical Review C 95, 044616 (2017);
- (9) Physical Review C 97, 034322 (2018);

.....



感谢各位专家、 敬请批评指正！

