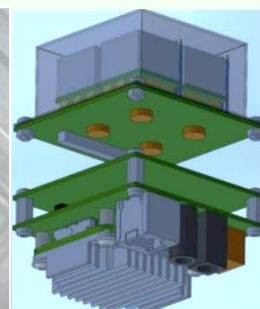
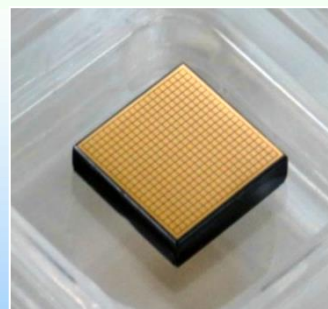
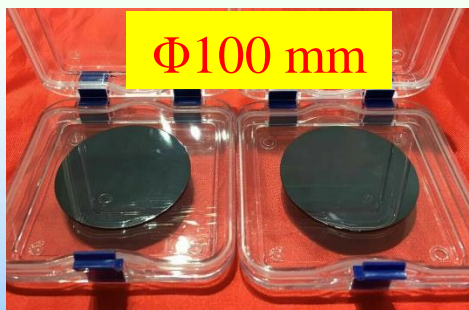


半导体核辐射探测晶体材料与器件研究进展

徐亚东*

西北工业大学, 辐射探测材料与器件工信部重点实验室,
凝固技术国家重点实验室

*Email: xyd220@nwpu.edu.cn



2021.10.22 第十届全国先进气体探测器研讨会

汇报提纲

- 一、辐射探测材料与器件工信部重点实验室**
- 二、碲锌镉晶体与器件研究进展**
- 三、基于碲锌镉晶体终端器件开发**
- 四、辐射探测用金属卤化物钙钛矿**

1.1 面向应用需求牵引

辐射探测材料和器件是推动微波、太赫兹、红外和核技术应用不可缺少的工具和手段



医学成像



环境监测



安全检查



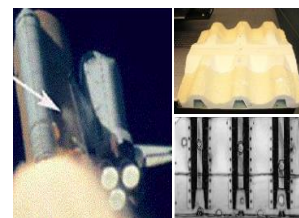
国防核技术



大科学装置--XFEL



工业在线检测



无损探伤



武器装备侦检

成为医学成像，环境监测，安全检查和在线检测等工业领域核心器件，及提升武器装备性能的关键

1.2 实验室研究背景

- **涉及领域**：雷达波（频率GHz）~ 伽马射线（能量MeV）
- **出发点**：基于宽频谱电磁波与材料作用原理，开展探测材料设计与合成、器件制备及系统集成



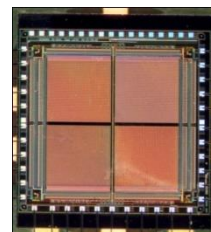
隐身图层



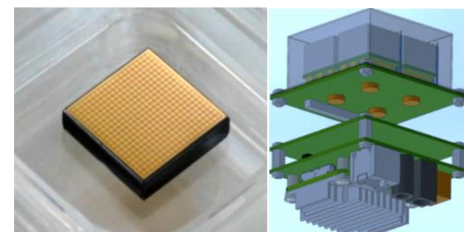
THz电光晶体



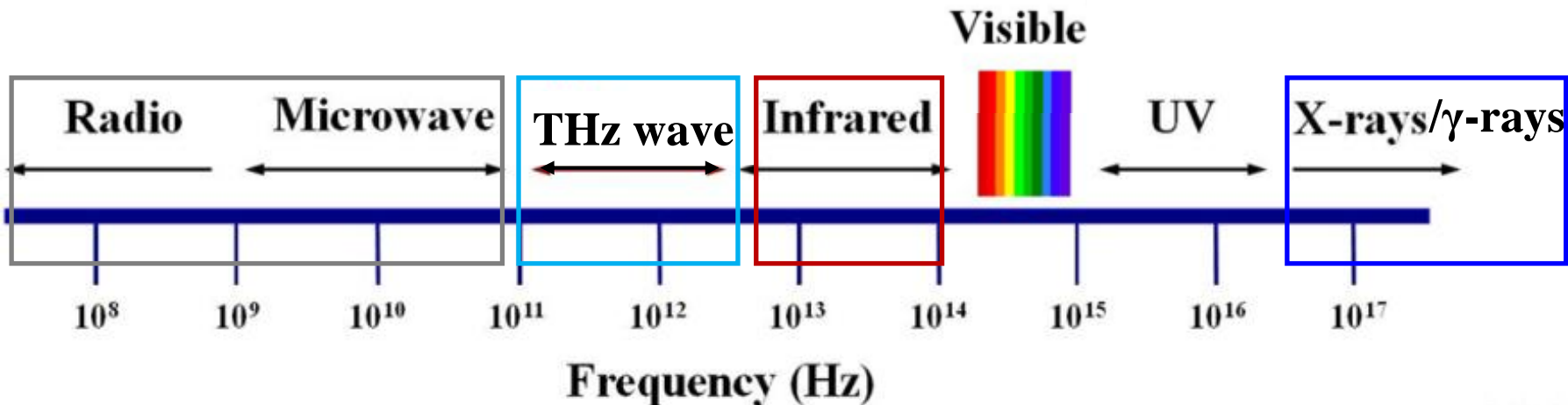
红外探测器



ASIC芯片



γ 射线探测器



1.3 建设目标与定位

辐射探测相关
领域的应用基
础研究与技术
转化

开展探测器的材料合成与制备，元器件的设计与制造以及系统集成等，**建设研究平台**

面向“中国制造2025”中辐射探测领域新材料和元器件，**服务于工业和信息化领域创新能力**

形成不同辐射探测技术的**学科交叉、学术交流、人才培养和成果转化中心**

1.4 实验室基本情况

学术委员会

主任：郝跃院士

副主任：李言荣院士

介万奇教授

实验室

主任：徐亚东教授

副主任：王涛教授、高武

教授、卿玉长研究员



跨学科合作机制

- 材料学院
- 计算机学院
- 电子信息学院
- 机电学院

□ 服务西北工业大学材料科学与工程一流学科建设的重要平台

1.5 研究方向与主要工作

研究方向

1. 新型辐射探测材料设计与合成
2. 辐射探测材料性能表征与器件设计制备
3. 辐射探测器信号读出芯片设计与器件集成

研究工作

应用基础
研究

重大关键
技术

产业共性
技术

1.6 研究水平与贡献

5年来，共承担各类科研项目69项，总经费3亿6千余万元。其中，承担重点研发计划项目6项，国家自然科学基金16项，国际合作项目6项，装发共用技术、军品配套等项目12项。

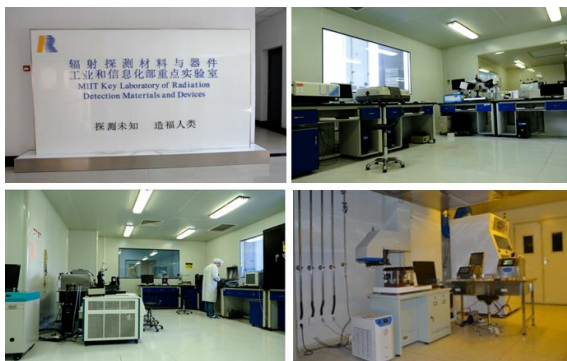
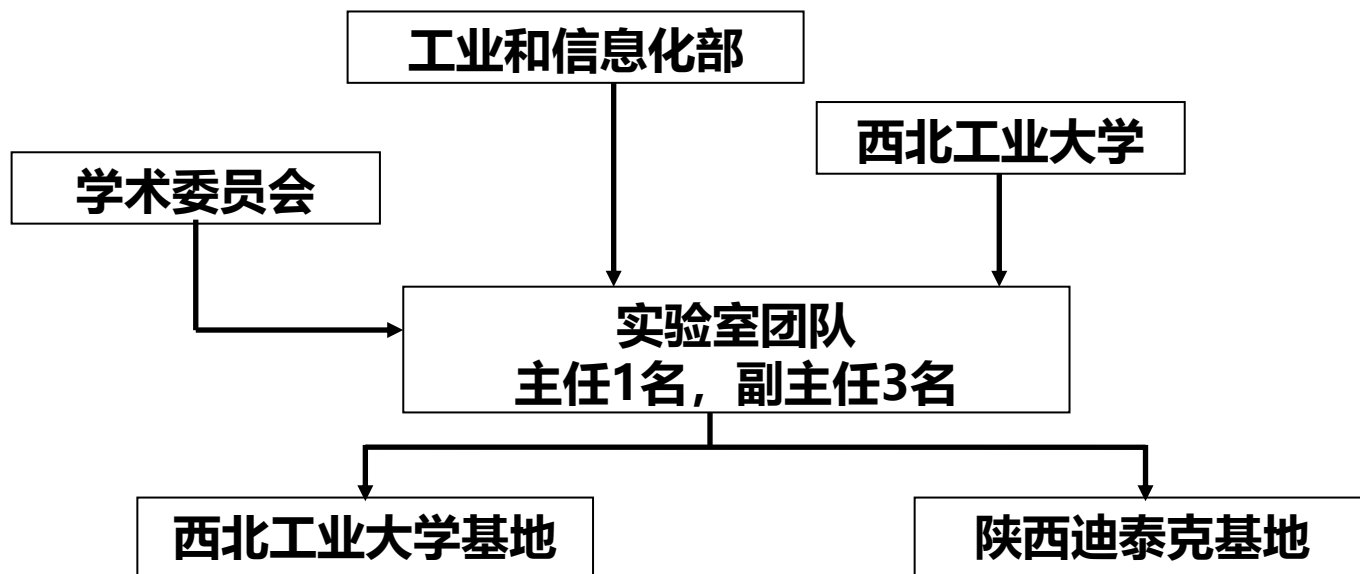
项目名称	项目类型	起止时间	资助金额/万元	任务
多能谱光子计数X射线成像仪的开发	国家重点研发计划	2016.9-2020.8	4200	主持
高能束增材制造复杂结构无损检测方法研究	民机科研项目	2017.1-2020.12	1760	主持
碲锌镉面阵探测材料与器件研究	国家重点研发计划	2016.7-2020.12	1455	主持
XXX探测器研制	军用电子元器件型谱项目	2017.1-2019.12	980	主持
XXXX材料与结构研究	装发共用技术项目	2017.12-2020.12	800	主持

1.6 研究水平与贡献

近5年，获国家级奖励 1 项，省部级奖4项，行业奖励2项

序号	奖励名称	级别（国家/省部/行业）	时间
1	航空发动机用耐高温长寿命特种功能材料	国家技术发明二等奖	2018年
2	***系列高温**材料	国防技术发明一等奖	2017年
3	太赫兹产生与探测用碲化锌基电光晶体的制备技术	陕西省技术发明一等奖	2019年
4	制备大体积碲锌镉单晶的方法	中国专利优秀奖	2017年
5	高电阻率碲锌镉晶体的制备方法	陕西省专利奖一等奖	2018年
6	新型非制冷抗辐照红外探测材料碲镉汞单晶及器件制备技术	陕西省技术发明二等奖	2019年
7	钙钛矿铌钛酸盐的介电响应与调控机制	广西省自然科学二等奖	2017年

运行管理



“双基地”



□ 现有实验场地近3000平米，其中，洁净实验室约700平米；
次外，成果转化基地配套1500平米实验场地

汇报提纲

- 一、辐射探测材料与器件工信部重点实验室
- 二、碲锌镉晶体与器件研究进展
- 三、基于碲锌镉晶体终端器件开发
- 四、辐射探测用金属卤化物钙钛矿

2.1 近年来总体研究思路

II-VI族碲化物半导体材料和器件

关键问题

材料

液/固界面失稳

缺陷种类复杂

载流子输运性能差

器件

限制器件灵敏体积

恶化器件光电性能

降低器件收集效率



研究工作



2.2 学术贡献一：大尺寸单晶生长

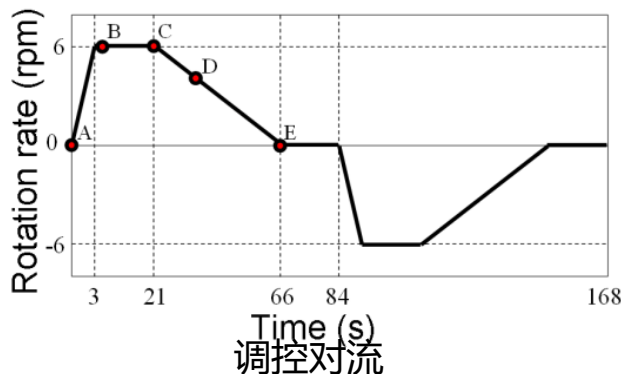
- 提出了熔体法晶体生长的平界面控制原理，揭示了ACRT技术影响熔体对流的规律

难点

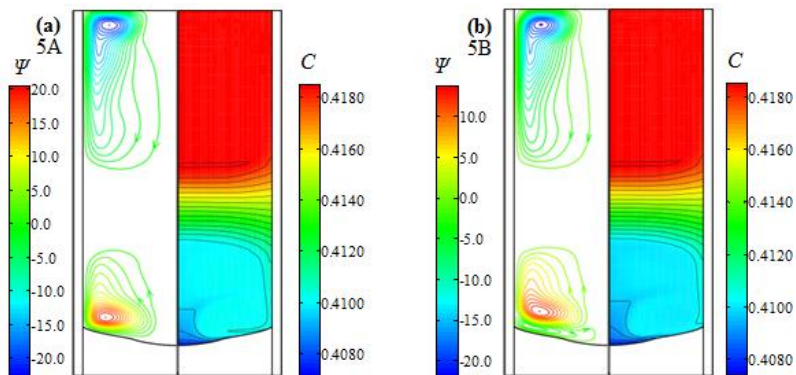
- 热导率低 => 凹液面生长，形成多晶
- 分凝现象 => 成分不均匀



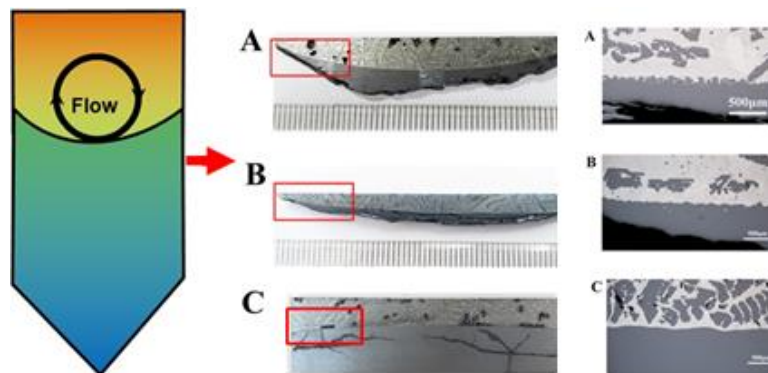
温度场优化



调控对流



多场耦合及溶质分凝的数学模型和计算方法



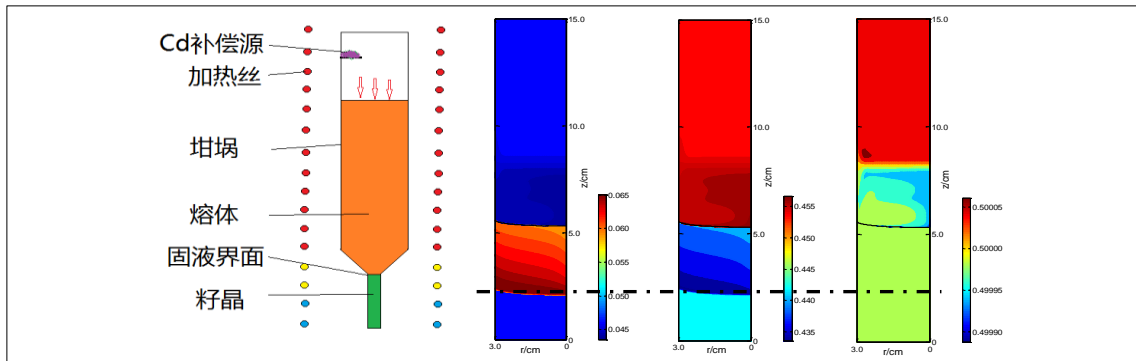
宏观/微观界面调控

Y. Xu, et al., IEEE TNS, 2009, 56: 2808. H. Zhang, et al., CGD, 2017, 17: 6426.

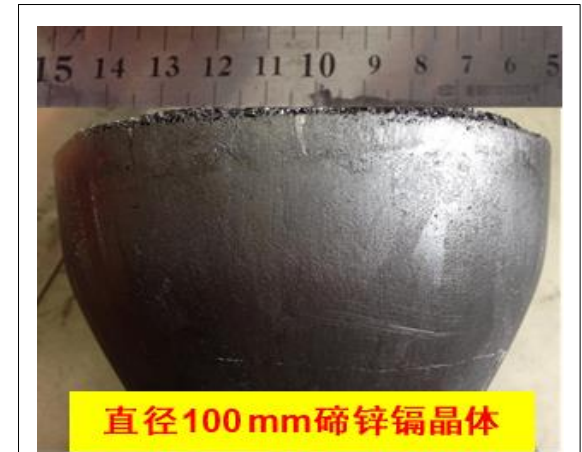
专利: ZL200710017996.7, ZL 201310489066.7

学术贡献一：大尺寸单晶生长

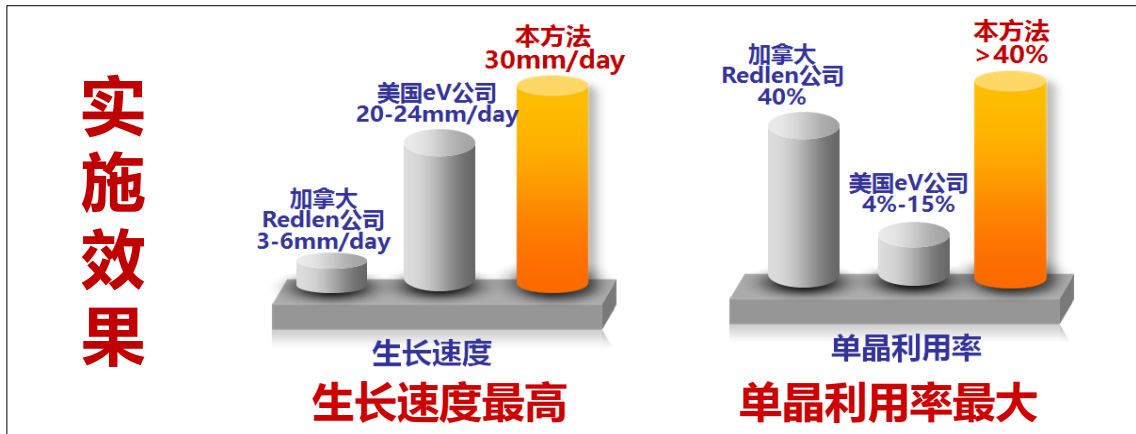
- 发展了籽晶非化学计量比的生长方法，突破了直径100 mm 碲锌镉晶体的制备技术



晶体生长多场计算结果



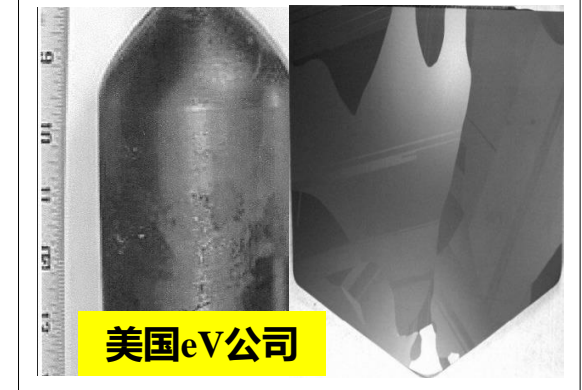
直径100 mm碲锌镉晶体



实施效果

生长速度最高

单晶利用率最大

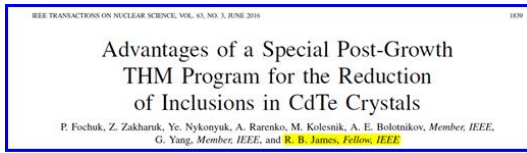


美国eV公司

R. Yang, Crys. Res. Tech. 2014, 49, 353.(封面论文) Y. Xu, Opt. Mater. Express, 2016, 6, 3309.
专利: ZL201510468818.0, ZL201610556029.7

学术意义和实施效果

同行评价



was increased significantly, and the concentration of isolated centers was reduced. One major advantage of this treatment, compared to thermal annealing alone, is that both the inclusions and impurities are eliminated simultaneously.

Index Terms—Annealing, CdTe, crystals, inclusions, purification, traveling heater method.

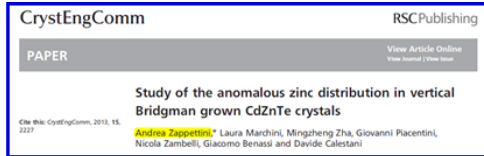
I. INTRODUCTION

CdTe crystals and its solid solutions are widely used

- [11] Y. He, W. Jie, Y. Xu, T. Wang, J. Zha, P. Yu, X. Zheng, Y. Zhou, and H. Liu. "Matrix-composition dependent morphology evolution of Te inclusions in CdZnTe single crystals," *J. Mater. Sci. Mater. Lett.*, vol. 67, pp. 5–8, 2014.
- [12] A. Zappettini, G. Benassi, D. Calestani, and M. Pavese,

.....Te migration in CdZnTe under temperature gradient field.....

IEEE-RTSD主席
Ralph James教授



conditions, any perturbation in this region (for example scratches of micro-protuberance in the ampoule walls) can drive to nucleation.

However, in most cases, zinc distribution profiles are characterized by a single maximum as shown in Fig. 2b and 3b, and also as reported by the majority of authors.

- 19 K. Mochizuki, K. ... and K. Miyazaki, *Mater. Lett.*, 1988, 6, 119.
- 20 M. ...

.....Zinc distribution profiles are reported by Xu et al.....

JCG期刊副主编
Andrea Zappettini教授

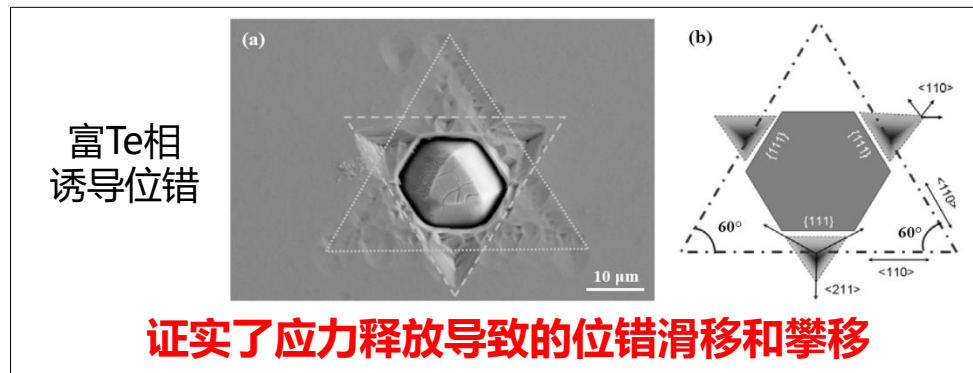
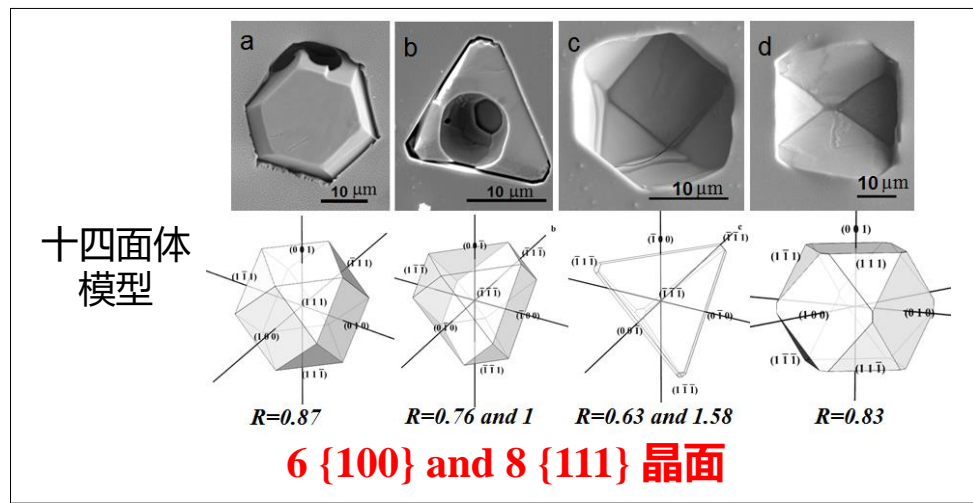
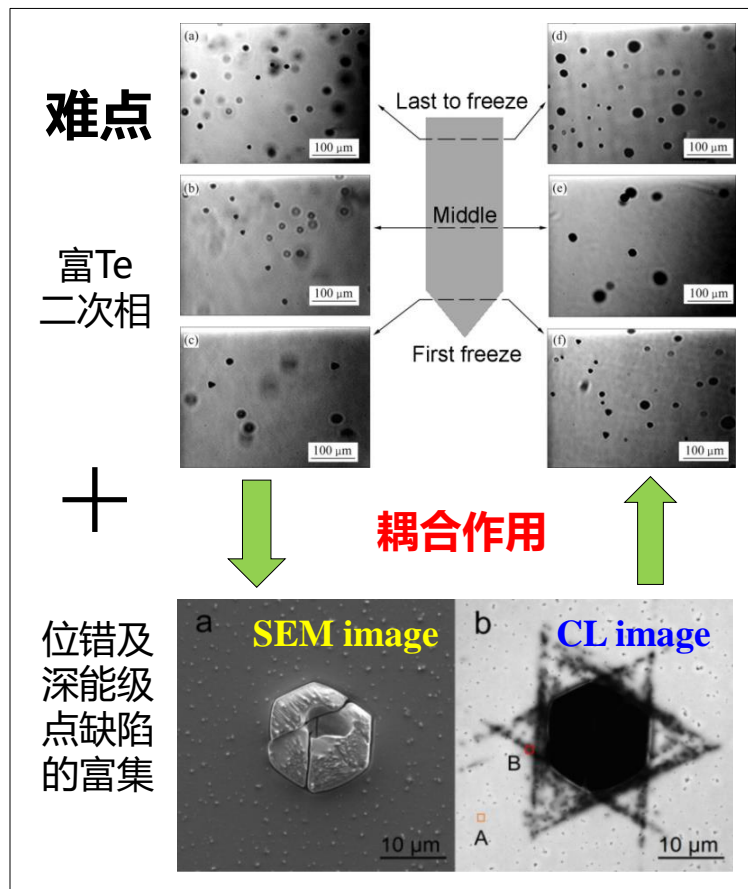


2013年国家技术发明
二等奖

.....阐明了关于CdZnTe晶体生长的重要细节以及成分偏析规律.....

2.3 学术贡献二：晶体缺陷表征与调控

- 建立了II-VI族碲化物晶体中富Te相的“十四面体”模型，诠释了富Te相与诱导位错的交互作用机制



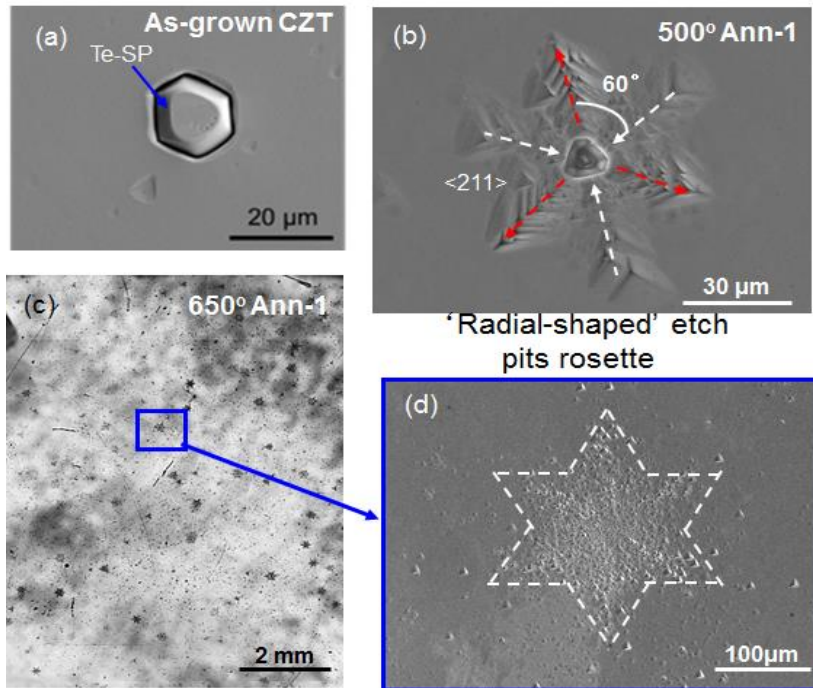
Y. Xu, et al, Phys. Status Solidi B, 2017, 254, 1600474 (封面论文) .

Y. Xu, et al, CrystEngComm, 2015, 17, 8639. Y. He, et al, Scripta Materialia, 2014, 82, 17.

学术贡献二：晶体缺陷表征与调控

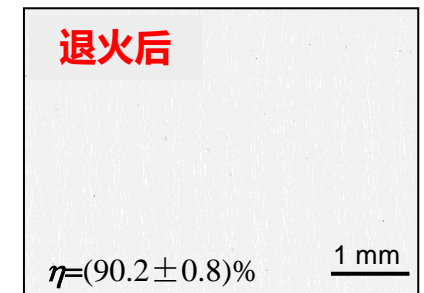
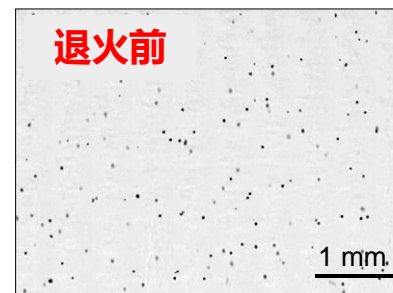
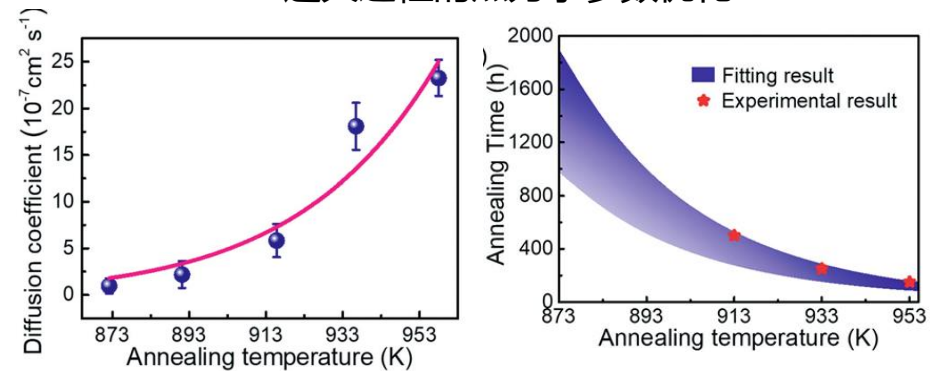
- 基于对富Te相热力学和动力学描述，发明了气氛可控退火方法，实现富Te相消除率在90%以上

对富Te相形貌演化的动力学描述



“富Te相解离”和“富Te相迁移”退火机制

退火过程的热力学参数优化



实现大于5 μm 的富Te相消除率 $\eta > 90\%$

Y. He, Scripta Materialia, 2014, 82, 17. Y. Xu, ACS photonics, 2018, 5, 556
专利: ZL201610817494.1, ZL201110067191.X

学术意义和实施效果

同行评价



III-V族InP晶体

...从动力学角度出发, 局部的冷却速率严重影响了析出相的表面形貌...



IV-VI族SnTe晶体

...参考 Xu 等研究结果, 发现退火后 SnTe 晶体 {111} 面的位错滑移同样呈螺旋状...

专利奖

- ◆ 2017年中国专利优秀奖 (ZL200710017996.7)
- ◆ 2018年陕西省专利奖一等奖 (ZL200710018784.0)

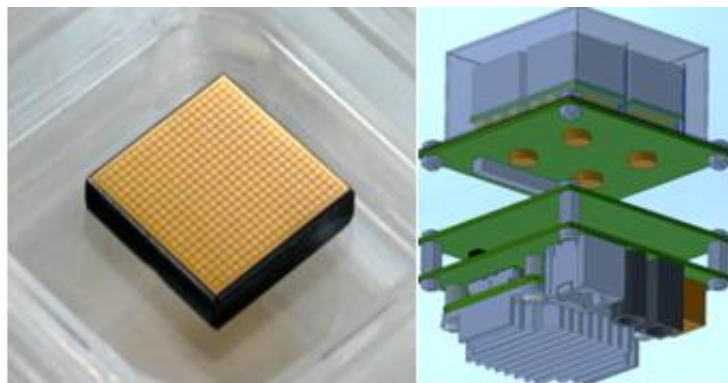


2.4 学术贡献三：器件设计和制备

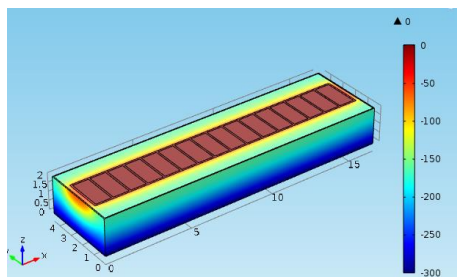
- 发现了制约碲锌镉探测器电荷收集效率的关键因素，并提出了优化器件结构和改善电极的方法

难点

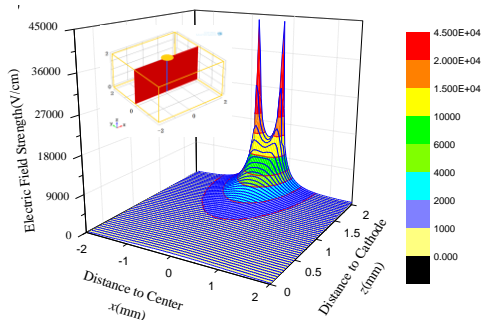
- 器件响应**均匀性差**
- 像素间**信号串扰**
- 空穴拖尾**



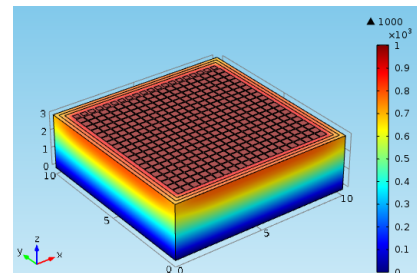
基于权重势场的电极结构设计



线阵探测器



半球形探测器



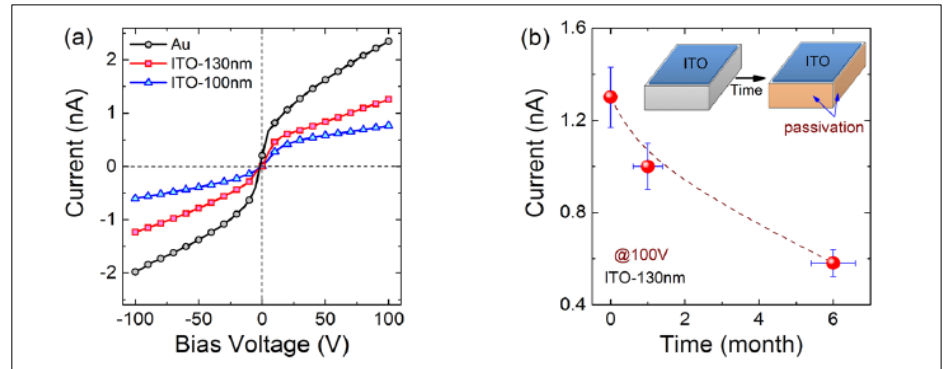
像素探测器

学术贡献三：器件设计和制备

- 发明了探测器倒装和模块封装技术，提高了器件的能量分辨率，解决了探测器可靠性和环境稳定性

难点

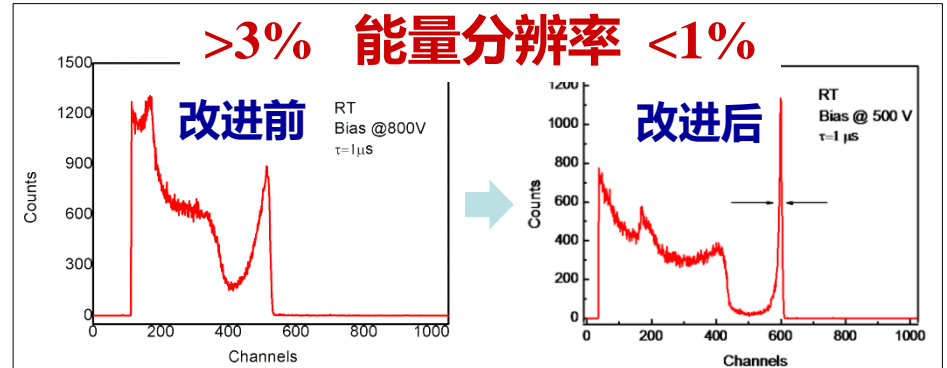
- ◆ 电极附着力差
- ◆ 器件漏电流大，界面态密度高



漏电流抑制



CZT像素探测器倒装

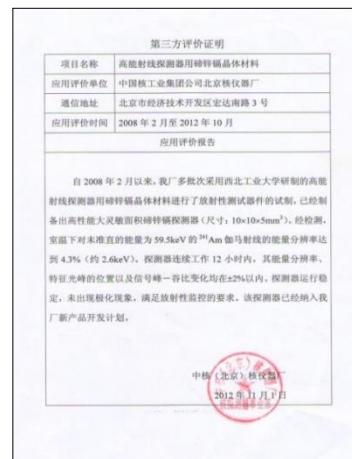


典型核素能谱 ^{137}Cs @662 keV

R. Guo, et al., Chinese Phys. B, 2018, 27, 127202 (亮点文章)
专利: ZL201310488594.0, ZL201310489066.7

学术意义和实施效果

国内外多家权威机构检测报告：开发出的碲锌镉晶体材料与器件性能总体处于国际先进水平



...Redlen device with a measured FWHM of **2.6%** while the NWPU device showed an improvement FWHM of **2.2%**.....

英国卢瑟福国家实验室

“拉脱维亚RITEC公司”等
测试报告

同方威视股份有限公司

发明奖

◆ 2019年**陕西省技术发明一等奖**

◆ 2017年**陕西省国防科技进步奖一等奖**



与国外技术的对比

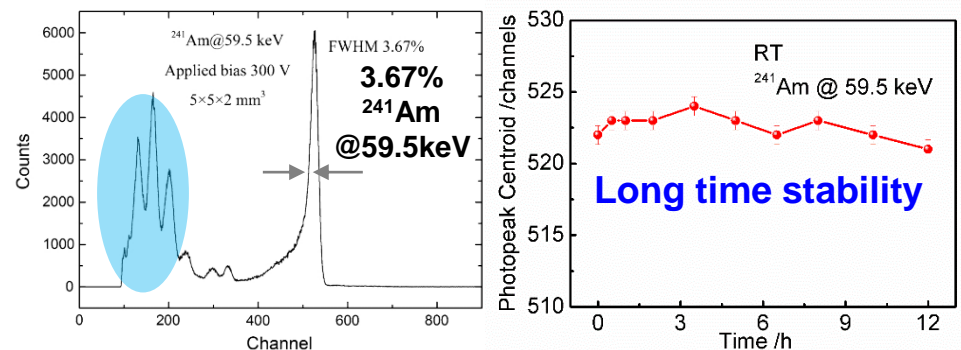
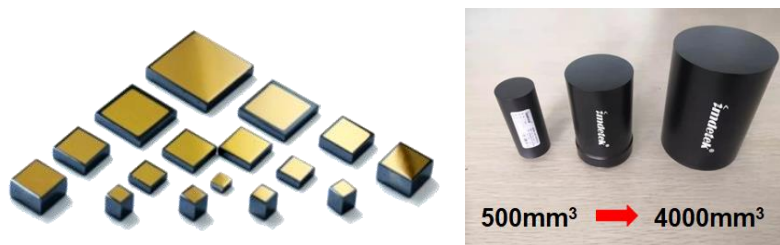
	本成果	美国 eV	加拿大 Redlen
晶体生长方法	常压熔体法	高压熔体法	移动加热器法
电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	$> 10^{10}$	$> 10^{10}$	$> 5 \times 10^9$
$\mu\tau$ 值 ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1}$)	$> 2 \times 10^{-3}$	$\sim 10^{-3}$	$1 \sim 3 \times 10^{-3}$
生长速度 (mm/day)	20	20	3~6
晶体利用率	$> 50\%$	4%~15%	50%
工艺特点	成本低, 可控性好	成本高	生长效率低

国外技术的数据来自其公司网页, 本项目数据来自陕西材料分析测试中心测试报告

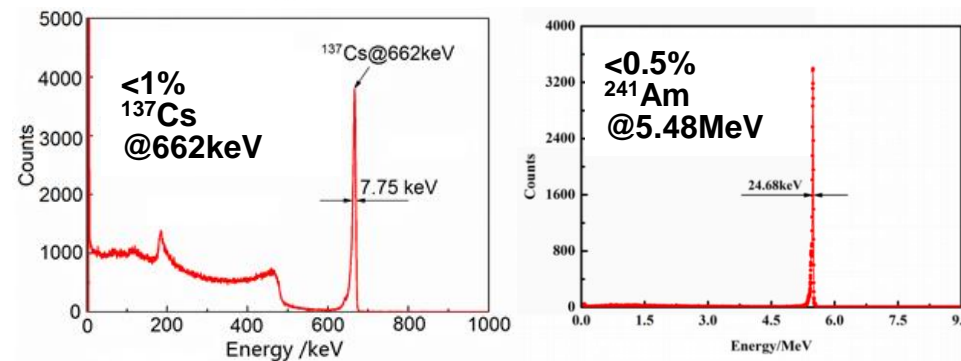
晶体性能国际先进, 生产效率高 3 倍, 成本降低 50%

典型探测器及其性能

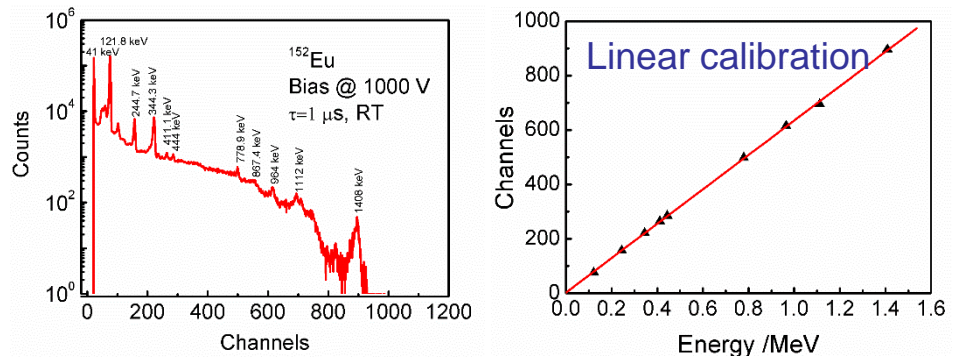
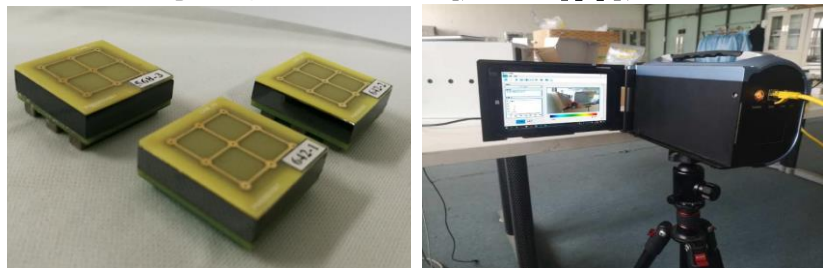
单元探测器与核素分析仪



线阵探测器与骨密度仪



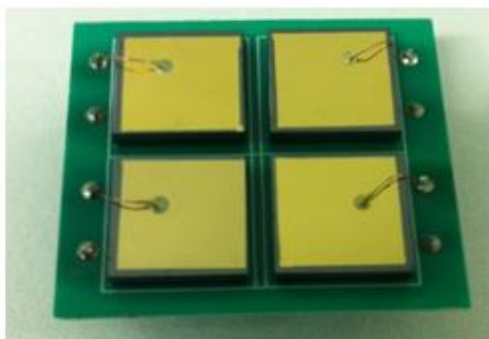
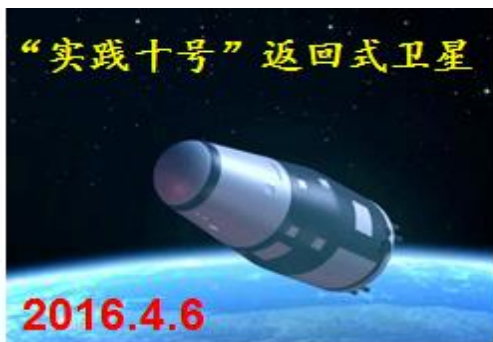
像素探测器与伽马相机



2.5 服务国家战略需求

□ 深空探测：实践十号卫星、XTP卫星样机

研制的CZT空间粒子探测器成功应用于“**实践十号**”返回式卫星，获得了生物细胞的空间辐射环境数据。



与以往在轨的Si探测器相比：其探测上限由8.13MeV提高到95MeV，提高了10倍以上

应用证明

项目名称	SJ-10号返回式卫星辐射基因盒辐射探测器
应用单位	中国科学院高能物理研究所
通信地址	北京市石景山区玉泉路19号乙
应用起止时间	2013年3月至2016年4月

经济效益（万元）

年度

新增产值

该探测器在实践十号卫星项目的成功应用也实现了我国国产CZT探测器的首次空间应用

样产品的研制任务，在整个初样及正样研制以及在...过程中，CZT探测器性能稳定并成功获得生物细胞的辐射环境数据。该探测器在实践10号卫星项目的成功应用也实现了我国国产CZT探测器的首次空间应用。

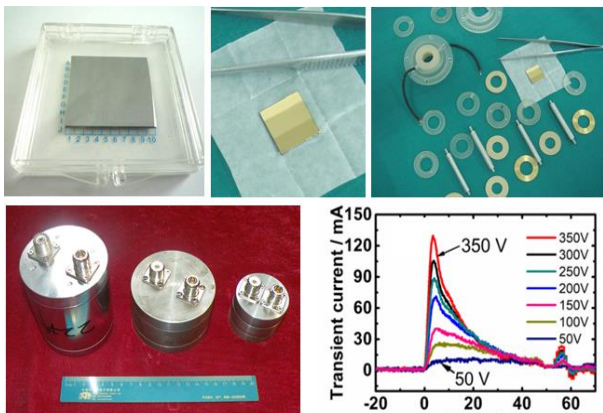
中国科学院高能物理研究所

2016年6月10日

2.5 服务国家战略需求

国防核技术：已为西北核技术所和中国工程物理研究院研制了36台/套探测器和装置

开发出大尺寸CZT电流型探测器，成功用于我国***核科学试验任务中“强脉冲伽马辐射场”的现场诊断。



摆脱国外技术封锁和进口限制

为***武器性能鉴定提供关键仪器

★ ***基础科研重点项目

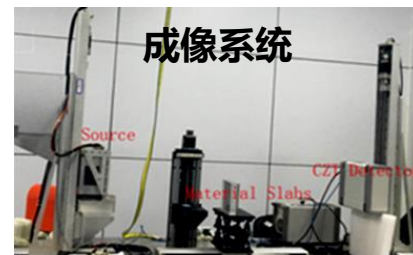
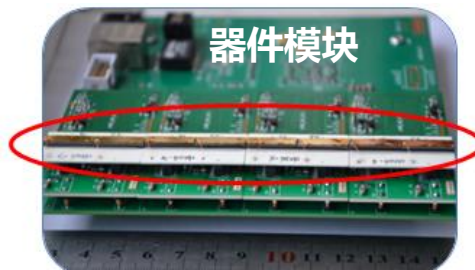
应用证明

项目名称	高能射线探测器用碲锌镉晶体材料
应用单位	西北核技术研究所
应用证明	<p>伽马射线灵敏度达到10^{-16} C·cm²/MeV，脉冲时间响应小于5 ns</p> <p>该晶体材料的电阻率达到10^{10}Ω·cm以上。光源和脉冲X射线测试表明，该材料对伽马射线探测的灵敏度达到10^{-16}C·cm²/MeV以上，脉冲响应时间小于5ns。近5年来的应用与测试表明，该晶体材料性能稳定，满足强脉冲射线探测方面的需求。基于该材料，研制成功了一款强脉冲辐射探测器。</p>
应用单位	西北核技术研究所
日期	2014年4月10日

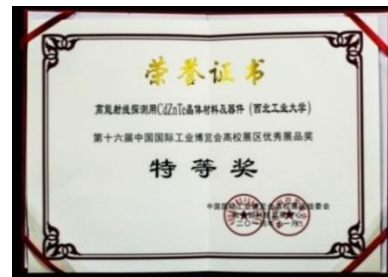
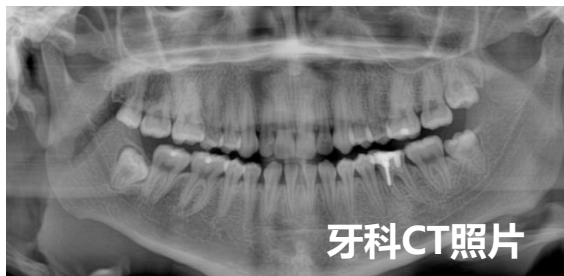
2.6 对接国家经济社会发展需求

□ 数字诊疗装备：合作研制骨密度仪，牙科CT等

开发出多能谱光子计数X射线探测器模块，能量分辨率达到**国际先进水平**



已应用上海联影医疗科技，合肥美亚光电股份有限公司等**10余家企业**



条形阵列碲锌镉探测器，2014年中国国际工业博览会**特等奖**

用户使用报告

更短的扫描时间 (1/10-1/20)
更低的射线剂量 (1/5-1/10)

核心专利： ZL 201310488594.0
ZL 201310489066.7

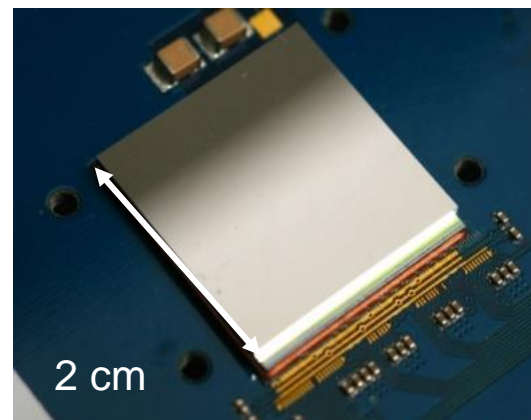
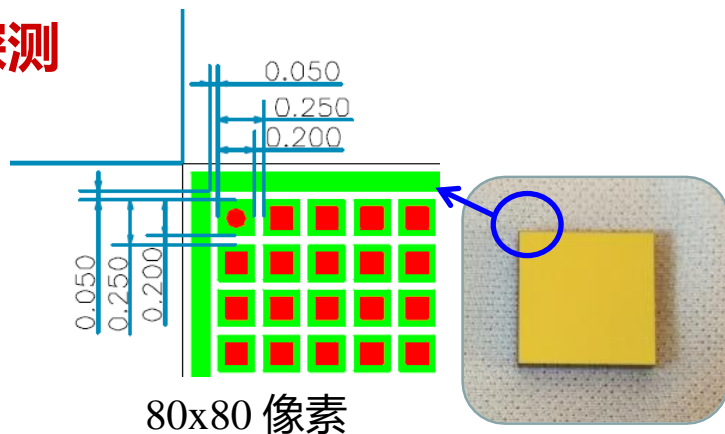
2.7 参与大科学装置预研

□ 欧洲X射线自由电子激光-LPD研制

大面积CZT像素探测器的制备

NPU贡献

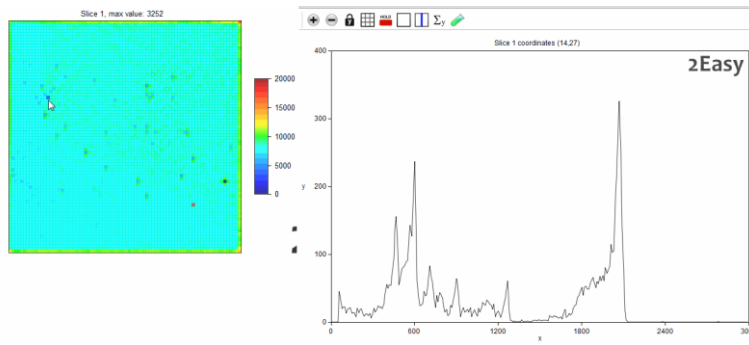
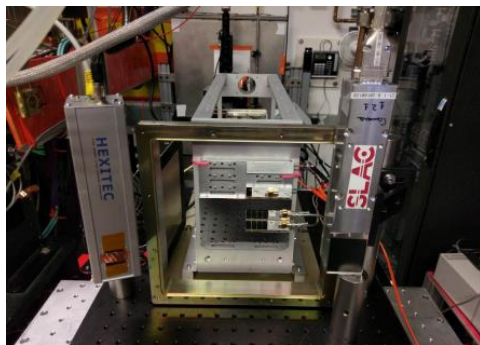
- ◆ 像素电极加工
- ◆ Flip-flip-chip倒装



关键性能指标： 能量分辨率 0.8 keV FWHM @ 59.5 keV; 2.7 keV FWHM @ 122 keV

斯坦福直线加速器 (SLAC)测试

Nucl. Instrum. & Meth. A, 2019, 927: 37



2.8 技术标准的制修订情况

□ 围绕辐射探测技术与应用，近5年，制定国家标准1项，国军标3项，地方标准1项

序号	标准名称	标准类型	状态
1	X射线和γ射线探测器用碲锌镉单晶材料规范	国标	已发布
2	CSL-HS-1A型碲锌镉伽马射线能谱传感器详细规范 (Q/NWPU 30001-2018)	国军标	已发布
3	CSL-HS-2A型碲锌镉大剂量辐射传感器详细规范 (Q/NWPU 30002-2018)	国军标	已发布
4	CSL-HS-3A型碲锌镉辐射成像器件详细规范 (Q/NWPU 30002-2018)	国军标	已发布
5	土壤重金属元素的测定能量色散X射线荧光光谱法 (DB61/T1162-2018)	陕西省地方标准	已发布

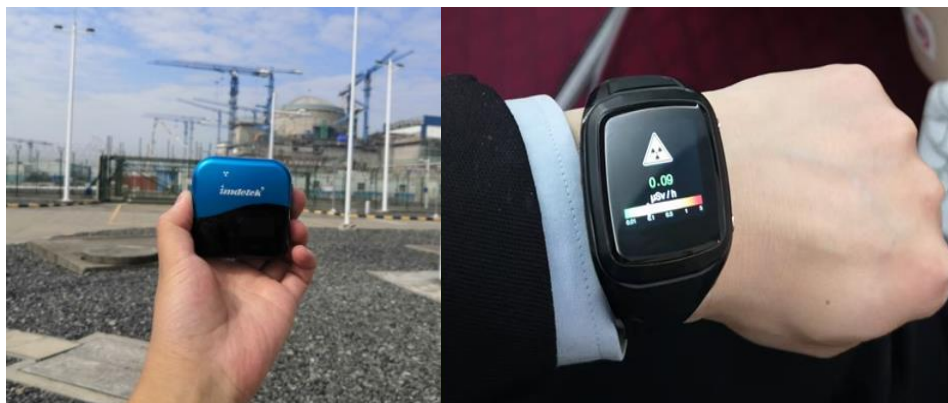
汇报提纲

- 一、辐射探测材料与器件工信部重点实验室
- 二、碲锌镉晶体与器件研究进展
- 三、基于碲锌镉晶体终端器件开发
- 四、辐射探测用金属卤化物钙钛矿

3.1 辐射剂量监测

应用一：个人辐射剂量计

国内首台基于CZT的个人辐射剂量仪



专业款

民用款



软件界面

特点:

1. 灵敏度高
2. 结构紧凑
3. 纯国产化

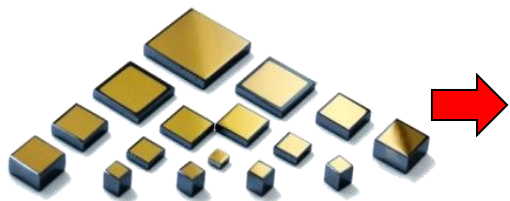
应用场景:

1. 军工
2. 医疗
3. 核电
4. 民用

探测器	灵敏度	能量下限(keV)	是否需光电倍增管	体积
Si	极低	15	不需	很小
GM管	低	50	不需	较大
CZT	高	15	不需	很小
CsI	中等	30	需要	较大

3.1.1 辐射剂量监测

应用二：低能量宽量程剂量监测模块

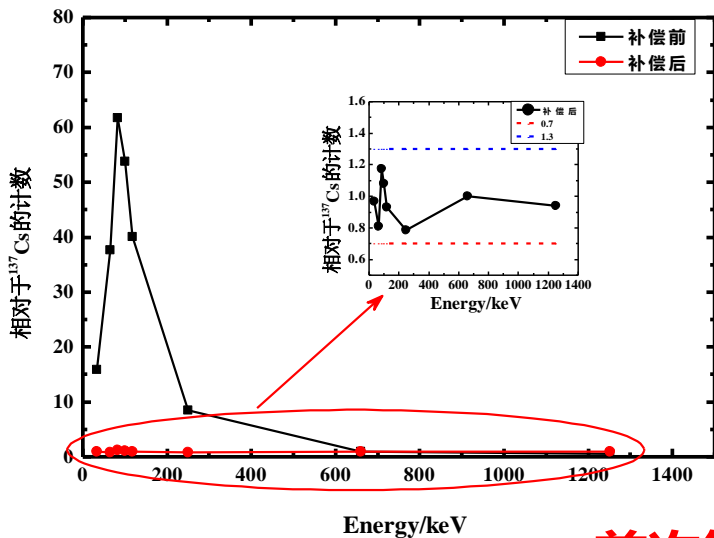


特点:

1. 能量下限**10keV**，低于GM管
2. 剂量范围：**0.1uGy/h~10Gy/h**

CZT探测器

中核404 R项目



江苏计量			
Page of			
测试结果			
Test Results	参考值(μGy/h)	测量结果(μGy/h)	相对误差(%)
N15/12	51.8	49.64	-4.2
N20/16	54.3	47.82	-11.9
N25/20	47.6	49.55	4.1
N30/24	51.1	52.89	3.5
N40/33	49.5	52.56	6.2
N60/48	51.5	58.90	14.4
N80/65	58.7	62.88	7.1
N100/83	55.1	62.67	13.7
N120/100	61.3	59.19	-3.5

以下空白

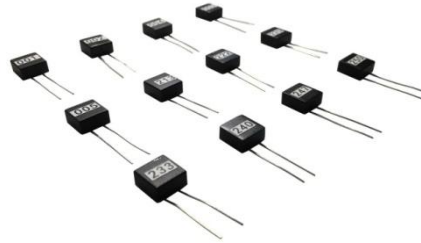
首次解决了CZT的能量响应问题

3.1.2 能谱分析与核素识别

■ CZT核素识别探头

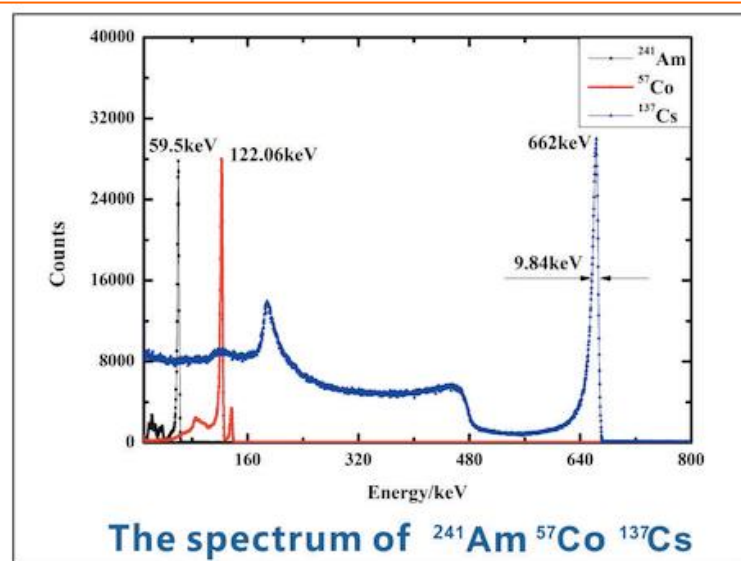
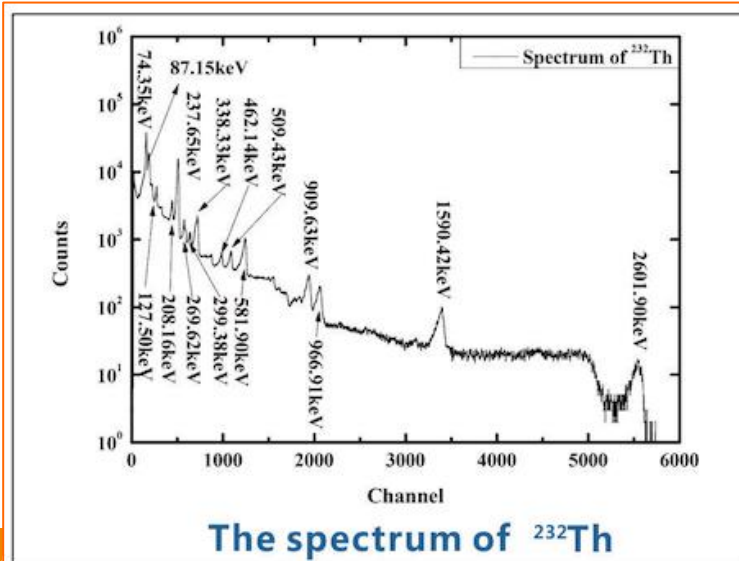
尺寸: $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$

$15 \times 15 \times 7.5 \text{ mm}^3$



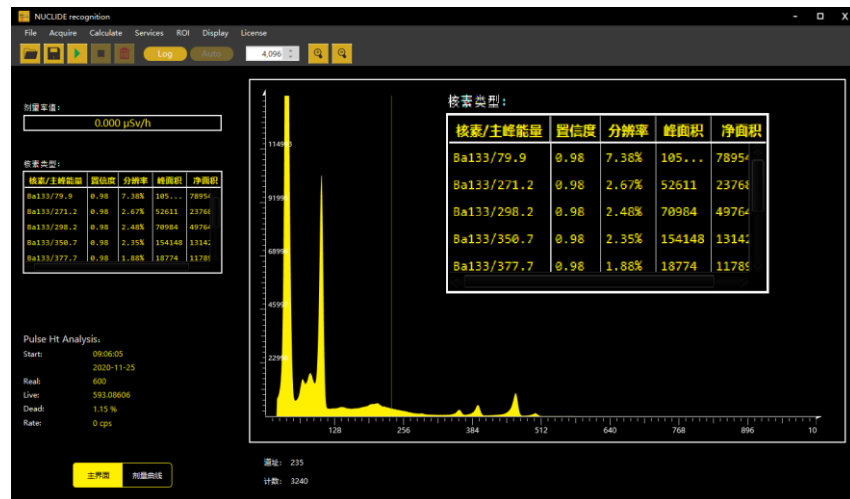
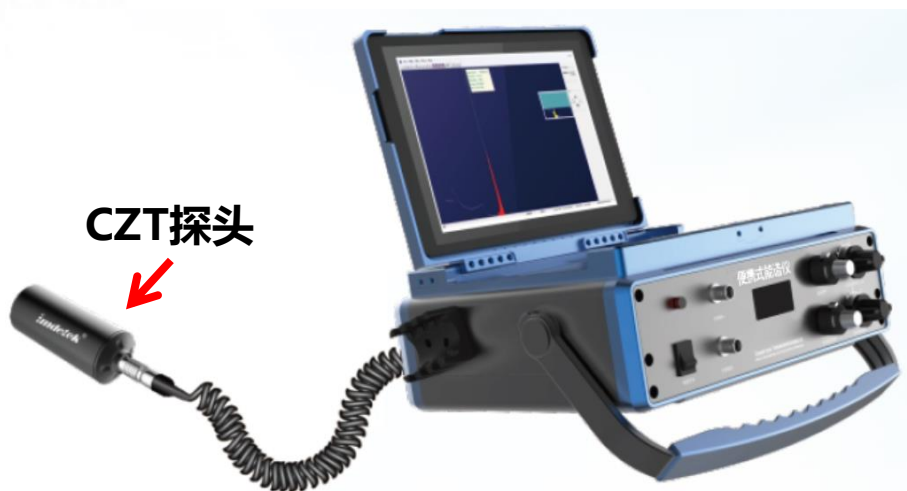
1. 能量范围: **10KeV~3MeV**

2. 能量分辨率: **4%~5% @59.5 keV , 1%~1.8%@662 keV**



能量分辨率
高于
NaI和LaBr

典型案例：便携式核素识别仪CZT-PES



- 小体积探头适合狭小空间的核素识别
- 大体积探头 (>2000 mm³) 适合探测 ⁶⁰Co等高能核素

多种核素

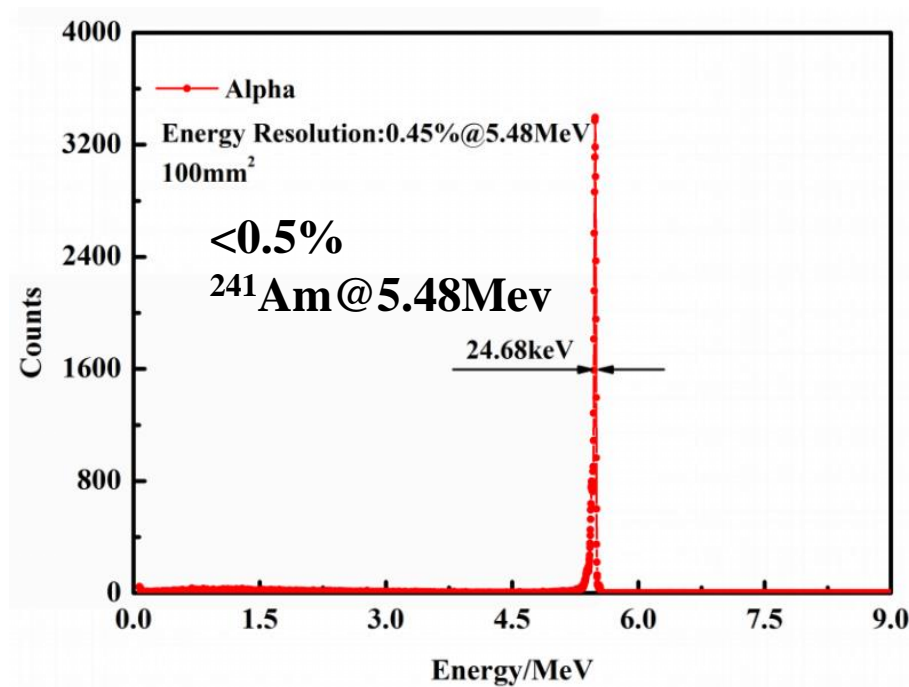
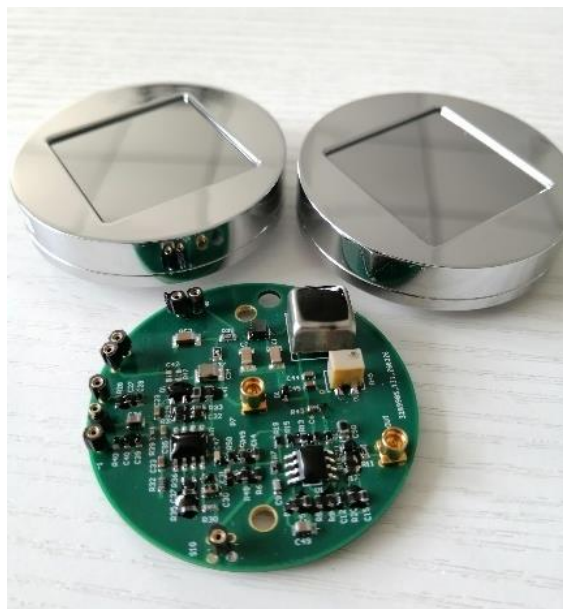


探测器	灵敏度	适合的剂量场
CZT	受限尺寸	10uGy-100mGy/h
Nal	较高	0.1uGy-几十uGy/h
LaBr	较高	
高纯Ge	较高	

3.2 气溶胶监测

国内首款CZT α 粒子探测器

主要应用：气溶胶、 α 谱仪、氡测量

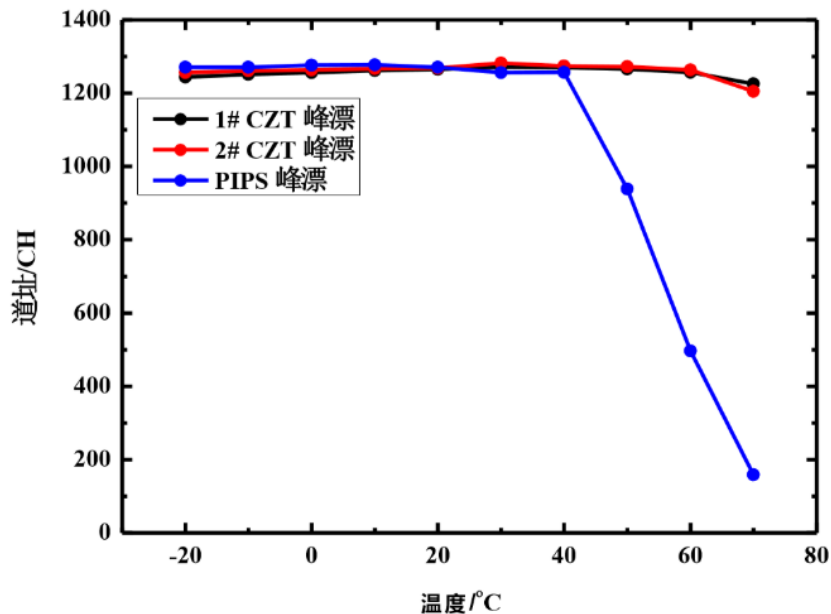


CZT与pips的能量分辨率相当

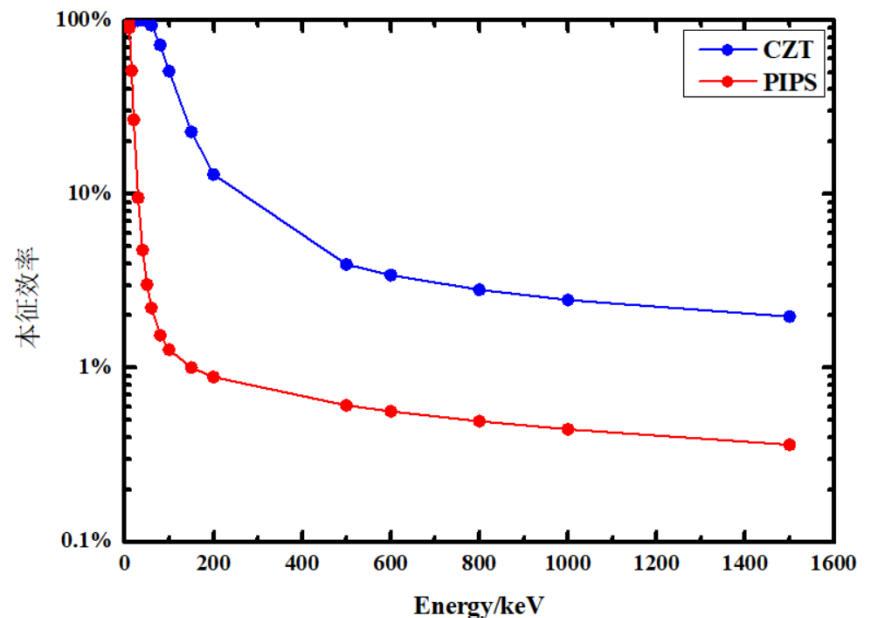
3.2.1 气溶胶监测

■ CZT α 监测

探测器	温度范围 ($^{\circ}\text{C}$)	能量分辨率 <1%@5.48MeV	是否可 耐擦拭	价格	伽马补偿
Pips	-20-40	满足	是	较贵	伽马效率低
CZT	-20-70	满足	是	适中	伽马效率高



CZT与pips的温漂比较

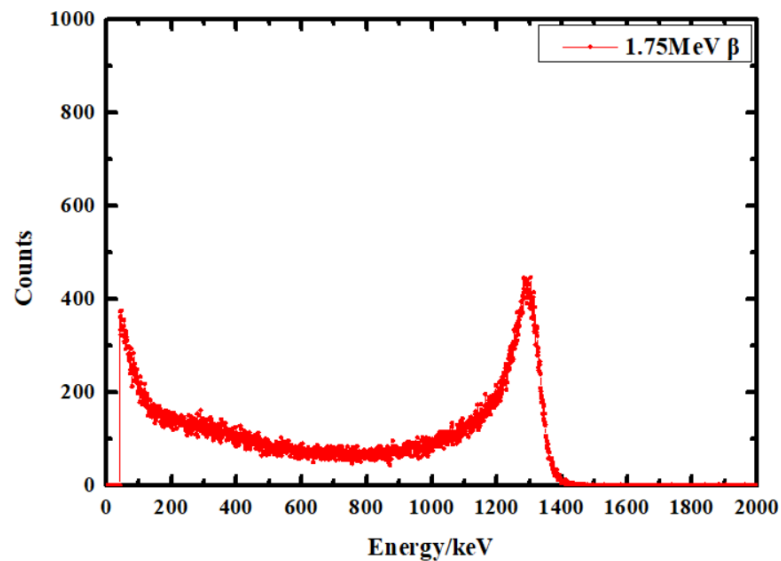
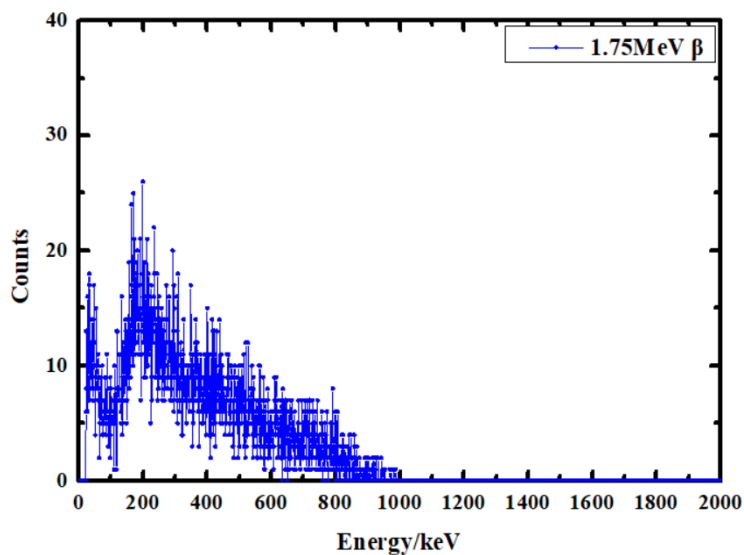


CZT与pips的探测效率比较

3.2.2 气溶胶监测

■ CZT β 监测

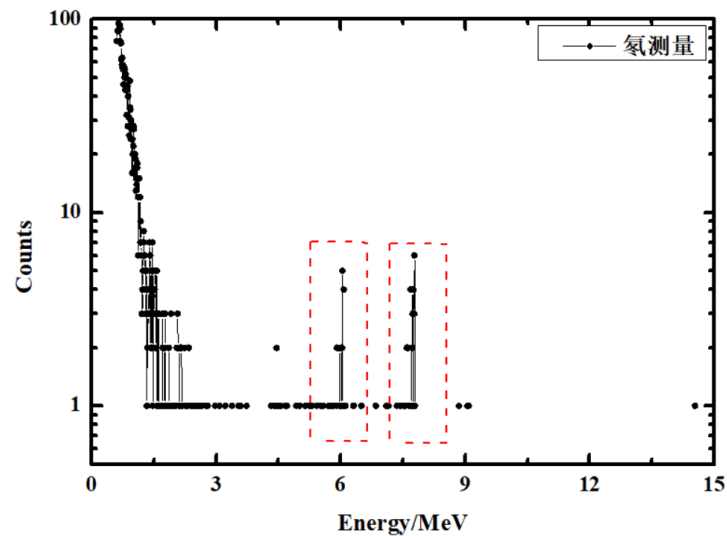
探测器	温度范围 (°C)	能量分辨率	探测效率	价格	伽马效率
Pips	-20-40	满足	偏低	较贵	低
CZT	-20-70	满足	高	适中	高



CZT对近单能 β 的探测谱

3.2.3 氡监测

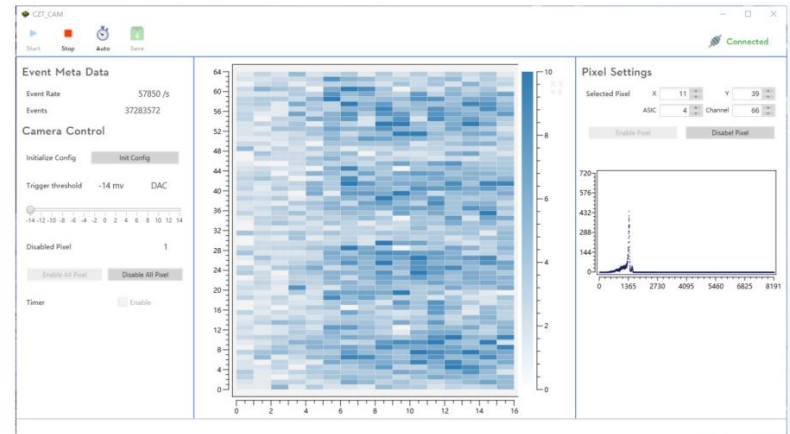
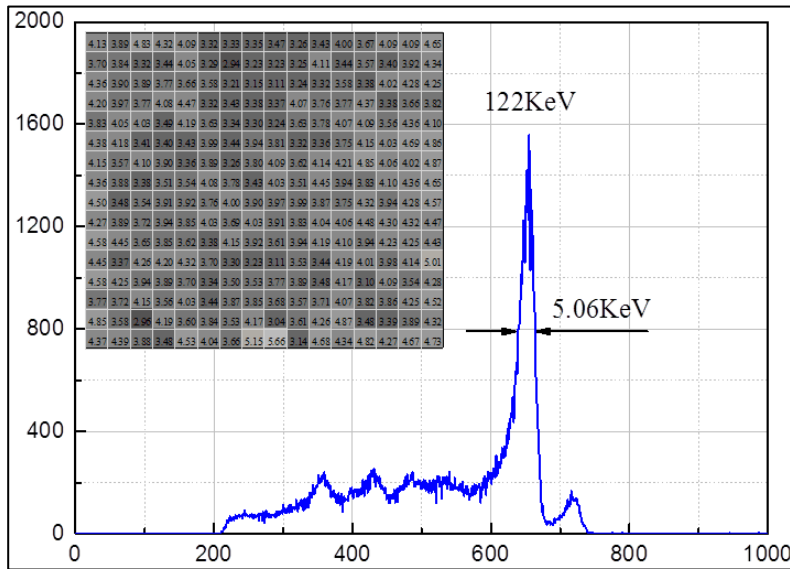
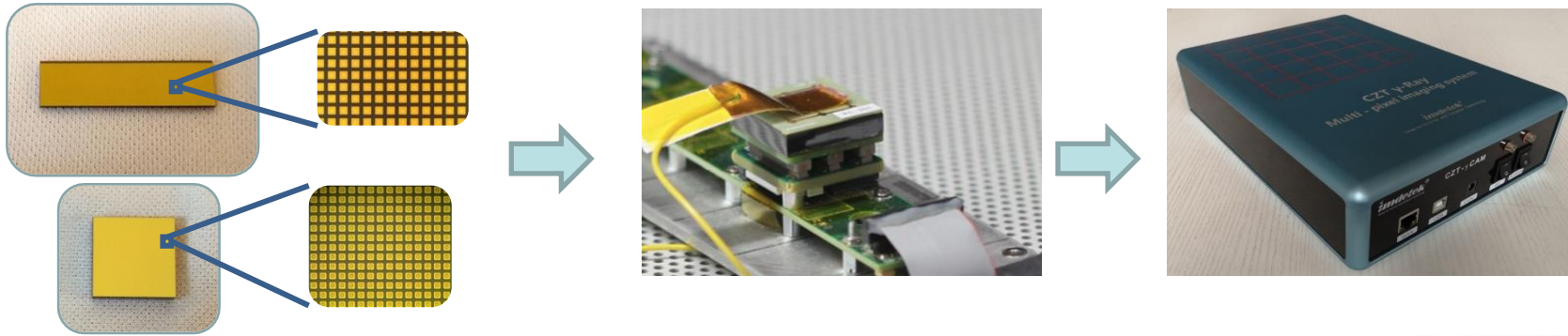
■ CZT测氡模块



室内天然氡测量

3.3 X/γ-射线成像

■ CZT大尺寸像素探测器



能量范围: 20keV~3 MeV

像素尺寸: $\geq 70\mu\text{m}$

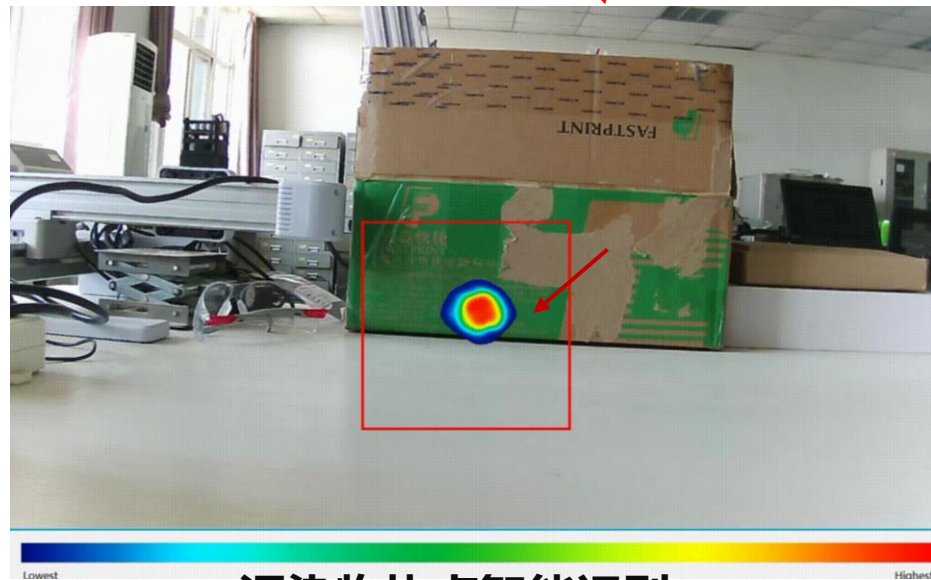
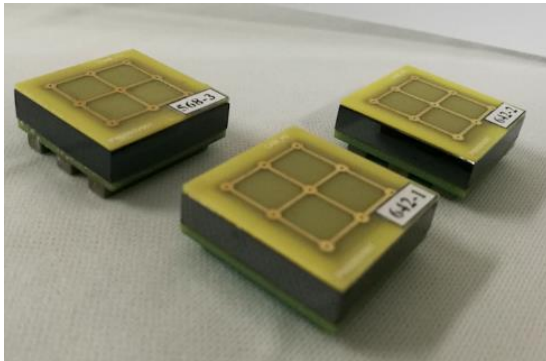
漏电流: $< 30\text{nA}/\text{cm}^2$

计数率 $\sim 10^7$ cps/mm²

可在探测器的每个像素上实时显示放射源的能谱

3.3.1 伽马成像

■ 基于CZT的伽马相机



能量范围: 20KeV~3MeV

能量分辨率: <1.2% (662 keV)

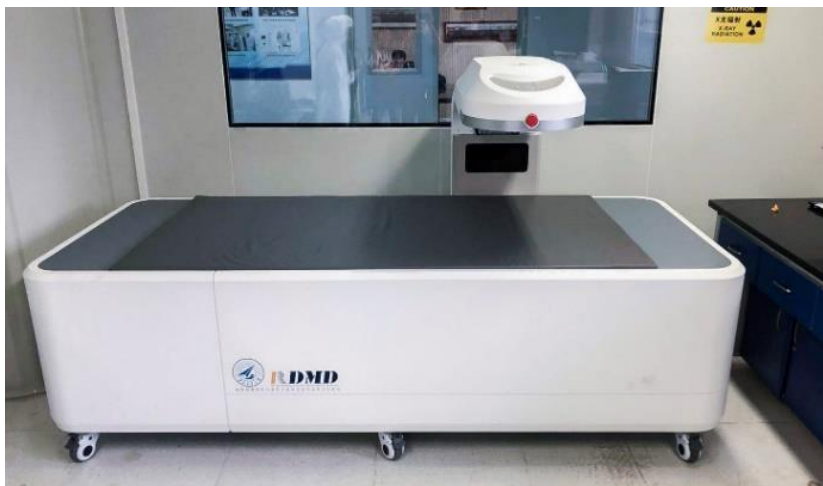
探测器尺寸: 22*22*15 mm³

像素尺寸: 1.1mm

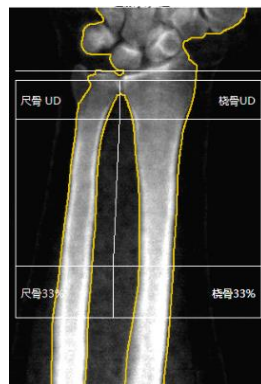
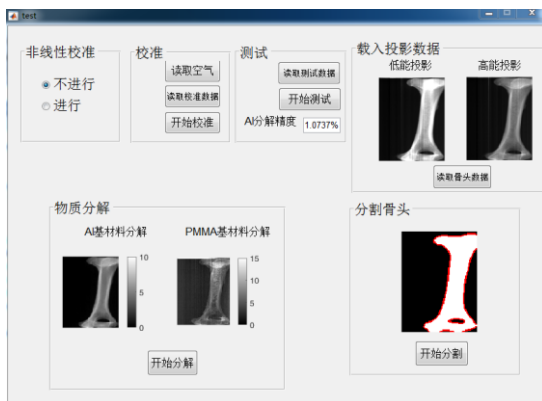
污染物热点智能识别

3.3.2 X射线成像应用开发

X射线多能骨密度仪



	GE Lunar	鑫高益	迪泰克
扫描速度	快	慢	快 (全身5min)
扫描部位	全身	局部	全身
辐射剂量	低	中	低
准确度	1%	中	1%
技术来源	自主研发	韩国 OsteoSys	自主研发



	医院报告 BMD	计算 BMD
桡骨	0.71g/cm ²	0.68g/cm ²
尺骨	0.71g/cm ²	0.71g/cm ²

手掌全数字多能谱
骨密度成像

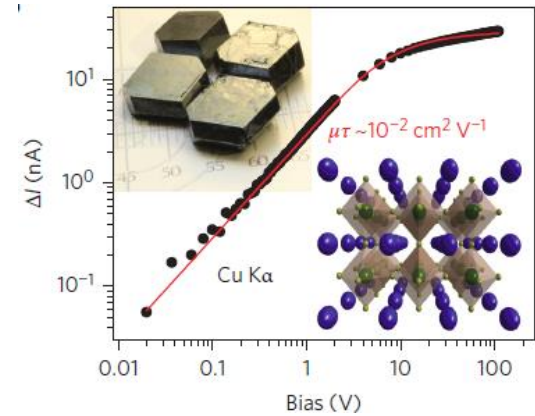
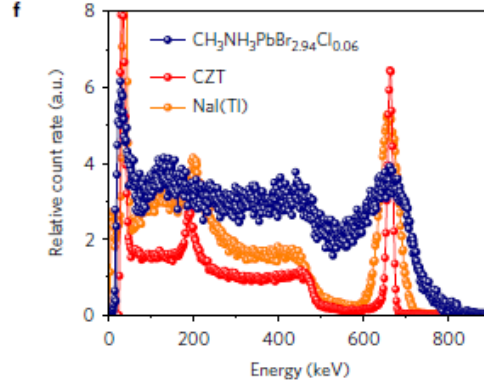
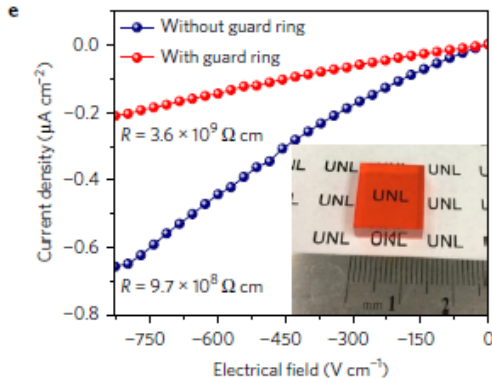
软件界面

汇报提纲

- 一、辐射探测材料与器件工信部重点实验室**
- 二、碲锌镉晶体与器件研究进展**
- 三、基于碲锌镉晶体终端器件开发**
- 四、辐射探测用金属卤化物钙钛矿**

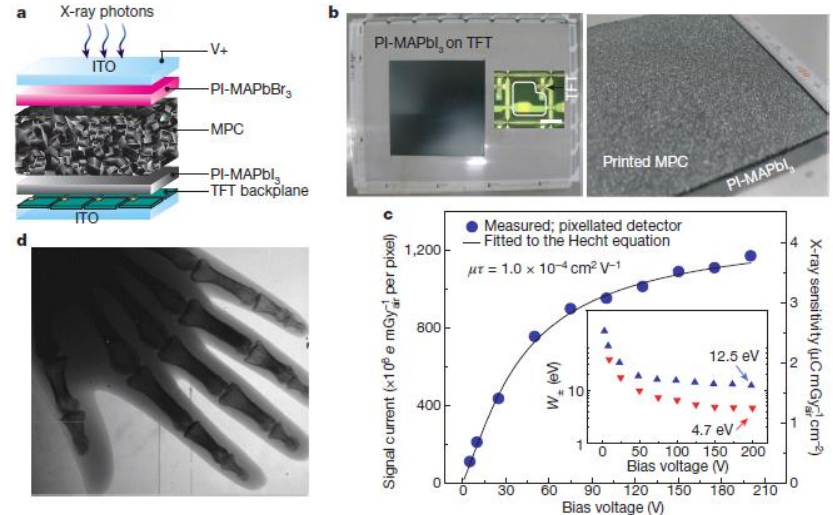
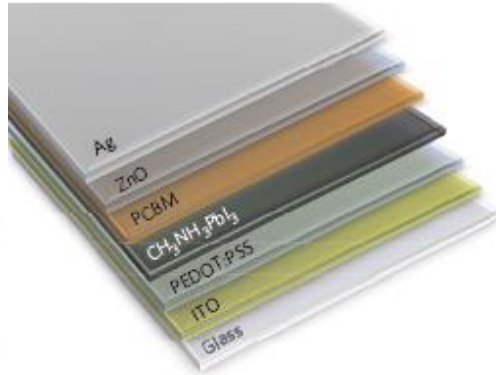
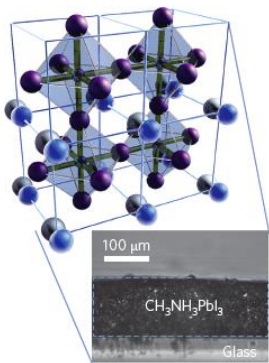
4.1 金属卤化物钙钛矿X/γ射线探测材料

➤ X-/γ-ray detector——可调的成分和带隙，以及较低的成本



➤ X-ray imaging

1. Wei et.al. *Nature Materials*, 2017, 16, 826-833.
2. Shrestha et.al. *Nature Photonics*, 2017, 11, 436-441



3. S. Yakunin et.al. *Nature Photonics*, 2015, 9, 444-449

4. Y. C. Kim et al. *Nature*, 2017, 550, 87-91

近年来相关的研究工作

◆ 钙钛矿体单晶生长

- 溶液法生长钙钛矿单晶
- 熔体法生长CsPbBr₃单晶及Bi基钙钛矿晶体

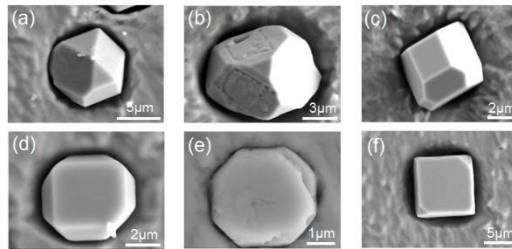


Cryst. Growth Des. 2017, 17, 6426-6431.

J. Mater. Chem. A, 2018, 6, 23388

◆ 缺陷表征与半导体探测器制备

- 二次相缺陷
- 结型与复杂电极探测

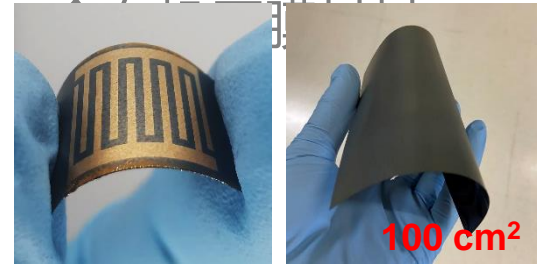


J. Phys. Chem. Lett. 2020, 11, 5625-5631.

ACS Appl. Mater. Interfaces, 2019, 11, 7522-7528

◆ X射线平板探测器

- Cs₂TeI₆厚膜材料及器件

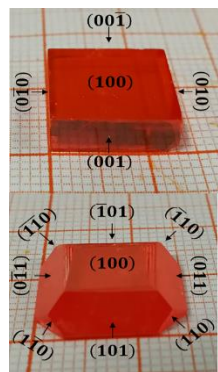


ACS Photonics 2019, 6, 196-203

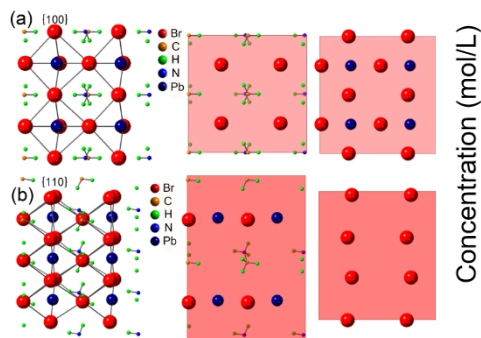
ACS Appl. Mater. Interfaces, 2021, 13, 23928-23935

4.2 溶液法生长有机无机杂化钙钛矿体单晶

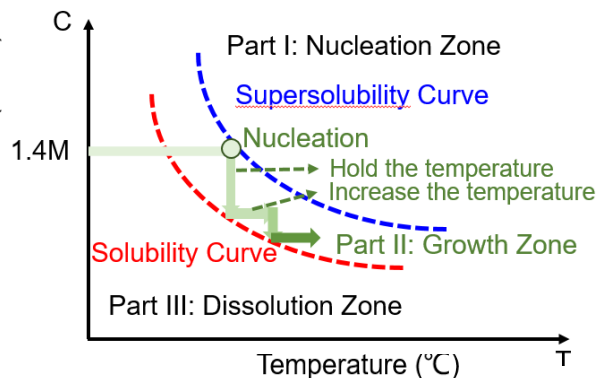
- ◆ 揭示了晶体生长各项异性与溶质传输过程的关系，获得厘米尺度不同形态的MAPbBr₃



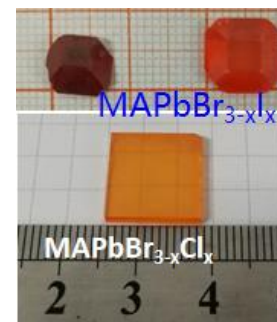
• 溶质的传输过程



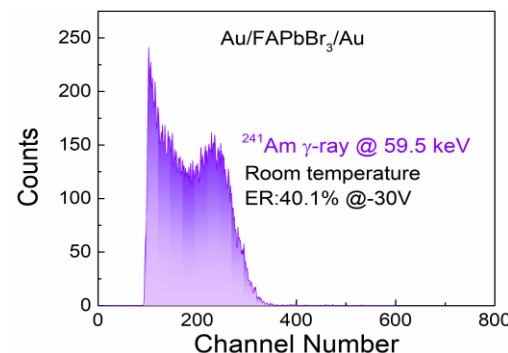
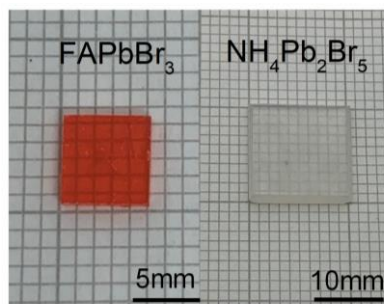
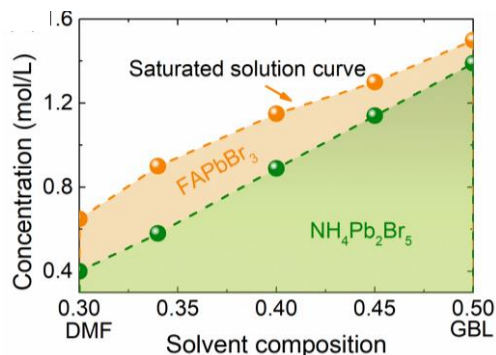
• 晶体生长速率调控



• 晶体掺杂

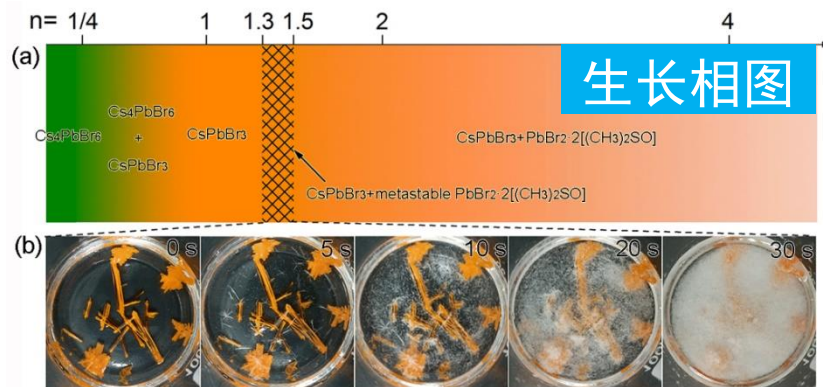
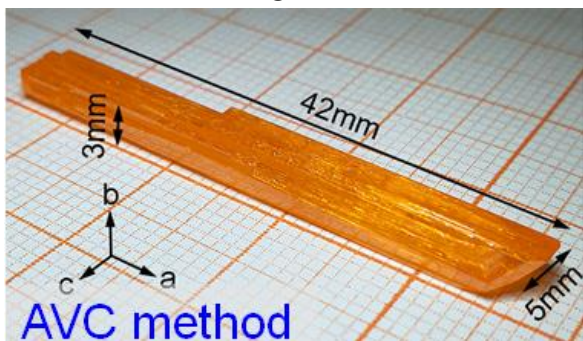


- ◆ 发现并解决了FAPbBr₃的第二相问题，生长出电阻率达10⁹ Ω·cm的FPB晶体，室温下实现对γ射线的识别

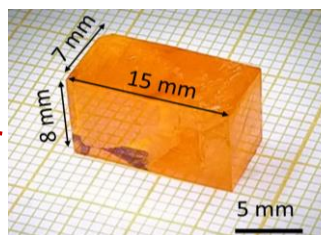
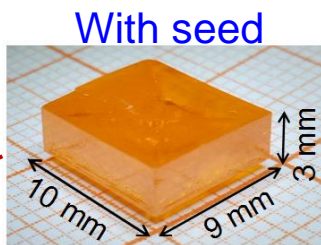
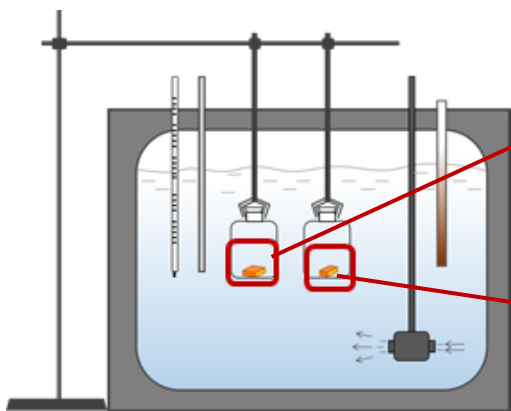


改进的溶液法生长全无机钙钛矿体单晶

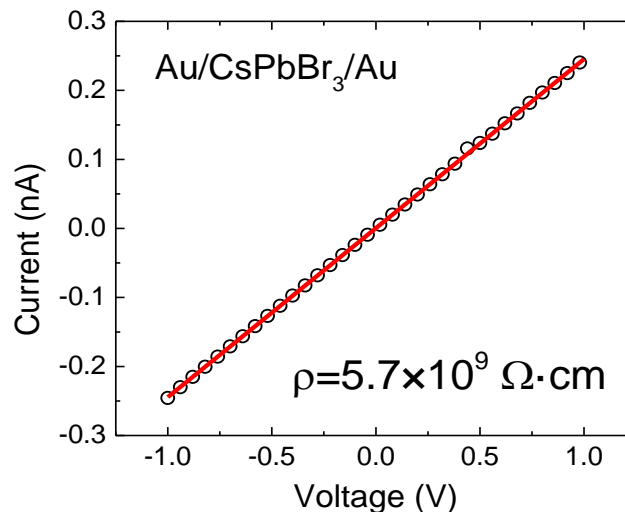
- 基于物相随初始原料的变化规律建立了溶液法生长相图，生长出厘米级CsPbBr₃单晶



- 发明了结晶提纯技术，通过调控逆温生长 (ITC) 法的结晶速率，获得高质量的单晶



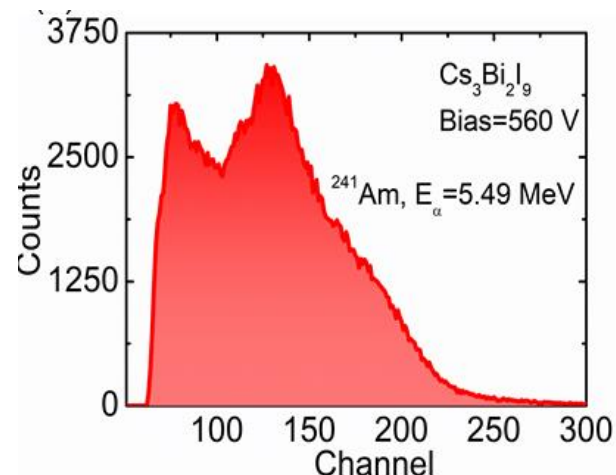
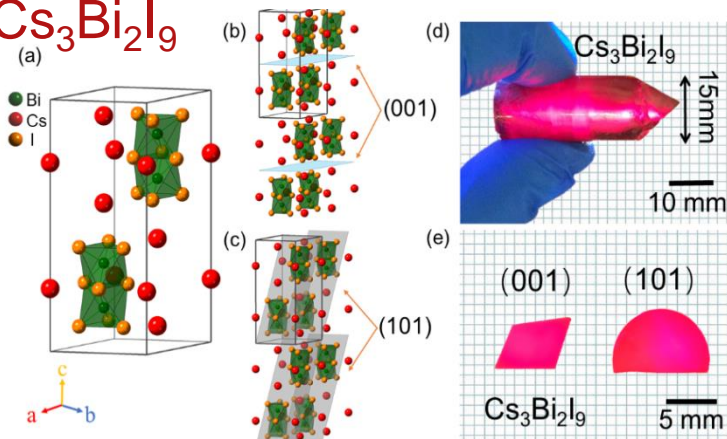
Without seed



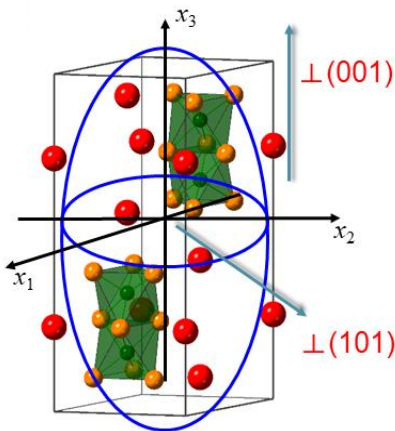
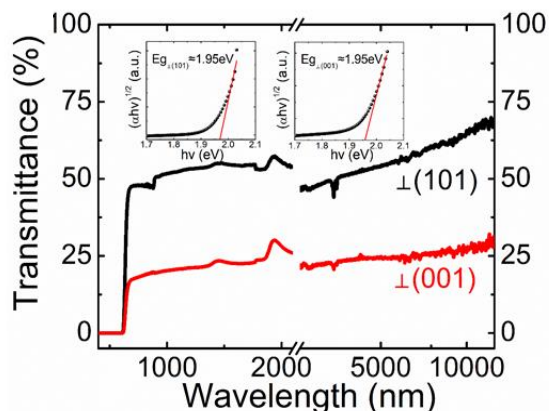
4.3 垂直布里奇曼法生长Bi基钙钛矿体单晶

➤ 获得了尺寸 $\Phi 15 \times 60 \text{ mm}^3$ 的 $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ 晶体，揭示了光电性能各项异性的机理，实现对 α 粒子的全能峰的识别

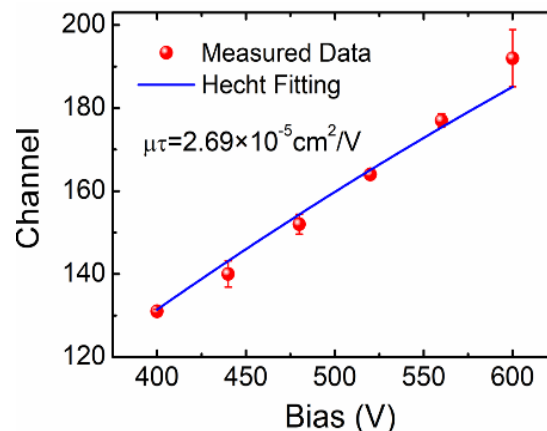
■ $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$



□ ‘0D’ 钙钛矿 & 六方 (‘2D’) 结构



➤ α 粒子的全能峰



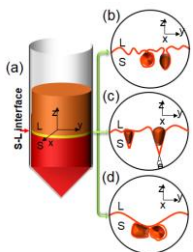
□ 与2D结构相关的光学、电学各项异性

➤ 弱的极化效应

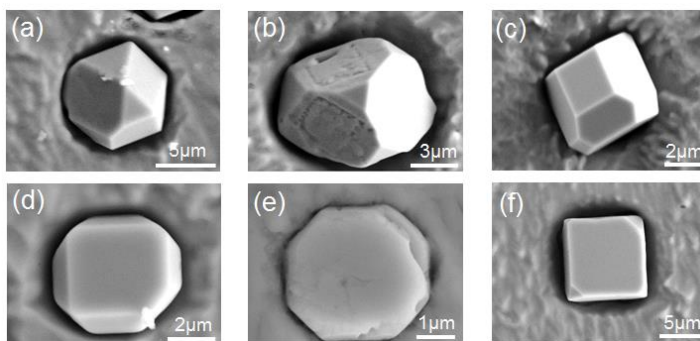
4.4 CsPbBr₃晶体中的二次相

- ◆ 阐明了垂直布里奇曼 (VB) 法和逆温结晶 (ITC) 法制备的CsPbBr₃晶体中二次相的组分特征、三维形貌、形成机制和形貌演变规律

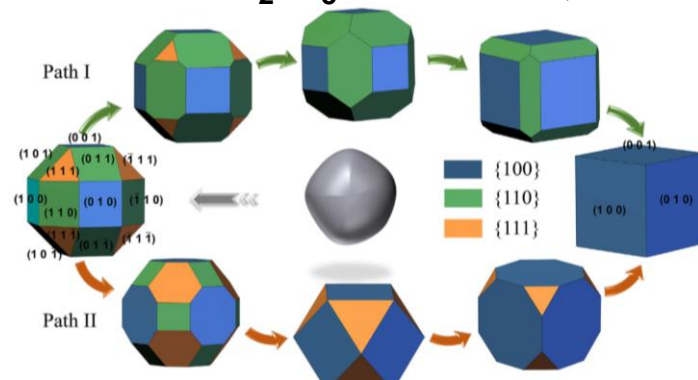
熔体法生长 Matrix-Controlled Inclusions



■ 规则多边形的CsPb₂Br₅-SP

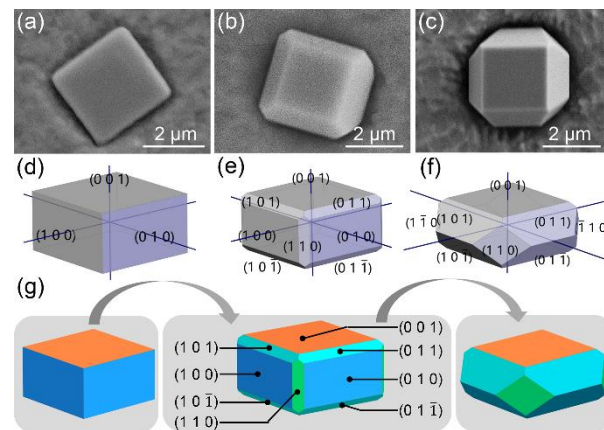
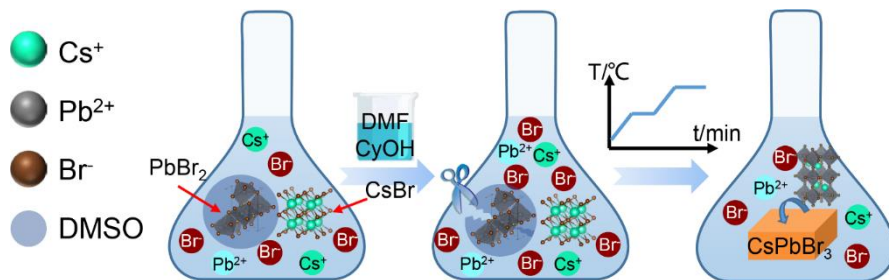


■ CsPb₂Br₅相形貌演变规律



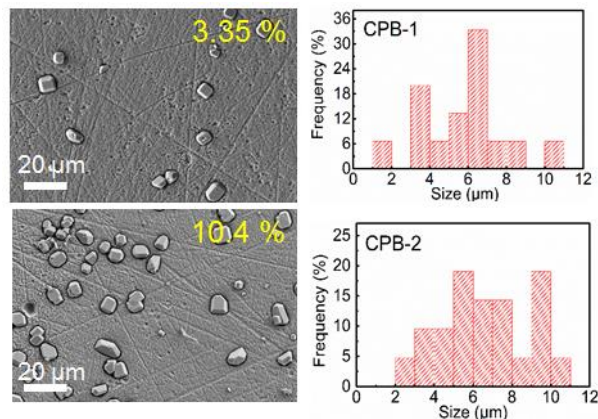
溶液法生长

Heterogeneous-Nucleation Precipitates

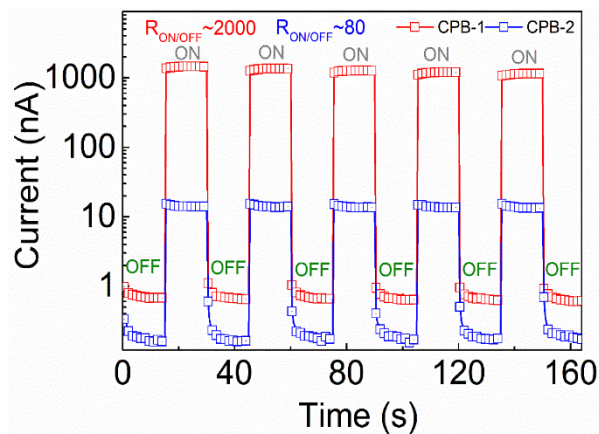


CsPb₂Br₅相对CsPbBr₃晶体光电性能影响

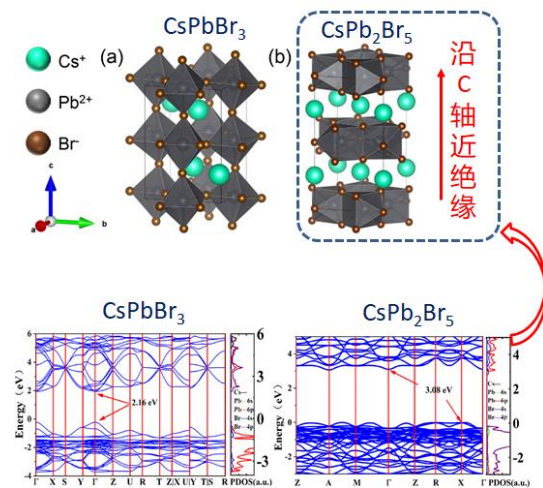
■ CsPb₂Br₅相尺寸和分布



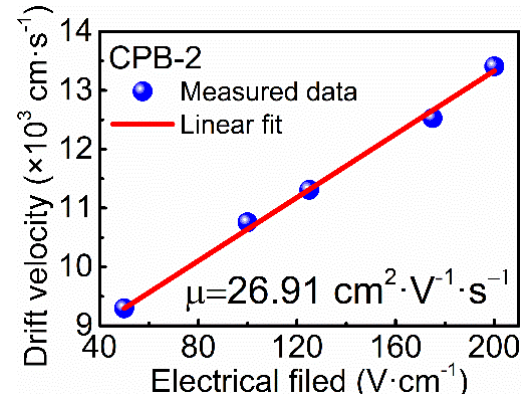
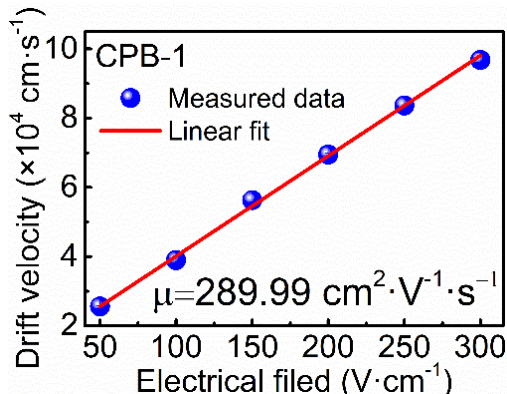
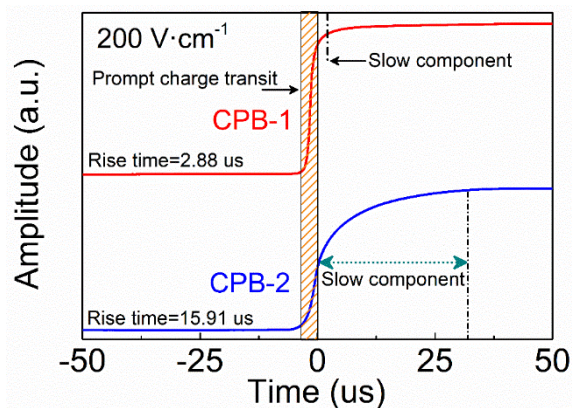
■ CsPbBr₃晶体光学响应



■ 晶体结构与能带差异



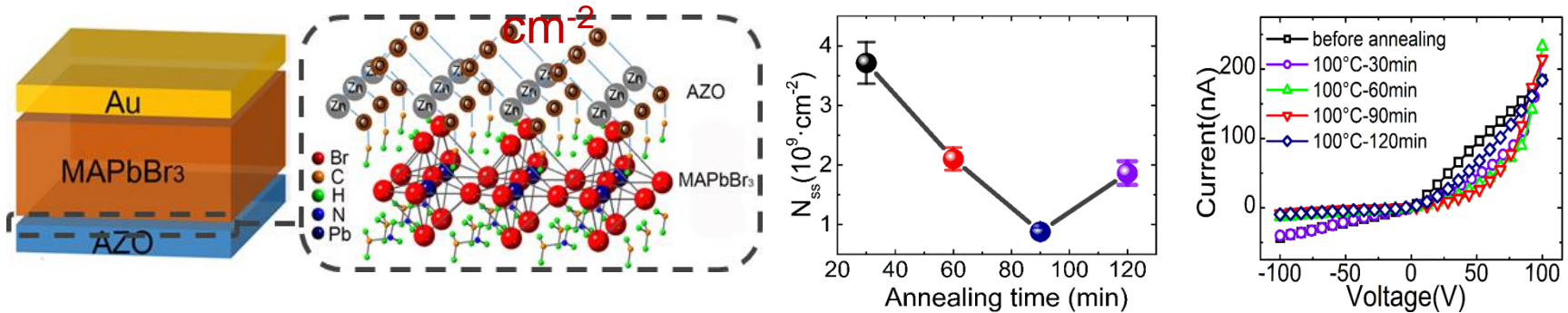
■ CsPbBr₃晶体载流子传输性能



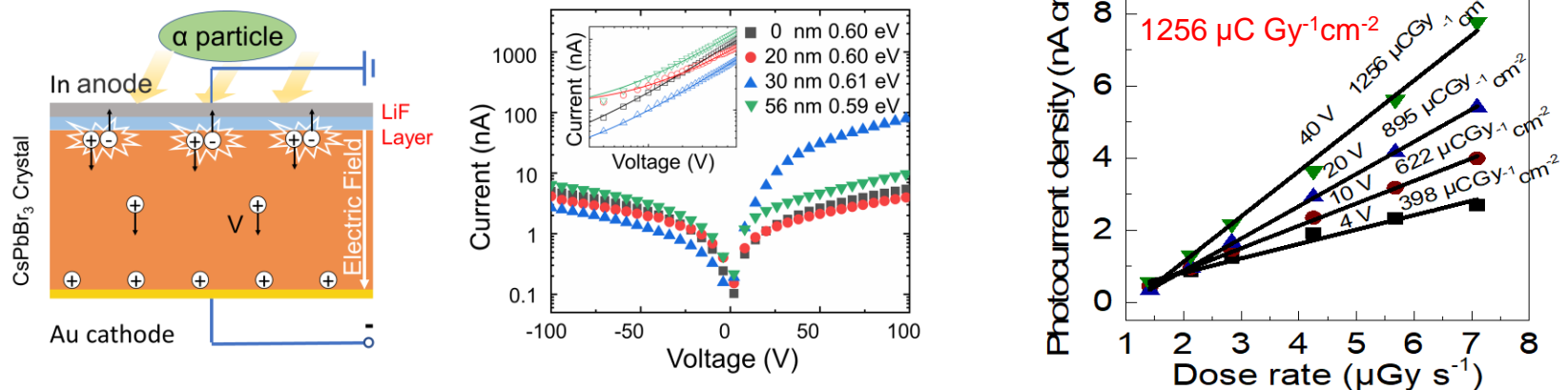
4.5 探测器制备与表征

- ◆ 制备出AZO/MAPbBr₃/Au 结型探测器，通过退火调控势垒和界面态密度

- 势垒: 0.757 eV => 0.849 eV
- 界面态密度: $3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ => 8.7×10^8

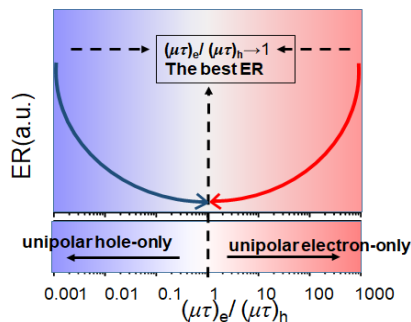


- ◆ 优化CsPbBr₃探测器电极结构，一定程度抑制离子迁移，实现器件工作在较大的偏压和高的灵敏度

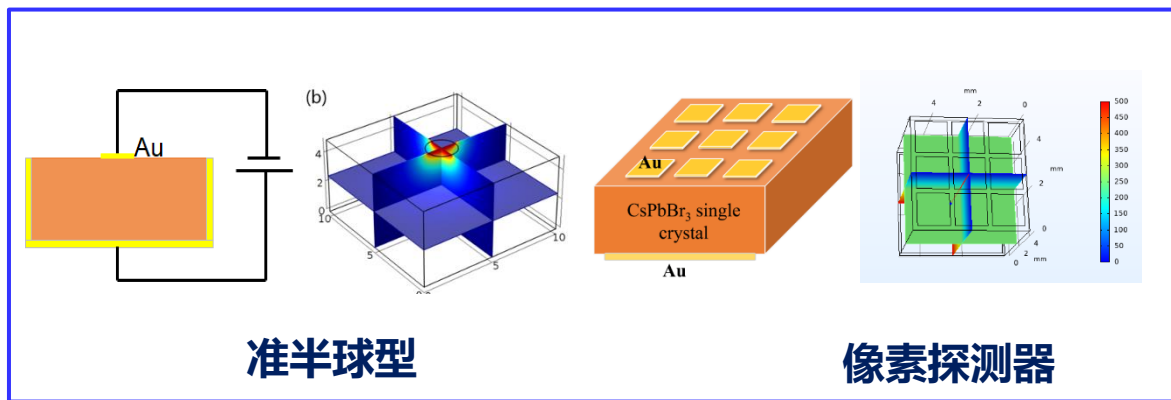


4.6 探测器结构设计

- ◆ 发现电子与空穴迁移率寿命积比值是影响能量分辨率的关键参数，为减少信号拖尾，开展复杂电极探测器设计与制备



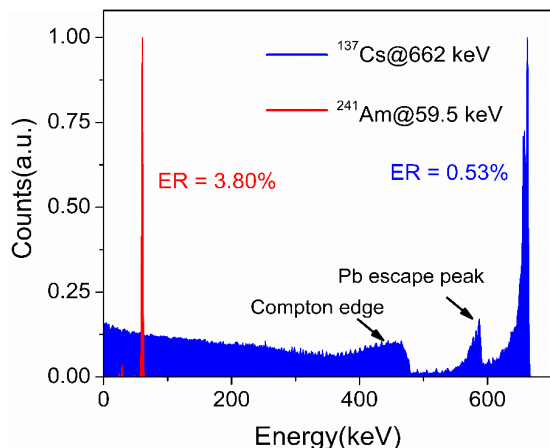
平面探测器能量分辨率仿真



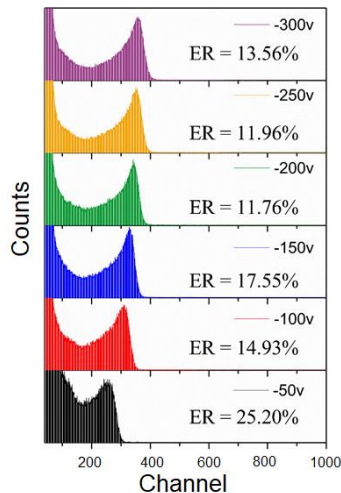
准半球型

像素探测器

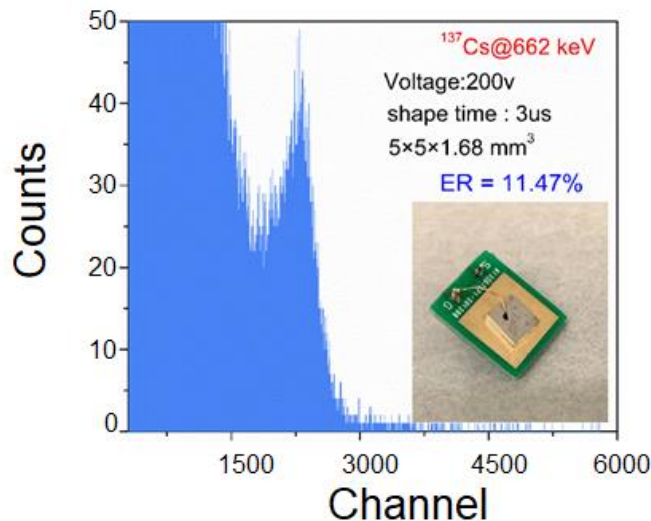
- ◆ 准半球以及像素CsPbBr₃探测器



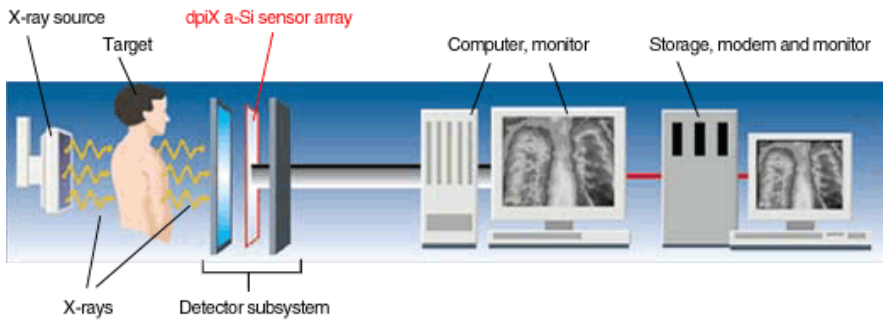
理论能量分辨率



Unpublished



4.7 X射线平板探测器XFPD



a-Se film from Hamamatsu for x-ray mammography

Large-Area CsI films from RMD

Based on

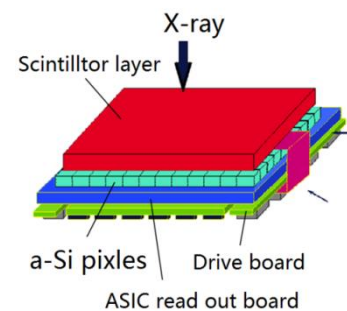
TFT: Thin Film Transistor

CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor

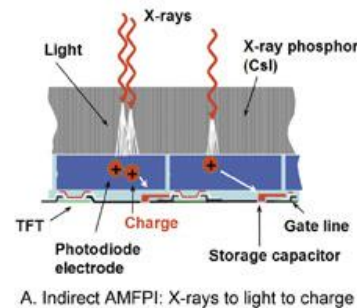
◆ a-Se will be crystalized over 50° , and the efficiency is limited as lower Z (34).

需求

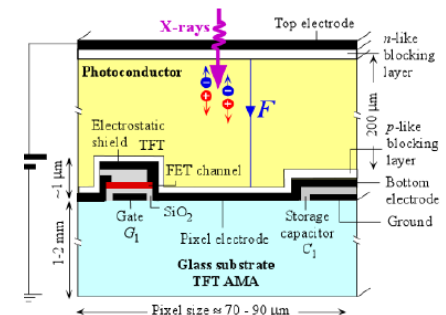
- ✓ 大面积厚膜
- ✓ 低温制备
- ✓ 低成本、无毒等



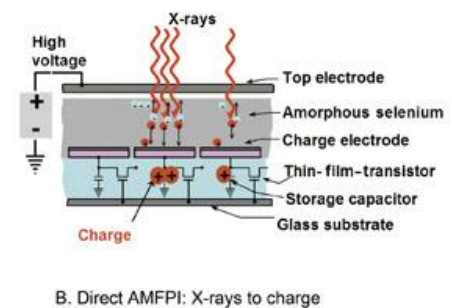
Indirect mode



A. Indirect AMFPI: X-rays to light to charge



Direct mode

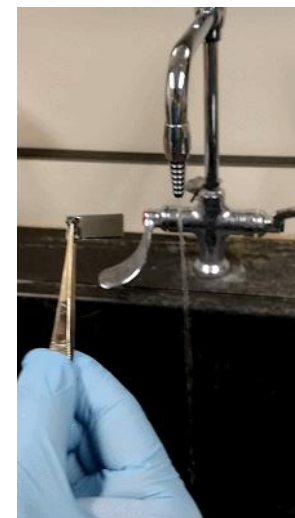
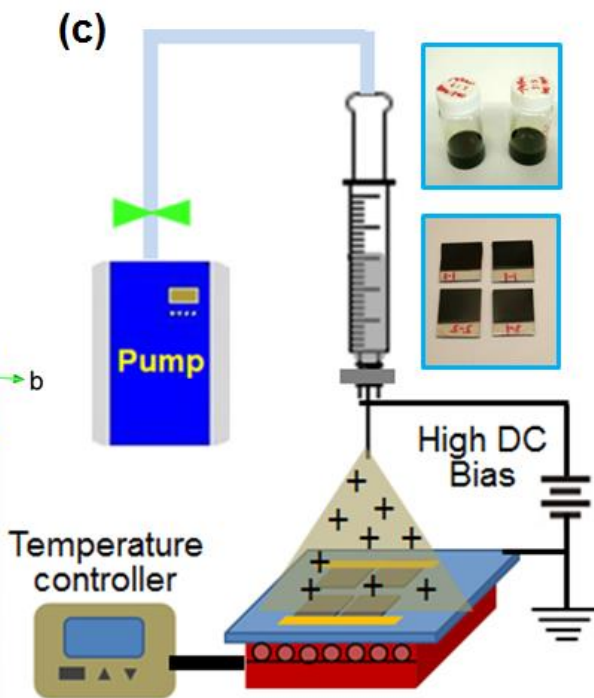
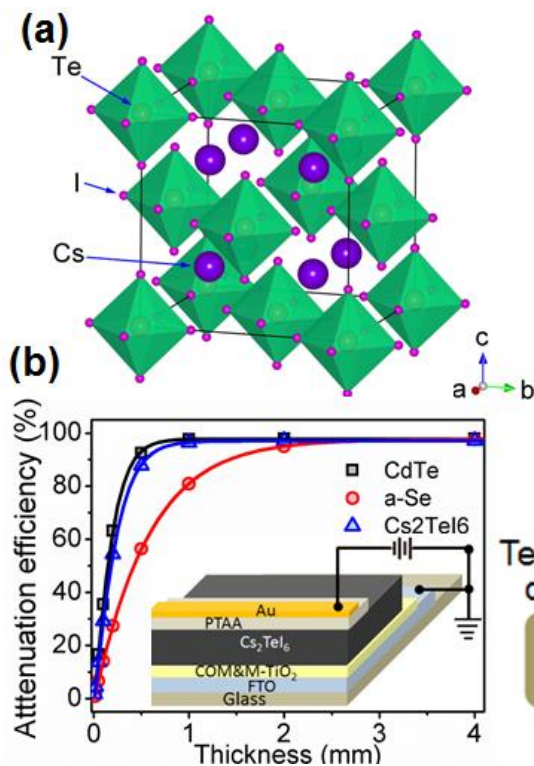


B. Direct AMFPI: X-rays to charge

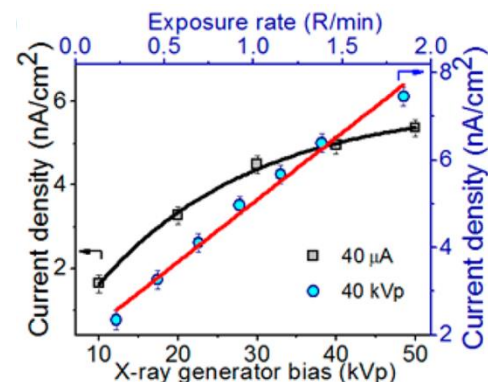
✗ nuclear medicine =? unclear medicine ✓

X射线成像用厚膜材料

- ◆ 采用静电辅助喷雾成膜技术制备出 Cs_2TeI_6 厚膜材料，具有较高的环境稳定性，并实现了对X射线探测



承受水冲刷

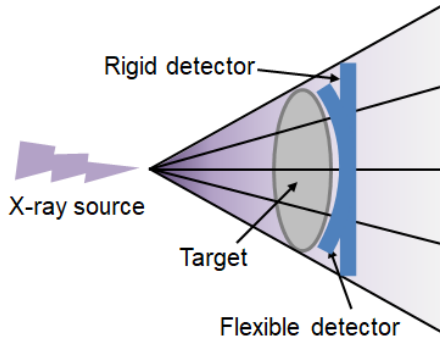


- 高电阻率、无铅、全无机、空气稳定和低温制备等

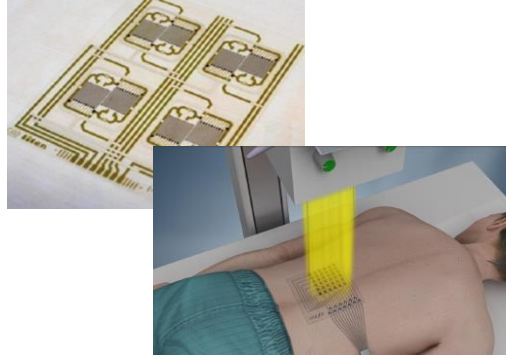
X射线探测灵敏度达到商用 α -Se

柔性X射线探测器探索

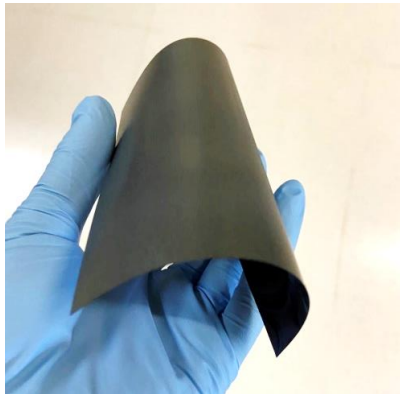
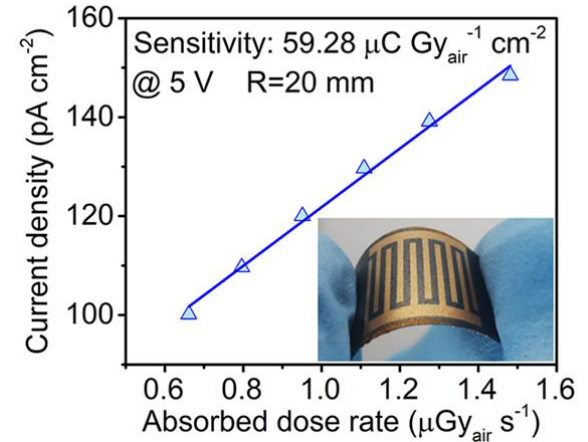
- ◆ 开展了基于柔性衬底的 Cs_2TeI_6 厚膜生长和探测器的制备，验证了弯曲试验条件下探测器仍具有高的灵敏度



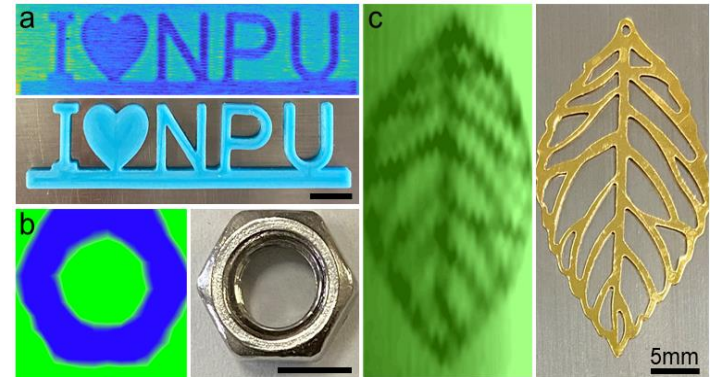
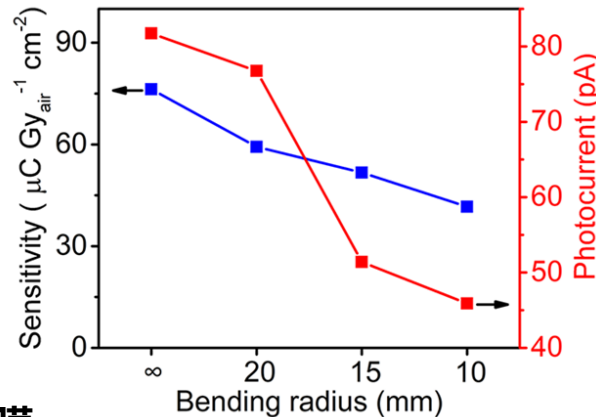
结构紧凑&无需图像校正



舒适度&低辐射计量



尺寸 100 cm^2 的 Cs_2TeI_6 厚膜

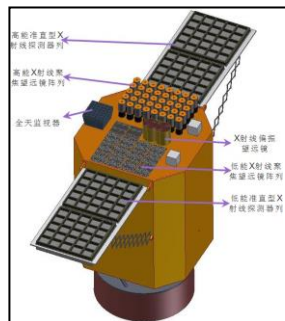
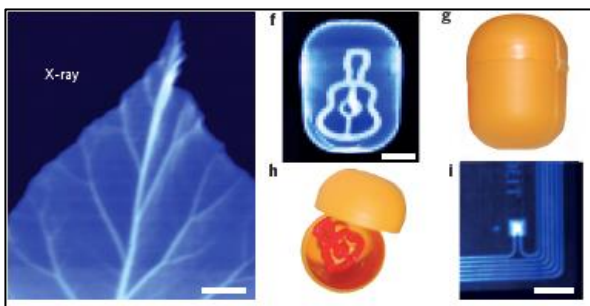
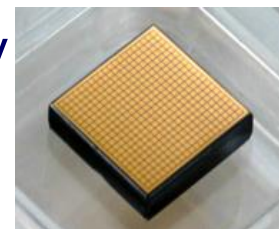
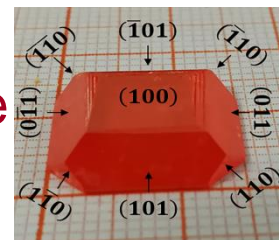
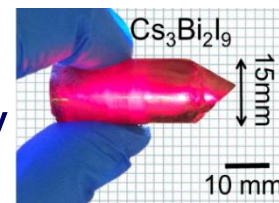


X-ray成像结果

结束语

■ 围绕高能射线探测，实现晶体生长-缺陷调控-器件设计和制备

- To explore the lead-free perovskite for X/γ-ray spectroscopy and imaging (基础研究) ;
- Optimizing the Pb-based perovskite crystals to achieve higher energy and space resolution (应用基础);
- To form stable and reliable industrial production capacity for 4-inch CZT (工程化)。





谢谢!

