

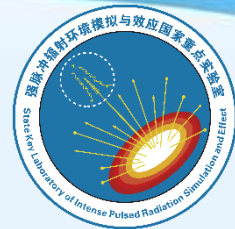
脉冲辐射闪烁探测与成像技术

1. 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室

2. 西北核技术研究院 二所

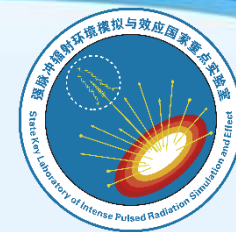
盛亮

2022年11月



报告主要内容

- 1 脉冲辐射闪烁探测与成像技术
- 2 脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术
- 3 脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统
- 4 典型的脉冲辐射探测与成像系统
- 5 总结与展望



一、脉冲辐射闪烁探测与成像技术

	脉冲射线测量	单粒子测量
测量对象	大量粒子形成的脉冲	单粒子
研究内容	波形形状和幅度, 能谱, 时间谱, 角分布, 源区形状等	粒子能谱, 粒子计数率, 绝对测量, 弱计数, 低本底
测量探头的主要参数	灵敏度, 时间响应, 幅度响应, 剂量率响应	能量分辨率, 死时间, 脉冲幅度, 射线的吸收, 立体角, 效率等
信号传输	同轴电缆或光纤, 长距离	同轴电缆, 短距离
记录设备	示波器, 条纹相机等	多道脉冲幅度分析器等
数据处理	波形修复和回归	能量分辨, 粒子分辨
标定方法	稳态和动态标定	能量刻度和计数率绝对测量
探测射线种类	n, γ , X, α , β , e 等射线	n, γ , α , β 等

脉冲射线测量与粒子测量之间的基本区别

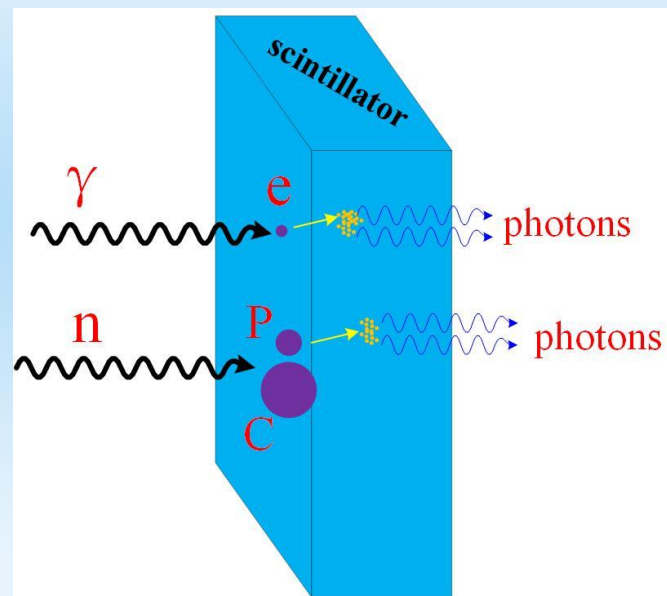
一、脉冲辐射闪烁探测与成像技术

闪烁探测与成像基本原理：

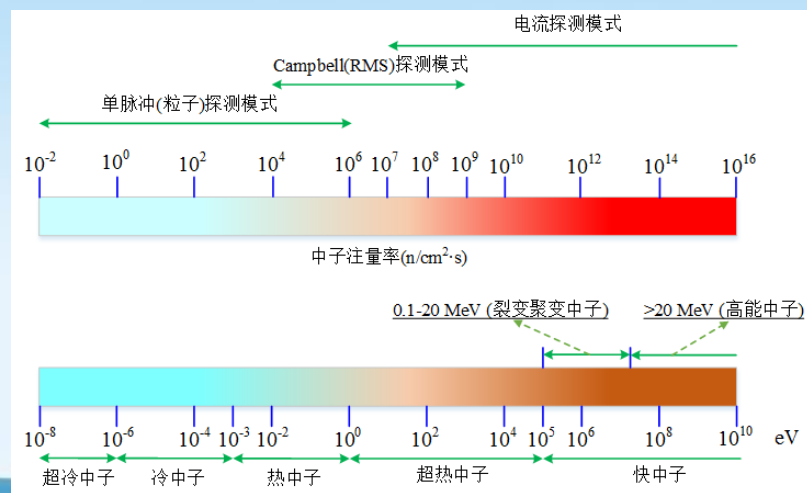
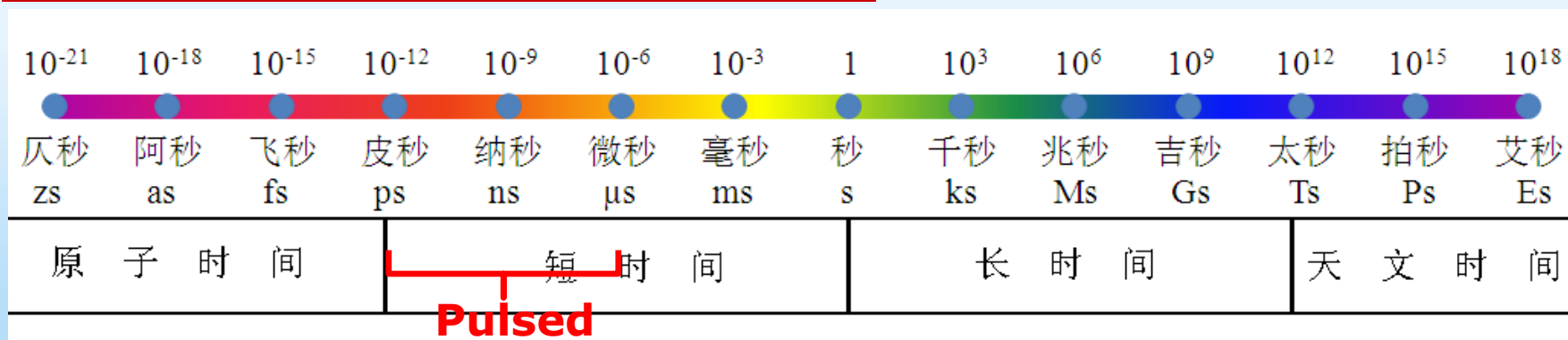
X/γ射线、中子等与闪烁材料相互作用，产生**次级电子或质子等**带电粒子，这些带电粒子又进一步使（敏化剂、激活剂）材料中原子核外电子激发或电离，退激过程中产生荧光，通过光电探测器或成像系统进行记录，是脉冲辐射场测量中最为传统与经典的方法。

多采用电流法测量方式，通过光电探测器将大量粒子作用在闪烁体上光转换为电流或电压。

在脉冲辐射探测与成像领域，闪烁探测与成像至今仍广为应用，主要是因为闪烁材料对入射中子、伽马的**高探测效率与高量子数倍增效应**，MeV级中子、伽马入射毫米级厚度的闪烁体通常可获得 10^3 以上的量子增益。

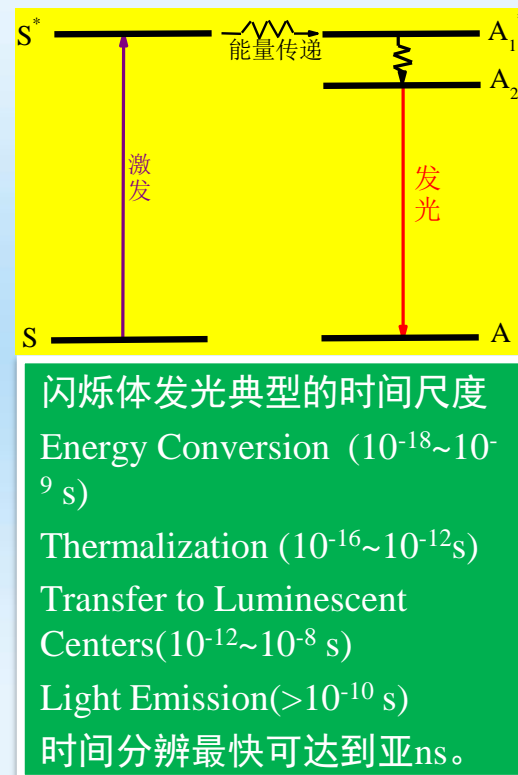
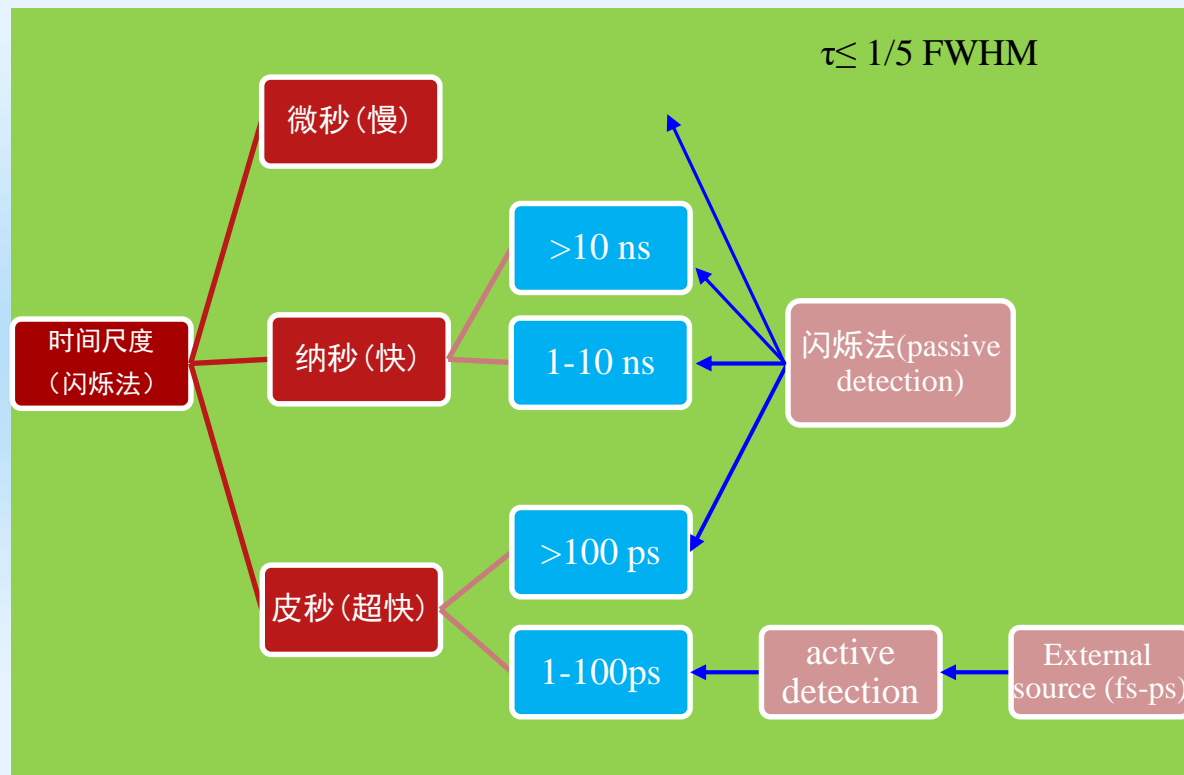


一、脉冲辐射闪烁探测与成像技术



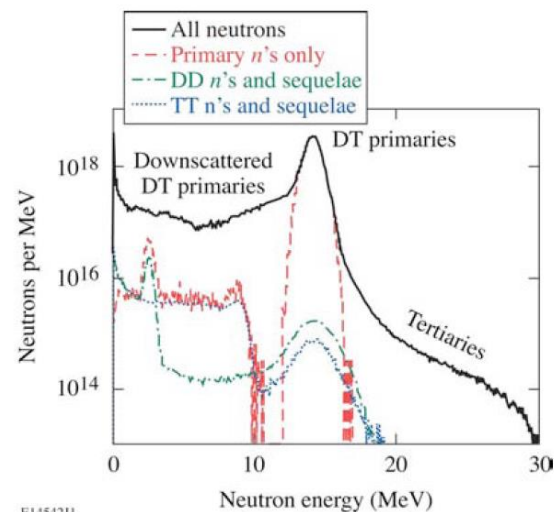
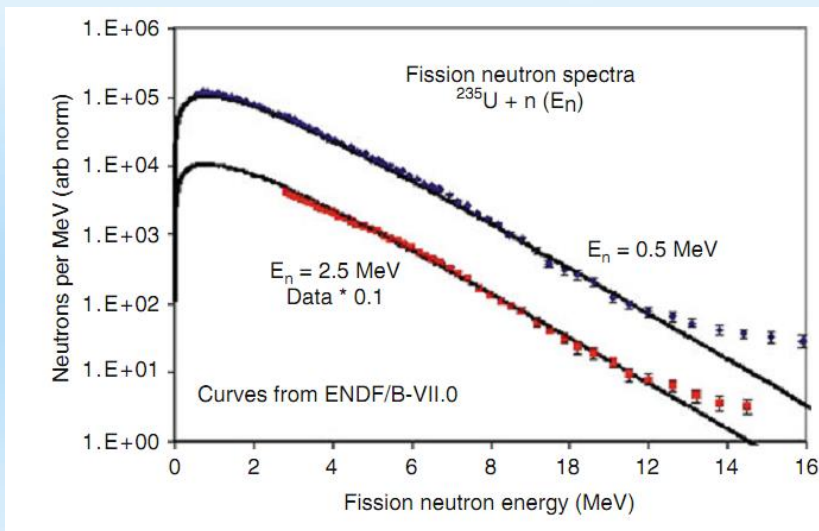
源产额: $10^8 \sim 10^{30}$ /pulse, 强脉冲: 射线束 $>10^{19}$ /pulse (源), >1 MJ/pulse

一、脉冲辐射闪烁探测与成像技术



与粒子计数法不同，在脉冲辐射探测与成像领域，特征时间是指的**时间衰减常数** τ (决定了源时间波形的畸变)，而不是**上升时间**(决定了粒子探测的定时精度)。

一、脉冲辐射闪烁探测与成像技术



EI4542J1

裂变与聚变中子能谱

一、脉冲辐射闪烁探测与成像技术

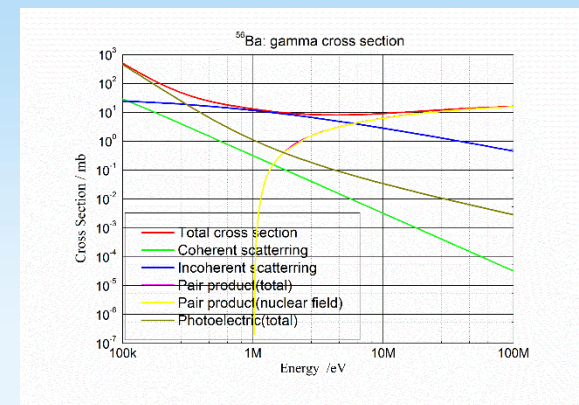
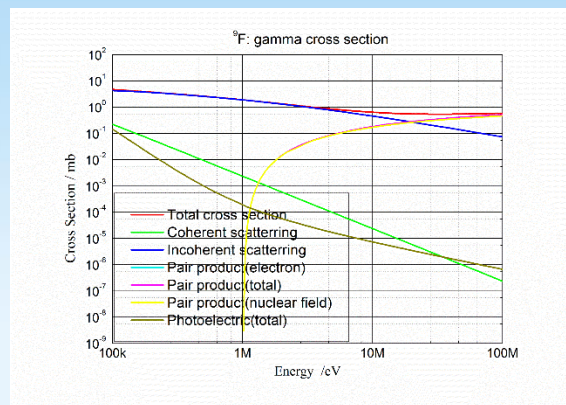
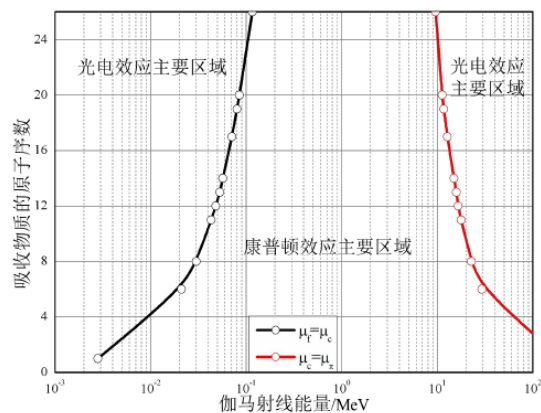
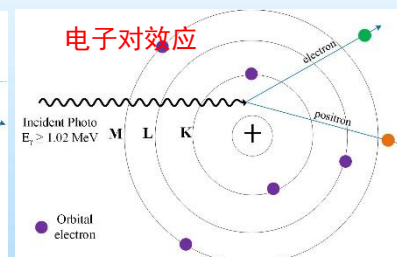
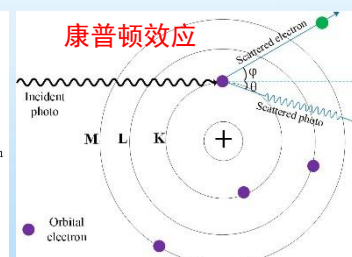
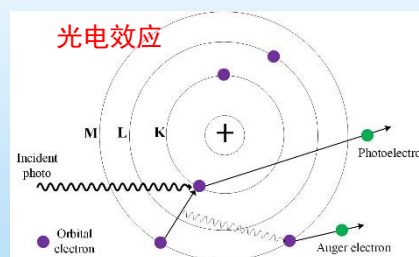
主要能量范围
0.1-20 MeV

伽马
(MeV)

光电效应

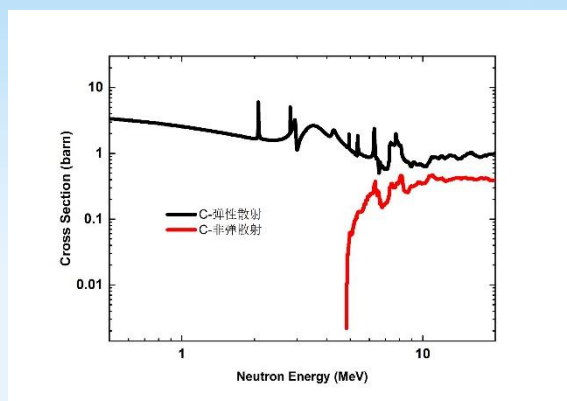
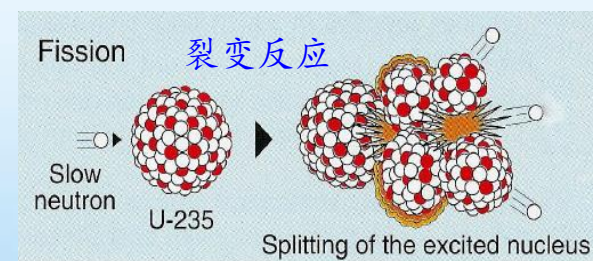
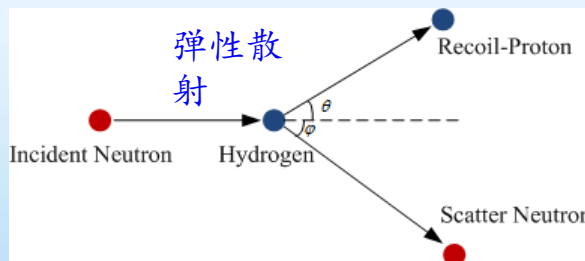
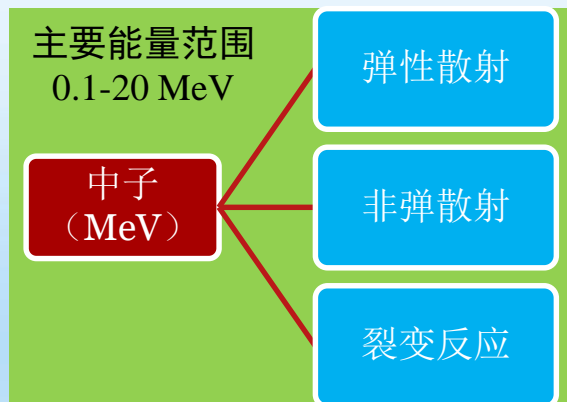
康普顿效应
(非相干)

电子对效应

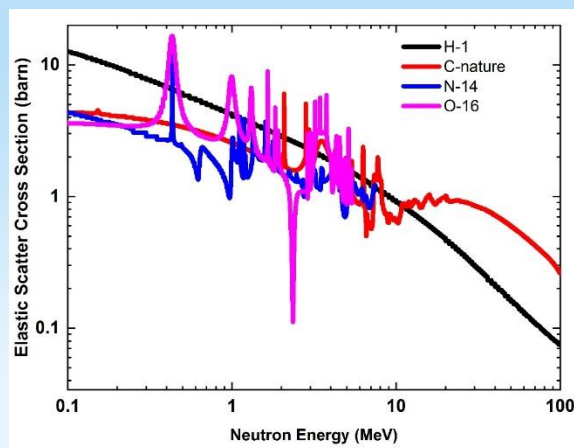


BaF₂闪烁体主要伽马射线反应截面

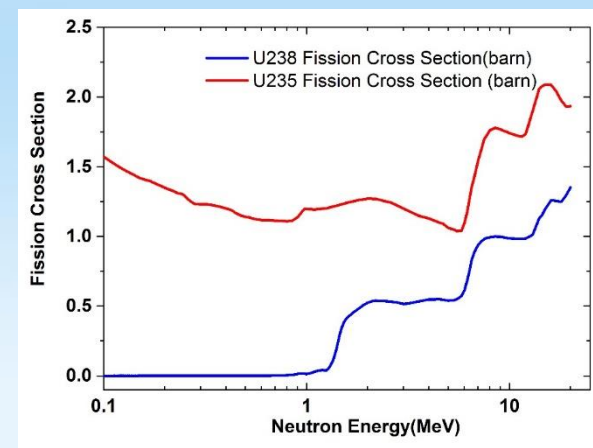
一、脉冲辐射闪烁探测与成像技术



C中子弹性散射与非弹散射截面



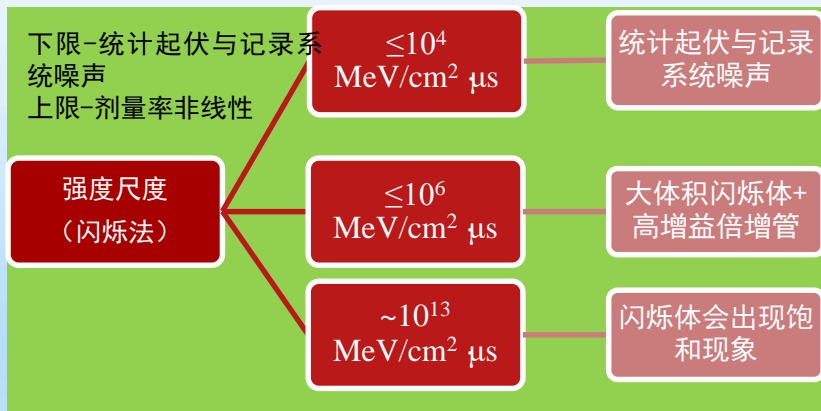
中子弹性散射截面



U材料中子裂变反应截面

脉冲辐射探测闪烁探测与成像技术中涉及到的最常见核反应：伽马康普顿散射、中子弹性散射

一、脉冲辐射闪烁探测与成像技术

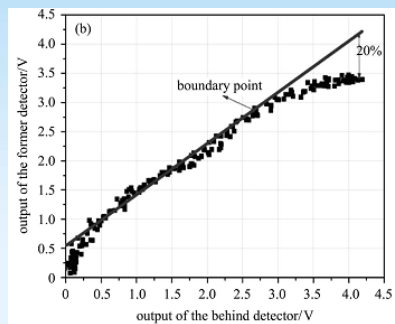
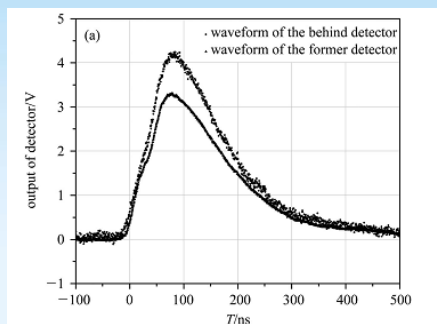


$$\sigma_n^2(r_d, t_d) = E_0 \langle g \rangle^2 F \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e(r, t) \left[\frac{P_1(r_d, t_d | r, t) - P_1^2(r_d, t_d | r, t)}{\langle g \rangle F} + P_1^2(x_d, t_d | r, t) \right] dr dt$$

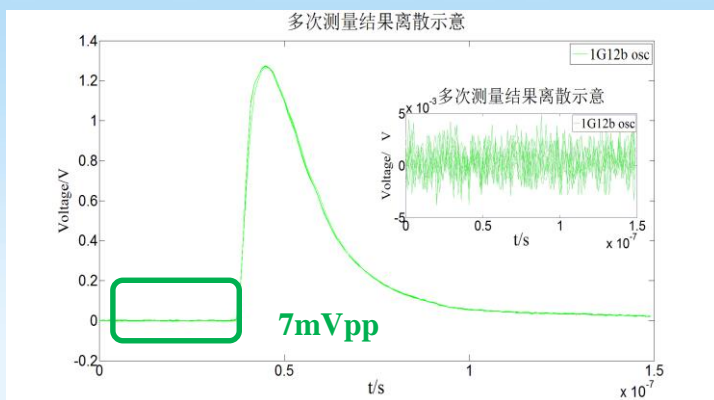
$$\langle n(r_d, t_d) \rangle = E_0 \langle g \rangle \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e(r, t) P_1(r_d, t_d | r, t) dr dt$$

$$F = \frac{\sigma_g^2}{\langle g \rangle^2} + 1$$

$$P_1(r_d, r_s | r, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(r - r_s, t - t_s) \cdot D(r_s - r_d, r_s - r_d) dr_s dt_s$$

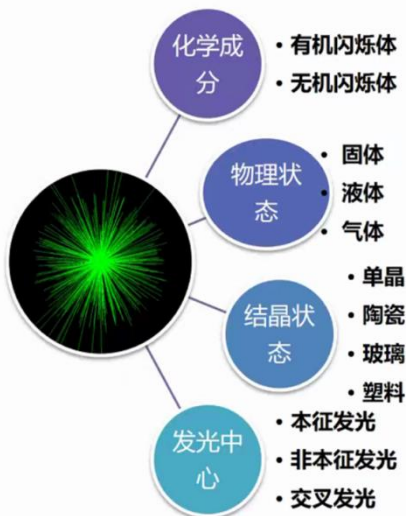
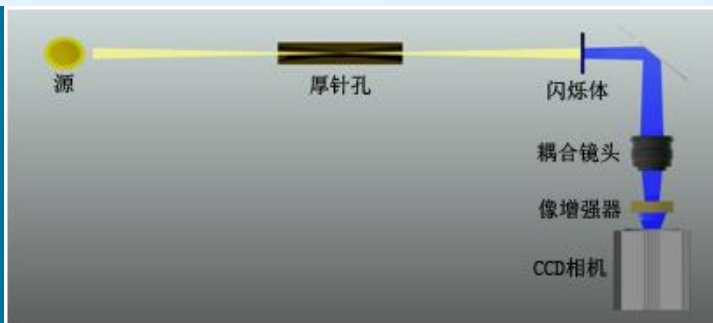
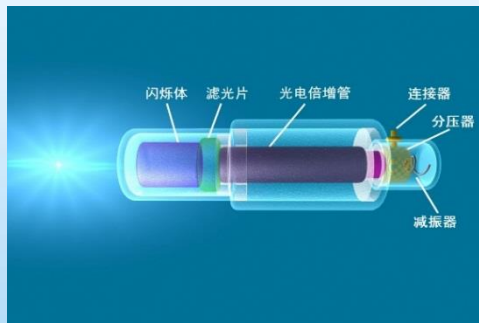


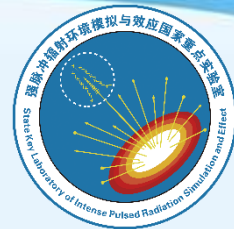
LYSO剂量率非线性响应实验结果
($\sim 2 \times 10^{13}$ MeV/cm² μs)



12-bit示波器

一、脉冲辐射闪烁探测与成像技术

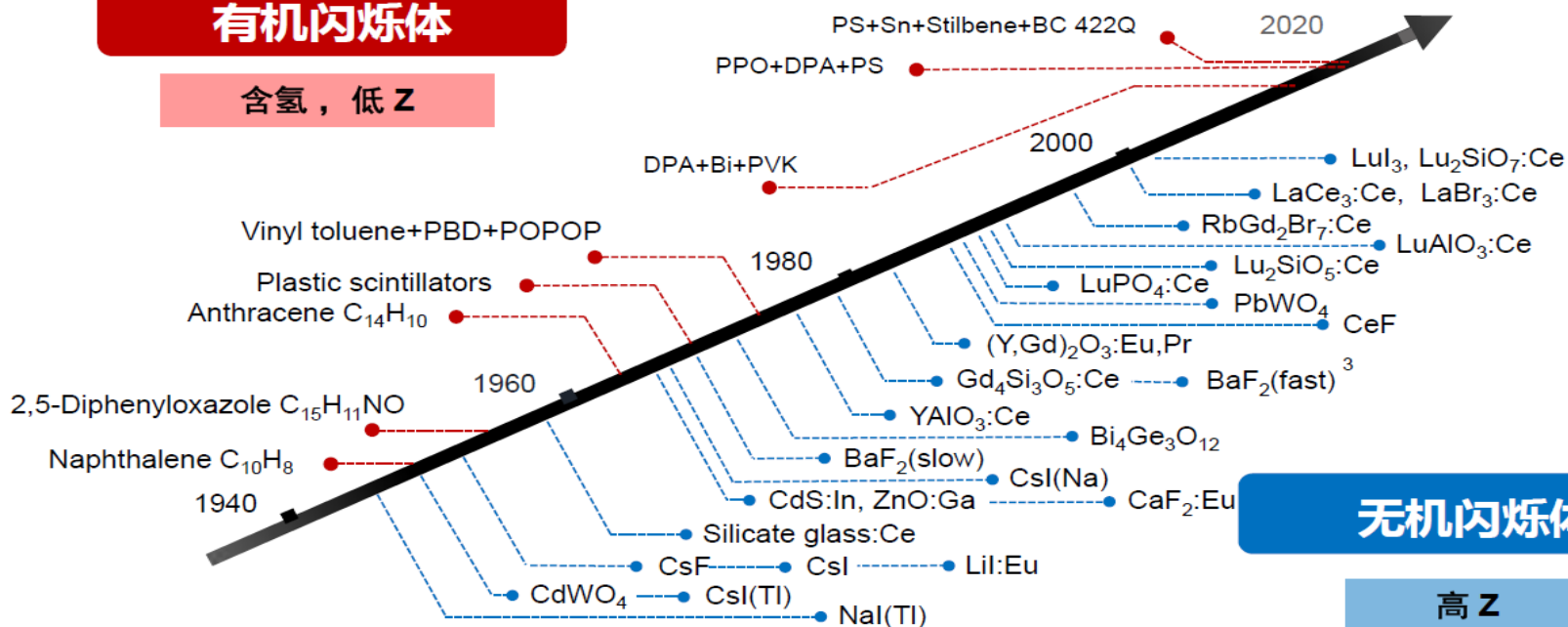




二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

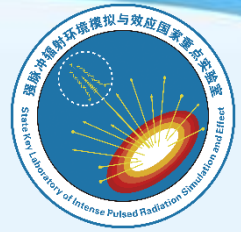
有机闪烁体

含氢，低 Z



无机闪烁体

高 Z

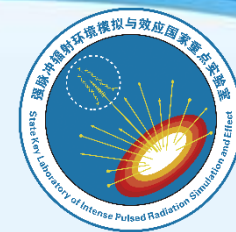


二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

理想闪烁体：

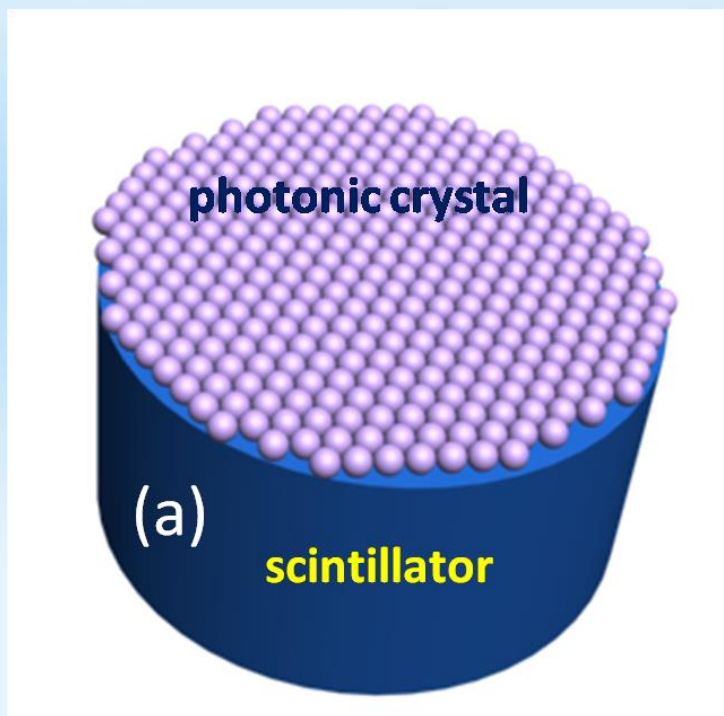
- ① 高探测效率 (中子-有机；伽-无机晶体)
- ② 中子/伽马灵敏度差别大(粒子甄别能力)
- ③ 高光产额
- ④ 快时间响应
- ⑤ 大动态范围(剂量率饱和效应)
- ⑥ 低内本底(放射性同位素含量低)
- ⑦ 高空间分辨
- ⑧ 能量分辨性能好 (脉冲场测量对此要求不高)
- ⑨ 大面积 ($\sim \Phi 100 \text{ mm}$)
- ⑩ 不易潮解、机械加工性能良好

“鱼与熊掌难以兼得的问题”



二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

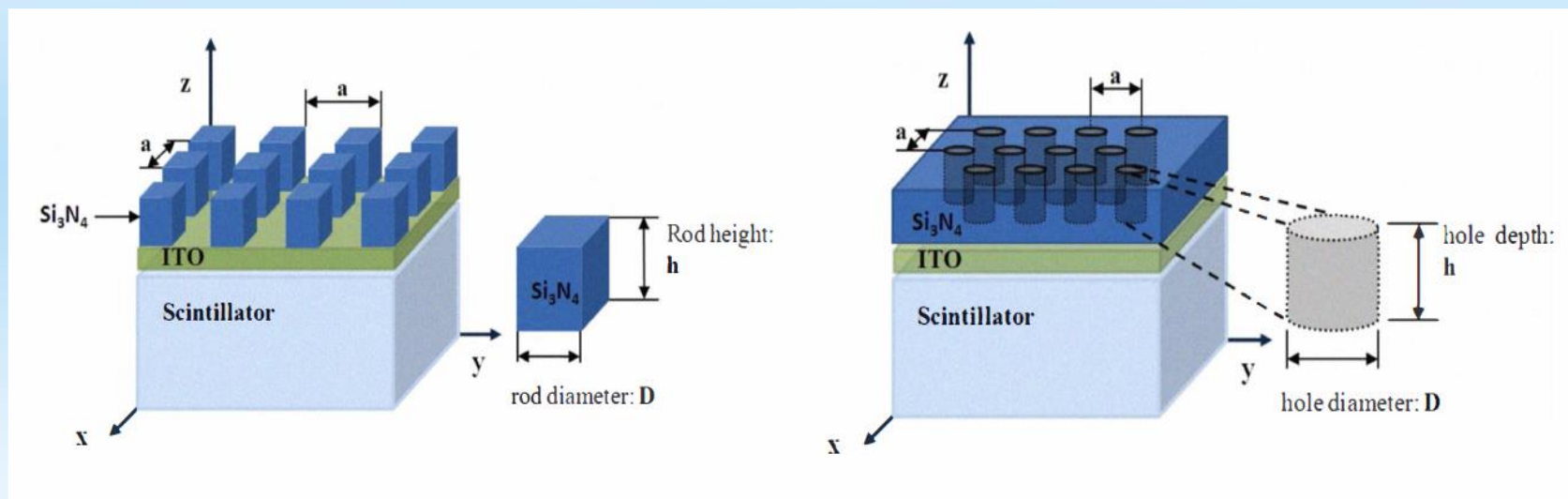
(1) 闪烁体表面微结构



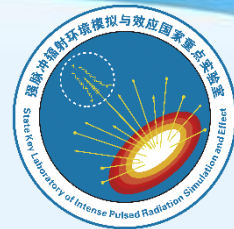
光子晶体可以改变荧光出射角分布，使更多光子从表面出射，减少了在闪烁体内的多次反射与被吸收的概率，从技术上等效提高了光产额（非本征光产额）。对改善荧光成像质量、提高能谱分辨率和改善具有荧光方向性依赖的测量系统的性能等具有重要意义。

二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(1) 闪烁体表面微结构

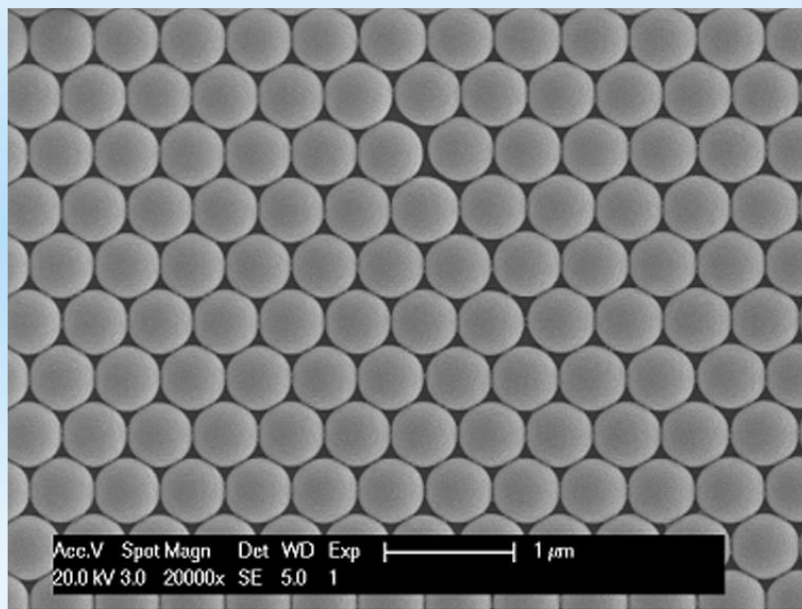


电子束刻蚀/X射线衍射光刻

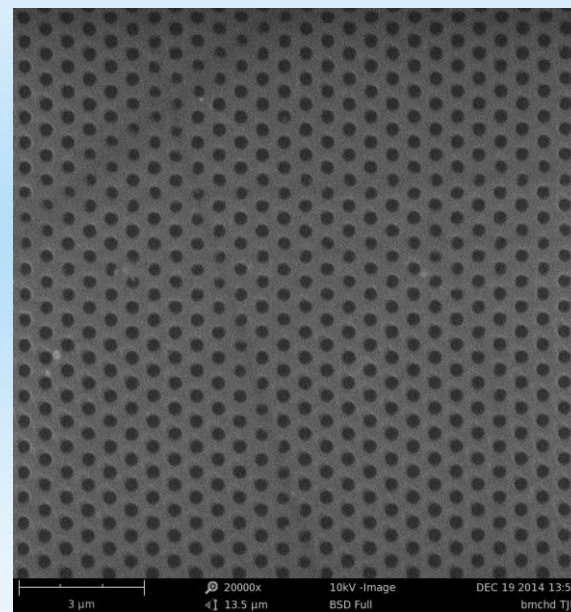


二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(1) 闪烁体表面微结构



化学自组装

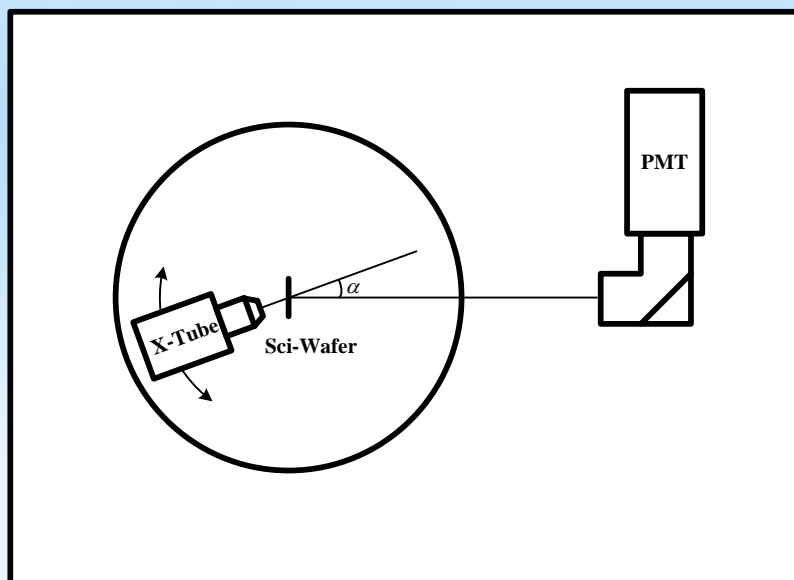
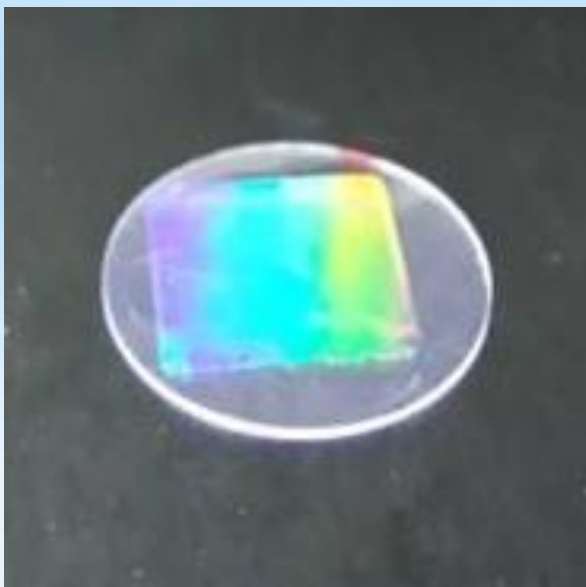


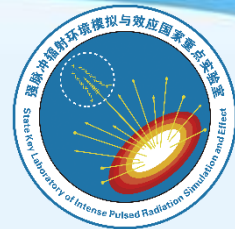
纳米压印

二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(1) 闪烁体表面微结构

EJ212塑料闪烁薄膜，纳米压印技术制作一层表面光子晶体结构。

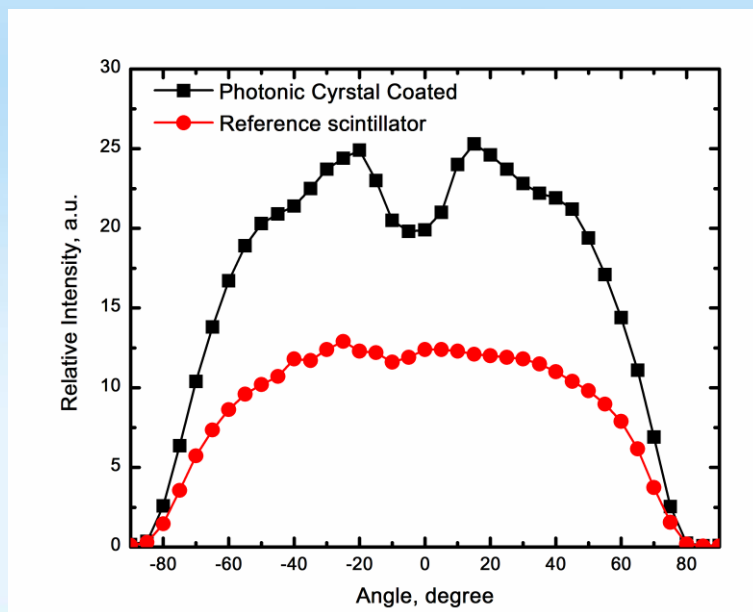




二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

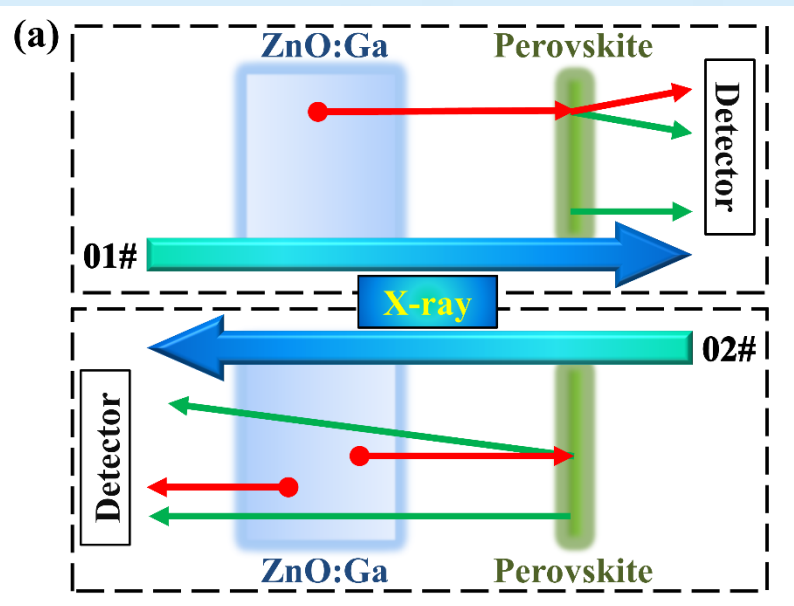
(1) 闪烁体表面微结构

荧光从闪烁体表面出射效率明显提高。荧光出射最强角度方向的光子数提高了1.04倍。



二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(2) 复合薄膜闪烁体

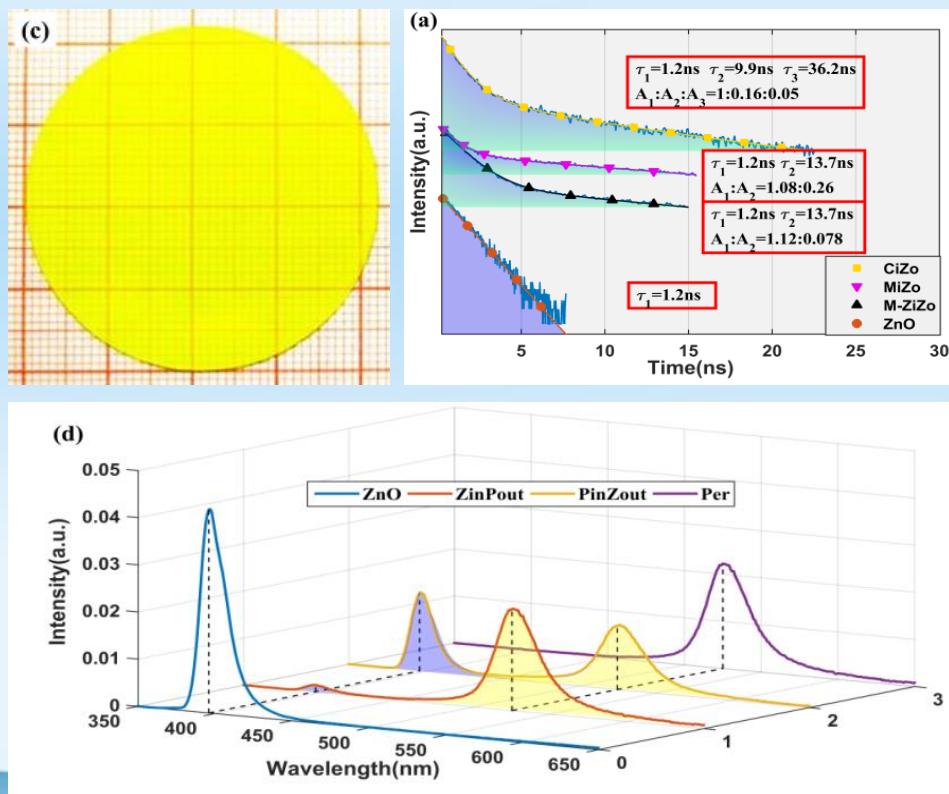


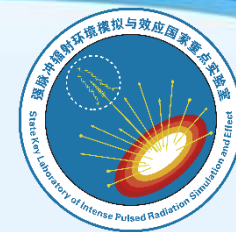
X射线作用下复合样品的工作原理

X射线同时作用于ZnO:Ga和钙钛矿薄膜。在钙钛矿侧，输出光包含**三种成分**：(a)钙钛矿的直接出射光；(b) ZnO:Ga发光经钙钛矿膜转化的发光；(c) ZnO:Ga产生的未被钙钛矿膜转化的发光。

二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(2) 复合薄膜闪烁体



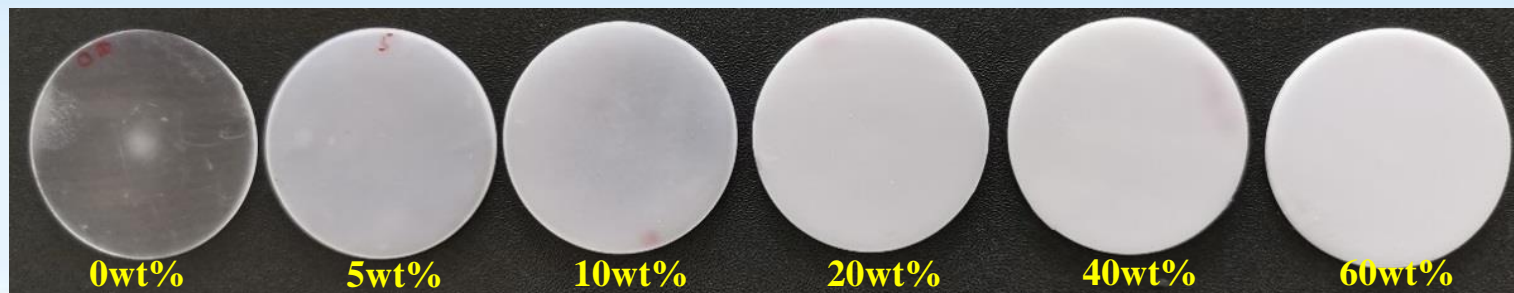


二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(3) 有机闪烁体纳米掺杂

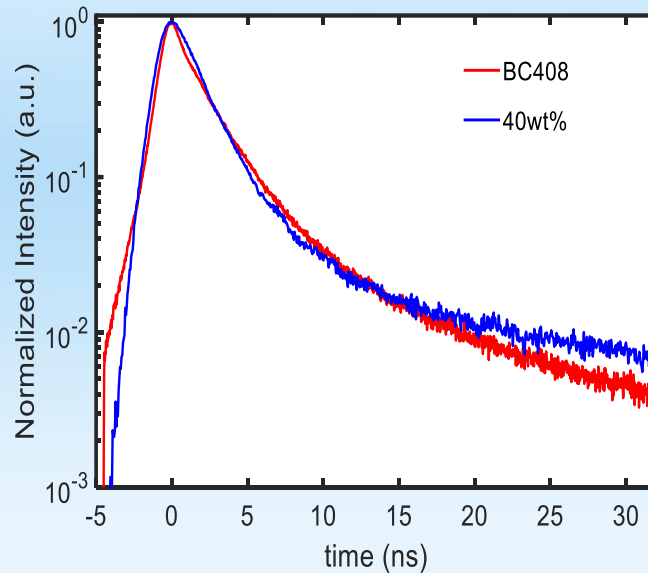
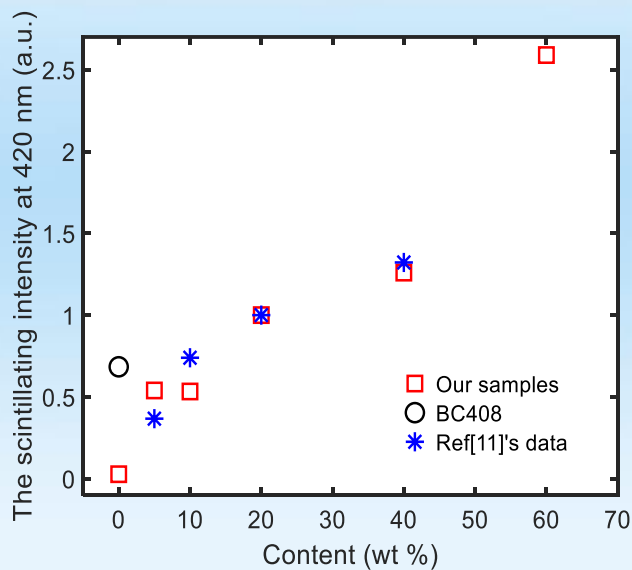
(a). 无机闪烁体+塑料； (b) 宽带隙材料+塑料闪烁体； (c) 无机量子点材料+塑料闪烁体

通过水热合成法制备了粒径在20 nm到40 nm之间的BaF₂纳米颗粒，利用有机溶剂溶解了BC408塑料闪烁体，并将其和一定量的BaF₂纳米颗粒充分混合起来，挥发溶剂并固化样品，得到了BaF₂纳米复合闪烁体。



二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

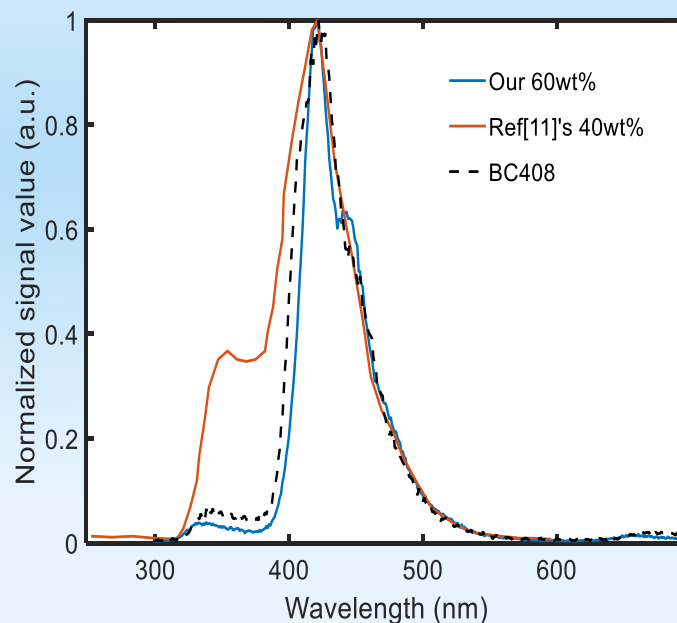
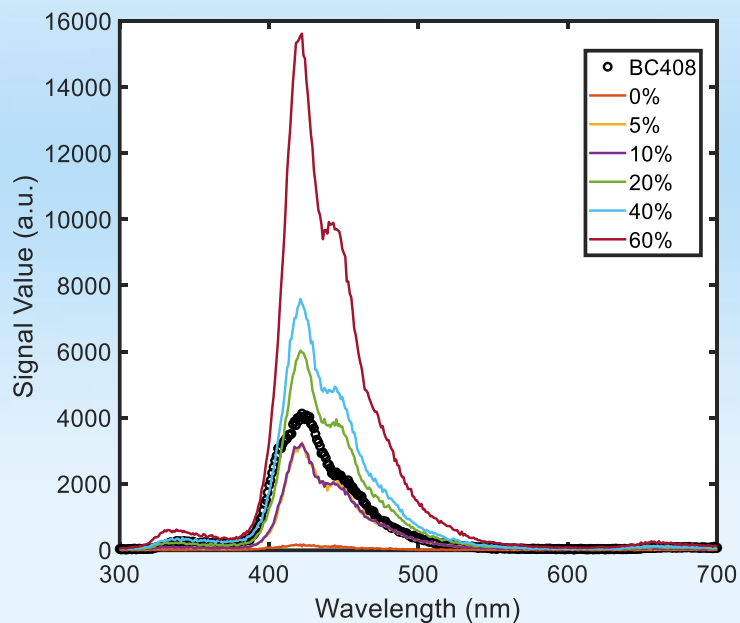
(3) 有机闪烁体纳米掺杂



BC408闪烁体与掺不同比例BaF₂发光强度与衰减时间比较

二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(3) 有机闪烁体纳米掺杂

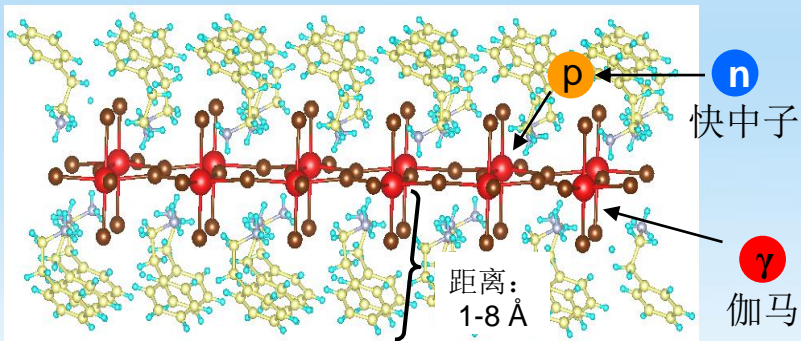


掺不同比例BaF₂纳米颗粒的BC408闪烁体发光光谱

二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

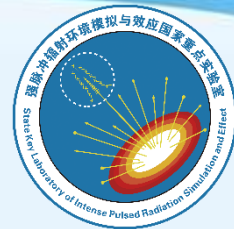
(4) 钙钛矿闪烁体

有机-无机杂化钙钛矿闪烁体



- A位有机基团(富氢)，响应快中子-带电粒子
- B位重金属离子，响应 γ 射线-带电粒子
- 有机、无机距离近，能量传递效率高
- 强限域激子发光，**ns响应速度、高光输出**

3D MAPbBr_3 (MA, CH_3NH_3)
 $\text{PEA}_2\text{PbBr}_4$ (PEA, $\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_4\text{NH}_3$)
 难点：有机无机杂化钙钛矿性能
 长期稳定性、大尺寸高质量体无机钙钛矿闪烁体制备。
 将钙钛矿量子点 (Quantum dots, QDs) 分散到聚合物形成复合闪烁体。聚合物既可以为钙钛矿量子点提供了载体，还可以提高钙钛矿的环境稳定性。

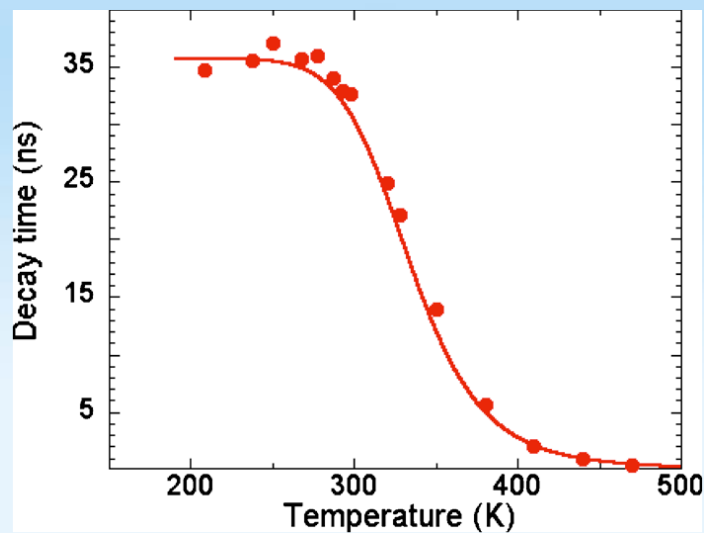


二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(5) 闪烁体温度效应

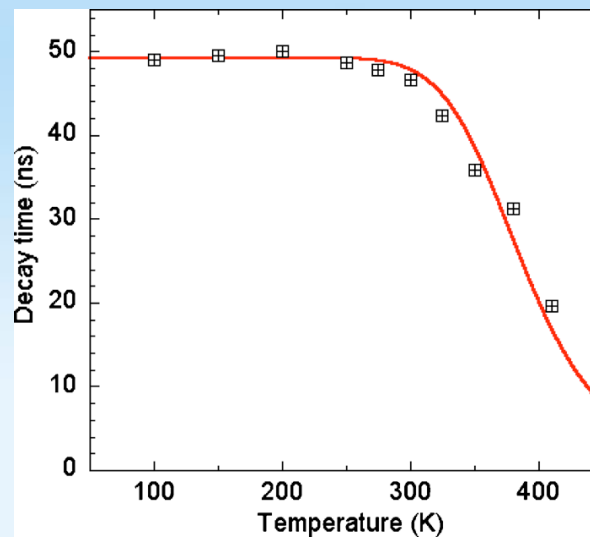
LYSO:Ce中存在两种Ce态: Ce1:95%, Ce2:5%

Ce1 (seven oxygen ligands)



$\lambda_{\text{ex}}=355 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{em}}=405 \text{ nm}$

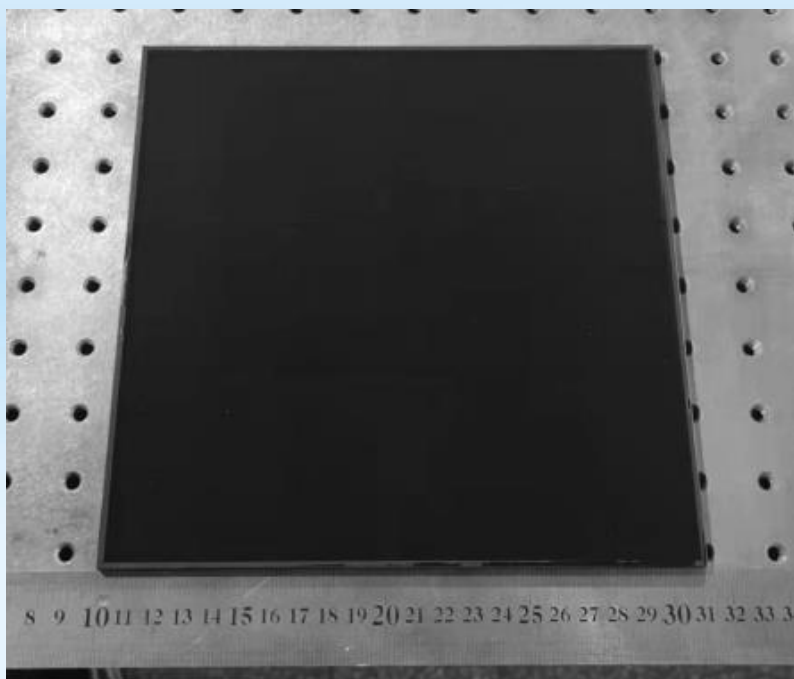
Ce2 (six oxygen ligands)



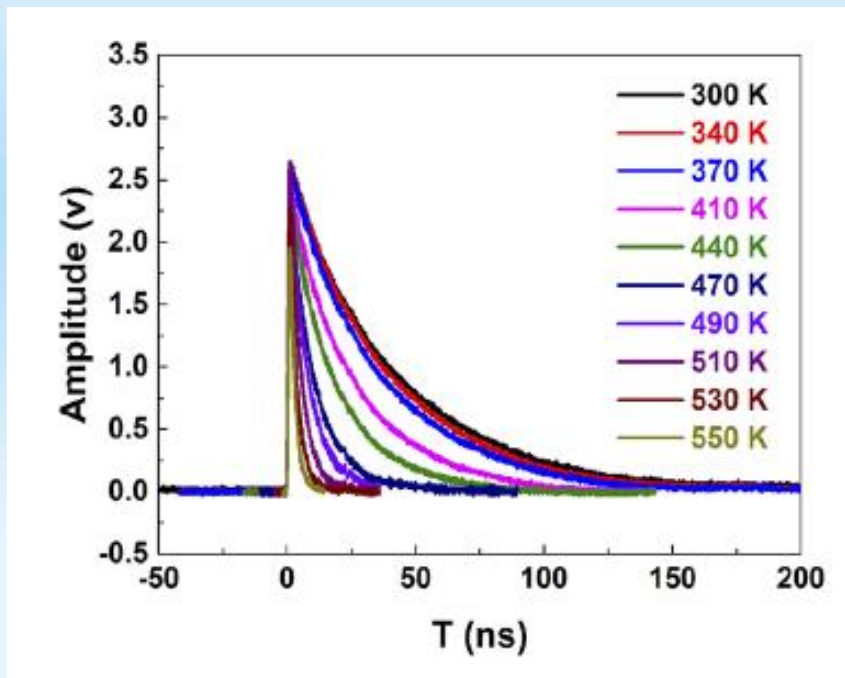
$\lambda_{\text{ex}}=320 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{em}}=490 \text{ nm}$

二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(5) 闪烁体温度效应



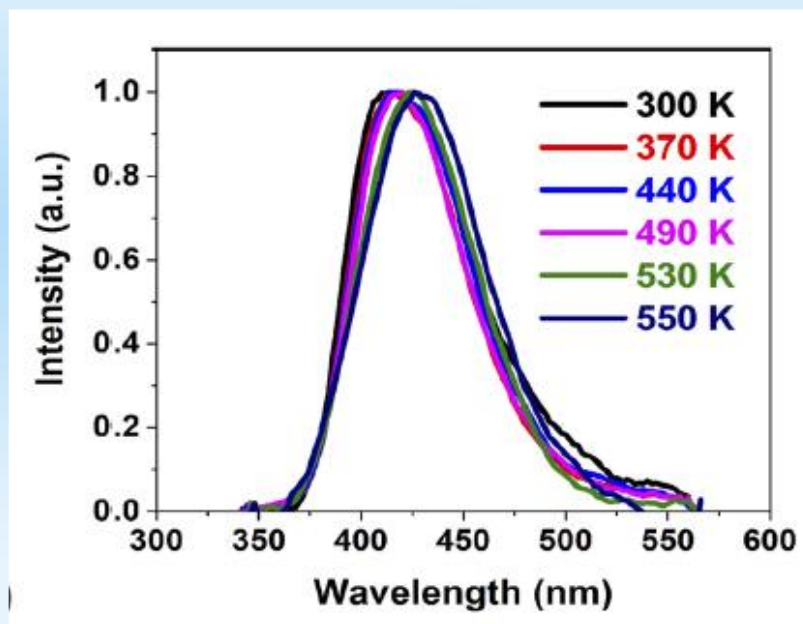
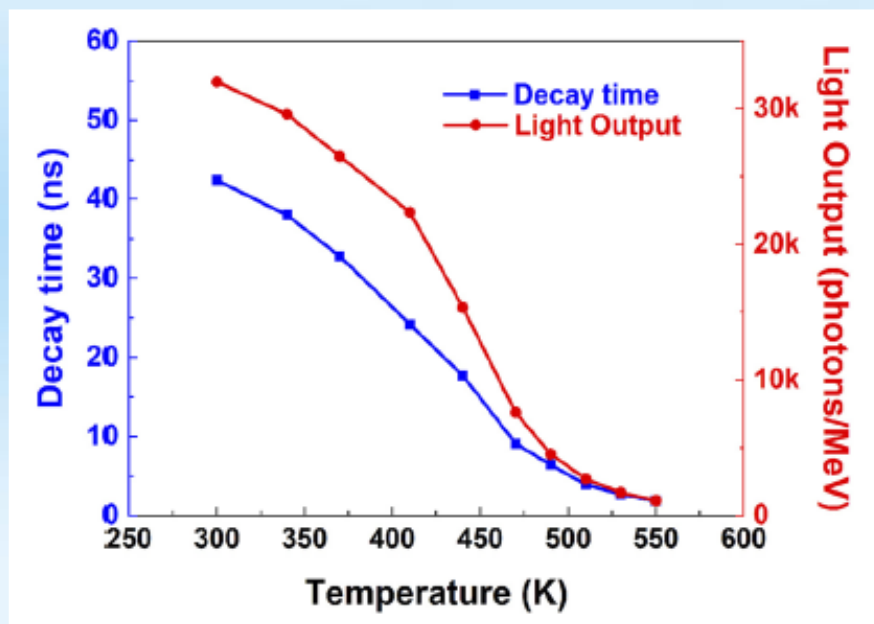
LYSO:Ce



LYSO:Ce闪烁体衰减时间随温度变化

二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

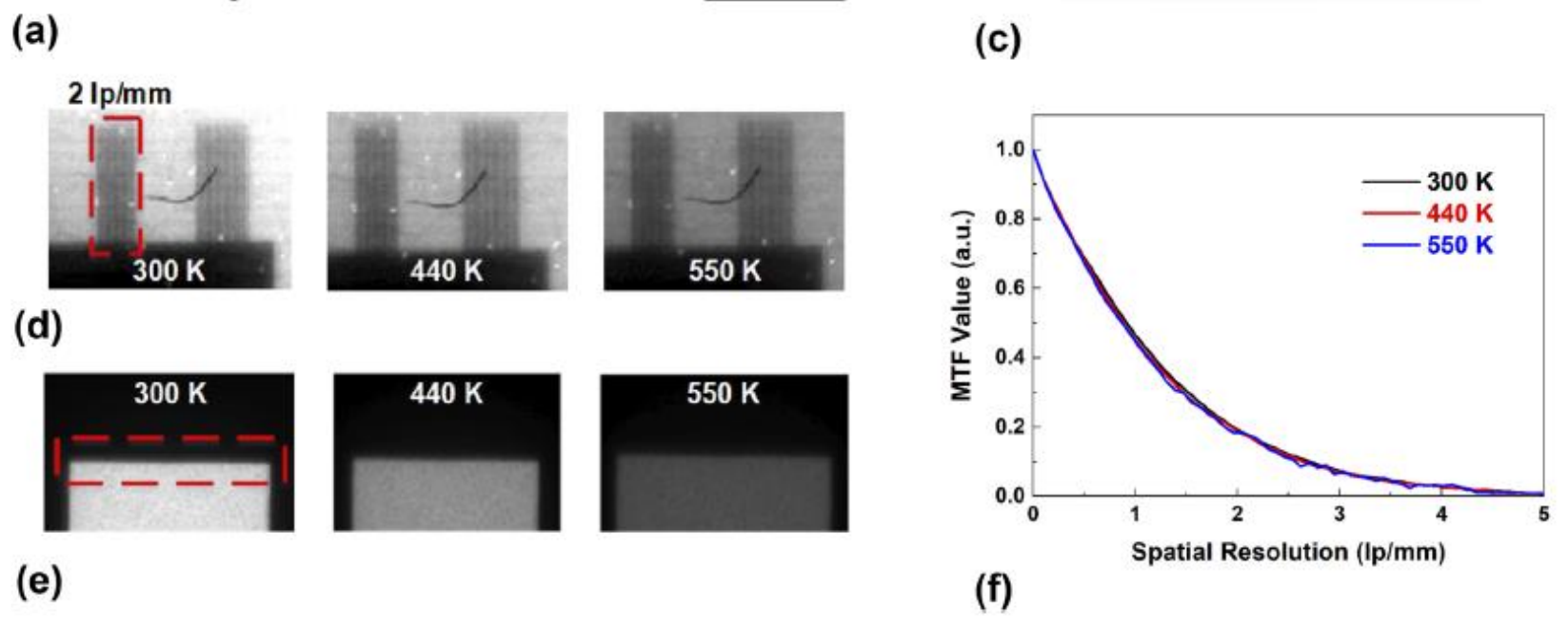
(5) 闪烁体温度效应



LYSO:Ce闪烁体光产额、发光光谱随温度变化

二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(5) 闪烁体温度效应



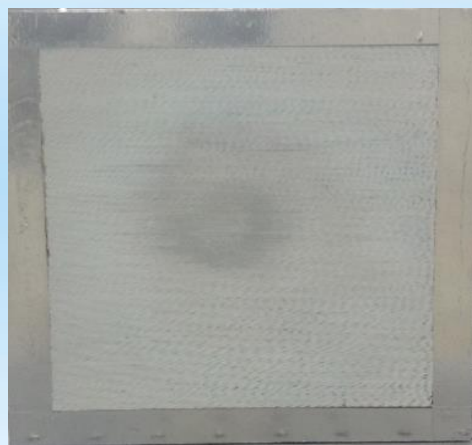
LYSO:Ce闪烁体空间分辨随温度变化

二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

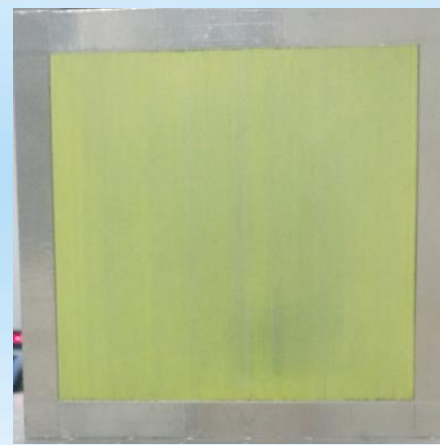
(6) 阵列式闪烁体



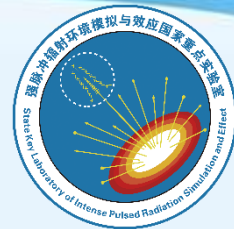
(a) LCA液闪阵列



(b) GSFA纤维阵列



(c) BSFA纤维阵列

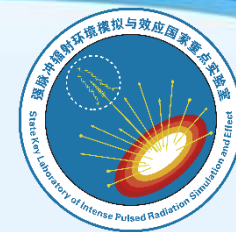


二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(6) 阵列式闪烁体

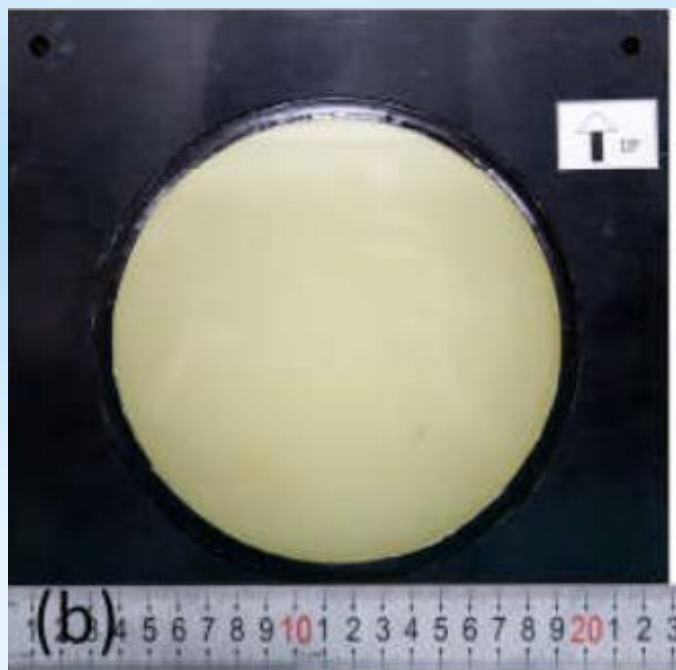
三种阵列屏的基本结构尺寸和参数

阵列图像屏	GSFA	BSFA	LCA
像元尺寸/mm	0.3	0.5	0.1
中心波长/nm	492	432	426
衰减时间/ns	2.7	2.7	<3.5
厚度 /mm	50	50	60
闪烁材料	BCF20	BCF10	EJ309

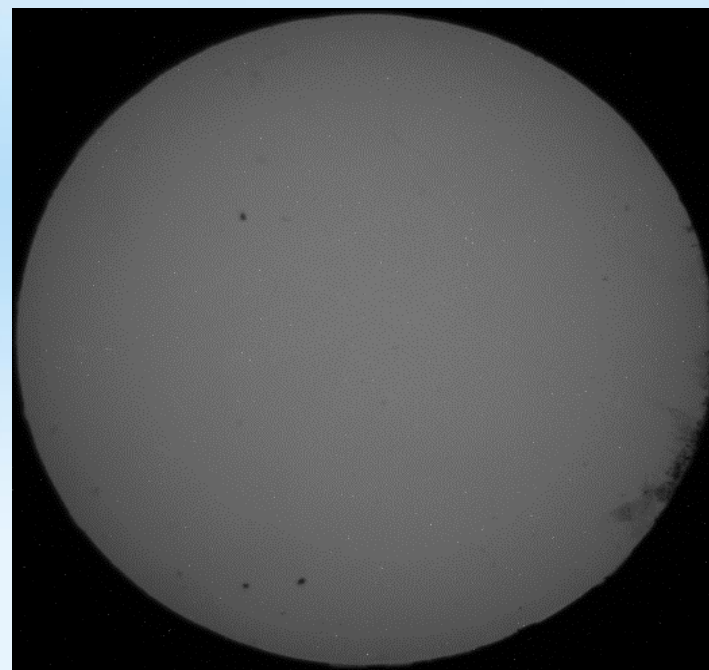


二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(6) 阵列式闪烁体



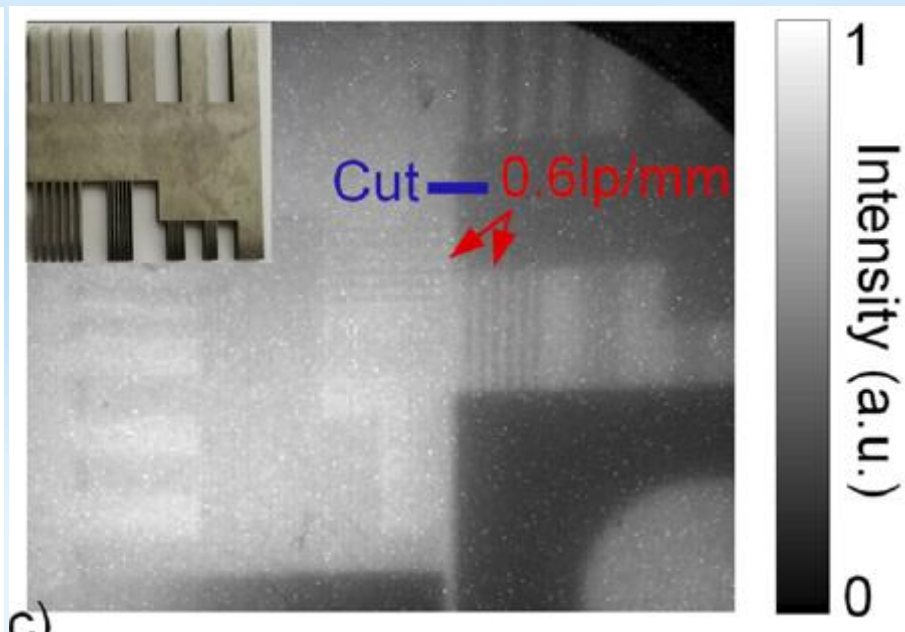
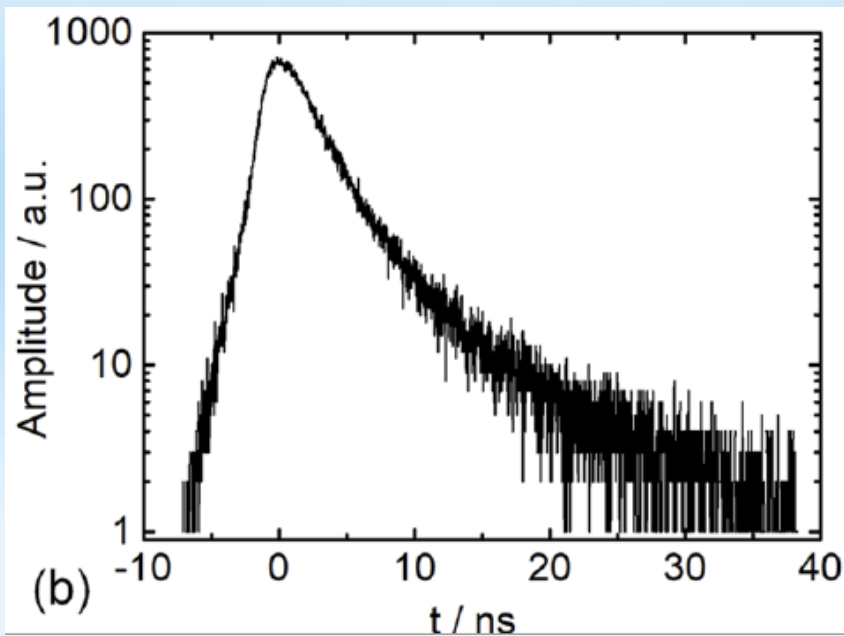
LCA液闪阵列 (5cm, 100 μm)



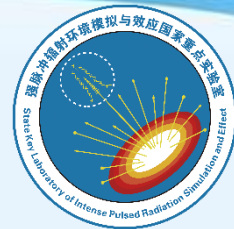
Co源均匀性测试结果

二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(6) 阵列式闪烁体

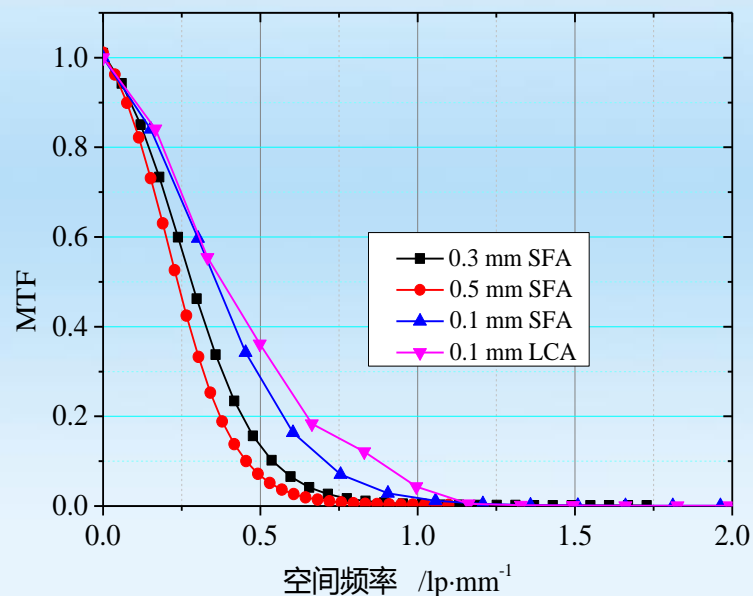
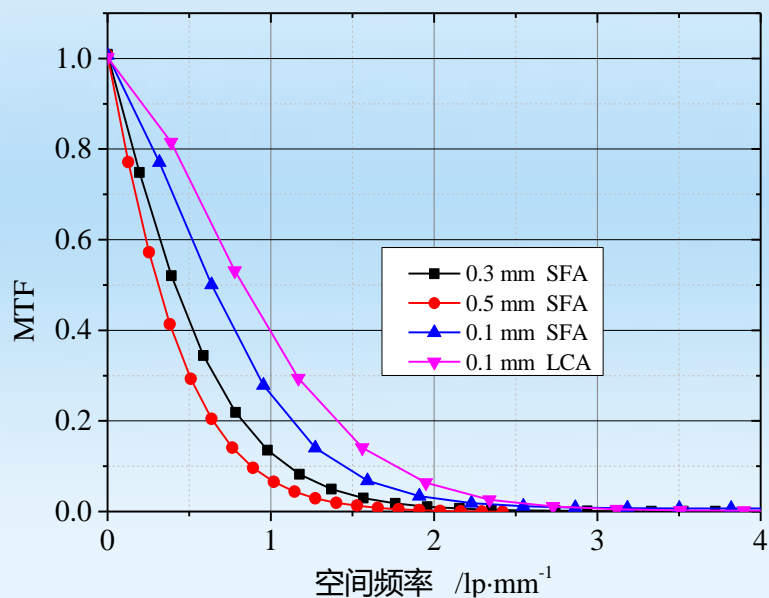


时间分辨与空间分辨

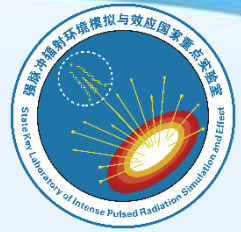


二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(6) 阵列式闪烁体



液闪阵列屏与闪烁纤维屏的MTF理论模拟曲线。左：14 MeV中子激发下的MTF曲线；右：1.25 MeV伽马激发下的MTF曲线

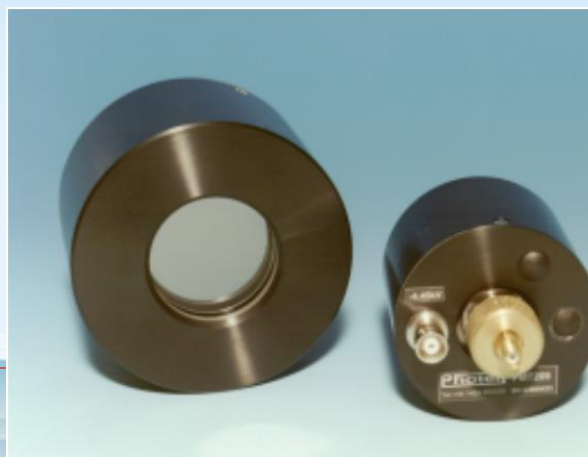


二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

我们所做的工作主要是基于应用需求，通过物理方法改善闪烁体脉冲辐射探测与成像某一方面的性能，并没有改变闪烁体材料的本征特性，因此从根本上促进闪烁探测与成像技术的进步仍然迫切需要材料科学家发现、合成新的材料。

三、脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统

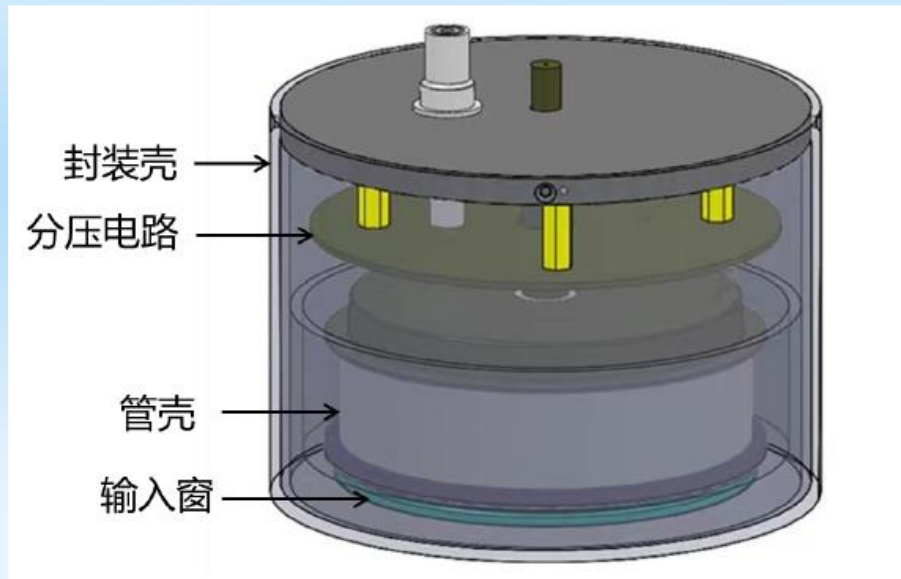
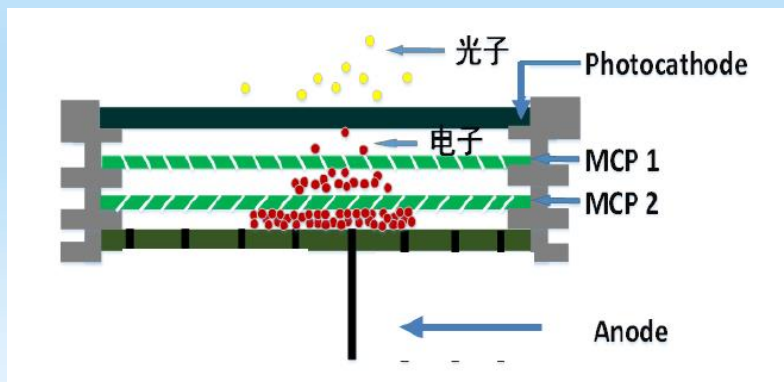
典型光电探测器



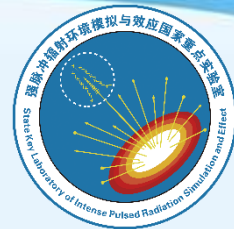
常用光电探测器件：
ETL 公司
9850/9815/9215/9428...
滨松公司
CR364/CR131/CR134...
Photek 公司
像增强器(MCP125)
全俄自动化研究所
T3/T5

三、脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统

(1) MCP型倍增管

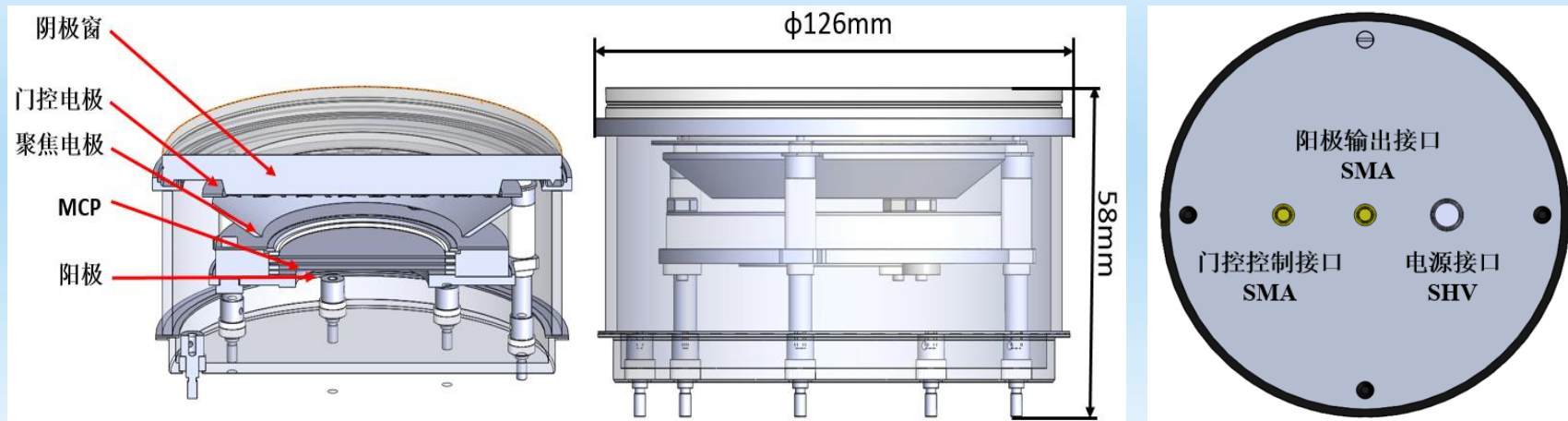


MCP型倍增管(上升时间 <1 ns, 电子增益 $>10^5$, 脉冲(100 ns)线性电流 >100 mA)



三、脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统

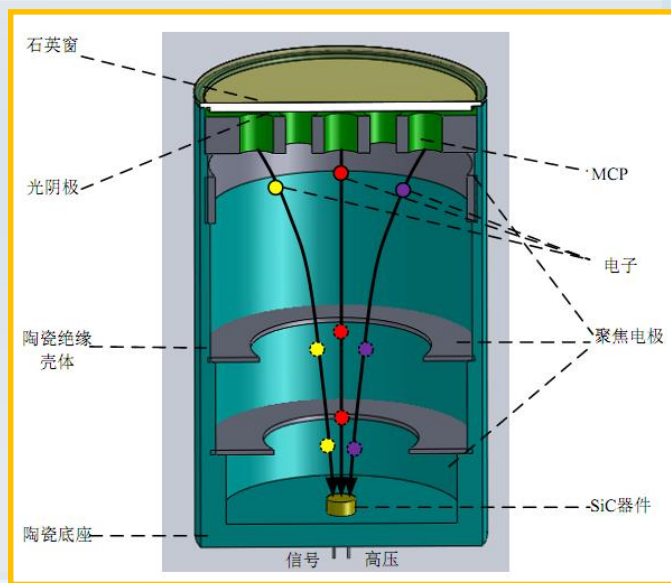
(2) 门控型MCP型倍增管



正脉冲10 V门控，上升下降沿5 ns，建立时间100 ns，消光比3000:1，脉冲线性电流300 mA

三、脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统

(3) 混合型倍增管(电子增益+半导体增益)



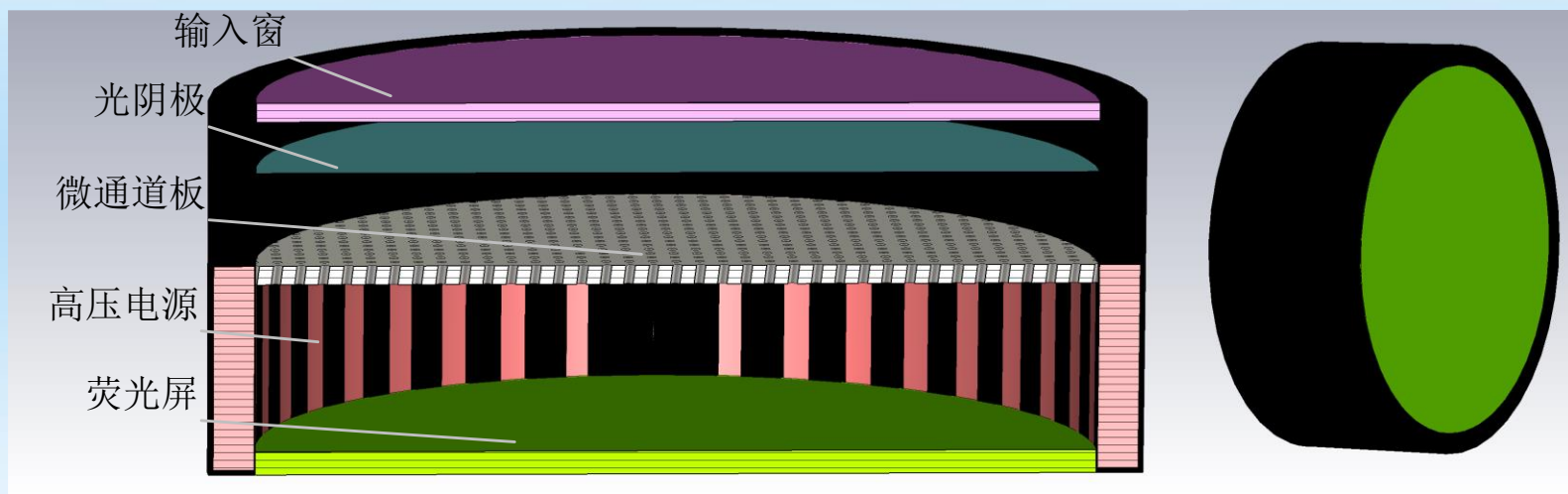
MCP-SiC-HPMT结构示意图



研制的百倍增益SiC-HPMT

三、脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统

(4) 时间选通成像器件-GaAs光阴极像增强器

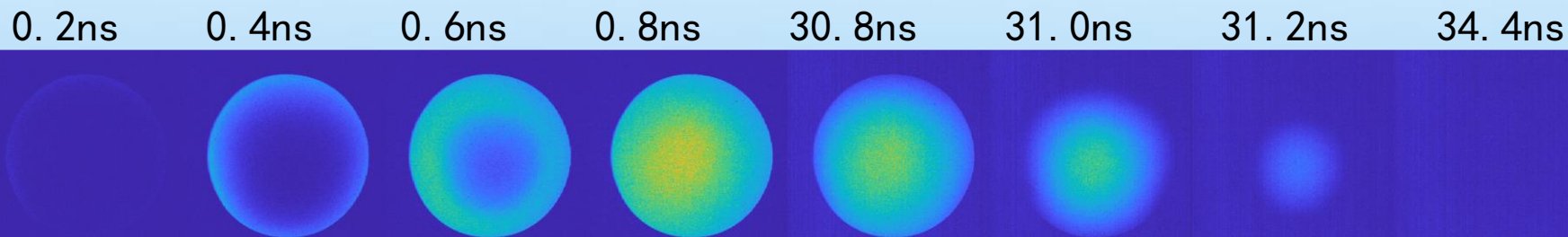


GaAs光阴极：面电阻小、量子效率高、电子发射角小、负电子亲和势

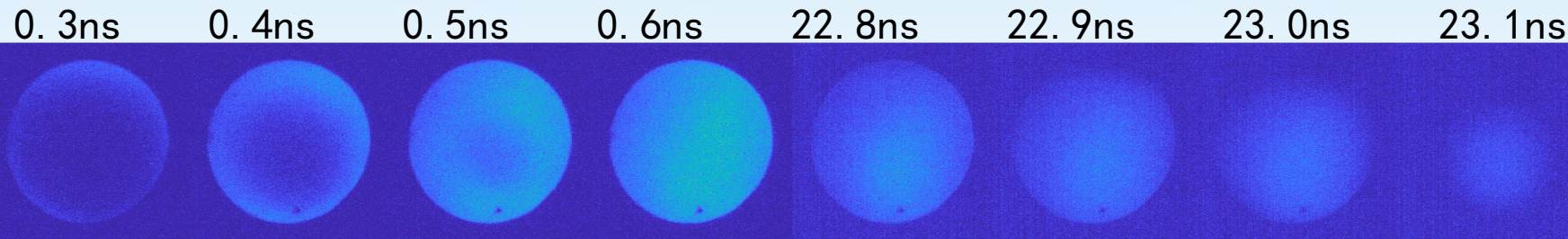
三、脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统

(4) 时间选通成像器件-GaAs光阴极像增强器

S20光阴极像增强器

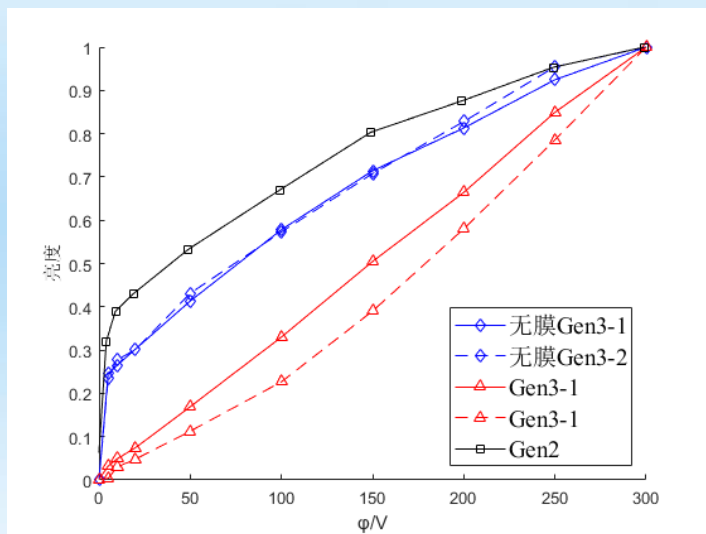


GaAs光阴极像增强器

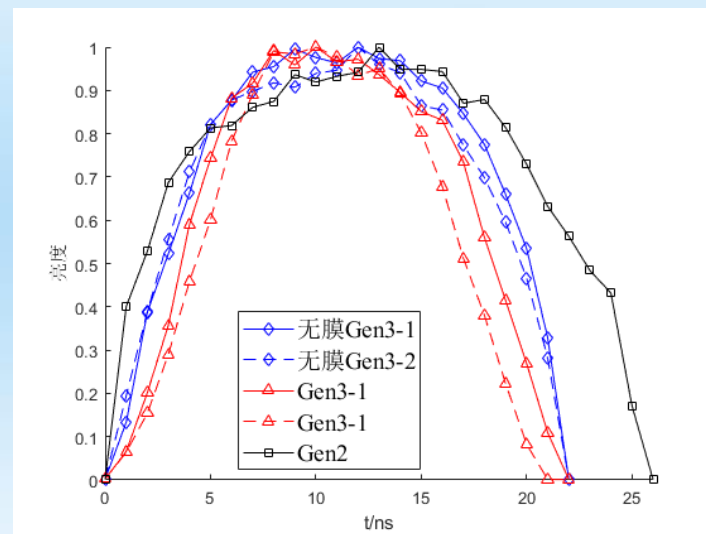


三、脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统

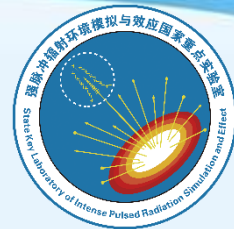
(4) 时间选通成像器件-GaAs光阴极像增强器



阴极材料与结构对电压响应的影响



阴极材料与结构对光选通开启与关闭的影响



三、脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统

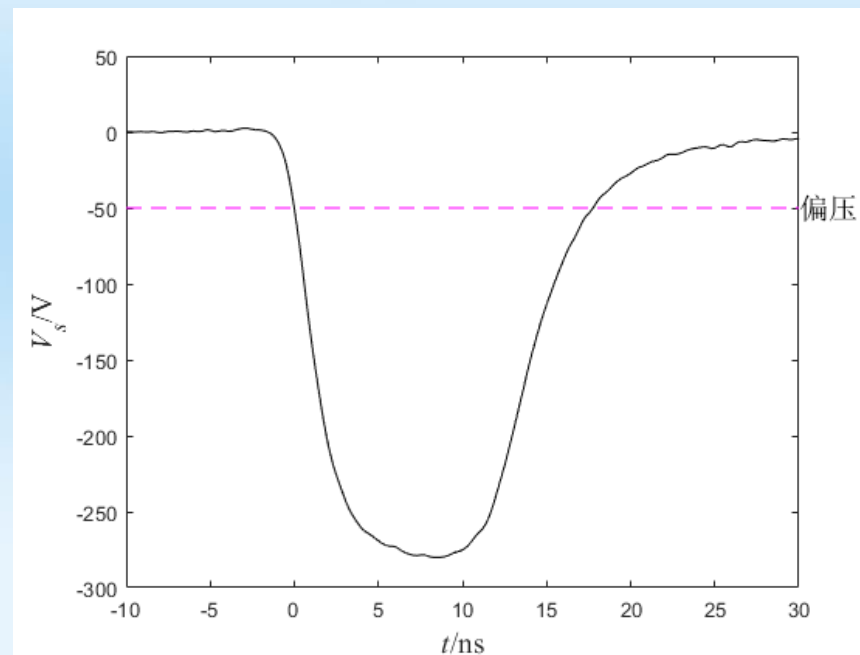
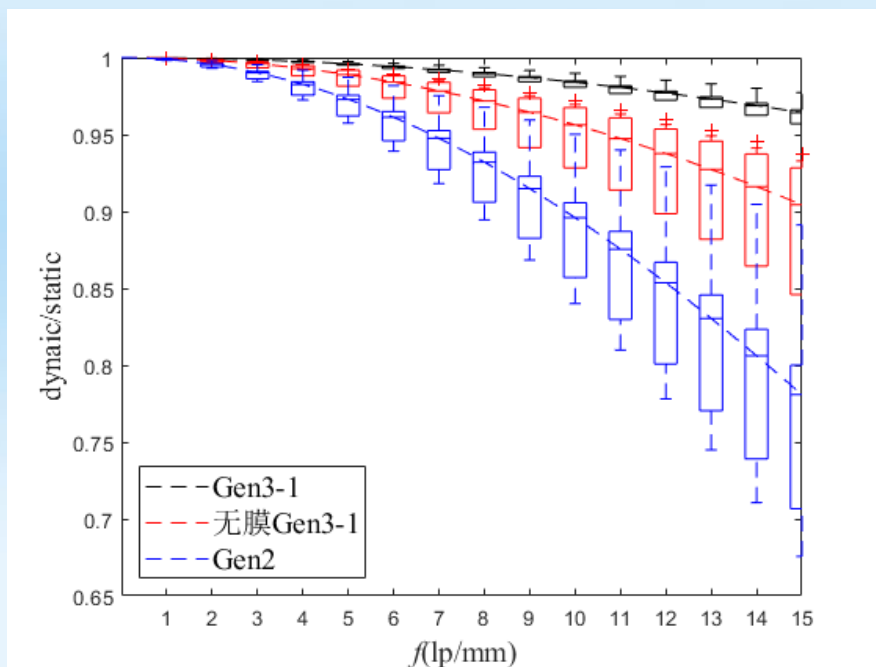
(4) 时间选通成像器件-GaAs光阴极像增强器

不同类型像增强器光选通时间与电快门之间的对比

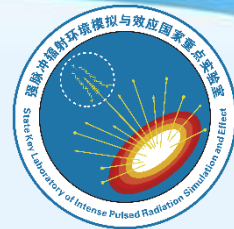
	无膜 Gen3-1	无膜 Gen3-2	Gen3-1	Gen3-2	Gen2	电快门
半高宽/ns	17.3	17.1	14.8	12.8	21.0	16.9
10%-90%/ns	5.6/5.6	6.6/7.1	5.3/7.2	5.7/6	8.2/8.8	5.0/6.2
10%-50%/ns	2.1/1.5	2.2/1.9	2.4/2.7	2.9/2.8	1.54/2.6	1.6/3.6

三、脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统

(4) 时间选通成像器件-GaAs光阴极像增强器



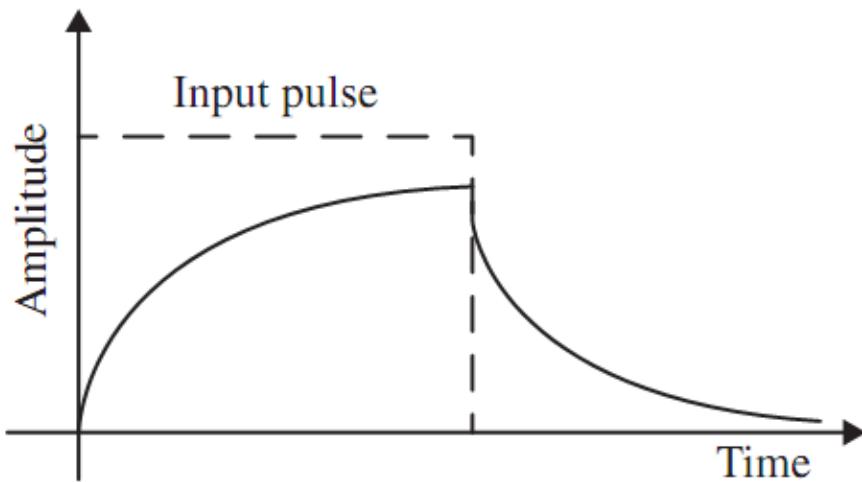
S20光阴极与GaAs光阴极像增强器动态空间分辨率 (10 ns)



三、脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统

(5) 高速数采记录仪

Central conductor Insulator Braided shield Outer covering



通常信号频率超过100 MHz时，
需要考虑电缆传输对信号的畸
变。

三、脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统

(5) 高速数采记录仪

主要特征

- 高速光纤数据传输
- 大量程覆盖（跨五个量程）
- 模块化集成式设计
- 全独立模块化设计

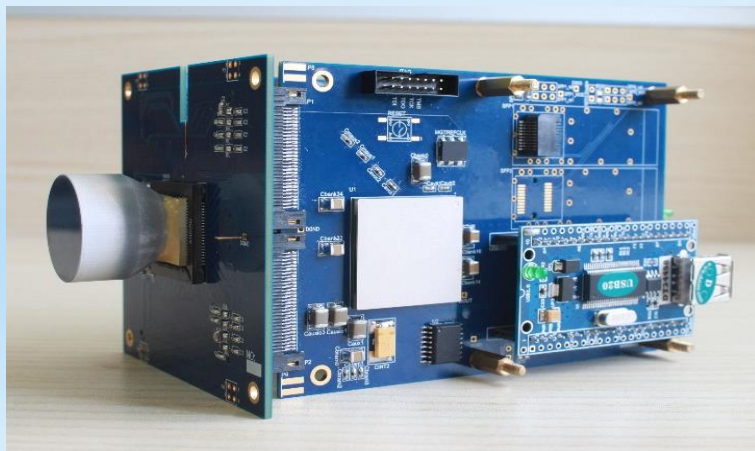


技术指标

通道数	8扩展/16分立
采样率	4GSPS
扩展量程	$\pm 2\text{mV} \sim \pm 250\text{V}$
带宽	DC~400MHz/1GHz
量化精度	12Bits
有效位	大于9位（400MHz）
记录长度	80Kpt（大于20us）
触发阈值	0.1~3.5V可调
时间精度	$\pm 100\text{ps}$ (全系统)
供电	220VAC
存储	本地Flash和Sram

三、脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统

(6) 高速CMOS相机



帧频率：~800fps@1280×1024像素；

读出噪声：25e⁻；

数字化精度：12bit；

动态范围：>52dB；

触发阈值：1~10V可调(默认值3.2V)；

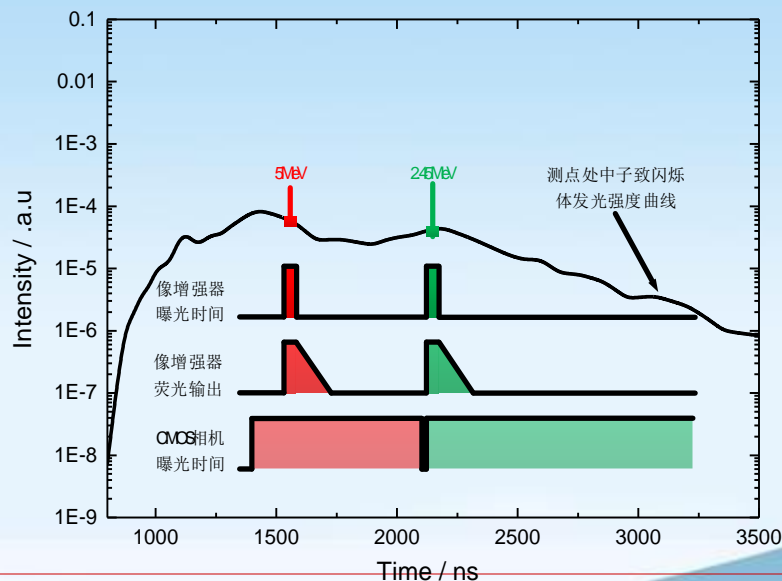
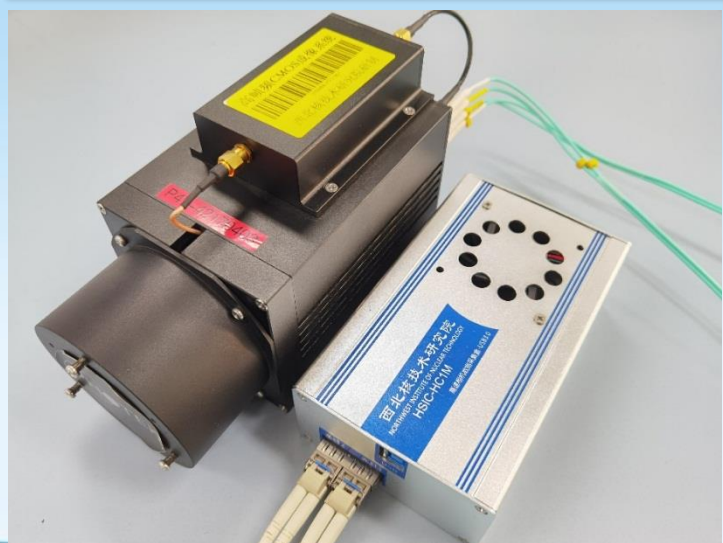
传输方式：20Gbps 光纤远程实时传输；

特殊功能：连续双帧图像采集、高速双曝光图像获取、亚微秒超短电子快门、双触发曝光控制等。

三、脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统

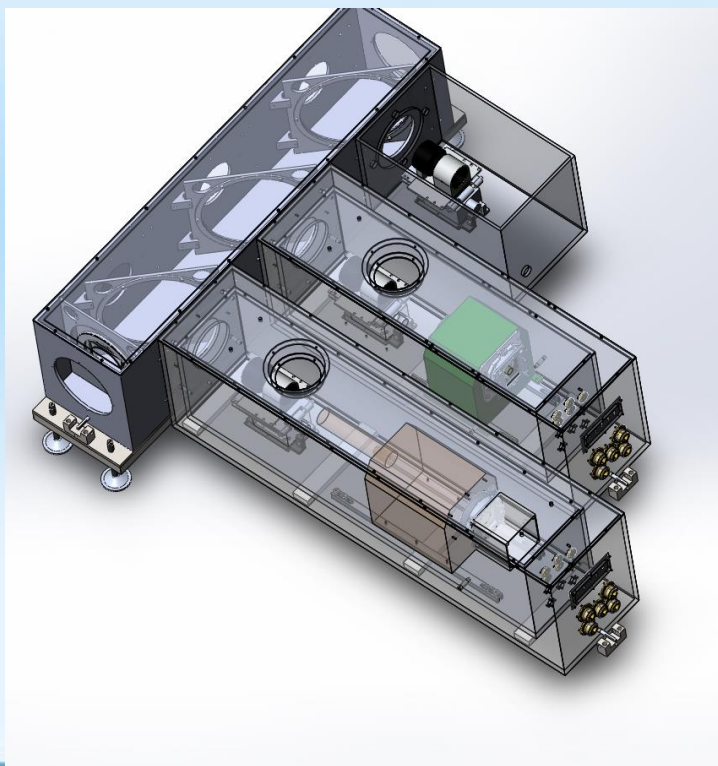
(7) 双曝光ICMOS相机

将高帧频CMOS相机的双曝光图像获取功能结合快响应短余晖像增强器(MCP125/P47)和重频快门，单台相机可获取两幅不同时刻的图像。



三、脉冲辐射闪烁探测与成像记录系统

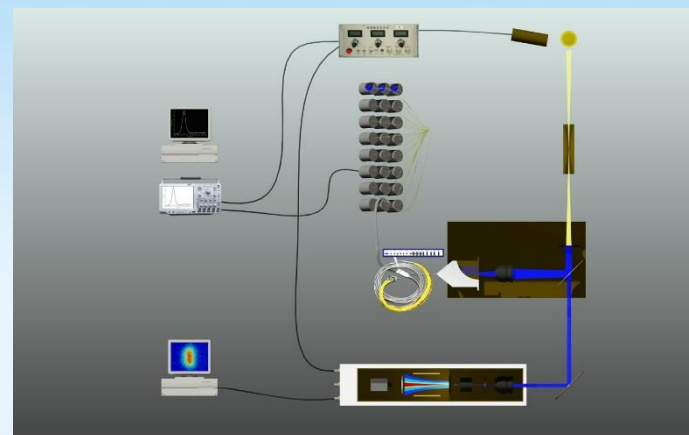
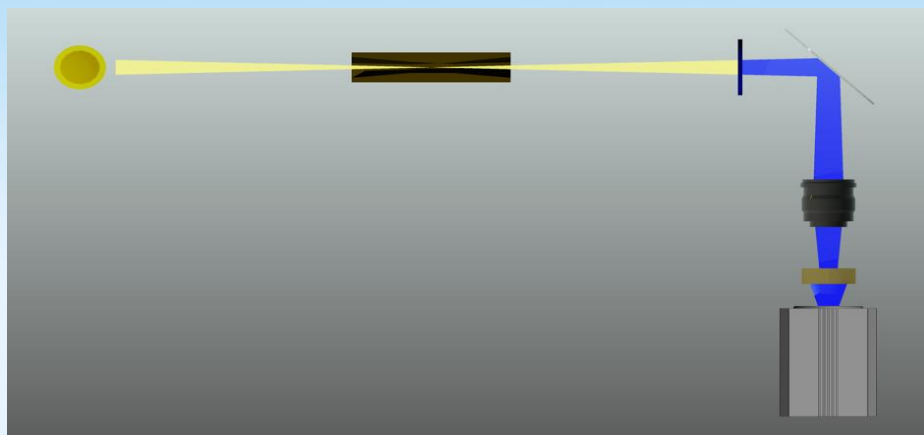
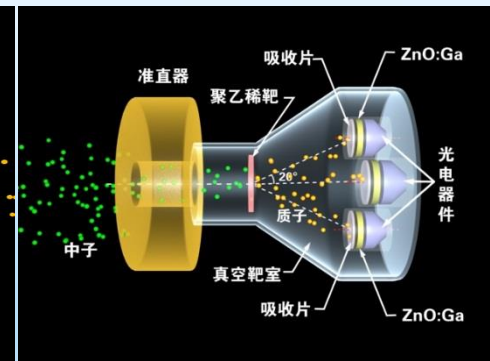
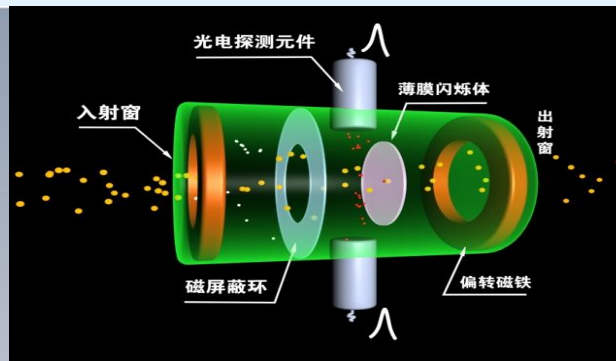
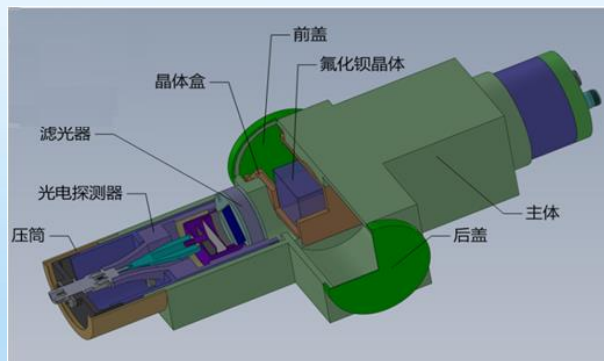
(8) 条纹相机

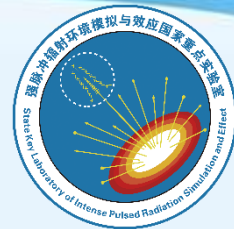


主要应用场景的技术要求：

- (1) 长狭缝(35mm),
边缘易受外界电磁场影响。
- (2) 空间分辨 >15 lp/mm(全视场)
- (3) 长扫描 >100 ns
- (4) 时间延迟 <100 ns
- (5) 扫描非线性 $<5\%$
- (6) 动态范围 >300
- (7) 耦合方式：狭缝镜头耦合、
像增强器光锥耦合。

四、典型的闪烁探测与成像系统





五、总结与展望

闪烁体

1. 亚纳秒时间衰减常数
2. 探测效率与2 mm BC408相当或更高
3. 光产额高于 10^3 /MeV
4. 空间分辨优于100 μm
5. 大面积($\Phi > 2$ inch 或更大)

光电探测器与记录系统

1. 亚纳秒时间响应
2. 百ns脉冲线性电流~A
3. 输出线性动态范围 $>10^3$
4. 动态空间分辨优于100 μm
5. 大面积($\Phi > 1$ inch 或更大)
6. 数字化采样率10 GHz, 量化位数 >12 bit, 有效位 >10 bit

当前阶段“MeV级脉冲伽马射线、中子探测与成像”对“高性能”闪烁体与光电器件的主要技术要求。闪烁体需同时满足1,2,3; 4,5是成像闪烁体的额外要求。光电探测器需同时满足1,2,3要求; 4,5是成像器件的额外要求; 6是波形数字化设备指标要求。

五、总结与展望

闪烁探测与成像技术(被动测量)当前的技术边界

Nanosecond

闪烁法、传输系统、记录系统

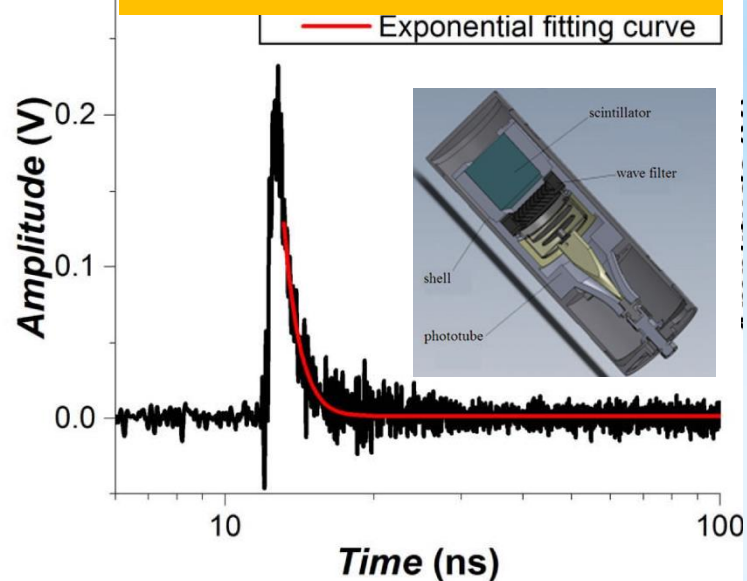
a. 亚ns响应闪烁体(BaF_2 、 ZnO 、钙钛矿等)+光电管(或MCP型倍增管)

b. 10G 数字化采样

c. 传输模拟带宽1GHz

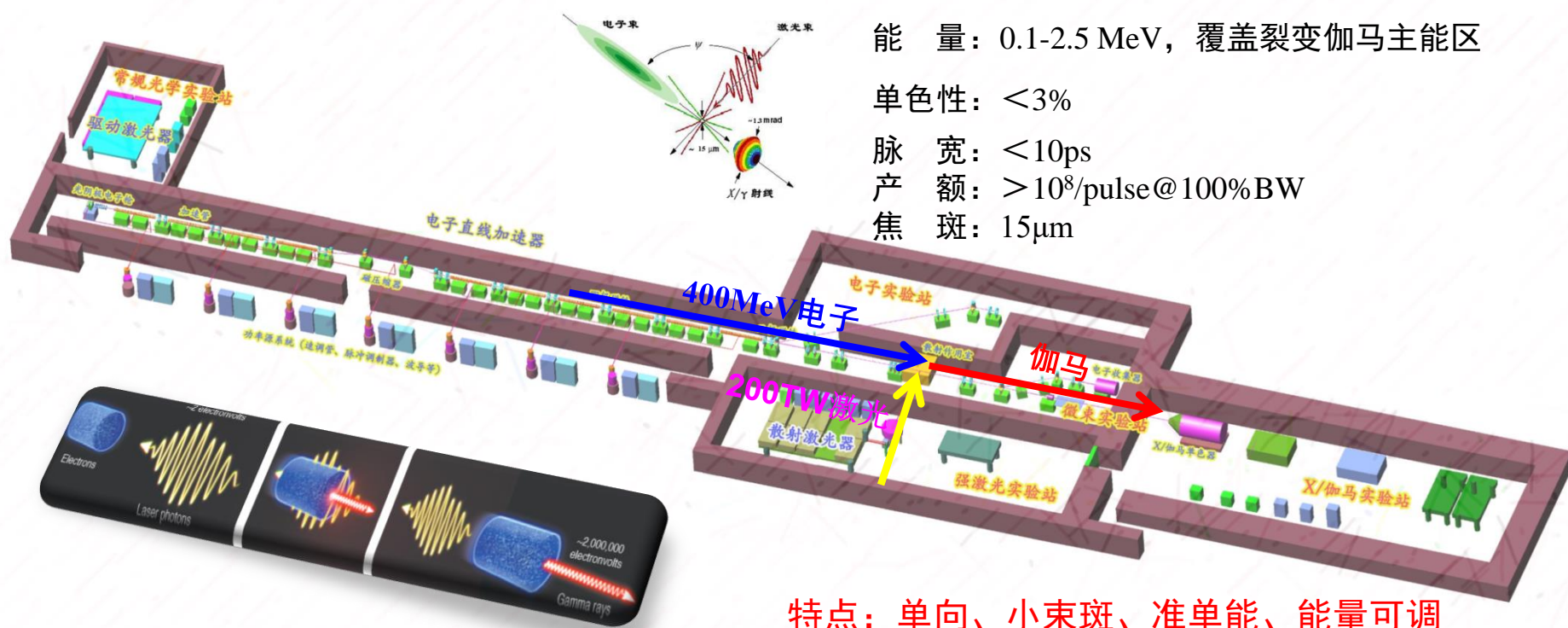
亚纳秒响应: BaF_2 闪烁体

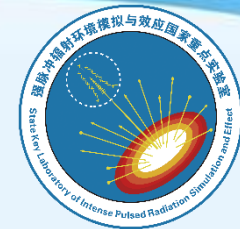
衰减时间: 0.6 ns



五、总结与展望

逆康普顿散射伽马射线源-XAGL(西安高亮)





五、总结与展望

脉冲射线物理先进诊断技术

发展针对高能高强度短脉宽的伽马射线的**强度、能量、时间宽度、时间强度谱**测量等脉冲射线物理先进诊断技术



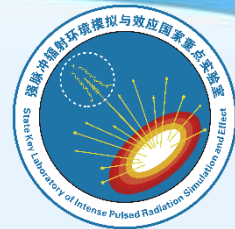
皮秒级伽马时间宽度测量

皮秒级电子束束长测量

窄谱脉冲伽马能谱测量

脉冲伽马剂量定标

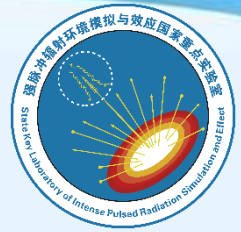
超过了闪烁法当前的技术能力，探测效率问题是非闪烁探测方法需要重点解决的问题。



五、总结与展望

报告中的内容只是研究所在脉冲辐射闪烁探测与成像研究方面的部分内容，如探测系统设计与模拟、性能研究、数据处理等方面的工作受时间所限，不能一一汇报。

受个人学识所限，错误之处在所难免，请各位老师不吝指正！

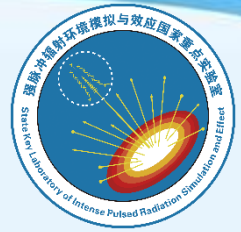


致谢

报告中涉及到的许多工作是与国内科研院所与高校共同完成的，在此表示感谢！

特别感谢多年来在基础材料、关键器件方面长期支持我所科研工作的合作单位！

感谢研究所中子、伽马、图像、电子学等研究团队提供报告素材！



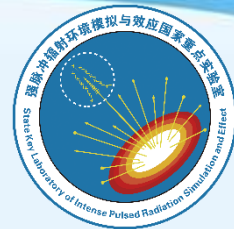
脉冲辐射闪烁探测与成像技术

谢谢！ 请批评指正！

西北核技术研究院 二所

盛亮

2022年11月



二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(1) 闪烁体表面改性-提高光收集效率

Snell定律

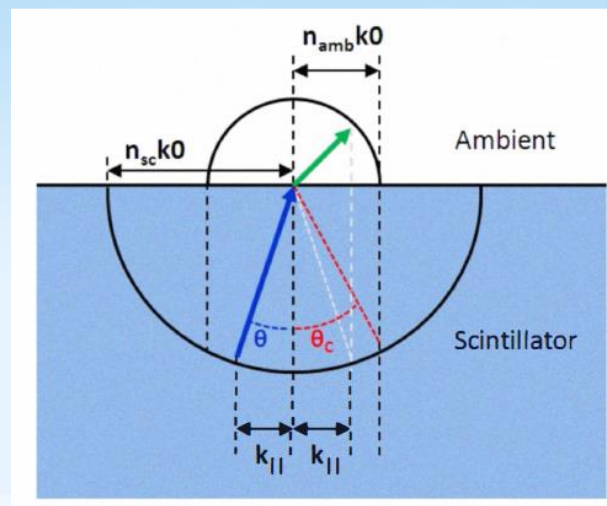
$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_{amb}}{n_{sci}}\right)$$

$$n_{sci} = 1.5 \quad \eta = 2 \frac{\int_0^{\theta_c} 2\pi R \sin \theta R d\theta}{4\pi R^2} = 1 - \cos(\theta_c) \quad \eta = 25.4\%$$

波矢理论描述

$$|k_{//}| < n_{amb} k_0 \quad |k_{//}| = n_{sci} k_0 \sin \theta$$

$$k_0 = 2\pi / \lambda$$



二、脉冲辐射探测与成像闪烁体改性技术

(1) 闪烁体表面改性-提高光产额

傅里叶变换，得到光子晶体矢量 G

$$G_0 = 2\pi / a$$

光子晶体矢量与电磁波矢量耦合，遵循平面谐波的线性叠加（Bloch Mode）模式。 $|k_{||} + mG| < n_{amb} k_0$

