

## 纯碘化铯(CsI)晶体的发光与光衰减特性研究

任国浩<sup>1</sup>, 宋朝晖<sup>2</sup>, 张子川<sup>2</sup>, 张侃<sup>2</sup>, 杨帆<sup>1</sup>, 李焕英<sup>1</sup>, 陈晓峰<sup>1</sup>

(1.中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 201800; 2. 西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘 要:** 纯碘化铯晶体是一种具有快衰减闪烁特性的新型辐射探测材料, 在伽马射线、中子和其它辐射探测技术中有重要的应用前景。本研究以 Bridgman 法所生长的纯碘化铯为对象, 分别研究了该晶体的透射光谱以及在紫外光、连续 X 射线、脉冲 X 射线和宇宙射线激发下的发射光谱、时间响应特性和沿晶体生长方向不同部位的光输出分布特点。实验测得晶体的吸收边为 240 nm, 激发和发射波长分别位于 241 nm 和 318 nm, 发光衰减时间分别为 2~3 ns 和 18~25 ns。以尺寸为 30 mm×30 mm×200 mm 的晶体籽晶端和尾端与 PMT 耦合所测得的光输出分别是 143 p.e/MeV 和 127 p.e/MeV, 尽管晶体两端的光输出存在 12.6% 的差异, 但没有观察到衰减时间长于 100 ns 的慢分量。这些性能进一步证明纯碘化铯晶体具有作为快闪烁体的优势。

**关 键 词:** 纯碘化铯; 晶体; 透光性; 发光; 衰减时间; 光输出

中图分类号: O734 文献标识码: A

## Luminescence and Decay Time Properties of Pure CsI Crystals

REN Guo-Hao<sup>1</sup>, SONG Zhao-Hui<sup>2</sup>, ZHANG Zi-Chuan<sup>2</sup>, ZHANG Kan<sup>2</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, LI Huan-Ying<sup>1</sup>,  
CHEN Xiao-Feng<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 2. Northwestern Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Pure CsI crystal is a kind of fast scintillators which can be used to detect  $\gamma$ -rays, neutrons as well as other radiation. Optical transmission and luminescence properties of pure CsI crystal grown with Vertical Bridgman method were measured under the excitation of UV, continuous X-ray, pulse X-ray as well as cosmic rays at room temperature. Cut-off edge of the grown CsI crystal reaches 240 nm, which is the shortest among the literature reported previously. Excitation and emission wavelength are 241 nm and 318 nm, respectively. The decay times of the fast intrinsic luminescence can be fitted into two components, 2~3 ns and 18~25 ns under the excitation of X-ray or cosmic rays. The light outputs measured from the crystal with size of 30 mm×30 mm×200 mm are 143 p.e/MeV and 127 p.e/MeV as its seed end and tail end were coupled with PMT, respectively. Even though the non-uniformity (12.6%) exists along the growth direction of the crystal, no significant slow component longer than 100 ns are observed. All of these properties prove that the pure CsI crystal is a promising fast scintillator.

**Key words:** pure CsI; crystal; transmittance; luminescence; decay time; light output

具有快衰减时间特性的闪烁体一直是高能物理实验、核物理和正电子断层扫描仪等技术所追求的辐射探测材料, 它有利于高计数率和纳秒、亚纳秒量级的时间分辨<sup>[1]</sup>。氟化钡(0.6 ns)<sup>[2]</sup>,  $\gamma$ -CuI(0.13 ns)<sup>[3]</sup>、

ZnO: Ga(0.7 ns) 和纯碘化铯是公认的快闪烁体, 但 BaF<sub>2</sub> 的发光波长位于 220 nm 的紫外区, 这给光探测带来了困难。 $\gamma$ -CuI 半导体生长困难, 至今只能生长厘米量级的晶体, 离实际应用还有较大的差距;

ZnO: Ga 的慢分量控制非常困难。相比较而言, 纯 CsI 晶体的衰减时间  $< 10$  ns, 而且它是立方晶系, 对称程度高, 方便生长出较大尺寸的块体单晶。所以日本 KEK 已经选用纯 CsI 晶体对其 Supper Belle 电磁量能器的端帽探测器进行更新<sup>[4]</sup>, 美国费米实验室在经过反复论证之后, 也决定在其即将建造的 Mu2e 工程中采用纯碘化铯晶体作为电磁量能器的核心探测材料<sup>[5]</sup>。

日本学者 KUBOTA 等<sup>[6]</sup>最早报道了纯 CsI 晶体的快衰减特性。为了探索纯 CsI 晶体在高能物理领域应用的可能性, 美国加州理工学院对乌克兰单晶研究所提供的纯 CsI 晶体做了进一步研究, 发现该晶体存在两个发光分量, 其主要发光波长为 310 nm, 并存在一个波长为 450 nm 的慢分量, 快/慢分量比为 30/70<sup>[7]</sup>, 抗辐照硬度是 CsI(Tl) 的 10 倍<sup>[8]</sup>。特别是, 相对于 BaF<sub>2</sub> 晶体, CsI 较短的辐射长度(1.86 cm)和较低的密度(4.51 g/cm<sup>3</sup>)可使电磁量能器的体积和重量分别缩小 15% 和 22%<sup>[7]</sup>。但根据 Amsler 的研究, 纯 CsI 晶体的光产额在室温下只有 CsI(Tl) 晶体的 5% 左右, 并且会随着温度的升高而下降<sup>[9]</sup>。较低的光产额和较低的快/慢成分比对实际应用是不利的。因此, 能否制备出具有较高光输出和较高快/慢分量比的纯 CsI 便成为该晶体能否获得实际应用的关键。另外受原料质量和晶体制备工艺的限制, 不同研究者报道的纯 CsI 晶体的闪烁性能并不完全相同, 特别是晶体光衰减时间存在很大的差异。为此, 本工作针对我们新近生长的纯 CsI 晶体进行了发光和光衰减性能研究。

## 1 实验方法

以纯度为 99.999% 的 CsI 多晶粉末为原料, 先在真空下烘干原料中的吸附水, 然后装入石英玻璃坩

埚中再对坩埚抽真空并封口。已知 CsI 晶体为立方原始格子, 空间群为 Pm3m, 晶胞参数  $a=0.45679$  nm, 无解理, 属于各向同性的晶体, 因此实验所使用的籽晶没有选择特定的结晶学方向。采用垂直 Bridgman 方法进行晶体生长, 生长出的毛坯晶体体积为  $\phi 50$  mm  $\times$  350 mm, 晶体经过切割、研磨和抛光后制作成规定形状的样品。采用 Shimadzu UV-2501PC 分光光度仪测试晶体的透光特性, 采用 Perkin-Elmer LS 50B 紫外荧光光谱仪测试晶体的激发和发射光谱, 以连续 X 射线为激发源的单色仪测试晶体的发射光谱, 以脉冲 X 射线和宇宙射线为激发源分别测试了晶体的光衰减曲线, 并对这些曲线进行拟合。以 <sup>22</sup>Na 为激发源和 HAMAMATSU 的 R2059 光电倍增管(PMT)为光探测器, 分别以晶体籽晶端和尾端与 PMT 耦合测试了晶体的光输出。

## 2 结果与讨论

### 2.1 透光特性

将尺寸为 27 mm  $\times$  35 mm  $\times$  200 mm 的纯 CsI 晶体六面抛光后(图 1(a))分别沿长轴和垂直于长轴方向测试晶体的透射光谱(图 1(b)), 从图中发现, 当沿垂直长轴方向测试时, 透光率从可见光区的 70% 以上陡然下降到紫外区的零, 截止吸收边落在 240 nm 处(图 1(b)), 这与文献[9-10]报道的吸收边(248 nm 和 250 nm)相比更加靠近紫外区, 非常逼近纯 CsI 的理论吸收边(CsI 的禁带宽度  $E_g=6.1$  eV), 说明本实验生长的晶体比文献报道的纯 CsI 晶体的质量有了明显提高。而当沿平行于长轴方向测试时, 吸收边会出现 3~5 nm 的红移, 而且透过率也明显降低(图 1(b)), 这是由于晶体自身对光的吸收和散射作用随光程的延长而增强所致。同时, 经仔细观察还会发现, 无论是纵向还是横向透射光谱, 它们在 300 nm 附近都

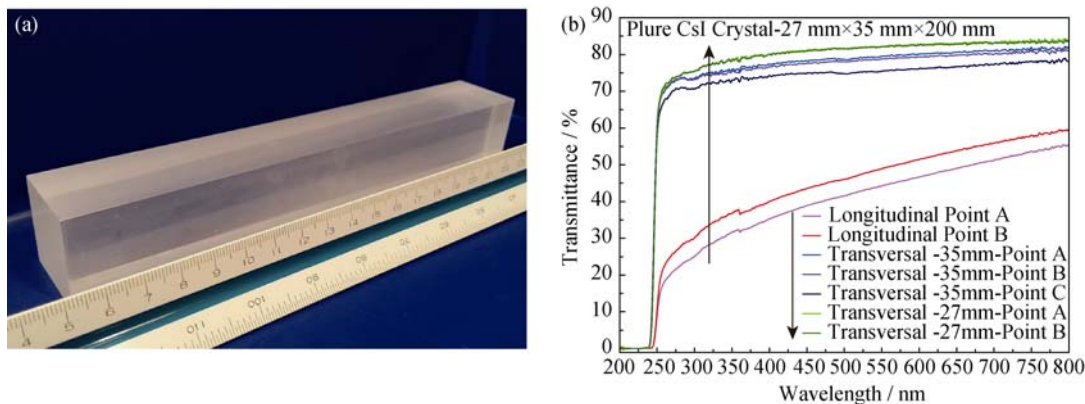


图 1 纯 CsI 晶体的照片(a)及其轴向与横向透射光谱图(b)

Fig. 1 Photo (a) and longitudinal and transversal transmittance (b) of pure CsI crystal

会有一个微弱的吸收谷, 通过与掺铊碘化铯晶体对比<sup>[11]</sup>, 该吸收谷应该是由晶体中的痕量铊污染所致(因掺铊碘化铯晶体也是本实验室的一个主要研究对象, 存在共用坩埚和容器而造成交叉污染的可能性)。而 360 nm 的突变则是由于两种光源切换所产生台阶。

## 2.2 发光特性

用紫外荧光光谱仪测试了纯 CsI 晶体的激发和发射光谱, 结果显示(图 2), 纯 CsI 晶体的激发波长位于 241 nm, 发射波长位于 318 nm。这个发射波长与 Schotanus 报道的 315 nm<sup>[8]</sup>, Amsler 和 Woody 报道的 310 nm 发射峰比较接近<sup>[12-13]</sup>。由于纯 CsI 晶体的发射波长位于紫外区, 给光探测带来一定的困难, 实际工作中需采用对紫外光敏感的光探测器, 或者在晶体表面涂上一层能够将紫外光移至可见光的荧光染料(波长位移膜), 以获得好的探测效果。而文献[10]中则没有测到这一紫外发射峰, 只在 450 nm 探测到纯 CsI 晶体的非本征发射。图 2 还显示, 除了 318 nm 这个主发光峰之外, 该晶体在 425~700 nm 波段存在微弱的发射带, 该发光带属于晶体中存在的少量慢发光成分。

以钨靶在 55 kV 电压下所产生的 X 射线为激发源, 测试了几个纯碘化铯晶体的发射光谱(图 3), 尽管所有样品都是在相同条件下测试的, 但不同样品的发射强度差别较大, 主发射峰的波长存在微小的差异, 变化范围介于 312~320 nm 之间, 这个波长与用紫外光激发所测得的发射波长(图 2, 318 nm)基本一致。同样, 该 X 射线激发发射谱在 400~575 nm 之间也存在强度较弱的发光带, 属于慢发光成分, 除 CsI-3 样品之外, 多数样品的快/慢分量比都大于

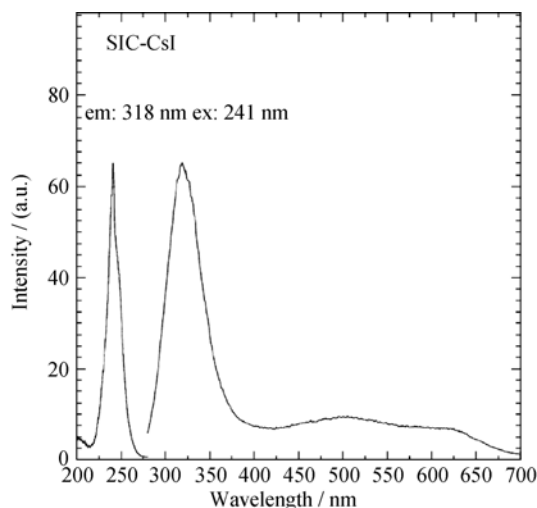


图2 纯CsI晶体的紫外激发发射光谱图

Fig. 2 Photoluminescence spectra of pure CsI crystal

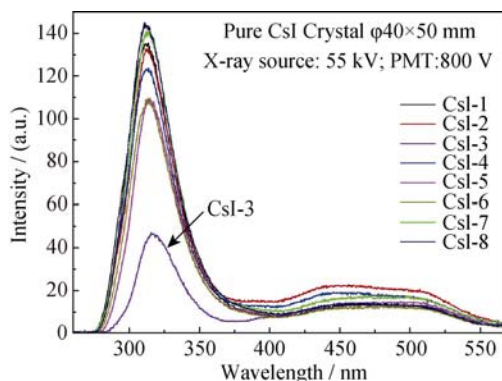


图3 纯CsI晶体的X射线激发发射光谱图

Fig. 3 X-ray excited luminescence (XEL) spectra of pure CsI crystals

80/20, 此值远大于文献[9]中报道的 30/70, 说明与慢分量有关的缺陷在本实验测试的样品中得到了有效抑制。

对于纯 CsI 晶体在 312~320 nm 之间的主发光峰, 即所谓的本征快发光, 一般认为它起源于晶体的本征发光。但实际上, 这个快分量并非单一发光组分, 而是由两个组分所构成, 根据低温下的测试结果<sup>[8]</sup>, 这两个组分的发光波长分别为 305 nm 和 340 nm, 而且它们的强度随温度和 X 射线管电压的变化呈现不同的变化趋势, 其成因源于晶体中的本征缺陷, 分别归属于 $(V_k+e)$ 和 $(H+F)$ 型自陷激子发光。而波长位于 400~700 nm 之间的发光带, 即所谓的慢成分, 其成因则存在比较大的争议。多数研究者认为慢分量起源于碘空位所引起的晶格缺陷<sup>[9, 14]</sup>, 或者是占据碘空位的氧杂质缺陷<sup>[10]</sup>。Gektin 的掺杂试验表明, Na、Ca 掺杂的 CsI 都会在 420 nm 处产生发光峰; Sb、Bi 掺杂 CsI 除了产生 420 nm 发射峰, 还会在 550 nm 处产生发光峰; Pb 掺杂还可产生 400、480 和 556 nm 等多个发光带<sup>[15]</sup>, 而且这些发光的时间常数在 0.6~3  $\mu$ s 之间变化, 属于慢衰减, 因此有人把纯 CsI 晶体中的慢衰减成分归因于杂质发光。但本实验显示, 即便是用同一批原料所生长的 CsI 晶体, 其慢分量的强度也会存在很大的差异, 因此难以用原料中的固有杂质来解释慢分量的产生。相反, 同一原料经不同的工艺生长所得晶体的快/慢分量比也差异很大, 因此其成因还有待进一步深究。

## 2.3 时间特性

### 2.3.1 脉冲 X 射线激发下的衰减时间

以图 3 中的 8#纯 CsI 样品为研究对象, 采用 GD40 光电管(响应时间为 1 ns)测量该晶体在脉冲 X 射线激发下输出的光信号, 同时采用另一只 GD40 配合 ST401 晶体监测 X 射线源的信号变化。整个测

量系统(含 GD40 光电管、信号传输电缆和 DPO4104)对 X 射线源的时间响应为: 上升时间 0.545 ns, 下降时间 1.248 ns, 半宽 0.889 ns。

闪烁体的发光包括两个过程: 发光增加过程和发光衰减过程, 前者包括入射粒子在晶体中的能量丢失、电离、激发和发射光子数达到最大值的过程, 这个过程所需要的时间被称为上升时间; 后者则是指发光强度从最大值衰减到最大值的  $1/e$  所经历的过程, 这个过程所需要的时间被称为发光衰减时间。图 4 为 8#纯 CsI 晶体对脉冲 X 射线的响应波形, 详细数据参见表 1。通过对多次实验中“GD40+ST401”的监测波形进行比较, 可以确认脉冲 X 射线源状态比较稳定, 从而拟合出 8#纯 CsI 晶体的平均上升时间 1.13 ns, 下降时间 40.76, 半高宽 5.41 ns。

根据文献[10-12]中 CsI 有两种发光成分的描述, 对 CsI 晶体实测波形的下降沿波形采用二阶指数拟合, 即

$$I(t)=I_1/\tau_1\cdot\exp(-t/\tau_1)+I_2/\tau_2\cdot\exp(-t/\tau_2)\quad (2)$$

拟合得到的衰减时间常数分别为  $\tau_1=3$  ns 和  $\tau_2=22$  ns。该值与 Schotanus 用  $^{137}\text{Cs}$  和 5.15MeV  $\alpha$  粒子激发所测得的衰减时间(2.1 ns 和 21.7 ns)几乎相同<sup>[9]</sup>, 但与 Woody 报道的  $\tau_1=7$  ns 和  $\tau_2=29$  ns<sup>[13]</sup>, Amsler 的  $\tau_1=6$  ns 和  $\tau_2=29$  ns<sup>[12]</sup> 和 Kubota 的  $\tau_1=10$  ns 和  $\tau_2=36$  ns<sup>[6]</sup> 相比, 本文拟合出的衰减时间要略快一些。图 5 中原始波形下降沿中的振荡是由于脉冲 X 射线源产生的电磁振荡带来的, 振荡对下降沿波形拟合会带来一定的不利影响。

### 2.3.2 CsI 晶体对宇宙射线的响应时间

根据符合法原理, 利用两支 ETL9815B 光电倍增管(简称 PMT)同时测量同一块 CsI(pure)晶体对宇宙射线的响应信号。两支 PMT 后端的信号传输电缆长度相同, 分别接入 DPO4104 示波器的两个独立信道。当两支 PMT 同时测量到脉冲波形信号时, 即认为该波形为 CsI(pure)在宇宙射线激励下发出的光信号。

图 6 为 CsI 晶体对宇宙射线响应的一组符合波

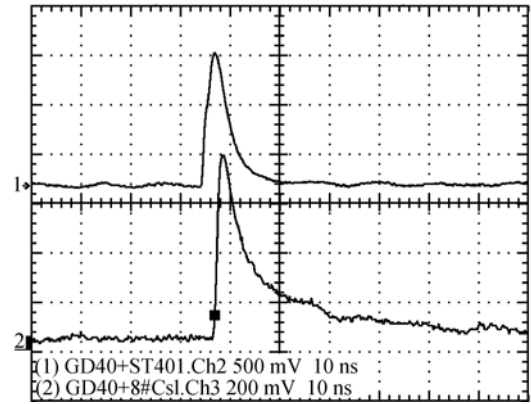


图 4 8#CsI 晶体对脉冲 X 射线的响应波形  
Fig. 4 Response of pure CsI crystal to the pulse X-ray

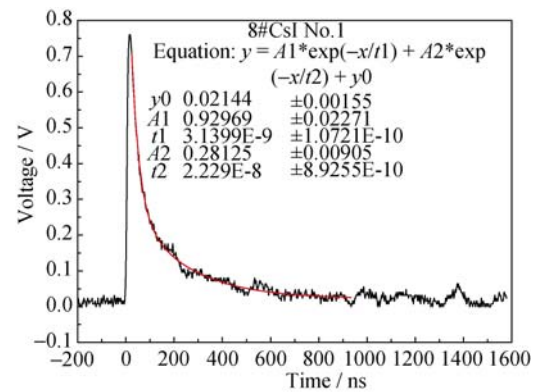


图 5 脉冲 X 射线激发下 8#CsI 晶体的下降沿波形拟合  
Fig. 5 Decay curve and its fitted line of 8# CsI crystal excited by pulse X-ray

形, 图中信道 1(Ch1)和信道 2(Ch2)为两支 PMT 同时测量得到的波形。两个信号峰值时刻的时间差是由于两路测量系统(PMT、信号电缆和示波器信道)的时间响应差别造成的。图 6 中两支 PMT 测量得到的波形信号形状基本一致。对多组波形信号的时间参数取平均值得到的结果列于表 2 中。

表 2 中 CsI 晶体的上升时间响应较表 1 中所列数据要慢一些, 这主要是由于表 2 实验中使用的 PMT 自身时间响应长达 3 ns 左右, 比表 1 实验中使用的光电倍增管时间响应要慢。考虑到两次实验中使

表 1 8#CsI 对脉冲 X 射线的时间响应参数  
Table 1 Response of 8# CsI crystal to the pulse X-ray

Test No.	8#CsI			Reference		
	Rise time/ns	Decaytime/ns	FWHM/ns	Rise time/ns	Decaytime/ns	FWHM/ns
1	1.07	37.31	5.29	1.85	7.96	4.79
2	1.16	39.88	5.36	1.86	7.85	4.97
3	1.17	44.96	5.50	1.95	8.40	4.90
4	1.10	40.88	5.49	1.85	7.25	4.80
mean	1.13	40.76	5.41	1.88	7.87	4.87



表 2 CsI(pure)晶体对宇宙射线的时间响应  
Table 2 Response of 8# pure CsI crystal to the cosmic ray

Sample	Rise time /ns	Decay time/ns	FWHM/ns
8#CsI(pure)	3.678	25.509	8.003

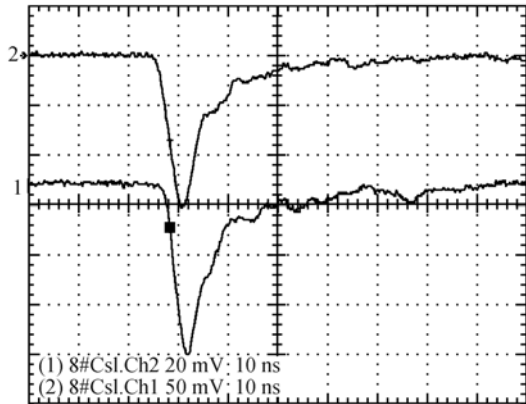


图 6 8#CsI 晶体对宇宙射线的响应波形  
Fig. 6 Response of 8# CsI crystal to the cosmic ray

用的光电转换器件时间响应上的差别, 可以认为两次实验的结果基本一致。脉冲 X 射线响应实验中光电倍增管的时间响应更快, 对测试波形时间性能的贡献更小, 因此认为该测试结果更加接近晶体自身的性能。

两次实验中, 信号波形的下降沿都有一个明显的平台, 这是晶体发光中慢成分发光与快成分发光叠加在一起造成的。根据图 7 中对实验波形下降沿的二阶

指数拟合结果, 两个成分的发光衰减时间分别为  $\tau_1=2\sim3$  ns 和  $\tau_2=18\sim25$  ns。这个结果与脉冲 X 射线响应实验的结果完全吻合, 与大多数文献报道的数据相比(表 3),  $\tau_2$  基本吻合, 只有  $\tau_1$  差异较大。对于衰减时间在 ns 级的信号, 无论是探测系统还是数据传输/采集/记录系统, 或是数据的处理, 都存在较大的不确定度, 各种系统因素和环境因素的影响也会在测试过程中有所体现。另外, 根据所测晶体紫外吸收边更接近其理论吸收边的事实, 我们有理由认为高的晶体质量也是其光衰减速度加快的原因之一。

2.4 光输出与快慢分量比

以  $^{22}\text{Na}$  为激发源和 HAMAMATSU 的 R2059 光电信增管(PMT)为光探测器, 用 Tyvek 包裹尺寸为 30 mm×30 mm×200 mm 的纯 CsI 晶体。为了比较晶体籽晶端(A)和尾端(B)两端的差异, 分别以 A(籽晶端)、B(尾端)端与 PMT 直接耦合, 测得它们在不同时间门宽下的多道能谱, 拟合出的光电子产额随时间门宽的变化如图 8 所示。由图 8 可见, 两个端面耦合所测得的衰减时间几乎相同, 分别是 29 ns 和 28 ns, 对应的光输出: 籽晶端(A)为 143 p.e./MeV, 尾端 127 p.e./MeV, 两者相差 12.6%。显然, 籽晶端

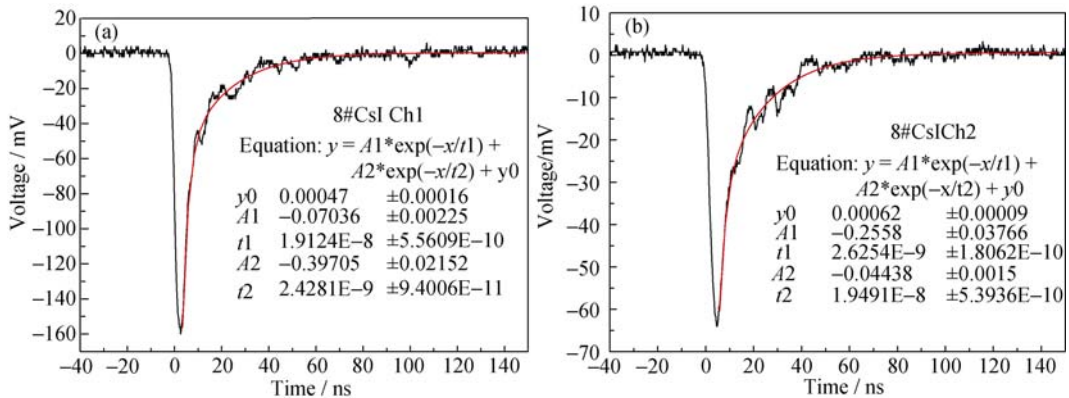


图 7 宇宙射线激发下从信道 1(a) 和信道 2(b) 所测得的 CsI 晶体下降沿的波形及其拟合曲线  
Fig. 7 Decay curves and their fitted lines from channel 1 and channel 2 of pure CsI crystal excited with cosmic ray

表 3 本文所测试的纯 CsI 衰减时间与以往文献报道值的对比  
Table 3 Comparison of decay times of pure CsI reported previously and those tested in this work

	Kubota	Woody	Schotanus	Amsler	Belsky	This work
$\tau_1$ / ns	10	7	2	6±1	5-9	2-3
$\tau_2$ / ns	36	29	22	28±2	10-25	18-25
Reference	[6]	[13]	[9]	[12]	[16]	

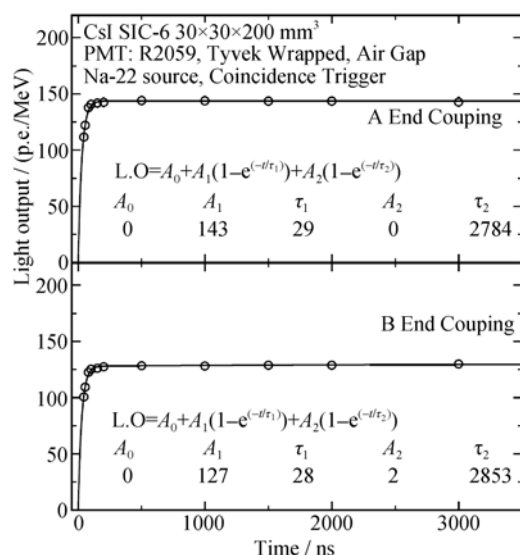


图 8 CsI 晶体分别用 A 端(上)、B 两端(下)耦合时在不同时间门宽下所测得的光输出

Fig. 8 Light outputs of CsI crystal when it is coupled by A (top) and B (bottom) ends and integrated from different time gate

的晶体质量要优于尾端,说明对于长尺寸晶体而言,即便是本征发光,依然存在发光不均匀性的现象。值得注意的是,从 A、B 两端所测的慢分量分别为 0 和 2 p.e./MeV,超过 100 ns 之后光输出不在随积分时间的增加而变化,呈现出一条水平直线,说明与慢分量有关的晶体缺陷在本次测试的样品中已经得到有效抑制。

### 3 结论

纯碘化铯晶体的紫外截止吸收边约为 240 nm,在可见光区的透过率达到 80%,该值与理论计算值非常接近。在紫外光和连续 X 射线激发下的发射波长分别位于 318 nm 和 312 nm 附近,除此之外,它们在 440 nm 附近存在一个很宽的发光带,前者属于纯碘化铯晶体的本征发光,后者则是与晶体缺陷有关的发光。由于实验所测晶体的紫外截止吸收边最接近理论值,且发光成分中的慢分量低于已有的文献报道值,因此可认为实验生长的样品质量是迄今为止最好的。同时,无论以脉冲 X 射线或是宇宙射线为激发源所测得纯 CsI 晶体的两个发光衰减时间均为 2~3 ns 和 18~25 ns,具有很好的一致性,因此提出本实验所测得纯碘化铯晶体的发光波长和衰减时间更能代表该晶体的真实性能。这些结果进一步确认了纯碘化铯晶体是一种难得的快衰减闪烁

材料。

致谢:本文中的光输出数据是由美国加州理工学院朱人元教授帮助测试的,作者在此特致谢意!

### 参考文献:

- [1] RODNYI P A. Progress in fast scintillators. *Radiation Measurements*, 2001, **33**: 605-614.
- [2] BIASINIA, CASSIDY D B, DENG S H M, *et al.* Suppression of the slow component of scintillation light in BaF<sub>2</sub>. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 2005, **553**: 550-558.
- [3] GU MU, GAO PAN, LIU XIAO-LIN, *et al.* Crystal growth and characterization of CuI single crystals by solvent evaporation technique. *Mater. Res. Bull.*, 2010, **45**: 636-639.
- [4] KUZMIN A. Endcap calorimeter for SuperBelle based on pure CsI crystals. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 2010, **623**: 252-254.
- [5] ATOANOV N, BARANOV V, BUDAGOV J, *et al.* Design and status of the Mu2e electromagnetic calorimeter. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 2016, **824**: 695-698.
- [6] KUBOTA S, SAKURAGI S, HASHIMOTO S, *et al.* A new scintillation material: Pure CsI with 10 ns decay time. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 1988, **268**: 275-277.
- [7] WEI ZONG-YING, ZHU REN-YUAN. Study on undoped CsI crystals. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 1993, **326**: 508-512.
- [8] WU Z, YANG B, TOWNSEND P D. Radioluminescence and thermoluminescence properties of X-ray-irradiated pure CsI. *J. Luminescence*, 2008, **128**: 1191-1196.
- [9] SCHOTANUS P, KAMERMANA R, DORENBOS P, *et al.* Scintillation characteristics of pure and Tl-doped CsI crystals. *IEEE. Trans. Nuc.l Sci.*, 1990, **37**(2): 177-182.
- [10] SHEN DING-ZHONG, DENG QUN, YUAN XIANG-LONG, *et al.* Luminescent Performance of pure CsI crystals. *Journal of Inorganic Materials*, 1997, **12**(3): 273-278.
- [11] BABIN V, KRASNIKOV A, WIECZOREK H, *et al.* Luminescence of complicated thallium centers in CsI: Tl. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 2002, **486**: 486-489.
- [12] AMSLER C, GROGLER D, JOFFRAIN W, *et al.* Temperature dependence of pure CsI: scintillation light yield and decay time. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 2002, **480**: 494-500.
- [13] WOODY C L, LEVY P W, KIERSTEAD J A, *et al.* Readout techniques and radiation damage of undoped Cesium Iodide. *IEEE. Trans. Nuc.l Sci.*, 1990, **37**(2): 492-499.
- [14] HAMADA M M, NUNOY Y, KUBOTA S, *et al.* Suppression of the slow emission component in pure CsI by heat treatment. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 1995, **365**: 98-103.
- [15] BABIN V, KRASNIKOV A, NIKL M, *et al.* Luminescence and relaxed excited state origin in CsI: Pb crystals. *J. Luminescence*, 2003, **101**: 219-226.
- [16] BELSKY A N, VASILEV A N, MIKHAILIN V V, *et al.* Time-resolved XEOL spectroscopy of new scintillators based on CsI. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(1): 806-809.