

ХАРАКТЕРИСТИКИ БЫСТРЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ (ЧАСТЬ II)

И. Багатурия*, Ю. Тевзадзе**, И Треков**, Б Чиладзе**

* Университет им И. Чавчавадзе

** Институт Физики Высоких Энергий им Джавахишвили Тбилисского Государственного Университета

Аннотация.

Изучаются временные и амплитудные характеристики неорганических сцинтилляторов LYSO – силиката лютеция и GSO – силиката гадолия и сравниваются с характеристиками других кристаллов, например, BGO – германат висмута. Сцинтилляционные кристаллы (в данном случае LYSO) являются основной частью (вместе с ФЭУ – фотоэлектронным умножителем) ECAL – электромагнитного калориметра. ECAL является основным детектором международного эксперимента COMET – Coherent Muon to Electron Transition [1].

Contact author – I.Tevzadze: iuri.tevzadze@tsu.ge

ИФВЭ ТГУ является членом COMET сотрудничества.

Введение. Характеристики сцинтилляционных кристаллов изучаем с помощью специального стенда (установки), который выделяет из космических лучей μ - мюоны [2]. μ - мюоны взаимодействуют с сцинтилляционным кристаллом. Назначение ECAL – точное измерение энергии электронов из $\mu \rightarrow e$ конверсии. Поэтому ECAL должны собрать из кристаллов с высокими временными и амплитудными характеристиками.

Анализ Экспериментальных Данных

С помощью нашей установки [2] в которой входят: ФЭУ – фотоэлектронный умножитель, сцинтиллятор, толстый поглотитель тяжелого металла, который пропускает только μ - мюоны (из космических лучей) и осциллоскоп, изучаем следующие характеристики C_k -сцинтилляционных кристаллов:

1. $U_A[mv]$ – амплитуда выходного импульса.
2. $\Delta t[nsec]$ – ширина импульса на полувысоте.
3. $\tau[nsec]$ - время высвечивания.
4. $LY[photon/MeV]$ – световой выход.
5. $R_M[cm]$ – радиус Мольер.
6. $X_0[cm]$ – радиационная длина.

Для наглядности амплитуда импульса и временные характеристики выводятся на экране осциллоскопа и компьютера.

Таблица №1

Характеристики неорганических сцинтилляционных кристаллов

Тип кристалла	$\langle \tau \rangle [nsec]$ время высвечивания	$\Delta t [nsec]$	$U_A [mv]$	$R_M [cm]$ Радиус Мольер	LY - световой выход [$photon/MeV$]
LYSO	40		143±5	2,07	27000
GSO	50 ^f /600 ^s [3]		140±2	2,23	8000-11500
CsI(Tl)	1280±80	351±12	104±6	3,57	5·10(4)
BGO	450±38	110±6	400±20	2,30	8200

LY – световой выход кристалла можно оценить, как: а) абсолютную величину – количество излученных фотонов, когда в кристалле поглощается энергия равная одного MeV, б) относительную величину – излучение NaI(Tl)=100. надо отметить, что NaI(Tl) имеет большую выходную амплитуду, но τ - время высвечивания равно ~ 230 nsec (медленный кристалл) [3].

Таблица №2

Характеристики неорганических сцинтилляторов
(Обозначения “f” и “s” характеризуют быструю и медленную компоненту, соответственно)

Кристаллы	<i>LYSO</i>	<i>GSO</i>	<i>CsI (pure)</i>
$\rho[\text{gr}\cdot\text{cm}^{-3}]$ плотность	7,40	6,71	4,51
$X_0[\text{cm}]$ – радиационная длина	1,14	1,38	1,86
$R_M[\text{cm}]$ – Мольер радиус.	2,07	2,23	3,57
τ [nsec] - время высвечивания	40	600 ^s ; 56 ^s	35 ^s ; 6 ^s
$\Lambda_{\text{max}}[\text{nm}]$ – длина волны	420	430	420 ^s ; 310 ^f
световой выход (NaI(Tl)=100)	83	3 ^s ; 30 ^s	3,6 ^s ; 1,1 ^s

Таблица №3

Экспериментальные и модельные характеристики кристаллов *LYSO* и *GSO* (программа *GIANT*)

τ [nsec] - время высвечивания	<i>LYSO</i>		<i>GSO</i>	
	<i>EXP</i>	<i>MOD</i>	<i>EXP</i>	<i>MOD</i>
	40	47	50 ^f ; 650 ^s	60 ^f ; 420 ^s 87%; 13%
<i>LY</i> (Photon/MeV) световой выход	25000-32000	31000	8000-11500	8400

Кроме того с помощью программы *GEANT* – 4 были оценены τ [nsec] - время высвечивания и LY - световой выход для кристаллов *LYSO* и *GSO*:

$$\tau(LYSO) MOD = 47 \text{ nsec} , \tau(LYSO) EXP = 40 \text{ nsec}. \tag{1}$$

Также хорошо согласуются между собой модельные и экспериментальные значения для LY - светового выхода (см. табл.№3).

Время высвечивания - τ [nsec] для кристаллов *BGO* и *CsI(Tl)* (наши данные) хорошо согласуются с литературными данными (см. табл. 1 и [3]).

Рассмотрим другие характеристики C_k - сцинтиляционных кристаллов:

$R_M[\text{cm}]$ – радиус Мольер, характеризующей размер электромагнитного ливня в поперечном направлении определяется так

$$R_M[\text{cm}] = 0,027 X_0(Z+1,2) \tag{2}$$

где Z – средний заряд кристалла, X_0 - радиационная длина кристалла. характеризующая эффективность поглощения данным веществом γ - квантов, электронов и позитронов.

Мольер радиус $LYSO$ $R_M=2,07cm$ (а $R_M(GSO)=2,23cm$ и $R_M(CsI)=3,57cm$) (табл.№2).

Радиационная длина $X_{0\text{ кристалла } LYSO}=1,14$; меньше чем X_0 для GSO и CsI (см. табл.№2). Именно маленькие значения R_M и X_0 для кристалла $LYSO$ определяет, то что $LYSO$ имеет самый большой световой выход. $LY(LYSO)=27000\text{ Photon/MeV}$. Световой выход. $LYSO$ значительно превосходит световые выходы кристаллов BGO и CSO (табл. №1),

U_A – значения выходных импульсов кристаллов BGO и $NaI(Tl)$ не малы, но ихние $\tau[nsec]$ - время высвечивания значительно превосходит $\tau(LYSO)$. Они - BGO и $NaI(Tl)$ являются медленными кристаллами [1,3]. (таблица № 1).

$$\tau(LYSO) = 40nsec, \tau(BGO) = (450\pm 38)nsec, \tau(CsI(Tl)) = (1280\pm 80)nsec \quad (3)$$

Как выше было сказано световой выход $LYSO$

$LY(LYSO) = 27000\text{Photon/MeV}$. Когда температура растёт от 20^0 до 40^0 световой выход $LYSO$ уменьшается на 8 %. Кристалл $LYSO$ обрабатывается легко. Можно изготовить кристаллы $LYSO$ больших размеров и без примесей (что очень важно) в отличие от GSO . Энергетическое и временное разрешения кристалла $LYSO$ гораздо лучше, чем те же величины для BGO [3].

Энергетическое разрешение BGO равно 22% (а для $LYSO$ 12 %). Временное разрешение для BGO равно $9,2nsec$ (а для $LYSO$ -- $1,15nsec$).

Если кристалл $LYSO$ завернут тефлоновой лентой, то коэффициент отражения равно 93% -- теряется только 7% фотонов.

Рассмотрим кристалл GSO – силикат гадолиния, который сам является сцинтиллятором; но его световой выход мал. Световой выход и время высвечивания не зависят от типа налетающего агента (частицы). Изготовление больших кристаллов является проблемой из-за возникновения трещин. GSO самый радиационно стойкий кристалл. Однако производство кристаллов GSO , особенно больших размеров относится к числу наиболее дорогих.

Свойства кристалла BGO – германата висмута, τ - время высвечивания зависит от температуры, когда температура меняется в пределах $(0-40)^0$ градусов значение τ изменяется от $(450-200)nsec$. LY - световые выходы BGO и GSO приблизительно одинаковы (Таблица №1).

Световой выход BGO – германата висмута может быть сильно повышен путем снижения температуры [1,3]. Достоинством BGO является его хорошие механические свойства при обработке и негигроскопичность. Эффективность регистрации γ -излучения у BGO большая. $\tau(BGO) > \tau(LYSO)$.

Кристаллы йодида цезия - $CsI(Tl)$ слабо гигроскопичны, механически легко обрабатывается. Материал йодида цезия позволяет изготавливать детекторы самых разнообразных форм и размеров. Время высвечивания - τ состоит из нескольких компонент и довольно большое (в среднем $\sim 1300nsec$. таблица №1) [3].

Спектр излучения $CsI(Tl)$ имеет максимум при $\lambda=560nm$ т. е. $\lambda^{max}=560nm$ и сдвинут существенно вправо от максимумов по сравнению с другими кристаллами (напр.

$\lambda^{max}(NaI(Tl))=410nm$; $\lambda^{max}(GSO)=440nm$; $\lambda^{max}(BGO)=480nm$; $\lambda^{max}(LYSO)=430nm$). По этому среднее значение выходного импульса - $\langle U_A \rangle$ для $CsI(Tl)=(104\pm 6)mv$, что существенно меньше, чем среднее значение выходных импульсов для $NaI(Tl)$, BGO и $LYSO$ $(1620\pm 100)mv$, $(400\pm 20)mv$, $(144,00\pm 3,00)mv$ соответственно. (см. табл. и рис.)

К числу недостатков $CsI(Tl)$ и $NaI(Tl)$ относится их довольно высокое послесвечение, - что значительно ограничивает скорость счета.

Неактивированный $CsI \equiv CsI(pure)$. Без добавления талия в йодид цезия, его световой выход уменьшается в 12 раз, но время высвечивания сильно сокращается. Спектр высвечивания кристалла состоит из двух компонент. Их максимумы находятся соответственно, при $\lambda^{max}=310^f$ и $\lambda^{max}=420^s$. Время высвечивания первой компоненты (f) составляет $6nsec$, второй компоненты (s) $35nsec$. Величина второй (медленной) компоненты зависит от технологии изготовления кристалла. Полагают, что эта компонента обусловлена наличием дефектов в структуре кристалла [3].

С понижением температуры LY - световой выход и время высвечивания CsI возрастают и при температуре жидкого азота становятся примерно такими, как и у $CsI(Tl)$ $5 \cdot 10(4)$ $Photon/MeV$ и $1300nsec$ [3].

Заключение. Изучение характеристик разных сцинтилляционных кристаллов ($LYSO$, CSO , $CsI(Tl)$, $CsI(pure)$ и BGO) показал, что оптимальными характеристиками обладают кристаллы $LYSO$ – силиката лютеция; а именно:

1. U_A – амплитуда выходного импульса = $(144\pm 3)mv$,
2. τ - время высвечивания = $40 nsec$,
3. LY – световой выход = $27000 photon/MeV$,
4. R_M – Мольер радиус = $2,07cm$

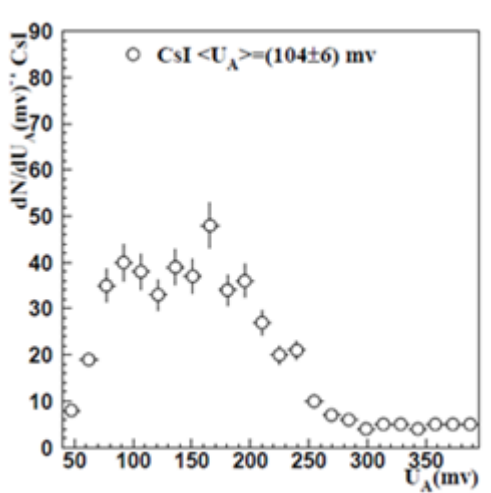


Рис.1. $U_A[mv]$ – амплитуда выходного импульса для $CsI(Tl)$

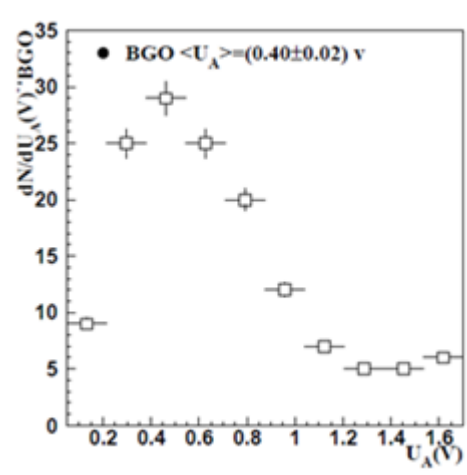


Рис. 2. $U_A[mv]$ – амплитуда выходного импульса для BGO

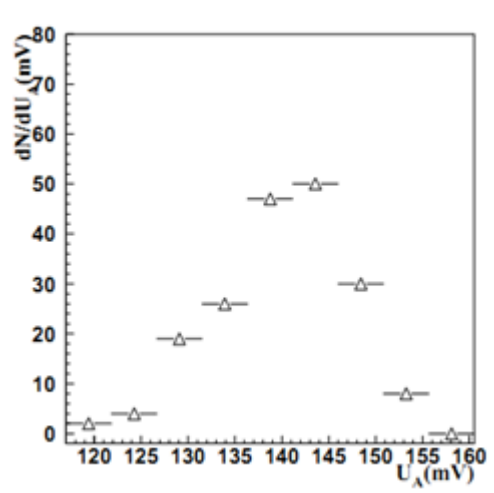


Рис. 3. U_A [mV] – амплитуда выходного импульса для кристалла *LYSO*.

$$\langle U_A \rangle = (144 \pm 3) \text{ mV}$$

Литература

1. *COMET*. Phase I. Technical Design Report. January, 2014.
2. Временные и Амплитудные Характеристики Сцинтилляционных Кристаллов (Част I) Ю. Багатурия, М. Ниорадзе, Ю. Тевзадзе, И. Треков, Б. Чиладзе, *GESJ:Physics* 2015.12.07.
3. Ю. К. Акимов. Фотонные Методы Регистрации Излучений. Дубна, 2006.
4. W. R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particles Physics Experiment*.

Article received: 2017-04-15