

## 1. Abstract

## 2. Introduction

Сцинтилляторы имеют широкое применение как в научных, так и в прикладных областях. Одной из важных сфер использования сцинтилляторов является медицина. Данная область предъявляет специфические требования к детектору рентгеновского излучения. Во-первых, детектор должен иметь высокую эффективность поглощения рентгеновских фотонов. Во-вторых, данный детектор должен обладать хорошим энергетическим разрешением. В-третьих, детектор должен быть достаточно быстрым, чтобы проводить обследование пациентов с максимальной возможной скоростью, а, следовательно и удобством. Наконец, самое главное, детектор должен иметь координатное разрешение порядка или лучше 1 мм, для получения пригодного для анализа снимка.

Одновременно удовлетворить всем этим требованиям достаточно сложно, поэтому необходимо выбирать детектор с особой тщательностью. В современном мире существует несколько типов детекторов, которые могут удовлетворить большинству из этих критериев. Первый детектор - это твердотельная ионизационная камера на основе теллурида кадмия. Самым большим преимуществом этого детектора является высокое энергетическое разрешение (примерно 3% при энергии 59.5 кэВ). Однако сигнал на выходе детектора имеет низкую интенсивность и большую длительность (порядка 1 мкс), что делает его использование в системах с высокой загрузкой затруднительным.

Второй тип детектора - это комбинация тяжелого неорганического сцинтиллятора и микропиксельного лавинного фотодиода. Подобный детектор позволяет достичь приемлемого энергетического разрешения ( $\approx 20\%$  при энергии 59.5 кэВ), быстродействия (20 МГц), 99% эффективности регистрации и координатного разрешения на уровне 1 мм.

Основной вклад в энергетическое разрешение дают флуктуации числа рожденных фотонов.

При расчете энергетического разрешения детектора на основе сцинтиллятора с большими флуктуациями числа рожденных фотонов в данной формуле можно ограничиться лишь первым членом. В этом случае абсолютный световыход сцинтиллятора, светосбор кристалла и квантовая эффективность детектора имеют второстепенную роль. Напротив, для сцинтилляторов с низкими флуктуациями рожденных фотонов второе слагаемое начнет играть важную роль при учете

энергетического разрешения.

Основная проблема определения абсолютного световыхода заключается в необходимости узнать светосбор сцинтиллятора, т.к. при любой постановке эксперимента можно измерить лишь произведение этих двух величин.

В данной работе рассматривается метод определения светосбора сцинтиллятора с последующим нахождением абсолютного световыхода.

### 3. Experimental methods

Основная задача при измерении световыхода заключается в определении числа фотонов, вышедших из сцинтиллятора. При энергии 59.5 кэВ рождается порядка 2000 фотонов и при типичном светосборе около 50% из сцинтиллятора выходит около 1000 фотонов. Чтобы зарегистрировать такое количество света, можно использовать ФЭУ или SiPM. Мы считаем использование ФЭУ более предпочтительным, т.к. его квантовая эффективность не зависит от приложенного напряжения и колебания комнатной температуры оказывают влияние на характеристики ФЭУ в меньшей степени, нежели на SiPM. Кроме того, ФЭУ обладает непрерывной структурой, поэтому его гораздо легче смоделировать.

Перед непосредственными измерениями световыхода мы проверили измерительный тракт (ФЭУ hamamatsu r10233, усилитель, CAEN DT5720A Desktop Digitizer) на линейность. Для этого мы использовали калиброванный ФЭУ hamamatsu h9319-01 и SP5601 CAEN Led Driver.

Во-первых, было проверено постоянство световыхода Led Driver с течением времени. Для этого Led Driver посредством световода был соединен со счетным ФЭУ h9319-01 (рис. ??).

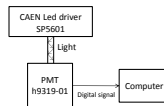


Рис. 1. Установка для проверки постоянства световыхода Led Driver

Выставив на Led Driver фиксированное напряжение светодиода, измерялось количество зарегистрированных фотонов за 1 секунду в зависимости от времени.

В первые 15 минут светодиод нагревается и напряжение пробоя повышается, поэтому перенапряжение(overvoltage) уменьшается и световыход падает. Затем

температура стабилизируется и колебания световыхода становятся незначительными. В этом режиме и проводились дальнейшие измерения с использованием Led Driver.

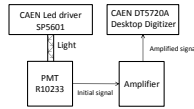


Рис. 2. Схема установки для проверки линейности ФЭУ и измерительного тракта

Рис. 3. Зависимость заряда на ФЭУ при напряжении 950 В от заряда на ФЭУ при напряжении 850 В

Рис. 4. Зависимость заряда на ФЭУ при напряжении 950 В от заряда на ФЭУ при напряжении 950 В

Следующий шаг заключался в соединении ФЭУ hamamatsu r10233 и Led Driver посредством световода. На ФЭУ сначала было выставлено напряжение 950 В и измерен заряд в единицах QDC при различном напряжении на светодиоде. Затем аналогичные измерения были проведены при напряжении 850 В. Если данный ФЭУ является линейным прибором, то зависимость одного заряда от другого при одинаковом напряжении светодиода должна быть линейной функцией. В этом случае данное условие выполняется.

Проверив

## 4. Monte-carlo simulation

Далее, мы измерили квантовую эффективность ФЭУ. Стоит особо отметить, что именно подразумевается под квантовой эффективностью. Производители ФЭУ вычисляют квантовую эффективность как отношение числа электронов, рожденных на фотокатод (так называемых фотоэлектронов) к числу фотонов, нормально падающих на стекло ФЭУ. Однако, вследствие того, что фотокатод отражает значительное количество света (10 - 20 % при каждом отражении), фактиче-

ская квантовая эффективность фотокатода оказывается недостроенной. Детальное описание зависимости коэффициентов прохождения и отражения от длины волны и угла падающего света можно найти в [22]. Как следует из измерений, коэффициент отражения неполяризованного света от фотокатода в зависимости от угла остается практически постоянным, если угол не превышает  $40^\circ$ .

Зная квантовую эффективность, измеренную производителем, и коэффициент отражения фотокатода, мы восстановили истинную квантовую эффективность. Для этого в моделирование была заложена геометрия, представленная на рис.

## 5. Results and discussions

Измерив среднее число зарегистрированных фотоэлектронов и квантовую эффективность, необходимо рассчитать светосбор. Отражение и преломление света на поверхностях подчиняется законам Френеля, если поверхность не покрашена или не обернута отражателем. Однако рассчитать аналитически многократные отражения от поверхности крайне трудно. Более того, свет может не только отражаться и преломляться на поверхности, но и затухать в толще материала. Поглощение описывается простым экспоненциальным законом:  $I = I_0 \cdot \exp(-\frac{x}{\lambda})$ , где  $\lambda$  - длина материала, пройдя которую интенсивность излучения падает в  $e$  раз.

Чтобы правильно учесть все эти эффекты, необходимо смоделировать прохождение света методом Монте-Карло. Для этого использовался пакет GEANT4 10.00 patch3. В моделирование была заложена геометрия, представленная на рисунке.

Главная проблема, связанная с моделированием светосбора, заключается в необходимости задания множества параметров, некоторые из которых достаточно сложно измерить экспериментально.

## 6. Conclusions

## Список литературы

- [1] <http://ru.wikipedia.org/wiki/Остеопороз>
- [2] Jacob Beutel, Harold L. Kundel, Richard L. Van Metter. Handbook of Medical Imaging. Volume I. Physics and Psychophysics.
- [3] I. Fogelman and G. M. Blake. Different Approaches to Bone Densitometry. The Journal of Nuclear Medicine. Vol. 41, No. 12, December 2000.
- [4] Д. М. Смолев. Особенности денситометрической диагностики остеопороза у пациентов пожилого возраста. Кандидатская диссертация.
- [5] H. Buhr, L. Buermann et al. Measurement of the mass energy-absorption coefficient of air for x-rays in the range from 3 to 60 keV. Physics in Medicine and Biology Volume 57 Number 24.
- [6] S. Baccaro, A. Cecilia et al. Refractive index and absorption length of YAP : Ce scintillation crystal and reflectance of the coating used in YAP : Ce single-crystal matrix. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 406 (1998) 479—485.
- [7] I. Vilardi, F. Ciocia et al. Optimization of the effective light attenuation length of YAP:Ce and LYSO:Ce crystals for a novel geometrical PET concept. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 564 (2006) 506–514.
- [8] Martin Janecek and W. Moses. Simulating Scintillator Light Collection Using Measured Optical Reflectance. IEEE Transactions on Nuclear Science, TNS-00249-2009.R1.
- [9] A. Levin and C. Moisan. A More Physical Approach to Model the Surface Treatment of Scintillation Counters and its Implementation into DETECT. 1996 IEEE (Volume:2), Pages 702 - 706.
- [10] A. I. Zagumennyi, Yu. D. Zavartsev, and S. A. Kutovoi, US Patent No. 7, 132, 060 (7 November 2006).
- [11] Gabor Erdei, Noemi Berze et al. Refractive index measurement of cerium-doped  $Lu_xY_{2-x}SiO_5$  single crystal. Optical Materials, Volume 34, Issue 5, March 2012, Pages 781–785.
- [12] Refractive index of Alkali Halides and Its Wavelength and Temperature Derivatives. H. H. Li. Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol. 5, No. 2, 1976.

- [13] Tese Claudio Silva. Reflection Distribution of the Fluoropolymers for the Xenon Scintillation Light.
- [14] DuPont<sup>TM</sup> Ti-Pure<sup>®</sup> titanium dioxide. TITANIUM DIOXIDE FOR COATINGS. [www.dupont.com](http://www.dupont.com)
- [15] Ivan V. Khodyuk and Pieter Dorenbos. Trends and patterns of scintillator nonproportionality. arXiv:1204.4350v1.
- [16] А. А. Боровков. Теория вероятностей, 2-е издание, 1986.
- [17] Patrick Eckert, Hans-Christian Schultz-Coulon, Wei Shen, Rainer Stamen, Alexander Tadday. Characterisation Studies of Silicon Photomultipliers. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 620, Issues 2–3, 11–21 August 2010, Pages 217–226.
- [18] A. Vacheret, G.J. Barker et al. Characterization and Simulation of the Response of Multi Pixel Photon Counters to Low Light Levels. Nucl.Instrum.Meth.A656:69-83,2011.
- [19] M. Balcerzyk, M. Moszynski et al. YSO, LSO, GSO and LGSO. A Study of Energy Resolution and Nonproportionality. Nuclear Science, IEEE Transactions on (Volume:47, Issue: 4).
- [20] A. Phunpueok, W. Chewpraditkul, P. Limsuwan, C. Wanarak. Light output and energy resolution of  $Lu_{0.7}Y_{0.3}AlO_3 : Ce$  and  $Lu_{1.95}Y_{0.05}SiO_5 : Ce$  scintillators. Procedia Engineering, Volume 32, 2012, Pages 564–570.
- [21] В. Н. Васильев, Л. А. Лебедев и др. Спектры излучения рентгеновских установок. Справочник. Энергоатомиздат, 1990.
- [22] D. Motta, S. Schonert Optical properties of bialkali photocathodes Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 539 (2005) 217–235