

СВЕТОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ДЛЯ ТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КАЛОРИМЕТРИИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ

М. В. Коржик, А. Р. Лопатик, О. В. Мисевич, А. А. Федоров

Эксперименты по физике высоких энергий, запланированные в ближайшем будущем в мировых центрах по исследованию микромира, включая Европейскую лабораторию ядерных исследований (ЦЕРН), требуют создания многоканальных систем детектирования и идентификации частиц, таких, например, как электромагнитные калориметры на основе сцинтилляционных кристаллов $PbWO_4$ (PWO) и лавинных фотодиодов для экспериментов CMS и ALICE на LHC [1], которые будут содержать более чем 10^5 детекторных ячеек. Энергетические шкалы всех этих ячеек должны быть совмещены на этапе сбора либо обработки информации с помощью соответственно систем аппаратурной стабилизации шкалы либо ее мониторингования. Причем функционирование данных калориметров будет осуществляться в интенсивных радиационных и электромагнитных полях. Для стабилизации (или мониторингования) энергетической шкалы калориметра необходим высокостабильный источник световых импульсов, так как именно им определяется стабильность системы детектирования в целом. Нами разработана система мониторингования с нестабильностью не хуже 0,1% и параметрами световой вспышки (длительность и временная форма импульса, спектральный состав излучения), близкими к параметрам сцинтилляций PWO. Система поставляет световой импульс одновременно нескольким десяткам каналов и излучает около 10^6 фотонов на канал. При этом она обладает регулируемой частотой повторения импульсов, возможностью оперативного изменения числа фотонов во вспышке. Также реализована возможность изменения длины волны выходного излучения. Система обеспечивает долговременную стабильность при работе в магнитных полях до 3 Т. По сути, нами предложена и разработана уникальная многоволновая система мониторингования электромагнитного калориметра, позволяющая работать с высокой точностью на ускорителях нового поколения с высокой светимостью.

В существующих системах стабилизации в качестве эталонного источника световых импульсов используются: радиолюминесцентные (сцинтиллятор с нанесенным радиоактивным веществом), оптоэлектронные (светодиод, лазер) или газоразрядные (импульсная лампа) светоизлучающие элементы.

В радиолюминесцентных источниках [2] радиоактивный изотоп может наноситься непосредственно на рабочий сцинтиллятор либо применяется отдельный небольшой сцинтиллятор с нанесенным изотопом. Эталонные источники с непосредственно нанесенным изотопом находят ограниченное применение в спектрометрии низких энергий, поскольку наибольшая энергия излучения существующих изотопов ограничена единицами МэВ. Применение отдельного сцинтиллятора с более высоким световыходом, чем у рабочего, в качестве эталонного источника позволяет существенно расширить диапазон энергий. Так, например, применяя в качестве эталона сцинтиллятор YAP:Ce с изотопом ^{241}Am [3]

для мониторинга сцинтилляционного детектора с кристаллом PWO, можно достичь эквивалентного энерговыделения в PWO около 2 ГэВ.

Радиолуминесцентные источники имеют ряд преимуществ: отсутствие дополнительного электронного оборудования, небольшая длительность световой вспышки (при использовании быстрого сцинтиллятора), компактность, относительная дешевизна, возможность работы в сильных магнитных полях. Дисперсия числа фотонов во вспышке минимальна, так как полностью определяется фотостатистикой. Однако присущие радиолуминесцентным источникам недостатки, такие как невозможность изменения частоты и амплитуды импульсов, уменьшение световых выходов со временем вследствие радиационного поражения сцинтиллятора при интенсивном облучении, в ряде случаев недостаточная температурная и долговременная стабильность, существенно ограничивают область их применения. Кроме того, стохастический характер световых вспышек требует амплитудной селекции опорного сигнала, что приводит к заметному усложнению логики отбора событий. К тому же перекрытие амплитудных спектров эталонного и регистрируемого сигналов ограничивает динамический диапазон интенсивности измеряемых сигналов вследствие взаимного маскирования.

Оптоэлектронные эталонные источники в большей степени удовлетворяют вышеперечисленным требованиям. Однако с помощью светодиода проблематично получить 10^8 и более фотонов во вспышке при достаточно малой (порядка десятков наносекунд) длительности светового импульса. Кроме того, серийно выпускаемые светодиоды с яркостью $\geq 0,1$ кд до недавнего времени перекрывали спектральный диапазон от 560 нм до 1000 нм, что не согласуется со спектрами излучения большинства сцинтилляторов, расположенными в ультрафиолетовой или синей области. Существующие голубые SiC-светодиоды обладают малой яркостью $\sim 0,01$ кд [4].

Импульсные лазеры, обладая высокой яркостью и малой длительностью светового импульса, имеют большую дисперсию числа фотонов во вспышке из-за лавинного характера генерации, низкую долговременную стабильность, зависимость числа фотонов во вспышке от частоты импульсов [5]. Нестабильность от импульса к импульсу для лазера может достигать $\sim 10\%$ [6]. Поэтому в случае применения лазера в качестве светового эталона систему, как правило, дополняют каналом мониторинга лазера на основе сцинтиллятора с изотопом и ФЭУ [7] или PIN-фотодиода [8]. Одним из вариантов снижения долговременной нестабильности лазера до $0,2\%$ может являться стабилизация интенсивности излучения при помощи электрооптического затвора с использованием PIN-фотодиода в качестве датчика [9]. Кроме того, набор длин волн генерации относительно компактных и надежных неперестраиваемых лазеров (особенно лазерных диодов) ограничен. Несовпадение формы спектра излучения сцинтиллятора с монохроматическим лазерным излучением может привести к погрешностям мониторинга в случае изменения спектра оптического поглощения сцинтиллятора и иммерсионной среды или спектральной чувствительности фотоприемника вследствие старения или радиационного поражения.

Газонаполненные (криптоновые, ксенонные) импульсные лампы, а также искровые разрядники из-за лавинного характера образования вспышки обладают

рядом таких недостатков, как низкая долговременная стабильность (относительный разброс интенсивности вспышки за несколько часов может достигать 100 % [10]), разброс амплитуды импульсов от вспышки к вспышке (12–14 %), и поэтому, требуют создания дополнительного канала мониторинга [11, 12, 13]. Частота повторения импульсов ограничена обычно сотнями Гц. Вместе с тем широкий спектр высвечивания (250–1000 нм) позволяет выделять при помощи светофильтров или монохроматора практически любой требуемый диапазон [14].

Другими словами, ни один из вышеописанных источников не удовлетворяет ряду противоречивых требований, предъявляемых к системам мониторинга: высокая долговременная и температурная стабильность, относительно малая длительность импульса вспышки и достаточно большое количество фотонов в импульсе, малая дисперсия амплитуды светового импульса, возможность работы в интенсивных радиационных полях.

Появившиеся недавно светоизлучающие диоды $\text{In}_x\text{Ga}_{x-1}\text{N}$ с яркостью в единицы и даже десятки канделл, спектральным диапазоном 370–530 нм, малой внутренней емкостью, возможность изготовления светодиода практически с любой длиной волны в данном диапазоне при варьировании значения X в пределах 0–0,5 [15], позволили частично устранить противоречия и создать эталонный источник световых импульсов, в наибольшей степени отвечающий вышеперечисленным требованиям. Необходимо сразу отметить особенности InGaN -светодиодов [16]. Параметры светодиодов сильно меняются не только от партии к партии, но и для приборов, изготовленных из одной пластины в едином технологическом цикле. Длина волны излучения для одного типа светодиода при одинаковых условиях может отличаться на ± 5 нм и при этом иметь сильную температурную зависимость. InGaN -светодиоды имеют высокое прямое падение напряжения (> 4 В при токе 20 мА) и очень чувствительны к статическому электричеству. Некоторые экземпляры не работают при пониженном значении тока.

Заметим, что абсолютное большинство светодиодов предназначено для работы в непрерывном режиме, поэтому назовем некоторые особенности работы светодиода при возбуждении импульсами тока с амплитудой, значительно превышающей значение номинального постоянного прямого тока, что необходимо для получения большого количества фотонов во вспышке. Как было установлено нами, значения тока в импульсе не должны превышать 2 А во избежание разрушения светодиода. Применение светодиода в импульсном режиме может приводить к значительным изменениям в спектре излучения. Для примера на рис. 1 приведены спектры излучения светодиода Gilway E902 [17], измеренные нами при возбуждении постоянным током 20 мА и импульсным током 2 А. Возбуждение импульсным током приводит к двукратному уширению спектра и сдвигу пика излучения на 25 нм в коротковолновую область. В спектре излучения светодиода NICHIA NLPB-500 в импульсном режиме появляется дополнительный пик с длиной волны 380 нм [18]. Основной пик (паспортное значение $\lambda = 450$ нм) при этом смещается в 430 нм. При длительности светового импульса 2–4 нс и токе через светодиод более 200 мА интенсивность излучения с длиной волны 380 нм становится преобладающей и продолжает расти с увеличением тока, тем самым светодиод превращается в источник ультрафиолетовых импульсов.

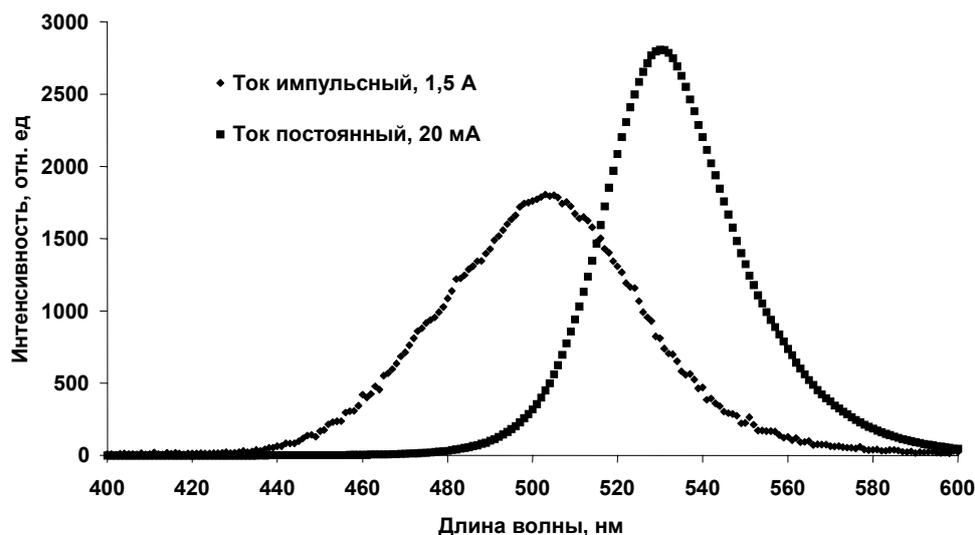


Рис. 1. Спектральные характеристики светодиода Gilway E902 при поджиге постоянным и импульсным током

Электрическую эквивалентную схему светодиода можно представить в виде емкости $p - n$ -перехода, подключенной параллельно диоду, и последовательного сопротивления. К сожалению, в спецификации на производимые изделия изготовители редко указывают данные параметры, играющие значительную роль при работе светодиода в импульсном режиме. Существование внутренней емкости (обычно ≥ 100 пФ) приводит к длительному послесвечению (сотни и более наносекунд для некоторых типов светодиодов) после прекращения действия поджигающего импульса тока. Поэтому мы предложили и использовали активную схему гашения для светодиода. Ее работа заключается в подаче гасящего импульса обратной полярности после прекращения действия поджигающего импульса тока. Существование последовательного сопротивления светодиода, достигающего 20 Ом и более, конечное значение выходного сопротивления генератора импульсов гашения и ограниченная пробоем светодиода величина обратного напряжения (как правило, 5 В) не позволяют достичь времени гашения светодиода менее нескольких наносекунд.

Для получения наносекундных импульсов тока возбуждения светодиода обычно используют высоковольтный транзистор, работающий в лавинном режиме [19]. Иногда применяют возбуждение светодиодов в обратном направлении, используя излучение, связанное с ударной рекомбинацией при обратном смещении $p - n$ -перехода [20]. Все эти методы позволяют получить через светодиод ток порядка нескольких ампер, допускают последовательное соединение светодиодов и, как следствие, позволяют получать мощный световой импульс. Однако лавинный пробой приводит к увеличению дисперсии числа фотонов в

световом импульсе [19]. Одним из вариантов минимизации дисперсии является работа токового ключа в линейном режиме. При этом необходимо отметить, что значительное последовательное сопротивление светодиода при токе через светодиод 2 А и длительности импульса поджига < 10 нс предъявляет повышенные требования к транзисторам выходного каскада блока поджига светодиода: граничная частота – более 1 ГГц, импульсный ток коллектора – более 2 А, постоянное напряжение коллектор/эмиттер – более 50 В, коэффициент передачи по току – более 20. Последовательное соединение светодиодов в целях увеличения интенсивности вспышки затруднено по той же причине.

Полученные результаты генерации световых импульсов некоторыми светодиодами в зависимости от длительности поджигающего импульса тока амплитудой 1,5 А с применением активного гашения и без приведены в таблице. Световой импульс пропускаться через световой смеситель, представляющий собой стеклянный цилиндр диаметром 10 мм и длиной 50 мм, обернутый светоотражающим материалом. Число фотонов оценивалось на выходе смесителя при помощи

Импульсные характеристики InGaN-светодиодов

Тип светодиода	Ток постоянный, 20 мА	Ток импульсный, 1,5 А Длительность импульса поджига ~ 8 нс				
		Длина волны излучения в максимуме, нм	Длина волны излучения в максимуме, нм	Число фотонов *10 ⁶	Длительность импульса на полувысоте, нс (по уровню 0,1 нс)	Длительность импульса на полувысоте, нс (по уровню 0,1 нс)
					с активным гашением	без гашения
Everlight EL383UBC	430	430	200	22 (100)	35 (200)	
Nichia NLPB 500 + ЖС4, 2 мм	450	440	800	7 (10)	9 (16)	
Everlight EL383UWC + СЗС12, 2 мм	470	450	1300	10 (16)	13 (30)	
Nichia NSPB 500S	470	460	4000	6 (9)	8 (13)	
HP HLMP-CB15	470	470	1500	6 (10)	8 (15)	
GILWAY E902	525	500	800	8 (15)	12 (20)	

PIN-фотодиода НАМАМАТСУ S3590-03 с чувствительной областью 10×10 мм. Временные параметры светодиодов измерялись стандартным старт-стопным методом. Из таблицы следует, что при применении современных светодиодов можно получать 10^9 фотонов при длительности светового импульса менее 10 нс, а использование активного метода гашения особенно эффективно при малых длительностях импульса и позволяет существенно сократить длительность световой вспышки при незначительном снижении числа фотонов.

Следующим важным вопросом является выбор способа стабилизации интенсивности излучения светодиода. Светодиод имеет температурную нестабильность интенсивности излучения, индивидуальную для каждого типа светодиода, определяемую физико-химическими свойствами кристалла. По различным оценкам [21, 22], температурная нестабильность светодиодов достигает $\pm 1\% / ^\circ\text{C}$ и более. Возбуждение светодиода в обратном направлении уменьшает нестабильность в 5–10 раз [23], но при этом уменьшается интенсивность излучения [20] и спектр излучения смещается в более коротковолновую область [23]. Стабилизация температуры светодиода реализуется простыми способами, однако вопрос долговременной стабильности светодиода остается открытым.

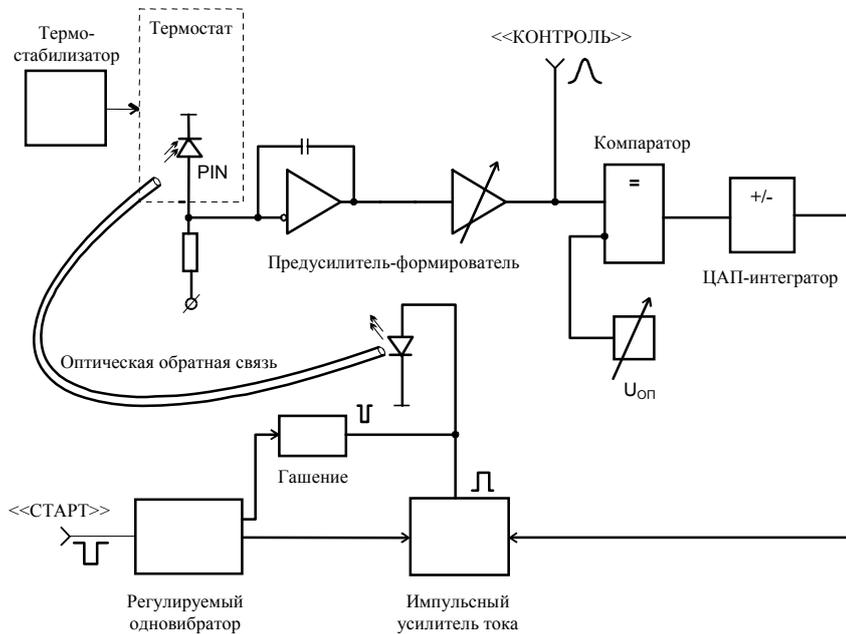


Рис. 2. Блок-схема стабилизированного источника световых импульсов

Долговременная стабильность светодиода также индивидуальна для различных типов светодиодов. Старение светодиода приводит к постепенному изменению эксплуатационных характеристик. В работах [22, 24] проведены исследования долговременной стабильности светодиодов. В результате нестабильность оценена в несколько процентов в день для зеленых и красных светодиодов. В системе с термостатированным синим SiC-светодиодом достигнута дол-

длительная нестабильность порядка 0,2 % [25]. Еще одной серьезной проблемой являются внезапные и необратимые изменения выходного сигнала светодиода [24], что, в частности, мы неоднократно наблюдали для светодиода HP HLMT-CL00.

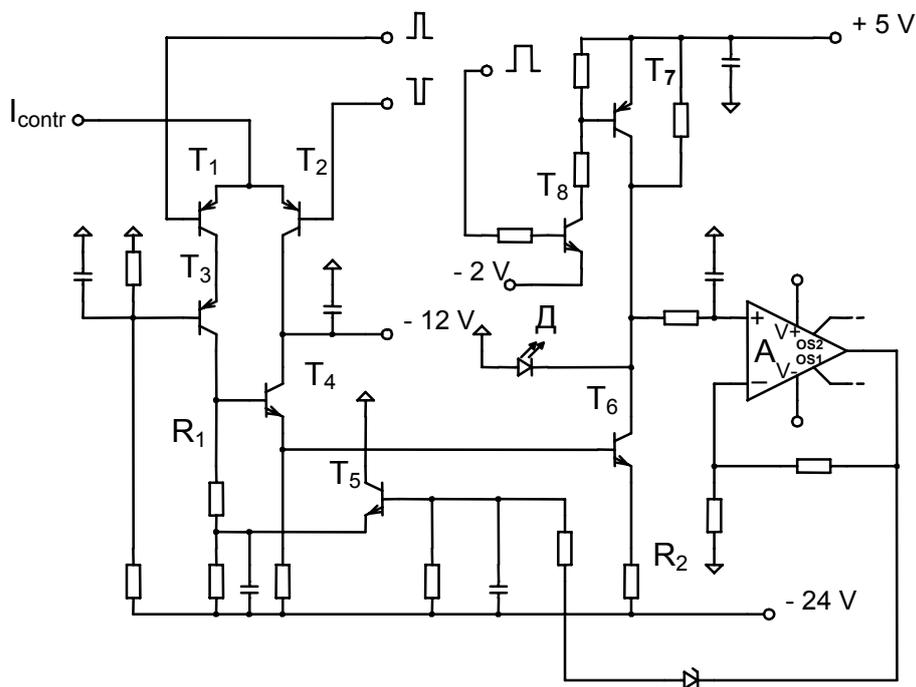


Рис. 3. Упрощенная принципиальная схема блока поджига светодиода

Наиболее радикальный способ стабилизации светодиода – стабилизация интенсивности выходного излучения с использованием оптической обратной связи по сигналу от PIN-фотодиода [26]. Температурная нестабильность PIN-фотодиода составляет $\sim 4 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$, а долговременная нестабильность – менее 10^{-4} [24]. Описанная в работе [26] система в целом имеет нестабильность около 0,1 %. Данный способ применен в нашем приборе.

Блок-схема прибора изображена на рис. 2. Входной импульс «Старт» запускает управляемый цифровым кодом одновибратор, собранный на ЭСЛ-элементах и генераторе задержки AD9500. Сформированный по длительности сигнал усиливается и поступает на схему поджига светодиода. Часть света светодиода ответвляется световодом на оптический вход канала обратной связи. В качестве фотоприемника канала обратной оптической связи используется термостабилизированный PIN-фотодиод HAMAMATSU S3590-03. Сигнал фотодиода усиливается зарядочувствительным предусилителем, затем усилителем формирования и поступает на компаратор, сравнивающий амплитуду сигнала с уровнем $U_{оп}$. Сигнал ошибки с выхода компаратора поступает на вход управления направлением счета реверсивного счетчика, соединенного с 12-разрядным ЦАП, выходной сигнал которого задает амплитуду тока поджига светодиода.

Схемные решения большинства блоков хорошо известны, поэтому рассмотрим подробнее схему поджига и гашения. Упрощенная принципиальная схема представлена на рис. 3.

Парафазный сигнал от ЭСЛ-одновибратора поступает на базы транзисторов $T1$ и $T2$, включенных по схеме токового ключа. Сигнал, снимаемый с коллектора $T1$, усиливается транзистором с общей базой $T3$, нагрузкой которого является резистор $R1$. Далее импульс усиливается по току транзистором $T4$ и поступает на мощный транзистор $T6$, в коллекторную цепь которого включен светодиод.

Ток через светодиод определяется сопротивлением $R2$ и амплитудой импульса на базе $T6$. Ток управления I_{CONTR} и сопротивление $R1$, в свою очередь, определяют амплитуду этого импульса. После прекращения поджигающего импульса на базу транзистора $T8$ подается импульс гашения. После усиления транзистором $T8$ импульс поступает на ключевой транзистор $T7$, подключающий катод светодиода к уровню + 5 В, разряжая внутреннюю емкость светодиода. Как правило, для полного гашения светодиода достаточно гасящего импульса длительностью несколько десятков наносекунд. Операционный усилитель A через транзистор $T5$ поддерживает нулевой средний потенциал на катоде светодиода, тем самым обеспечивая работу $T4$ и $T6$ в линейном режиме. Данная схема позволяет сформировать на светодиоде импульс тока ~ 2 А минимальной длительностью 5 нс, при этом падение напряжения на светодиоде может достигать 35 В (при увеличении напряжения на аноде светодиода до 25 В).

Прибор, использующий вышеописанные технические решения, был проверен в магнитном поле до 1 Т с внешним оптическим измерителем энергии светового импульса. Установлено, что магнитное поле 1 Т приводит к изменению интенсивности не более чем на 0,04 %. Кроме того, ряд приборов использовался в beam-тестах на пучках H4, X1, X5 GIF в ЦЕРНе в качестве эталонных источников световых импульсов при изучении радиационной стойкости кристаллов PWO непрерывно в течение нескольких месяцев. Достигнутая долговременная стабильность светового источника $\pm 0,1$ % позволила предложить данный принцип в качестве прототипа системы мониторинга создаваемого калориметра коллаборации ВТeV (Лаборатория им. Ферми, США), содержащего около 24 000 детектирующих ячеек.

Литература

1. The Compact Muon Solenoid: Technical proposal. CERN/LHCC 94–38. LHCC/P1, 15 December. 1994.
2. Menefee J., Cho Y. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1966. Vol. NS-13. P. 159.
3. Kachanov V. A., Rykalin V. V., Solovyanov V. L. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1992. Vol. A314. P. 215.
4. HEWLETT PACKARD: Optoelectronics Designer's Catalog. 1996.
5. Gobbi A., Alard J. P., Augustinskiat G. // Nucl. Instr. Meth. 1993. Vol. A324. P. 156.
6. Bianco S., Cantoni P., Cotta-Ramusino A. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1991. Vol. A305. P. 48.
7. Baumeister H., Beckmann P., Berger F. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1990. Vol. A292. P. 81.
8. Awes T. C., Baktash C., Cumby R. P. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1989. Vol. A279. P. 479.
9. Fedorov A., Korzhik V., Lopatik A. et al. // CMS Note 2000/26.
10. Bonutti F., Camerini P., Grion N. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1993. Vol. A337. P. 165.

11. *Bartoszek L., Bharadwaj V., Church M. D. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1991. Vol. A301. P. 47.
12. *Berger J., Bermond M., Besson P. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1989. Vol. A279. P. 343.
13. *Sumiyoshi T., Hayashi K., Ogawa K. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1988. Vol. A271. P. 432.
14. *Peigneux J-P., Singovski A., Fedorov A. et al.* // CMS Note 1999/061.
15. *Коган Л.* // Электронные компоненты. 2000. № 2. С. 22.
16. *McCarthy C. J.* // Spectra Photonics. December 1999. P. 77.
17. GILWAY. Lamps/ Leds: Engineering Catalog 168.
18. *Araki T., Misawa H.* // Rev. Sci. Instrum. 1995. Vol. 66 (12). P. 5469.
19. *Zabierovski J.* // Nucl. Instr. Meth. 1994. Vol. A338. P. 577.
20. *Jonson P. N., Tolfree D. W. L.* // Nucl. Instr. Meth. 1976. Vol. 134. P. 29.
21. *Autiero D., Baldo-Ceolin M., Bobisut F. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1996. Vol. A372. P. 556.
22. *Martinčič R., Ivkovič V., Tiringner M.* // Nucl. Instr. Meth. 1977. Vol. 147. P. 513.
23. *Шемякин В. А., Косяченко Л. А., Рабинков А. В.* // Конструирование и технология изготовления космических приборов. М., 1988. С. 143.
24. *Reiter W. L., Stengl G.* // Nucl. Instr. Meth. 1980. Vol. 169. P. 469.
25. *Böttcher M., Brewer W. D., Klein E.* // Nucl. Instr. Meth. 1983. Vol. 206. P. 177.
26. *Reiter W. L., Stengl G.* // Nucl. Instr. Meth. 1980. Vol. 173. P. 275.

LIGHT SOURCES FOR PRECISE ELECTROMAGNETIC CALORIMETRY IN INTENSE RADIATION FIELDS

M. V. Korzhik, A. R. Lopatik, O. V. Missevitch, A. A. Fedorov

Energy scale monitoring systems for multichannel scintillation detectors with various sources of reference light pulses are examined. LED based light pulse generator with active quenching of afterglow, allowing to reduce a light pulse duration up to 2 times is described. Number of photons is about $\sim 10^9$ per pulse for 10 ns duration. Long-term instability of the light pulse $\pm 0.1\%$ for a several weeks is obtained.

-
2. *Menefee J., Cho Y.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1966. Vol. NS-13. P. 159.
 3. *Kachanov V. A., Rykalin V. V., Solovyanov V. L. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1992. Vol. A314. P. 215.
 4. HEWLETT PACKARD: Optoelectronics Designer's Catalog. 1996.
 5. *Gobbi A., Alard J. P., Augustinskiat G.* // Nucl. Instr. Meth. 1993. Vol. A324. P. 156.
 6. *Bianco S., Cantoni P., Cotta-Ramusino A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1991. Vol. A305. P. 48.
 7. *Baumeister H., Beckmann P., Berger F. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1990. Vol. A292. P. 81.
 8. *Awes T. C., Baktash C., Cumby R. P. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1989. Vol. A279. P. 479.
 9. *Fedorov A., Korzhik V., Lopatik A. et al.* // CMS Note 2000/26.

 10. *Bonutti F., Camerini P., Grion N. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1993. Vol. A337. P. 165.
 11. *Bartoszek L., Bharadwaj V., Church M. D. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1991. Vol. A301. P. 47.
 12. *Berger J., Bermond M., Besson P. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1989. Vol. A279. P. 343.
 13. *Sumiyoshi T., Hayashi K., Ogawa K. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1988. Vol. A271. P. 432.
 14. *Peigneux J-P., Singovski A., Fedorov A. et al.* // CMS Note 1999/061.
 15. *Козан Л.* // Электронные компоненты. 2000. № 2. С. 22.
 16. *McCarthy C. J.* // Spectra Photonics. December 1999. P. 77.
 17. GILWAY. Lamps/Leds: Engineering Catalog 168.
 18. *Araki T., Misawa H.* // Rev. Sci. Instrum. 1995. Vol. 66 (12). P. 5469.
 19. *Zabierovski J.* // Nucl. Instr. Meth. 1994. Vol. A338. P. 577.
 20. *Jonson P. N., Tolfree D. W. L.* // Nucl. Instr. Meth. 1976. Vol. 134. P. 29.
 21. *Autiero D., Baldo-Ceolin M., Bobisut F. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1996. Vol. A372. P. 556.
 22. *Martinčič R., Ivkovič V., Tiringier M.* // Nucl. Instr. Meth. 1977. Vol. 147. P. 513.
 23. *Шемякин В. А., Косяченко Л. А., Рабинков А. В.* // Конструирование и технология изготовления космических приборов. М., 1988. С. 143.
 24. *Reiter W. L., Stengl G.* // Nucl. Instr. Meth. 1980. Vol. 169. P. 469.
 25. *Böttcher M., Brewer W. D., Klein E.* // Nucl. Instr. Meth. 1983. Vol. 206. P. 177.
 26. *Reiter W. L., Stengl G.* // Nucl. Instr. Meth. 1980. Vol. 173. P. 275.