

КАЛИБРИРАНЕ ПО ЕНЕРГИЯ НА СПЕКТРОМЕТРИЧЕН ДОЗИМЕТЪР БЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ЙОНИЗИРАЩИ ЛЪЧЕНИЯ

Митьо Митев^{1,3}, Людмил Цанков², Цветан Дачев¹, Борислав Томов¹,
Юрий Матвийчук¹, Николай Томчев³

¹Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
²ФзФ, Софийски университет “Св. Климент Охридски” - София
³ФЕТТ, Технически университет – София
e-mail: m_g_mitev@abv.bg

Ключови думи: спектрометри, дозиметри, калибровка по енергия, светлинни импулси

Резюме: Разглежда се възможността за провеждане на прецизна калибровка по енергия на спектрометрични и дозиметрични прибори с полупроводникови фотодетектори, чрез използване на светлинни импулси с променливи интензитет и продължителност. Обхваща се целият преобразователен тракт – фотодетектор, зарядочувствителен усилвател, линеен формирова-цифров преобразувател. Дадени са основните зависимости за определяне на характеристиките на прибор и е описана последователността за провеждане на изследването. Приложени са резултати от експерименталните изследвания.

ENERGY CALIBRATION OF A SPECTROMETRIC DOSIMETER WITHOUT USING IONIZING RADIATION

Mityo Mitev^{1,3}, Ludmil Tsankov², Tsvetan Dachev¹, Borislav Tomov¹,
Yuri Matviichuk¹, Nikolay Tomchev³

¹Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
²Faculty of Physics, University of Sofia
³Technical University – Sofia
e-mail: m_g_mitev@abv.bg

Keywords: spectrometers, dosimeters, energy calibration, light pulses

Abstract: The possibility for a precise energy calibration of spectrometric and dosimetric devices based on semiconductor photodetectors by means of light pulses with different intensity and length is investigated. The calibration process includes all components of the spectrometric system – the photodetector, the charge-sensitive amplifier, the shaping amplifier and the analog-to-digital converter. The main functional dependencies related to the device's parameters are presented, and the measurement sequence is described. Results from experimental investigations are discussed.

Въведение

Точното привързване по енергия на обхватите на спектрометричните и на дозиметричните прибори е от съществено значение за точността на провежданите измервания [1]. Типът на детекторната система, видът на регистрираните лъчения и използваните енергетични обхвати оказват съществено влияние и ограничават приложимостта на методите за калибровка [2, 3].

За извършване на ефективна калибровка по енергия са необходими източници на йони или заредени частици. Това са различни типове ускорители, достъпът до които е силно ограничен и скъп. Явно е, че прецизната калибровка на всеки дозиметричен прибор с използването на ускорител е невъзможна и неоправдана поради твърде високата цена.

Дозиметрите с аеро-космическо приложение от серията „Люлин“ използват като детектор *Si p-i-n* фотодиоди тип S2744-08 (Hamamatsu) с активна площ 2 cm² и ширина на прехода 300 μm. Сигналите се снемат и формират със зарядо-чувствителен усилвател/линеен формирова-цифров (CSA/LSA) A225F на Amptek, след което се дискретизират с бърз 12-разряден аналогово-цифров

преобразувател (ADC). Определянето на мощността на абсорбираната доза от лъчението в обема на детектора се извършва на базата на данни от амплитудни разпределения, получени в резултат на спектрометрично регистриране на сигналите при възникналите взаимодействия. За това е необходимо е да се знае привързването на скалата на прибора по енергия. Два са параметрите на апаратурата, които определят тази зависимост:

1. **Ширината на каналите по амплитуда.** Тя се определя от входния обхват по напрежение на аналогово-цифровия преобразувател и броя на използваните разряди. При обхват $U_{max}=5\text{ V}$ и използване само на старшите 8 разряда на ADC (формирани на 256 канален спектър) за ширина на канала се получава $\Delta U_{Ch}=19.53\text{ mV}$;

2. **Ширината на каналите по енергия.** Тук се изхожда от зависимостта на амплитудата на изходния импулс на CSA/LSA от заряда, генериран в детектора (респективно отдадената енергия от йонизиращото лъчение в обема на детектора). Производителят на CSA/LSA тип A225F (Amptek Inc.) декларира типична входна чувствителност за Si p-i-n полупроводникови детектори $IS_S=240\text{ mV/MeV}$. Оттук лесно се определя специфичната енергия ΔE_{Ch} за един канал:

$$(1) \quad \Delta E_{Ch} = \frac{\Delta U_{Ch}}{IS_{Si}} = \frac{19,53}{240} = 0,081375\text{ MeV/Ch}$$

Използвайки основни физични зависимости, за случай, в който спектрограмата е представена в скалата по канали, мощността на абсорбираната доза лъчение в детектора P_D е:

$$(2) \quad P_D = \frac{D_a}{t_m} = \frac{\Delta E}{\Delta m} \cdot \frac{1}{t_m} = 1.602 \cdot 10^{-16} \cdot \frac{1}{m \cdot t_m} \cdot \sum_{i=0}^{255} n_i \cdot i \cdot \Delta E_{Ch} \quad \text{Gy/h}$$

където n_i е броят събития, регистрирани в даден канал;

i е съответният номер на канала;

ΔE_{Ch} е специфичната ширина на каналите по енергия, представена в keV;

масата m се изразява kg;

времето на измерване t_m – в часове.

От гореизброените факти следват следните основни изводи:

- точността на провежданите измервания зависи много силно от точността на определяне на специфичната енергия ΔE_{Ch} , отдадена в детектора;
- приема се, че връзката енергия/канал е линейна и минава през нулата. На практика за определяне на параметрите се използва само една точка, зададена от производителя на CSA/LSA, без да се отчита неопределеността от толеранса на параметъра IS_{Si} . Това може да доведе до съществена грешка при определяне на коефициентите;
- не се отчита влиянието и толерансите на електронните компоненти. При еднополярно захранване на CSA/LSA в околността на нулата (при регистриране на събития, породени от частици или кванти с малки енергии) характеристиката му вече не преминава през нула.

За определяне на действителните характеристики на приборите от серията „Люлин“ през годините са провеждани тестови изпитания на ускорители на тежки йони **4Error! Reference source not found.**, при което регистрираните отклонения са в рамките на 5 -10 %.

Очаква се кривата на отговор на приборите „Люлин“ да бъде много подобна на тази, публикувана в 4, защото всички спектрометри тип „Люлин“ (LTS) се произвеждат с използване на еднотипни електронни компоненти. В конкретния пример за калибриране, извършено от д-р Юкио Учихори, е установено, че линейният коефициент на реакция, получен с протони, He+ и Ne+ йони, е равен на 81.3 keV, докато приборите „Люлин“ измерват 81.4 keV.

Опитна постановка

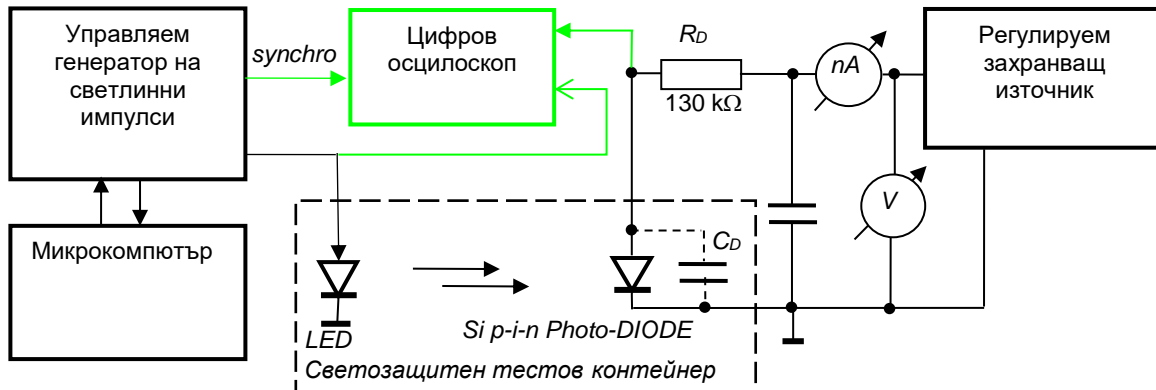
Изхождайки от принципа на суперпозицията, в изхода на полупроводниковия детектор би могло да бъде породено еквивалентното количество заряд, ако вместо с една частица с много висока енергия се въздейства с много по-голям брой фотони с ниска енергия (например във видимата област – 1.5 – 3 eV). За целта е създадена опитна постановка, която позволява дозиране на фотонния поток така, че в изхода на детектора да се получава еквивалентно количество заряд, съответстващ на работния обхват на изследвания прибор.

Структурната схема на опитната постановка, позволяваща да се определи количеството заряд в изхода на Si p-i-n фотодиод, е показана на Фиг.1. Тя съдържа следните функционални блокове, които трябва да отговорят на определени условия:

1. Изследваният Si p-i-n фотодиод, заедно с облъчващия светодиод, се поставят в светозащитен тестов контейнер, който осигурява оптична връзка между тях, както и предотвратява проникване на външни смущаващи светлинни потоци. Той има подходящи конектори, позволяващи както подаването на управляващия импулс към светодиода, така и снемането на заряда от фотодиода. Същевременно контейнерът играе и ролята на екран

за електромагнитни смущения и позволява в обема да се поставят допълнителни електронни схеми (напр. CSA/LSA и др.);

2. Управляемият генератор на светлинни импулси 5,6 е основен елемент в опитната постановка. Той служи за изработване на токови импулси към светодиода, осветяващ *Si p-i-n* фотодетектор. Изходът му е генератор на ток, чиято изходна стойност може да се задава в 15 дискретни стойности от 1 до 15 mA със стъпка 1 mA. Генераторът поддържа поне три режима:



Фиг. 1

- непрекъснат режим – стойността на изходния ток за даден обхват k се поддържа постоянна и непрекъсната във времето;
 - импулсен режим – изработват се токови правоъгълни импулси с регулируема продължителност в наносекундния и микросекундния диапазони, чиято амплитуда е идентична с тази при непрекъснатия режим за съответния обхват. Периодът на повторение се избира в милисекундния диапазон;
 - режим с променлива амплитуда или продължителност – амплитудата или продължителността на импулсите периодично се променя в зададени граници;
- Микрокомпютърът служи за управление режимите и параметрите на работа на управляемия генератор и за следваща обработка на резултатите;
 - Регулируемият захранващ източник осигурява обратно поляризиращо напрежение за фотодиода, такова, че да сведе до минимум рекомбинацията на токоносителите вътре в прехода. На практика, това условие се постига при стойности $U_p > 15$ V;
 - Важен елемент от опитната постановка е галванометърът (наноамперметър), с който се измерва тока през фотодиода в непрекъснат режим на облъчване. Той трябва да има чувствителност поне 50 nA. От точността и дискретността му в голяма степен зависи точността на провеждане на калибровката;
 - Цифровият осцилоскоп позволява точно да се определи (измери) продължителността на импулса, подаван към светодиода. Ако входните му обхвати по напрежение позволяват, чрез него би могло да се наблюдава и изходния импулс, който генерираният заряд създава върху товарното съпротивление R_D (в схемата на Фиг.1 все още не е включен зарядо-чувствителния преобразувател).

Описание на метода за изследване

Необходимо е да се определи какъв заряд възниква в изхода на фотодиода при различни режими на управление на светодиода – по ток (обхват на генератора) и различна продължителност на управляващия импулс. За целта се извършват следните стъпки:

- Задава се поляризиращо напрежение за фотодиода в интервала от 15 до 70 V;
- Генераторът се настройва за работа в режим на непрекъснато излъчване;
- За всеки обхват k се измерва тока I_k , който се възбужда във фотодиода;
- Генераторът се превключва за работа в импулсен режим;
- Задава се определена продължителност t_u на светлинните импулси (200 – 400 ns).

Зарядът ΔQ_k , генериран в детектора, зависи от обхвата k и продължителността на импулса t_u :

$$(3) \quad \Delta Q_k = \Delta I_k \cdot \Delta t_u$$

Така за всеки обхват при дадена продължителност на импулса се определя какъв заряд се генерира в обема на детектора. Оттук се определя енергията на частицата или кванта ΔE_{eqv} ,

която би генерирала същия заряд ΔQ_k – т.е. на всяка комбинация обхват k / продължителност на импулс t_u се съпоставя точно определена енергия на абсорбираното лъчение:

$$(4) \quad \Delta E_{eqv} = \frac{\Delta Q_k \cdot \varepsilon_{Si}}{e^-}$$

където - ΔE_{eqv} е енергията на частицата или кванта, която при взаимодействие с детектора би довела до образуване на същия заряд;

ΔQ_k е зарядът за съответния обхват/продължителност на импулс;

ε_{Si} е средната енергия за образуване на двойка електрон/дупка за силиция;

e^- е зарядът на електрона, $e^- = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Тази зависимост дава възможност да се направи еднозначна връзка между амплитудата на изходящия импулс от спектрометричния тракт (която е пропорционална на ΔQ_k) и еквивалентната енергия на частицата/кванта. **Респективно, така много лесно амплитудният спектър от пространството на каналите може да са прехвърли в пространството на енергиите.**

Коефициентите за връзка канал – енергия се определят по метода на най-малките квадрати (МНК) от 15 точки на базата на реални експериментални данни, които конкретизират линейната зависимост за изследвания спектрометричен тракт. В тази линейна функция вече има и реален свободен член, който отразява несиметрията на използваните електронни компоненти.

Последователност на измерване

Последователността на определяне на параметрите на системата включва няколко етапа, провеждани в различни конфигурации на работа на фотоприемника и режими на работа на генератора. Те се свеждат до:

I. Мащабиране на сигналите от детектора в конкретната опитна постановка

Целта на операцията е да се подбере такава геометрия на експерименталната постановка, че при максимален обхват от генератора формираните изходни импулси след CSA/LSA да покриват най-пълно входния обхват на използвания спектрометър. За целта:

1. Сигналът от фотоприемника се подава към CSA/LSA;
2. Генераторът на светлинни импулси се настройва в импулсен режим при период на изходните импулси 1 – 10 ms;
3. Задава се най-големият обхват (в случая – 15) за амплитуда на импулсите;
4. Настройва се минимална продължителност на импулсите (в случая – 200 ns);
5. Наблюдават се на осцилоскоп изходните импулси от CSA, като се следи основно за тяхната амплитуда. Ако тя е значително по-малка от входния обхват на спектрометъра, се увеличава продължителността на импулса (напр. 400 ns) и при следващите стъпки се работи при новата стойност. Ако амплитудата е по-голяма (или CSA достига до насищане), е необходимо да се редуцира светлинния поток върху фотоприемника. Това може да стане чрез:

- промяна на разстоянието и/или ъгъла на облъчване;
- поставяне на непрозрачна преграда (бленда) на пътя на лъча, при което част от площта на Si p-i-n фотодиод остава необлъчвана.

След постигане на оптимална настройка, геометрията на системата трябва да се поддържа непроменена.

II. Измерване на тока през p-i-n диода в статичен режим

Целта на измерването е да се определи степента на връзката между светодиода и фотоприемника при конкретната геометрия на експерименталната постановка в непрекъснат режим на облъчване. Последователността на работа е следната:

1. Товарният резистор в катодната верига на фотодиода се изключва (откача се) от поляризиращото захранващо напрежение на прибора. Добавя се ограничителен резистор със стойност 15 – 150 K Ω и чувствителен наноамперметър (гальванометър), които се свързват към външен добре филтриран стабилизирани токоизточник 10 – 30 V;
2. Измерва се токът на тъмно на фотодиода – при изключен импулсен генератор;
3. Импулсният генератор се привежда в режим на поддържане на непрекъснато ниво, при което светодиодът свети непрекъснато;
4. Сменят се обхватите по ниво на генератора, като за всеки обхват се измерва токът през гальванометъра;
5. Резултатът за всеки обхват се коригира с тока на тъмно.

Прецизното снемане на тази характеристика е предпоставка за точно определяне на заряда, който се генерира във фотоприемника и е обект на определяне при следващите стъпки.

III. Измерване разпределението по канали в спектрометричната система

Целта на измерването е да се получи разпределението на импулсите от генератора по канали – в разглеждания случай на 15 обхвата спектрограмата съдържа 15 ясно различими пика, като всеки от тях е разположен в няколко канала вследствие на крайната амплитудна разделителна способност на спектрометъра, нестабилността на генератора и статистическия характер на процесите както в светодиода, така и във фотоприемника. Необходимо е да бъде реализирана следната последователност от действия:

- 1) Формираните изходни импулси от фотодетектора и CSA се подават към спектрометричната система (многоканален амплитуден анализатор);
- 2) Генераторът на светлинни импулси се превключва в импулсен режим;
- 3) Задава се постоянна продължителност на импулсите – 200 ns;
- 4) Задава се стойност на амплитудата, която се променя в хода на измерването така, че да се обхванат всички обхвати от 1 до 15;
- 5) Стартира се генераторът за работа с указаните по-горе параметри на сигналите;
- 6) Стартира се спектрометърът (многоканалният амплитуден анализатор) за натрупване на спектри за време, гарантиращо натрупване на достатъчен за статистическа обработка брой събития;
- 7) Данните от спектрометъра се записват за следваща обработка и определяне параметрите на системата детектор – CSA – формирова тел - амплитуден анализатор.

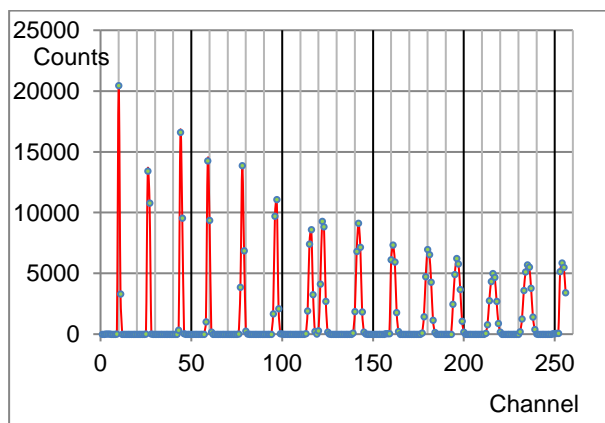
Една спектрограма, получена по описания начин, съдържа необходимите данни за точно и еднозначно определяне на връзката номер на канал – енергия на лъчението. Системата позволява да се изменят условията на експеримента – например температура на околната среда, захранващо напрежение и др., като по този начин може да се проследи хода на калибровката при промяна на съответните условия.

Определяне параметрите на системата от експерименталните данни

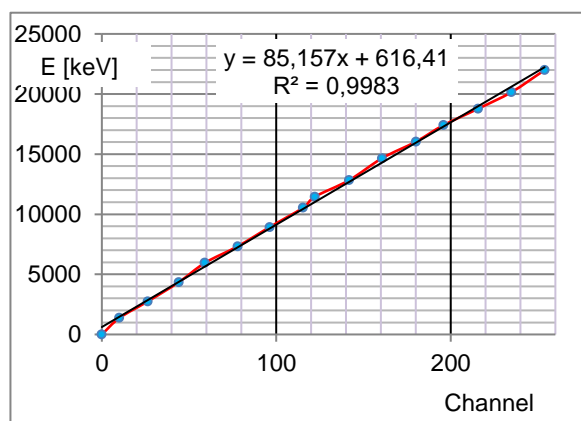
Получените данни позволяват да се извърши преминаване от скалата на каналите в скала по енергии с отчитане на индивидуалните особености и характеристики на тракта *детектор*->*CSA/LSA*->*ADC* на всяка конкретна система. Това става по следната методика:

- 1) От резултатите за изходния ток от фотодетектора в непрекъснат режим и продължителността на импулса от генератора се определя зарядът ΔQ , който възниква в детектора и се подава на входа на зарядо-чувствителния усилвател за всеки обхват по амплитуда на генератора;
- 2) От вида на материала на полупроводника и неговата средна енергия за образуване на двойка токови носители се изчислява еквивалентната енергия, отдадена от лъчението (фотонно или корпускулярно) в обема на фотодетектора. Така за конкретната геометрия на системата генератор-светодиод-фотоприемник на всеки обхват на генератора може да се съпостави енергията, която би трябвало съответното лъчение (фотонно или корпускулярно) да отдаде в обема на детектора. Това дава възможност при следващите преобразувания вместо номер на обхват да се използва еквивалентната депозирана енергия.

Спектрограмата в скалата на каналите е показана на Фиг. 2. Вижда се, че всички пикове заемат поне три канала. Това дава възможност за точно определяне центроидите на пиковите по някой от известните методи (например чрез първия момент на разпределението).



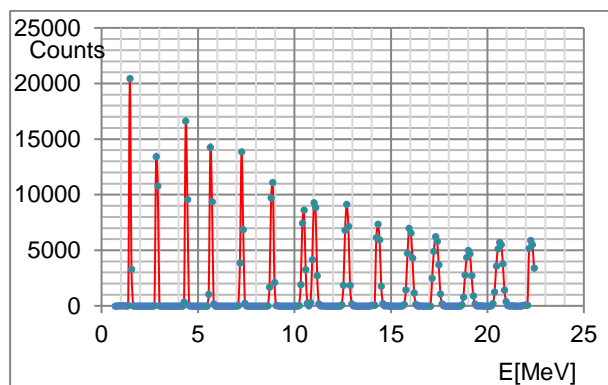
Фиг. 2



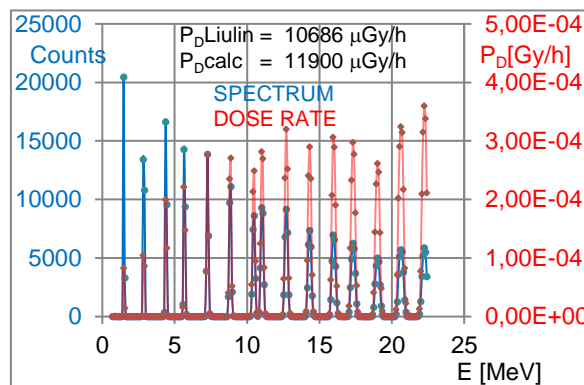
Фиг. 3

Съпоставяйки енергията на всеки пик, съответстваща на обхватите на генератора, и центроидите на тези пикове в спектъра, се стига до зависимостта на енергията от номера на канала, показана на Фиг.3. Снемането на заряда и формирането на сигнала става с линейни електронни схеми, очаквано и зависимостта $E=f(N_{Ch})$ е линейна функция. Тъй като са известни 15 точки от тази права, може да се приложи МНК, за да се определят преводните коефициенти за преминаване от номер на канал към енергия. В конкретния случай $a=85.157$ keV/Ch, а за свободния член b се получава 614.41 keV. По същество зависимостта $E=f(N_{Ch})$ е строго линейна (правата минава през 0 и би следвало $b=0$), но тъй като се работи с реални експериментални данни, се отчита и влиянието на параметрите на електронните схеми (напр. постояннотокови отмествания в усилвателя, нелинейност и пр.).

На Фиг. 4 е представена същата спектрограма, но вече в скалата на енергиите. Вижда се, че приборът покрива енергетичния обхват до 22.5 MeV.



Фиг. 4



Фиг. 5

Тази процедура е приложена за калибровка на системата Люлин 6F. При обработката на усреднени данни от 5 последователни спектъра (Фиг. 5), за които приборът определя за мощността на дозата стойност 10686.62 $\mu\text{Gy/h}$, след прилагане на описаната методика се получава стойност 11900.12 $\mu\text{Gy/h}$, като разликата между двете стойности е 10.2 %.

Изводи от проведените изследвания

От гореизложеното следва, че наличните експериментални данни са достатъчни, за да може да се извърши прецизна калибровка по енергия на цялата спектрометрична система, обхващаща както CSA и ADC, така и самия Si p-i-n фотодетектор.

Сходимостта на резултатите от двата метода (съществуващия и новопредложения) дават основания да се твърди, че предложената методика за калибриране без използване на йонизиращи лъчения може да бъде използвана за провеждане на прецизна калибровка по енергия на дозиметрични и спектрометрични прибори. Методиката е приложима и при други типове детектори, използващи фотосензори, напр. сцинтилационни детектори (базирани на вакуумни ФЕУ или Si-PMT).

Вграждането на минимална допълнителна схемотехнична част в прибора ще даде възможност за въвеждане на ефективни алгоритми за периодична автокалибровка и автодиагностика, което ще повиши точността на измерване и надеждността на прибора.

Литература:

1. Glenn F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons (1999).
2. Lutz, Gerhard, Semiconductor Radiation Detectors. Springer. Berlin Heidelberg New York, 1999, 353 p.
3. Ahmed, S.N., Physics and Engineering of Radiation Detection. Academic Press Inc. Published by Elsevier. Amsterdam, 2007, 764 p.
4. Uchihori, Y., Kitamura, H., Fujitaka, K., Dachev, Ts.P., Tomov, B.T., Dimitrov, P.G., Matviichuk, Y., 2002. Analysis of the calibration results obtained with Liulin-4J spectrometer-dosimeter on protons and heavy ions. Radiat. Meas.35, 127–134.
5. Mitev, G., L. Tsankov, M. Mitev. Light Pulse Generator for Photon Sensor Analysis. Annual Journal of Electronics, 2010, ISSN 1313-1842, Volume 4, №2, pp. 111–114.
6. Mitev, G., L. Tsankov, M. Mitev, E. Messomo. Light Pulse Generator for Multi-Element scintillation detectors testing. Proceedings of the 2016 XXV International Scientific Conference ELECTRONICS (ET), ISBN 978-1-5090-2882-5, IEEE Catalog Number CFP16H39-PRT, pp. 274–277.