

**Насурлла Маулен, Буртебаев Н., Мукашев К.М.*,
Насурлла Маржан, Ходжаев Р.А.**

НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы
Институт ядерной физики МЭ РК, Казахстан, г. Алматы
*e-mail: mukashev.kms@gmail.com

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЕТЕКТОРА ИЗ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

В работе приводятся результаты исследования детектора, выполненного по технологии газофазной эпитаксии из арсенида галлия особой чистоты (VPE GaAs). Энергетическое разрешение детектора 52 КэВ. Для всех исследуемых детекторов эффективность сбора заряда от самых длиннопробежных частиц выходит на максимум при напряжении 60 В. При нулевом смещении эффективность сбора заряда для энергий альфа-частиц от 4.8 до 7.7 МэВ находится в пределах от 74 до 58 %. Эти данные свидетельствуют о возможности использования разработанных детекторов в режиме счета частиц без внешнего смещения с высокой эффективностью сбора заряда в качестве сенсора протонов отдачи при регистрации быстрых нейтронов. Детектор сохраняет спектрометрические качества до температуры порядка 110°C при одновременном увеличении рабочего смещения до 110–130 В. Дальнейшее повышение температуры до 130°C приводит к катастрофическому ухудшению характеристик детектора.

Ключевые слова: нейтрон, альфа-частица, арсенид галлия, детектор, сенсор, регистрация, характеристики, заряд, эффективность сбора, фотолитография.

Nassurlla Maulen, Burtebayev N., Mukhashev K.M.*,
Nassurlla Marzhan, Khojayev R.A.

IETP, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty
Institute of Nuclear Physics ME RK, Kazakhstan, Almaty
*e-mail: mukashev.kms@gmail.com

Temperature dependence of the energy resolution of a gallium arsenide detector

The paper presents the results of the study of the detector, made by gas-phase epitaxy technology of high purity gallium arsenide (VPE GaAs). The energy resolution of the detector is 52 KeV. For all detectors under study, the efficiency of charge collection from the longest-running particles reaches a maximum at a voltage of 60 V. At zero offset, the charge collection efficiency for alpha-particle energies from 4.8 to 7.7 MeV ranges from 74 to 58%. This data show the possibility of using the developed detectors in the particles counting mode without external offset with high collection efficiency as a sensor of recoil protons for detecting fast neutrons. Detector saves spectrometric qualities to a temperature of 110 °C while increasing the operating offset to 110-130 V. A further increase in temperature to 130 °C leads to a catastrophic degradation of detector characteristics.

Key words: neutron, alpha particle, gallium arsenide, detector, sensor, registration, characteristics, charge, collection efficiency, photolithography.

Насурлла Мәулен, Бүртебаев Н., Мұқашев Қ.М.*,
Насурлла Маржан, Ходжаев Р.А.

ЭТФФЗИ, әл-Фараби ат. Қазақ Ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

¹Ядролық физика институты, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: mukashev.kms@gmail.com

Галлий арсенидінен жасалған детектордың энергетикалық шешуші қабілетінің температураға тәуелділігі

Жұмыста тазалығы айрықша жоғары, газифазалық эпитаксия технологиясы бойынша галлий арсенидінен жасалған (VPE GaAs) детекторды зерттеу нәтижелері баяндалады. Детектордың энергетикалық шешуші қабілеті 52 кэВ құрады. Жүру жолы мейлінше ұзақ саналатын ядролық бөлшектер үшін детекторлардың ығыстырушы кернеу 60 В кезінде зарядты жинақтау тиімділігі максимумға жетіп үлгереді. Ығыстырушы кернеу нольге тең болса және альфа-бөлшектердің энергиясы 4.8–7.7 МэВ аралығында өзгерген жағдайда, детектордың зарядты жинақтау тиімділігі (74–58)% аралығында қалыптасады. Соған, сәйкес, осындай детекторларды сыртқы ығыстырушы кернеусіз, зарядты жинақтау тиімділігі жоғары, нейтрондарды тіркеуге байланысты пайда болатын қайтымды протондардың сенсоры және ядролық бөлшектердің санауышы ретінде қолдануға болады. Детекторлар спектрометриялық сапалығын температура 110°C дейін, ал жұмысшыкернеу (110–130)В дейін өскенше сақтай алады. Температура 130°C асқан кезде детектордың сипаттамаларының күрт төмендейтіні белгілі болды.

Түйін сөздер: нейтрон, альфа-бөлшек, галлий арсениді, детектор, сенсор, тіркеу, сипаттамалар, заряд, жинақтау тиімділігі, фотолитография.

Введение

Детекторы нейтронного излучения имеют широкий спектр применений и используются для радиозонологического мониторинга местности, контроля нейтронного фона, для создания комплексов контроля для таможенных служб, при обнаружении специальных ядерных материалов, в ядерной энергетике, в экспериментах ускорительной физики и физики космоса и в других направлениях. В зависимости от энергии нейтронов для их регистрации используются разные методы. Так, регистрация нейтронов с энергиями более 10 МэВ осуществляется с использованием их взаимодействий с ядрами углерода (в углеродсодержащих соединениях). Нейтроны с энергиями от 0.1 до 10 МэВ регистрируются через упругое рассеяние на легких атомах (главным образом на водороде), как правило, в водородсодержащих средах с последующей регистрацией протонов отдачи. Регистрация нейтронов с энергиями менее 0.1 МэВ производится или путем их замедления до энергий порядка 0.5 кэВ с последующей регистрацией продуктов реакции $n + p \rightarrow d + \gamma$, или путем их более сильного замедления до тепловых энергий [1].

В основном такие детекторы создаются на основе сцинтилляционных материалов [2, 3]. Использование сцинтилляторов позволяет работать приборам на их основе как в режиме счета нейтронов, так и одновременно со спектрометрией.

Среди многих перспективных решений есть полупроводниковые нейтронные детекторы, основными преимуществами которых является высокое быстродействие, низкая энергия ионизации, небольшие размеры, а также их компактность. В большинстве своем это кремниевые поверхностно-барьерные детекторы с радиаторами из водородсодержащих материалов, включающих изотопы ${}^6\text{Li}$ или ${}^{10}\text{B}$ [4]. Регистрация этими детекторами быстрых нейтронов (свыше 0.5 МэВ) осуществляется по протонам отдачи, тепловых нейтронов – по продуктам реакции на атомах элементов Li или B.

С начала двухтысячных годов проявился интерес к детекторам нейтронов на основе GaAs. Возобновление активных работ по созданию детекторов на основе GaAs стало возможным благодаря значительному улучшению качества материала [5–7]. Лидером в данной области исследований является коллаборация с головным институтом – Institute of Nuclear and Physical Engineering (Slovakia). Разработанные ими детекторы на объемном VGF (Vertical Gradient Freeze) или LEC (Liquid Encapsulated Czochralski) GaAs производства CMK Ltd. (Slovakia) оказались эффективными устройствами для обнаружения быстрых или тепловых нейтронов [8–11]. Высокая радиационная стойкость SiGaAs для высокоэнергетических фотонов [12] и нейтронов [13] предопределяет этот материал в качестве перспективного кандидата для изготовления детекторов нейтронов.

Однако детекторы на объемном SiGaAs требуют использования высоких рабочих смещений (до 300 В) для получения приемлемой эффективности сбора заряда, а также использования защиты от γ -фона [11]. Использование GaAs в качестве материала сенсора имеет свои преимущества, в том числе благодаря высокой радиационной стойкости и температурной устойчивости GaAs по сравнению с кремнием, а также значительному развитию технологий на нем (по сравнению с другими широкозонными материалами), используемыми при производстве приборов различных классов для СВЧ электроники, оптоэлектроники, логических схем и др. Настоящая работа посвящена исследованию температурной зависимости энергетического разрешения детектора на основе GaAs, который был создан в коллаборации Московского института стали и сплавов и Научно-исследовательского института экспериментальной и теоретической физики КазНУ им. аль-Фараби [14].

Изготовление поверхностно-барьерного VPE GaAs сенсора площадью 25 мм²

Для изготовления поверхностно-барьерного VPE GaAs сенсора использовались эпитакси-

альные слои арсенида галлия толщиной 42 мкм с концентрацией носителей заряда на уровне $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ [14, 15]. Плёнки выращивались на двухдюймовых n^{++} -GaAs подложках с ориентацией $\langle 100 \rangle$, легированных кремнием до концентрации $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Для этого была использована известная хлоридная система Ga-AsCl₃-H₂, реализованная на установке с вертикальным реактором – ETR-100 (рис.1). Изготовление экспериментальных образцов GaAs сенсоров проводилось с помощью ранее разработанной технологии [16-18], включающей контактную фотолитографию с использованием 3 фотошаблонов, топология которых описана в [14].

На конечном этапе пластина разделялась на отдельные чипы размером $6 \times 6 \text{ мм}^2$ посредством резки алмазным диском. Чипы приклеивались обратной стороной токопроводящим клеем ТОК-2 в металлокерамические корпуса КТ-94-2 производства ОАО «Завод «МАРС» (г. Торжок, Россия). Контакт к активной области выполнялся алюминиевой проволокой посредством термокомпрессионной сварки. Двухдюймовая пластина с готовыми чипами поверхностно-барьерных GaAs сенсоров и внешний вид сенсора в корпусе представлен на рисунке 2.

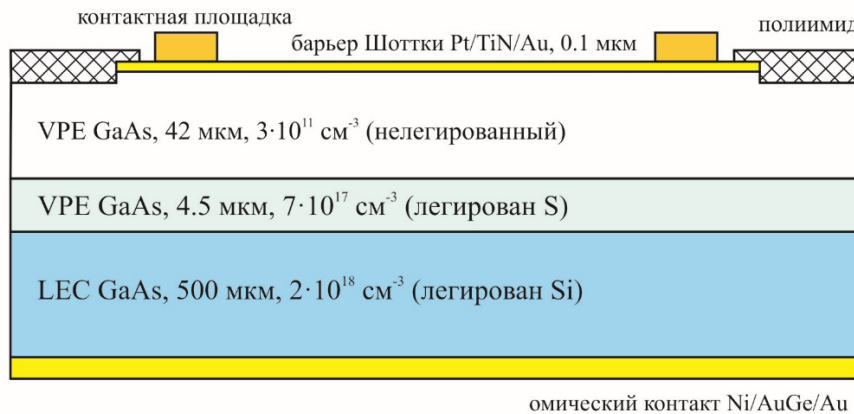


Рисунок 1 – Принципиальная конструкция поверхностно-барьерного GaAs сенсора

Определение эксплуатационных характеристик VPEGaAs детектора

Измерения спектральных характеристик поверхностно барьерных структур проводились при комнатной температуре [15]. Детекторы располагались в специальной вакуумной камере при остаточном давлении 10^{-2} мм.рт. столба. Облучение проводилось сколлимированным пуч-

ком α -частиц от источника ²²⁶Ra (источник ²²⁶Ra испускает α -частицы с энергиями 4.784, 5.489, 6.002 и 7.687 МэВ) с привлечением стандартной для альфа-спектрометрии схемы. Детектор через малощумящий зарядочувствительный предусилитель и усилитель-формирователь подключался к 512-канальному анализатору на базе ДЕ-Епо методике Института ядерной физики МЭ РК [19].

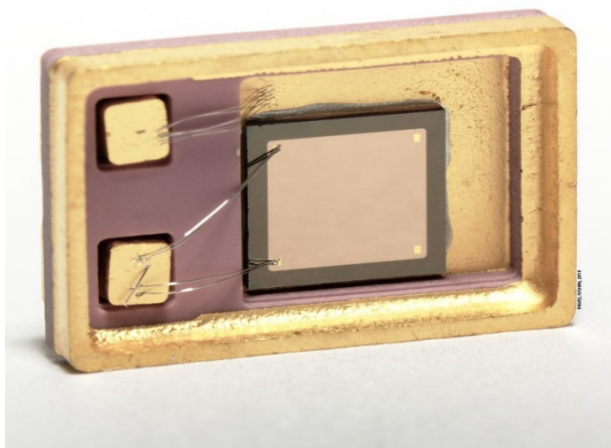


Рисунок 2 – Фотография поверхностно-барьерного VPE GaAs сенсора в корпусе

На первом этапе была исследована эффективность сбора заряда (CCE – **chargecollectionefficiency**) в зависимости от поданного на детек-

торы напряжения смещения для определения рабочей величины. Для всех исследуемых детекторов результаты измерения зависимости показала, что эффективность сбора заряда от самых длиннопробежных частиц выходит на максимум при напряжении 60 В [15]. При этом полученные значения эффективности сбора заряда достаточно высоки. При нулевом смещении эффективность сбора заряда для энергий от 4.8 до 7.7 МэВ находится в пределах от 74 до 58 %. Это свидетельствует о том, что разработанные детекторы могут работать в режиме счета частиц (например, протонов отдачи) без внешнего смещения с высокой эффективностью сбора заряда и могут быть использованы в качестве сенсора протонов отдачи при регистрации быстрых нейтронов. На рисунке 3 приведен спектр альфа-частиц от источника ^{226}Ra , измеренный при смещении 65 В на детекторе. Для оценки шумов спектрометрического тракта и их вклада в энергетическое разрешение детектора, одновременно проводилось измерение сигнала, подаваемого от генератора импульсов точной амплитуды.

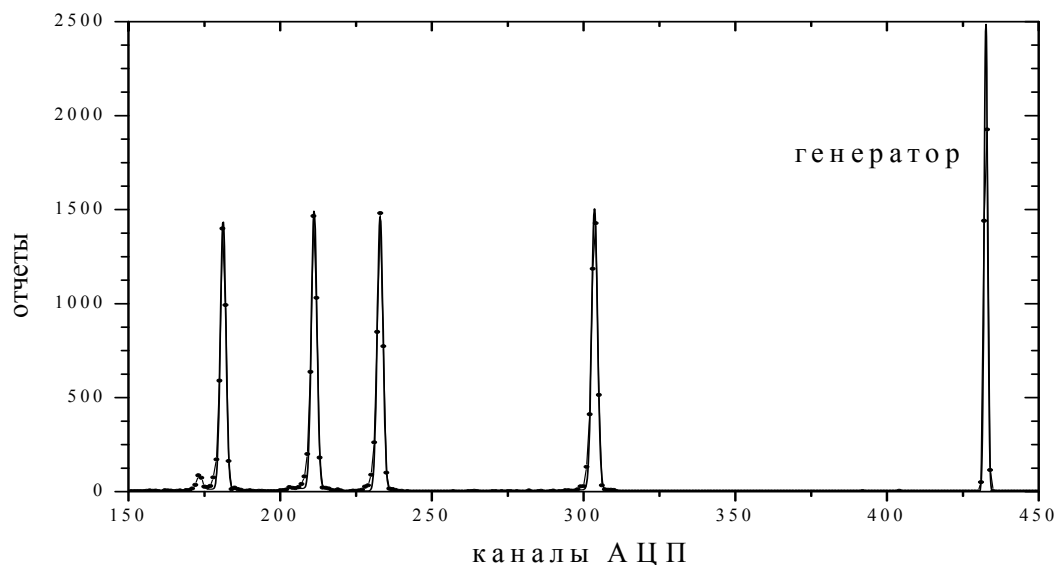


Рисунок 3 – Амплитудный спектр альфа-частиц от источника ^{226}Ra , измеренный с помощью GaAs сенсоров. Крайний слева пик соответствует α -частицам с энергией 4.784 МэВ; второй справа пик – 7.687 МэВ

Кроме того, детекторы демонстрируют энергетическое разрешение порядка 49 кэВ в исследуемом диапазоне энергий. На данном этапе не ставилось задачи определить максимальное энергетическое разрешение разработанных структур. Отметим, в настоящее время имеют-

ся уже наработки по созданию детекторов для альфа-частиц с высоким разрешением на основе соединений галлия [20]. Однако можно говорить о том, что полученный результат достаточно высок с учетом завышенного энергетического эквивалента шума (28.2 кэВ), который определяется в

основном шумами электронного тракта, а также существующих потерь энергии альфа-частиц в выходном окне источника ^{226}Ra .

Измерение температурных характеристик детекторов AsGa

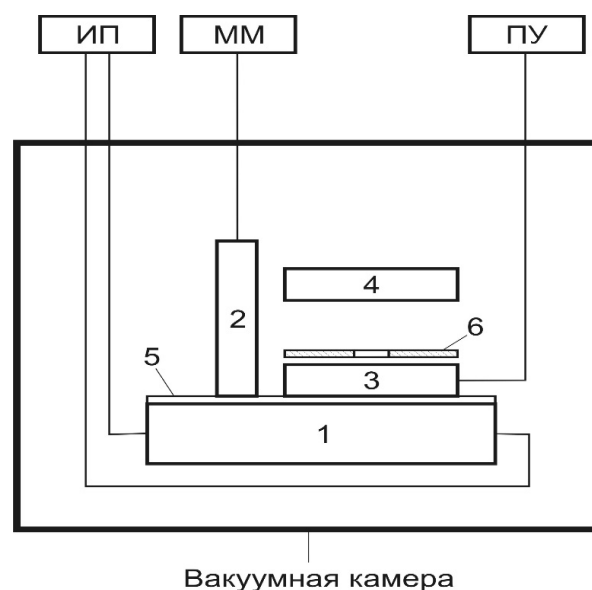
Для измерения температурных характеристик детекторов на основе GaAs необходимо было решить две задачи: создать экспериментальную установку для исследования влияния температуры на разрешение детекторов и измерить спектры альфа-частиц при различных температурных режимах. Созданная установка (рис.4) состоит из следующих компонентов:

- резистивного элемента I , соединенного с источником питания ИП и выполнявшего функцию нагревателя;
- тонкой изолирующей пленки 5, плотно прилежавшей к резистивному элементу I , служащей для устранения наводок надетектор3от резистора I и термопары2;
- детектора GaAs 3, плотно прилежавшего к изолирующей пленке 5 и соединенного с предусилителем ПУ.
- термопары 2, соединенной с мультиметром ММ для измерения температуры изолирующей пленки 5 и соответственно детектора GaAs 3;
- источника альфа-излучения 4;
- диафрагмы 6, установленной перед детектором

Измерения температурных характеристик детекторов проводились при высоком вакууме (давление около 10^{-5} атм). Источник питания, мультиметр и предусилитель были вынесены за пределы вакуумной камеры и соединялись с резистором, термопарой и детектором посредством высоковакуумных разъемов. Для поддержания постоянной температуры детектора установка была оснащена системой автоматического включения и отключения тока.

Тестовое измерение, проведенное при комнатной температуре на данной установке, показало разрешение детектора $\text{FWHM} = 52$ кэВ при энергетическом эквиваленте шума 27 кэВ. Следует отметить, что основными вкладками в энергетическое разрешение в данном случае были потери энергии α -частиц в защитном покрытии источника и шумы электронного тракта. Влияние температуры на разрешение детекторов проверялось в диапазоне от 30 до 150°C при различных напряжениях смещения на детекторе. В интервале температур от 30 до 70°C при постоянном напряжении смещения (60 Вольт) разрешение де-

тектора не претерпевает каких-либо изменений. При дальнейшем увеличении температуры, как видно из рисунка 5, разрешение заметно ухудшается. На рисунке 6 представлены спектры при одной температуре 100°C , но различных напряжениях смещения (60, 80 и 90 Вольт). Видно, что увеличение напряжения существенно улучшает разрешение детектора. При температурах выше 120°C увеличение напряжения смещения уже не оказывает существенного влияния на улучшение разрешения детекторов GaAs.



1 – резистивный элемент, 2 – термопара, 3 – детектор, 4 – источник альфа-излучения, 5 – тонкая изолирующая пленка, 6 – диафрагма, ИП – источник питания, ММ – мультиметр, ПУ – предусилитель

Рисунок 4 – Схема установки, предназначенной для измерения температурных характеристик детекторов GaAs

Не трудно заметить, что при рабочем смещении 60 В детектор выдерживает повышение температуры до 80°C . При дальнейшем росте до 100°C наблюдается дефицит амплитуды 214 кэВ для линии 7.687 МэВ и значительно ухудшается энергетическое разрешение – до 282 кэВ. Подобное поведение спектра следует связывать с уменьшением параметров переноса вследствие снижения подвижности носителей и времени жизни, обусловленного увеличением концентрации ионизированных рекомбинационных центров захвата (прежде всего EL2 центров). Увеличение рабочего смещения до 90 В позволяет нивелировать влияние температуры (рис. 6b), характеристики детектора полностью вос-

становливаются и соответствуют таковым при комнатной температуре. Таким образом, детектор сохраняет спектрометрические качества до температуры порядка 110°C, однако при этом необходимо увеличивать рабочее смещение до

110–130 В. Дальнейшее увеличение температуры до 130°C приводит к катастрофическому ухудшению характеристик детектора – детектор не «различает» отдельные линии источника при рабочих смещениях менее 150 В.

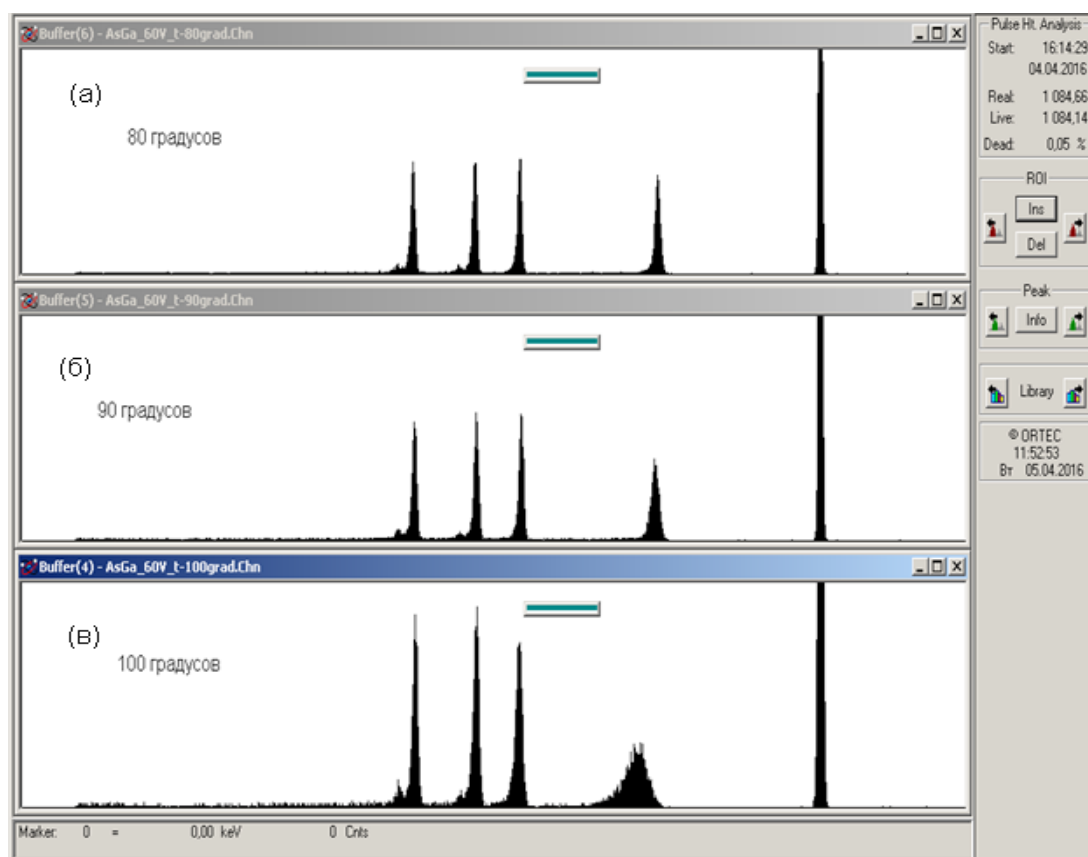


Рисунок 5 – Спектры альфа-частиц при напряжении смещения 60 Вольт и температурах 80°C (а), 90°C (б) и 100°C (в)

Можно утверждать, что температурный диапазон исследуемых детекторов ограничивается температурой 110–120°C и определяется наличием глубоких EL2 центров в материале. Полученный результат значительно превосходит характеристики кремниевых детекторов, которые теряют свои спектрометрические качества уже при температуре 50°C [21,22].

Выводы

Выполнен комплекс испытаний детекторов на основе арсенида галлия–VPE GaAs. При испытаниях с привлечением источников альфа-ча-

стиц и гамма-квантов разработанные детекторы показали высокие характеристики, близкие к соответствующим показателям кремниевых детекторов. Это свидетельствует о высоком качестве эпитаксиальных слоев и разработанных детекторов. Тестовые оценки энергетического разрешения детекторов по параметру FWHM (full width at half maximum), оцененная на альфа-линии 5.499 МэВ от источника ^{238}Pu , составила 52 кэВ при энергетическом шуме 22 кэВ. Полученные результаты позволяют рассчитывать на возможность использования изготовленных структур в качестве сенсора протонов отдачи при регистрации быстрых нейтронов.

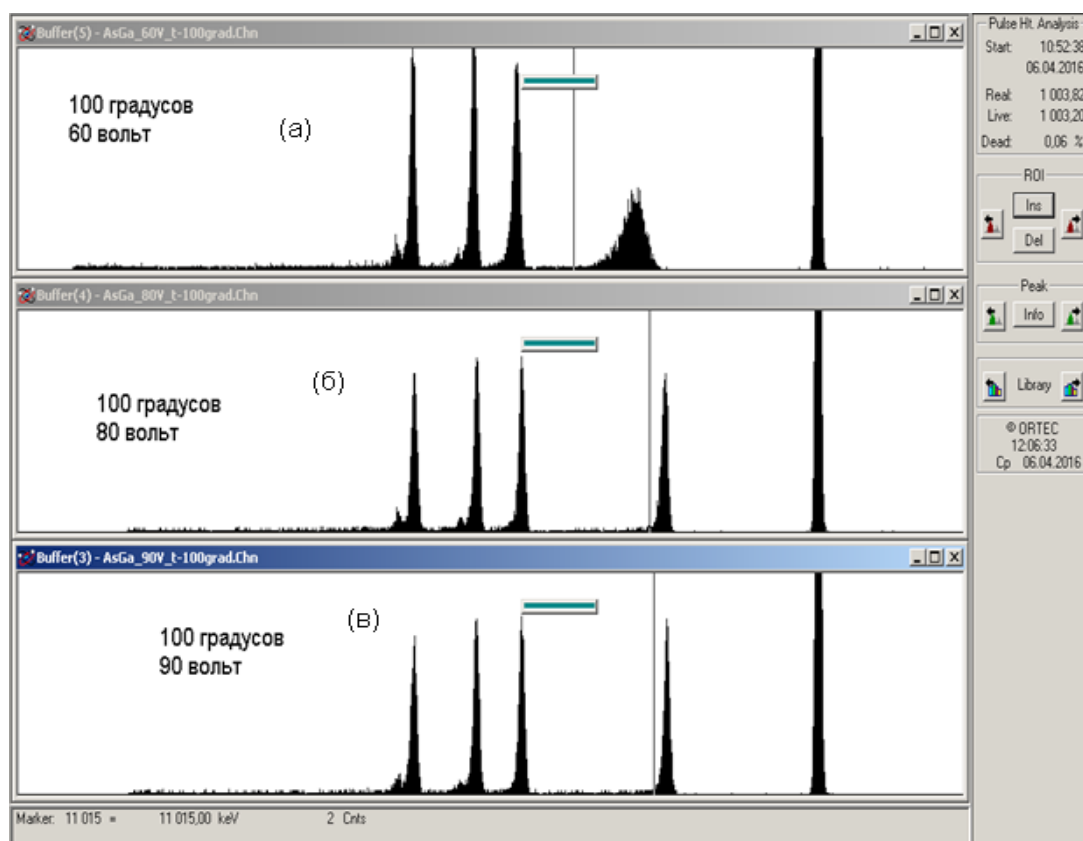


Рисунок 6 – Спектры альфа-частиц при температуре 100°C и напряжениях смещения 60В (а), 80В (б) и 90В (в)

Литература

- 1 Бритвич Г.И. и др. Прототип детектора нейтронов на основе борсодержащего пластического сцинтиллятора – Препринт ИФВЭ 2004-9. – Протвино, 2004. – 22с.
- 2 Шульгин Б.В. и др. Новые детекторные материалы и устройства. – М.: Физматлит, 2009. – 360 с.
- 3 Beluchkin A.V. Modern trends in the development of position sensitive neutron detectors for condensed matter research // *Pramana – J. Phys.* – 2008. – Vol.71, №4. – P. 639.
- 4 Дегтярев Ю.Г. Modern trends in the development of position sensitive neutron detectors for condensed matter research // *Изв. РАН, сер. Физ.* – 2002. – Т.66, N.5. – С. 719-722.
- 5 Kordyasz A.J., Strzelecka S.G., Kownacki J. et al. Response of semi-insulating 100 mkm thick GaAs detector for α -particles, γ -rays and X-rays // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* – 2005. – Vol. A 545. – P. 716.
- 6 Kang S.M., Ha J.H., Park Se-H. et al. Radiation Response of a Semi-insulating GaAs Semiconductor Detector for Charged Particle at Variable Operating Temperature // *Progress in nuclear science and technology.* – 2011. – Vol. 1. – P. 282.
- 7 Zatko B., Dubecky F., Bohacek P. et al. Development and evaluation of semiinsulating GaAs detectors in hot plasmas diagnostics // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* – 2011. – Vol. A 633. – P. S131.
- 8 Sagatova-Perdochova A., Dubecky F., Zatko B. et al. Detectors of fast neutrons based on semi-insulating GaAs with neutron converter layers // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* – 2007. – Vol. A 576. – P. 56.
- 9 Sagatova-Perdochova A., Ladziansky M. and Necas V., GaAs detectors with LiF layer for detection of thermal neutrons // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* – 2008. – Vol. A 591. – P. 98.
- 10 Zatko B., Sedlackova K., Dubecky F. et al. Detection of fast neutrons using detectors based on semi-insulating GaAs // *JINST.* – 2011. – 6 C12047.
- 11 Sagatova A., Zatko B., Sedlackova K. et al. Semi-insulating GaAs detectors optimized for fast neutron detection // *JINST.* – 2013. – 8 C03016.
- 12 Anh T., Perdochova Ly A., Necas V., Pavlicova V.. Radiation resistance study of semi-insulating GaAs-based radiation detectors to extremely high gamma doses // *Nuclear Physics B* – 2006. – Vol. 150. – P. 402.
- 13 Ladziansky M., Sagatova A., Necas V. et al. Deep traps study of radiation-damaged semi-insulating GaAs detectors introduced by neutrons // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* – 2009. – Vol. A 607. – P. 135.

- 14 Черных С.В. и др. Полупроводниковый детектор с внутренним усилением // Патент на полезную модель РФ №178710 от 17.04.2018
- 15 Диденко С.И., Черных С.В., Барышников Ф.М., Мукашев К.М. и др. Анализ характеристик полупроводникового детектора на основе арсенида галлия // Вестник КазНПУ им. Абая. –2015. –Т.3, №51. –С. 147-152.
- 16 Koltsov G.I., Didenko S.I., Chernykh A.V. et al. Contacts to High-Resistivity Epitaxial GaAs Layers for Detectors of Particles and X- or γ -Ray Photons // Semiconductors.– 2012.– Vol. 46, №8. – P. 1066.
- 17 Didenko S.I., Koltsov G.I., Chernykh A.V. et al. Schottky Barriers at Undoped Epitaxial GaAs Films Used For Nuclear Radiation Detectors // International Conference Nuclear Science and its Application 2012. Book of Abstracts.– 2012.– p. 171.
- 18 Baryshnikov F.M., Britvich G.I., Chernykh A.V. et al. Radiation Detectors Based on a Matrix of Ion-Implanted p-i-n Diodes on Undoped GaAs Epilayers // Ion Implantation Technology. (2012 AIP Conf. Proc.) – 2012.– 1496.– P. 50.
- 19 Артемов С.В., Бажажин А.Г., Буртебаев Н. и др. Двумерный анализатор на микроконтроллерах для идентификации и спектрометрии заряженных частиц // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – №1. –с.168-170
- 20 Xu Q. et al. Bulk GaN alpha-particle detector with large depletion region and improved energy resolution // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2017. V. 849. – P. 11-15.22 21.
- 21 Bellinger S.L. et al. Improved high efficiency stacked microstructured neutron detectors backfilled with Nanoparticle ^6LiF // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2012. –Vol. 59, №1. –P. 167-173.
- 22 Буртебаев Н., Мукашев К.М., Насурлла М., Черных С.В. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений на основе арсенида галлия. – Алматы: Қазақ университеті. 2017, 150 с.

References

- 1 G.I. Britvich and et al., Prototip detector neutronov na osnove borsoderzhashego plasticheskogo scintillyatora, Preprint IFVE 2004-9, (Protvino, 2004), 22 p. (in Rus.).
- 2 B.V. Shul'gin and et al., Novye detectornye materialy i ustroistva, (Moskva, Fizmatlit, 2009), 360 p. (in Rus.).
- 3 A.V. Beluchkin, Pramana, J. Phys., 71 (4), 639 (2008).
- 4 Y.G. Dygterev, Izv. RAN. Ser. Fiz., 66 (5), 719-722 (2002). (in Rus.).
- 5 A.J. Kordyasz, S.G. Strzelecka, J. Kownacki et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 545, 716 (2005).
- 6 S.M. Kang, J.H. Ha, Se-H. Park et al., Progress in nuclear science and technology, 1, 282 (2011).
- 7 B. Zatko, F. Dubecky, P. Bohacek et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 633, S131 (2011).
- 8 A. Sagatova-Perdochova, F. Dubecky, B. Zatko et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 576, 56 (2007).
- 9 A. Sagatova-Perdochova, M. Ladziansky and V. Necas, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 591, 98 (2008).
- 10 B. Zatko, K. Sedlackova, F. Dubecky et al., JINST, 6, C12047 (2011).
- 11 A. Sagatova, B. Zatko, K. Sedlackova et al., JINST, 8, C03016 ().
- 12 T. Ly Anh, A. Perdochova, V. Necas, and V. Pavlicova, Nuclear Physics B 150, 402 (2006).
- 13 M. Ladziansky, A. Sagatova, V. Necas et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 607, 135 (2009).
- 14 S.V. Chernykh and et al. Poluprovonikovyi detector s vnutrennim usileniem, Patent na polrznuyu model RF №178710; 17.04.2018 (in Rus.).
- 15 S.I. Didenko, S.V. Chernykh, F.M. Baryshnikov, K.M. Mukashev and et al., Vestnic KazNPU im. Abaya, 3 (51), 147-152 (2005). (in Rus.).
- 16 G.I. Koltsov, S.I. Didenko, and A.V. Chernykh et al., Semiconductors, 46 (8), 1066 (2012).
- 17 S.I. Didenko, G.I. Koltsov, A.V. Chernykh et al., Book of Abstracts of Intern. Conf. Nuclear Science and its Application, 2012, p. 171.
- 18 F.M. Baryshnikov, G.I. Britvich, A.V. Chernykh et al, Ion Implantation Technology. (2012 AIP Conf. Proc.), 1496, 50 (2012).
- 19 S.V. Artemov, A.G. Bazhazhin, N. Burtebaev and et al., Pribory i tekhnika experimenta, 1, 168-170 (2009). (in Rus.).
- 20 Q. Xu et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 849, 11-15.22 21 (2017).
- 21 S.L. Bellinger et al., IEEE Transactions on Nuclear Science, 59 (1), 167-173 (2012).
- 22 N. Burtebaev, K.M. Mukashev, M. Nasyrlla and S.V. Chernykh, Poluprovodnikovye detector yadernykh izluchenii na osnove arsenide Gallia. (Almaty: Qazaq universytety, 2017), 150 p. (in Rus.).