

P13-2006-91

К. Н. Гусев, Ю. Б. Гуров, С. Л. Катулина, В. Н. Павлов,
В. Г. Сандуковский

ПОВЕДЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
ИЗ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ ПРИ
ТЕМПЕРАТУРАХ НИЖЕ 77 К

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

Гусев К. Н. и др.

P13-2006-91

Поведение характеристик полупроводниковых детекторов из кремния и германия при температурах ниже 77 К

Исследовано поведение наиболее широко используемых типов полупроводниковых детекторов при криогенных температурах. Показано, что увеличение напряженности электрического поля внутри детектора в большинстве случаев приводит к восстановлению его спектрометрических свойств. Сделан вывод о возможности применения полупроводниковых детекторов в температурном диапазоне 1–77 К.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Gusev K. N. et al.

P13-2006-91

Performance of Semiconductor Detectors Made from Silicon and Germanium at Temperatures Below 77 K

Performance of most popular types of semiconductor detectors at cryogenic temperatures is investigated. It is shown that the increase of electric field inside detector leads to the restoration of its spectrometric characteristics in most cases. It is presented that semiconductor detectors can function in the temperature range 1–77 K.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2006

Детекторы ядерных излучений из кремния и германия продолжают занимать лидирующее положение в экспериментальной ядерной физике благодаря ряду неоспоримых достоинств. К ним относятся: высокое энергетическое разрешение, компактность, универсальность в отношении вида регистрируемого излучения, а также способность работать в магнитных полях и вакууме. При этом надо отметить, что если детекторы из сверхчистого германия (HPGe) практически полностью вытеснили литий-дрейфовые структуры (Ge(Li)), то кремниевые Si(Li)-детекторы по-прежнему остаются незаменимым инструментом для многих экспериментальных исследований.

Оптимальная температура работы германиевых детекторов — это температура жидкого азота (77 К). Кремниевые детекторы обычно используются в более широком температурном диапазоне от 77 до 300 К. Однако существуют задачи, в которых детекторы нужно охлаждать ниже 77 К. Так, в экспериментах по изучению реакций ядерного синтеза в мюонном комплексе $\mu d^3\text{He}$ [1] Si(Li)-детекторы должны были функционировать при температуре 30 К. Примерами более глубокого охлаждения полупроводниковых детекторов могут служить исследования свойств радиоактивных ядер, ориентированных при низких температурах [2], поиск «темной» материи [3, 4]. Выполненные ранее работы [5–16], посвященные изучению поведения полупроводниковых детекторов при температурах ниже 77 К, содержат неполные и иногда противоречивые сведения. Кроме того, основные исследования выполнены в 60–70-е годы. Очевидно, что с тех пор произошел заметный прогресс в технологии получения чистых монокристаллов кремния и германия, в методике создания детекторов, а также в качестве спектрометрической аппаратуры.

В настоящей работе представлены результаты исследования характеристик наиболее часто используемых в экспериментах типов детекторов из кремния и германия, изготовленных в ЛЯП ОИЯИ (Дубна), в температурном интервале 1–77 К.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Исследование работы детекторов при криогенных температурах проводилось с помощью гелиевого криостата с электронной системой стабилизации температуры, позволявшего охлаждать образцы до 1 К. Схема криостата, специально разработанного для наших измерений, представлена на рис. 1. Исследуемый детектор размещался на массивной медной платформе. Рас-

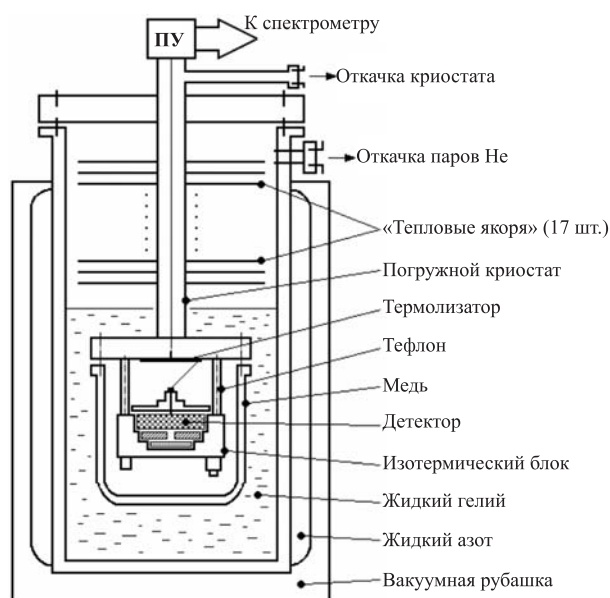


Рис. 1. Испытательный криостат

положенные на ней термодатчик и нагреватель, включенные в автоматизированную систему контроля, давали возможность фиксировать нужную температуру изотермического блока платформа–детектор в диапазоне 1–77 К. В качестве термодатчика использовалось термосопротивление, позволяющее измерять температуру ниже 77 К с точностью $\pm 0,05$ К. Блок, включающий в себя платформу, детектор, радиоактивный источник, термодатчик и нагреватель, располагался внутри вакуумной камеры. Внешней средой камеры на первом этапе снижения температуры являлся жидкий азот, который по достижении температуры детектора ~ 80 К замещался жидким гелием. Особенности конструкции криостата (17 тепловых мостов, специальные термолизаторы, выполненные на каптоне, сигнальные провода из константана и др.) обеспечивали возможность варьировать величину температуры детектора в интервале 1–77 К и поддерживать ее с точностью $\pm 0,1$ К в течение длительного времени (более суток). В этом заключается главное отличие представленного исследования от выполненных ранее, где измерения проводились в режиме непрерывного охлаждения или нагревания. Опуститься по температурной шкале до 1 К позволял метод откачки паров гелия.

Детекторы облучались через коллиматор диаметром 3 мм α -частицами от источника ^{148}Gd – ^{244}Cm с энергиями 3,2; 5,7; 5,8 МэВ.

Было исследовано шесть специально изготовленных детекторов: Si(Li), три поверхностно-барьерных из кремния n - и p -типа проводимости, ионно-имплантированный из n -кремния и HPGe-детектор из германия p -типа (рис. 2). Перед проведением эксперимента все детекторы измерялись в обычных условиях работы и имели спектрометрические характеристики (амплитуду сигнала и энергетическое разрешение), близкие к оптимальным для детекторов данного типа.

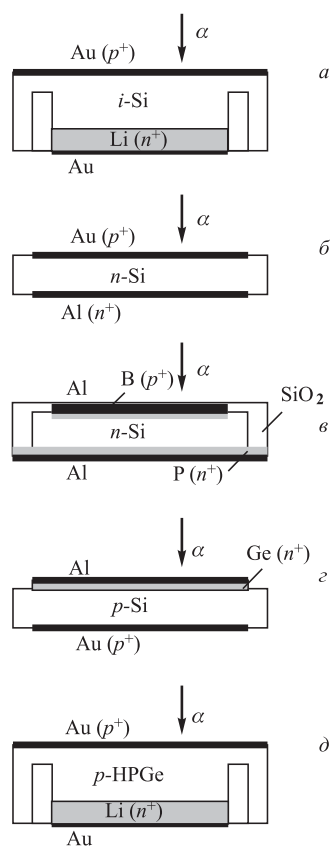


Рис. 2. Структуры исследуемых детекторов

Si(Li)-детектор был изготовлен из p -кремния с удельным сопротивлением $\rho \approx 500$ Ом·см и временем жизни носителей заряда при комнатной температуре $\tau \sim 1$ мс. Активная площадь детектора составляла 5 см^2 , полная толщина — 2,3 мм. Толщина мертвого литиевого слоя ~ 300 мкм. Такая тол-

щина активной области детектора была выбрана для обеспечения высоких значений напряженности поля, так как конструкция криостата не позволяла подавать на детектор напряжение смещения выше 2,5 кВ. Максимально возможная напряженность поля в Si(Li)-детекторе составляла 12500 В/см.

Поверхностно-барьерный детектор Si(Au), изготовленный из *n*-кремния ($\rho \approx 8$ кОм·см, $\tau \approx 800$ мкс), имел активную площадь 8 см² и толщину 400 мкм.

Два поверхностно-барьерных детектора Si(Ge,Al) из *p*-кремния с $\rho \approx 75$ кОм·см и $\rho = 150$ кОм·см имели активную площадь 3 см² и толщины 750 и 2490 мкм соответственно.

Детектор Si(B,P), изготовленный из *n*-кремния ($\rho \approx 6$ кОм·см) по планарной технологии (контакты выполнены ионной имплантацией бора и фосфора), имел активную область 2×2 см и толщину 300 мкм.

HPGe-детектор был изготовлен из сверхчистого германия *p*-типа с разностной концентрацией примесей $|N_a - N_d| = 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Активная площадь детектора — 1 см², толщина — 5 мм. Толщина литиевого *n*⁺-слоя составляла 600 мкм. *p*⁺-контакт детектора получен окислением германия в смеси H₂O₂ + HF с последующим напылением золота.

Съем спектрометрической информации с детекторов осуществлялся с помощью стандартного тракта (предусилитель ORTEC 120F, усилитель ORTEC 450, многоканальный анализатор и ЭВМ). Для контроля стабильности работы тракта использовался генератор точной амплитуды ORTEC 419. Цифровой осциллограф LeCroy 9361 позволял детально исследовать форму сигнального импульса.

Si(Li)-ДЕТЕКТОР

Анализ результатов предыдущих работ, посвященных исследованию работы кремний-литиевых детекторов при криогенных температурах [5–9], показывает, что эти детекторы не способны нормально функционировать при температуре ниже 40 К. Это связано с появлением «медленной компоненты» сигнала (длительность переднего фронта ≥ 2 мкс и снижение амплитуды сигнала). При $T < 20$ К время нарастания импульса увеличивалось настолько, что сигнал практически пропадал из-за ограниченности формировок усилителя.

Зависимость амплитуды сигнала от температуры, полученная в нашем исследовании, представлена на рис. 3. Детектор облучался со стороны *p*⁺-контакта, съем сигнала производился со стороны *n*⁺-контакта. Таким образом, мы наблюдали в основном электронную составляющую сигнала. Заметное уменьшение амплитуды сигнала при низкой напряженности поля в детекторе соответствует данным, приведенным в [8, 9] (кривые 1, 2). При $E = 6000$ В/см (кривая 3) изменение амплитуды уже не столь значительно. При

максимально возможной в нашем случае напряженности $E = 12500$ В/см (кривая 4) уменьшение амплитуды составляет $\leq 30\%$, но сигнал не исчезает вплоть до 1,5 К.

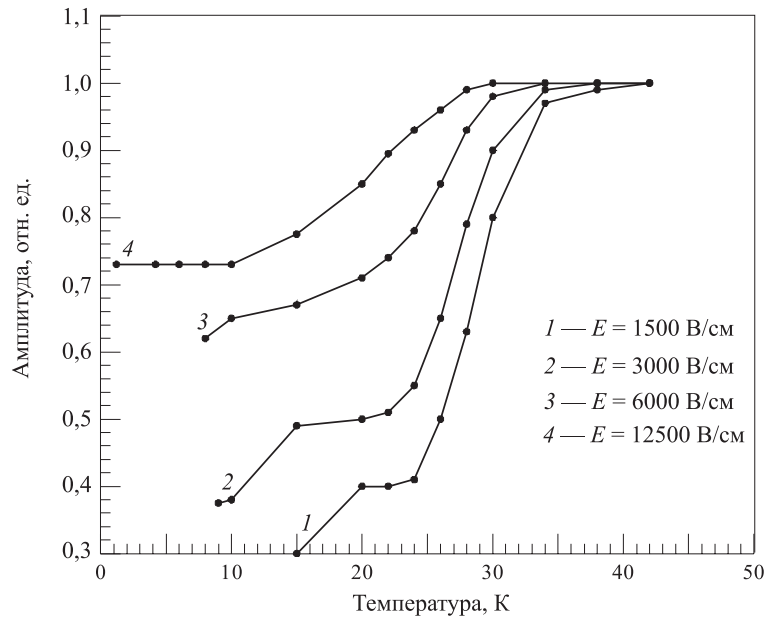


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала Si(Li)-детекторов от температуры при различных напряженностях поля

Снижение температуры до 40 К не приводит к появлению медленной компоненты сигнала. Ниже 26 К ее вклад становится настолько большим, что амплитуда итогового сигнала из-за ограниченности формировок усилителя (10 мкс) сильно уменьшается. В интервале 38–26 К время нарастания сигнала меняется от 0,5 до 30 мкс. Повышение напряженности поля в детекторе приводит к подавлению медленной компоненты (рис. 4) и, соответственно, к росту амплитуды (кривые 2–4 на рис. 3). Таким образом, нормальная эксплуатация Si(Li)-детектора при сверхнизких температурах возможна только при напряженности поля в детекторе выше 12000 В/см. В наших измерениях при $E = 12500$ В/см энергетическое разрешение в диапазоне 25–77 К практически не менялось и соответствовало 18 кэВ. При температуре 10 К и ниже оно также не менялось, но несколько ухудшилось (25 кэВ).

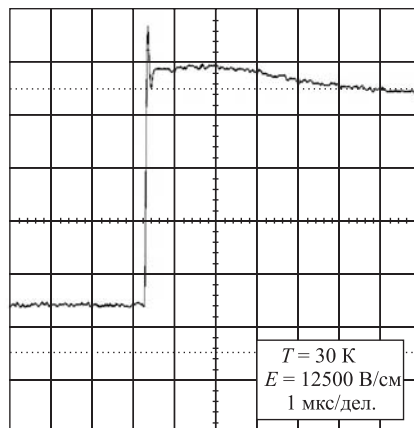
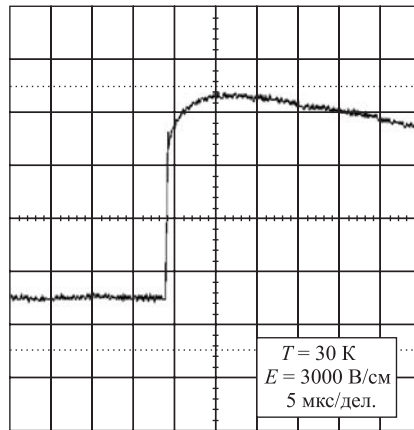


Рис. 4. Изменение формы сигнала Si(Li)-детектора в зависимости от напряженности поля при $T = 30 \text{ K}$

ДЕТЕКТОРЫ ИЗ $n\text{-Si}$

В исследованиях, касающихся особенностей работы поверхностно-барьерных детекторов в условиях низких температур [6], при $T < 30 \text{ K}$ показана аномалия в отклике детектора — появление медленной компоненты в форме сигнала ниже 26 K и соответствующее уменьшение амплитуды сигнала. Увеличение напряжения на детекторе позволяло уменьшить аномалию ниже 14 K , но авторам не удалось полностью избавиться от этого эффекта. В работе [7]

при охлаждении от азотной до гелиевой температуры амплитуда и разрешение практически не менялись, что, по мнению авторов, явилось следствием применения разработанных ими специальных контактов. Данные работы [10] показывают, что при условии создания максимально резких профилей n^+ - и p^+ -контактов детектора и работы в режиме полного обеднения разрешение для α -частиц (Pu-238 — 5,5 МэВ) в диапазоне температур 77–4,2 К ухудшается от 29 до 38 кэВ. В работе [11] вообще не выявлено изменений в характеристиках Si-диода с диффузионными контактами вплоть до 1,4 К.

Результаты наших исследований детектора, изготовленного по планарной технологии, показаны на рис. 5. Аналогичный характер поведения амплитуды сигнала в зависимости от температуры и напряжения наблюдался и для поверхностно-барьерного детектора Si(Au)-детектора. В данном случае основной вклад в амплитуду сигнала давала электронная составляющая. Видно, что при увеличении напряжения на детекторе амплитуда сигнала не зависит от температуры. Время нарастания сигнала для обоих детекторов было ≈ 100 нс. Эта нижняя граница определялась параметрами предусилителя.

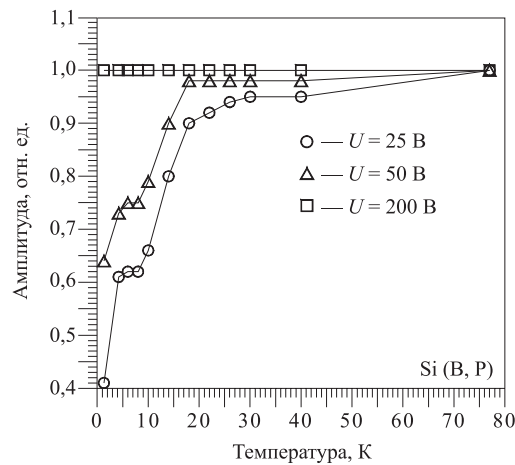


Рис. 5. Зависимость амплитуды сигнала имплантированного (Si(B,P)) детектора, изготовленного из n -Si, от температуры при различных напряжениях

Энергетическое разрешение (FWHM) Si(Au)-детектора изменилось с 17 кэВ при 77 К до 21 кэВ при 4,2 К, для Si(B,P)-детектора FWHM изменилось с 38 кэВ (77 К) до 42 кэВ (4,2 К). Наблюдаемое ухудшение разрешения вероятнее всего, связано с увеличением энергии образования электрон-дырочной пары (ε) при уменьшении температуры. Большая величина энергетического разрешения имплантированного детектора по сравнению с поверхностно-барьерным вызвана значительной толщиной (≥ 2 мкм) входного окна данного детектора.

ДЕТЕКТОРЫ ИЗ p -Si

Зависимости амплитуды сигнала от температуры ниже 77 К для поверхностно-барьерных детекторов, изготовленных из кремния p -типа проводимости, представлены на рис. 6. Эти детекторы рассматриваются отдельно от поверхностно-барьерных детекторов из n -кремния из-за обнаруженных аномалий, различных для детекторов с разным удельным сопротивлением. В этом

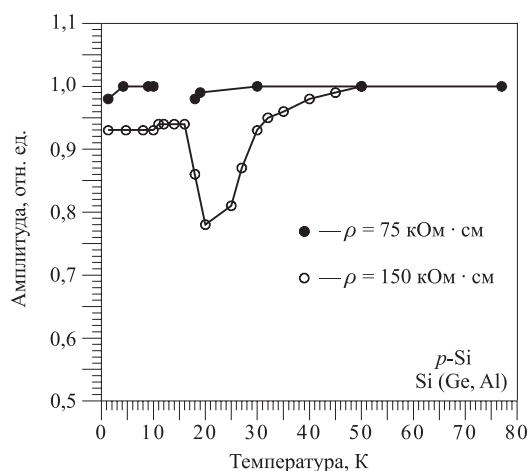


Рис. 6. Зависимость амплитуды сигнала от температуры для поверхностно-барьерных детекторов из p -Si (Si(Ge,Al)), имеющих разные удельные сопротивления

случае регистрировалась в основном дырочная составляющая сигнала (облучение со стороны n^+ -контакта, съём сигнала — со стороны p^+).

У детектора с $\rho \approx 75 \text{ кОм} \cdot \text{см}$ при максимальном напряжении $U = 500 \text{ В}$ амплитуда сигнала не зависит от температуры, а энергетическое разрешение близко к наблюдаемому при азотной температуре (63 кэВ). В интервале от 11 до 18 К подача напряжения не вызывает появления пиков.

У детектора с $\rho \approx 150 \text{ кОм} \cdot \text{см}$ при напряжении $U = 1200 \text{ В}$ также существует область аномальной зависимости амплитуды от температуры (см. рис. 6). Разрешение детектора во всем температурном интервале составляет 60–65 кэВ за исключением $T = 1,3 \text{ К}$, где FWHM = 80 кэВ, и точек, находящихся в области амплитудной «ямы». В этих точках FWHM $\sim 160 \text{ кэВ}$.

Вероятнее всего, аномалии в отклике детекторов из кремния p -типа (исчезновение сигнала или уменьшение его амплитуды) связаны с наличием в исходном полупроводниковом материале примесей, на которых происходит «вымерзание» носителей заряда.

HPGe-ДЕТЕКТОРЫ

Исследования с детекторами из сверхчистого германия (HPGe) при температурах ниже 77 К выполнены в работах [12–16]. Авторы работы [12] показывают, что в диапазоне температур 5–77 К энергетическое разрешение практически не меняется при приложении к детектору достаточно высокого напряжения. Ниже 10 К амплитуда уменьшается при снижении напряжения на детекторе вследствие появления в сигнале медленной компоненты длительностью в несколько мкс. При $T = 5,2$ К с уменьшением напряжения также падает эффективность регистрации. В работе [13] получено, что амплитуда сигнала при $T = 4,2$ К по сравнению с амплитудой при 78 К падает вдвое, но энергетическое разрешение изменяется незначительно: от 3,5 % при 78 К до 4,5 % при 4,2 К. Достаточно полное исследование HPGe-детекторов в диапазоне температур 2–77 К приведено в [14]. Разрешение по электронам и γ -квантам практически не менялось до 4,3 К, медленная компонента с максимумом $\sim 1,5$ мкс появлялась при 4,4 К, при температурах ниже гелиевой сильно увеличивалась, но при увеличении времени формирования разрешение можно было восстановить. Медленная компонента не зависела от напряженности поля вплоть до 3330 В/см.

В наших измерениях с HPGe-детектором получено, что при напряженности поля 3000 В/см амплитуда сигнала остается практически постоянной, плавно уменьшаясь при понижении температуры от азотной до гелиевой на незначительную величину порядка 5 %. При этом не обнаружено никаких аномалий в амплитуде и времени нарастания сигнала во всем исследуемом температурном диапазоне при шаге измерений 0,5 К. Время нарастания сигнала было ≈ 100 нс. Энергетическое разрешение во всем температурном диапазоне составляло порядка 18 кэВ.

Главным выводом из проведенного исследования является то, что наиболее распространенные детекторы из кремния и германия способны сохранять свои спектрометрические характеристики в температурном интервале 1–77 К при условии достаточной напряженности электрического поля. Некоторые ограничения касаются поверхностно-барьерных детекторов из высокоомного *p*-кремния из-за аномальных температурных интервалов, которые являются особыми для каждого образца и определяются удельным сопротивлением исходного материала. Тем не менее, за пределами этих интервалов данный тип детекторов вполне можно использовать.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить В. Ф. Борейко за обеспечение системы измерения и стабилизации температуры, А. В. Ревенко и Т. В. Трофимова за помощь в капсулировании детекторов, а также В. Ф. Кушнирука за полезное обсуждение и Н. И. Замятина за предоставление имплантированных детекторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Del Rosso A. et al.* // Hyperfine Interactions. 1999. V. 118. P. 177.
2. *Wouters J. et al.* // Hyperfine Interactions. 1992. V. 75. P. 379.
3. *Luke P. N. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1990. V. 289. P. 406.
4. *Spooner N. J. C. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1993. V. 40, No. 3. P. 275.
5. *Gregoire G. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1964. V. 28. P. 346.
6. *Dodge W. R. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1964. V. 11. P. 238;
Dodge W. R. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1965. V. 12. P. 295.
7. *Тамбовцев Д. И., Козловский Л. К.* // ПТЭ. 1969. № 5. С. 59.
8. *Martini M., McMath T. A.* // Nucl. Instr. Meth. 1969. V. 76. P. 1.
9. *Martini M., McMath T. A.* // Nucl. Instr. Meth. 1970. V. 79. P. 259.
10. *Афанасьева Н. П. и др.* // ПТЭ. 1982. № 1. С. 73.
11. *Martoff C. J. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1991. V. 301. P. 376.
12. *Stuck R. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1972. V. 19. P. 270.
13. *Выдрик А. А.* // ПТЭ. 1976. № 4. С. 59.
14. *Venos D. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 365. P. 419.
15. *Luke P. N., Steiner H. M., Haller E. E.* // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 41. P. 315.
16. *Hansen W. L.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 365. P. 419.
17. *Горнов М. Г. и др.* // ПТЭ. 1988. № 1. С. 57.

Получено 19 июня 2006 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 06.09.2006.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,63. Уч.-изд. л. 0,74. Тираж 305 экз. Заказ № 55443.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/