

**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

13-85-677

Ц.Вылов, Б.П.Осипенко, В.Г.Сандуковский,
Я.Юрковски

**HPGe - ДЕТЕКТОРЫ
В НЕКОТОРЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

1985

ВВЕДЕНИЕ

Последнее десятилетие отмечено значительными изменениями в области разработки полупроводниковых детектирующих систем. Одним из наиболее примечательных достижений, наряду с появлением кремниевых микростриповых детекторов^{/1/}, явилось получение промышленного ультрачистого германия (HPGe). Хорошо известно, что германиевые детекторы частиц совершили коренную ломку в области спектроскопии γ -излучения и сравнительно недавно начали играть важную роль в спектрометрии заряженных частиц. Ультрачистый германий /имеющий разностную концентрацию примесей $10^9 \div 10^{10} \text{ см}^{-3}$ / открыл новые сферы применения полупроводниковой методики регистрации частиц. Помимо традиционного применения для спектрометрии радионуклидов, HPGe-детекторы стали использоваться в экспериментах физики средних и высоких энергий^{/2/}. Благодаря HPGe появилась возможность разработки многокристалльных германиевых^{/3-5/} а также комбинированных германий-кремниевых^{/6/} телескопов, предназначенных для регистрации γ -излучения и заряженных частиц с большой длиной свободного пробега.

Ранее сообщалось о разработках в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ кремниевых детекторов для многокристального телескопа, используемого при исследовании процессов поглощения пионов атомными ядрами^{/7/}. Появление ультрачистого германия, накопленный опыт работы с полупроводниковыми детекторами позволили изготавливать в ЛЯП ОИЯИ HPGe-детекторы^{/8/}, имеющие спектрометрические параметры, близкие к предельно достижимым. В настоящей работе описываются HPGe-детекторы, имеющие резкие $p-n$ переходы, с малой глубиной залегания, которые могут найти применение в ряде физических экспериментов, в частности, для создания телескопических спектрометров.

ХАРАКТЕРИСТИКИ HPGe-ДЕТЕКТОРОВ

Телескопические полупроводниковые спектрометры применяются в двух областях - спектрометрии и идентификации частиц. В первом случае спектрометры обычно рассчитаны на регистрацию одного сорта частиц. Сигналы от отдельных детекторов используются для селекции тех частиц, которые рассеиваются или участвуют в ядерных реакциях. В спектрометрах-идентификаторах сигналы от

детекторов анализируются с помощью алгоритма идентификации для определения типа частиц и выделения событий, имеющих нарушение зависимости ионизационных потерь энергии, т.е. относящихся к рассеянию или ядерным реакциям.

И в первом и во втором случаях необходимо точно знать толщины нечувствительных областей детекторов - "мертвых" слоев. При этом прецизионность телескопического спектрометра растет с уменьшением мертвых слоев детекторов. Так как технология изготовления стандартного HPGe-детектора включает создание p-n перехода с помощью диффузии лития^{18/}, глубина залегания которого 600 ± 1000 мкм, то возникла необходимость в разработке HPGe-детекторов с небольшой глубиной залегания p-n перехода и резкой границей раздела концентрации примеси диффузионного слоя от основного материала. Некоторым решением этой задачи является низкотемпературная диффузия лития, которая использовалась в работе^{5/}. Но недостатком такого подхода является уменьшение поверхности концентрации лития и, следовательно, снижение качества омического контакта.

Для получения тербуемых p-n переходов в HPGe был разработан метод диффузии лития в сильном температурном градиенте. Для этого использовались световые импульсы нагревателя и охлаждение образца изготавливаемого детектора. Необходимый градиент темпе-

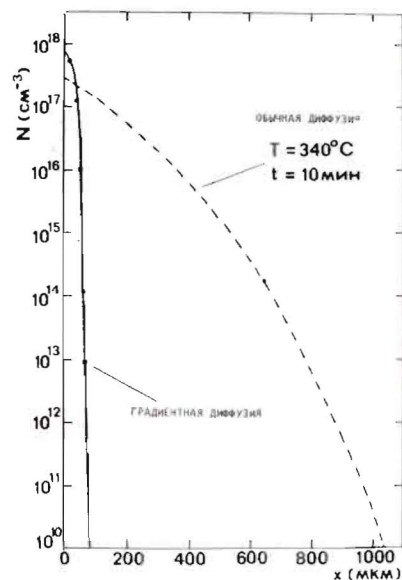


Рис.1. Распределение концентрации лития в HPGe.

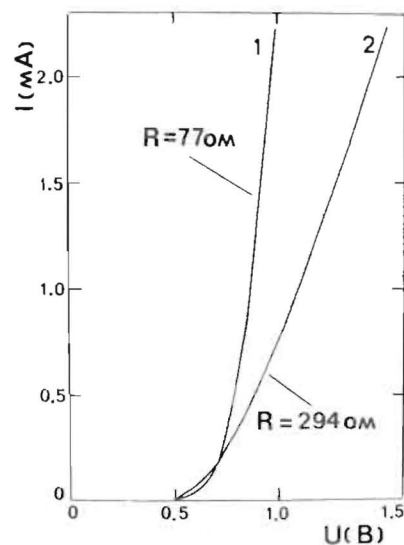


Рис.2. Вольт-амперные характеристики детекторов, измеренные в прямом направлении.

ратуры и, соответственно, коэффициента диффузии лития от поверхности в глубину кристалла достигался выбором режимов импульсного нагрева.

Как показали дальнейшие исследования, метод градиентной диффузии позволяет получать в HPGe резкие p-n переходы с глубиной залегания до 10 мкм. На рис.1 представлен один из примеров распределения концентрации лития в германии после градиентной диффузии. Профиль распределения получен из измерений поверхностной проводимости на сферическом шлифе. В данном случае глубина залегания p-n перехода ~ 80 мкм. Для сравнения на этом же рисунке показано расчетное распределение концентрации лития по глубине при обычной диффузии $/T_{\text{диф}} = 340^\circ\text{C}, t = 10 \text{ мин}/$, которое описывается уравнением $N(x) = N_0(x/2\sqrt{Dt})$, где D и t - коэффициент и время диффузии соответственно.

Технология градиентной импульсной диффузии позволяет разогреть поверхность кристалла до более высоких температур $/\sim 800 \text{ C}/$, что ведет к повышению поверхностной концентрации лития и, следовательно, улучшает качество омического контакта. Для примера на рис.2 показаны вольт-амперные характеристики детекторов, измеренные в прямом направлении для детектора, имеющего обычный диффузионный переход /сопротивление контакта 294 Ом/ и детектора с градиентной диффузией лития /сопротивление контакта 77 Ом/.

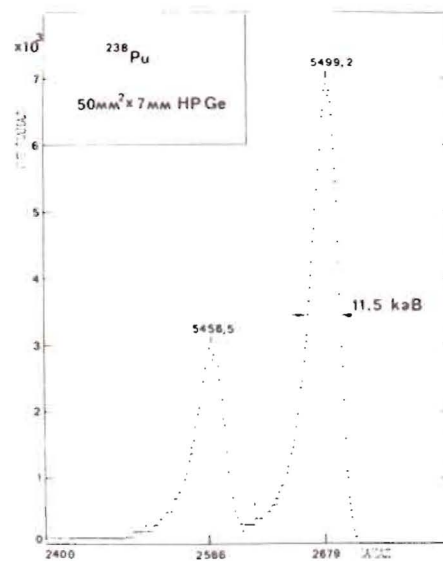


Рис.3. Спектр α -частиц ^{238}Pu , полученный с помощью HPGe-детектора, облучаемого со стороны омического контакта.

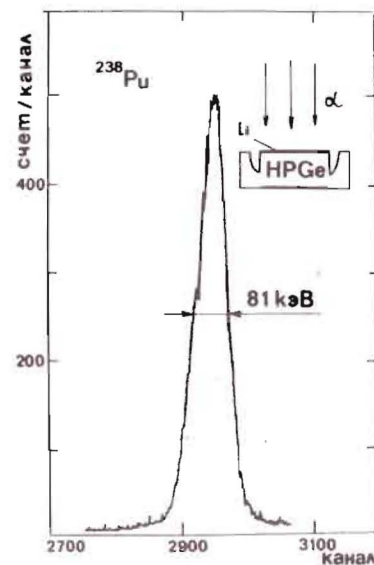


Рис.4. Спектр α -частиц ^{238}Pu , полученный с помощью HPGe-детектора, облучаемого со стороны p-n перехода.

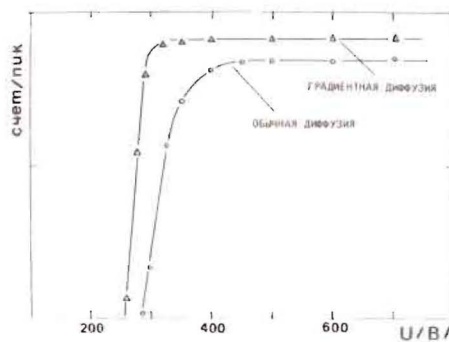


Рис.5. Зависимости эффективности регистрации от приложенного напряжения.

Противоположный контакт (P^+) планарных $HPGe$ -детекторов изготавливался путем окисления поверхности в смеси $H_2O_2:HF$ с последующим напылением золота, либо с помощью ионной имплантации галлия или бора^{18/}, что позволяет иметь тонкую $<1000 \text{ \AA}$ нечувствительную область. Это видно из высокого энергетического разрешения $FWHM = 11,5 \text{ кэВ}$, полученного для α -частиц ^{238}Pu /рис.3/. Следует отметить, что имплантированные контакты являются более надежными, но контакты, полученные с помощью окисления, отличает технологическая простота изготовления.

Проведенные исследования с $HPGe$ -детекторами, облучаемыми α -частицами со стороны литиевого контакта, показали, что можно получать /как видно из рис.4/ тонкие мертвые слои. Измерения с коллимированными α -частицами, падающими на детектор под разными углами, дали величину нечувствительной области со стороны p - n перехода меньше 10 мкм.

Подтверждением резкого, практически ступенчатого характера p - n перехода является зависимость эффективности регистрации от приложенного напряжения, представленная на рис.5. Видно, что она более резко выходит в насыщение у детектора с градиентной диффузией по сравнению с детекторами, изготовленными по стандартной технологии. Известно, что идеальный ступенчатый переход может обеспечить реализацию наилучших эксплуатационных характеристик ППД. Действительно, как показали измерения, резкий переход улучшил характеристики $HPGe$ -детекторов: увеличилось пробивное напряжение, уменьшились обратные токи и улучшилось энергетическое и временное разрешение по сравнению со стандартными детекторами.

ПРИМЕНЕНИЕ $HPGe$ -ДЕТЕКТОРОВ

Разработка методики получения тонких входных окон в $HPGe$ -детекторах позволила предложить эксперимент по поиску двойного безнейтринного бета-распада ($2\beta_{0\nu}$) с помощью многокристального спектрометра совпадений^{19/} /рис.6/. Вопрос существования этого редкого процесса является весьма актуальным. А наиболее чувствительным способом его регистрации обладает в настоящее время техника полупроводниковой спектрометрии. Использование $HPGe$ -детектора $100 \text{ мм}^2 \times 7 \text{ мм}$ дало возможность с высокой точностью

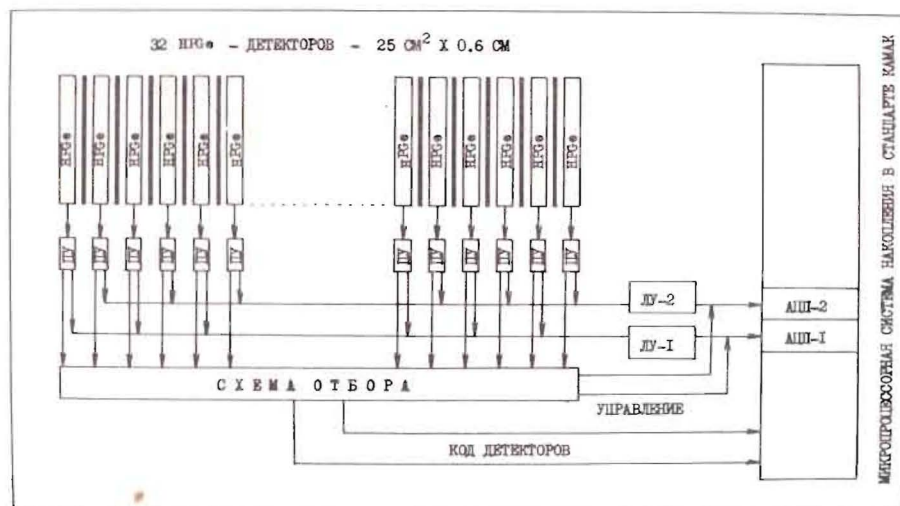


Рис.6. Блок-схема эксперимента по поиску $2\beta_{0\nu}$ -распада с помощью многокристального $HPGe$ -спектрометра.

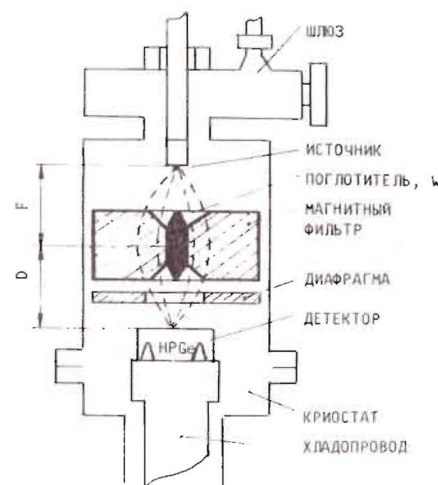


Рис.7. Схема спектрометра "Мини-апельсин".

экспериментально исследовать процесс прохождения электронов через вещество и получить данные о наиболее вероятных потерях и флуктуациях потерь энергии электронов, на основе которых сделана оценка чувствительности спектрометра из 32 $HPGe$ -детекторов по поиску $2\beta_{0\nu}$ -распада ^{48}Ca /9,10/.

Высокие спектрометрические характеристики разработанных детекторов стимулировали создание спектрометра типа "Мини-апельсин", предназначенного для регистрации электронов. В состав спектрометра входит фильтр из четырех постоянных магнитов^{11/}, расположенных вокруг поглотителя из вольфрама, и $HPGe$ -детектор размером $50 \text{ мм}^2 \times 7 \text{ мм}$ /рис.7/. Использование компактного маг-

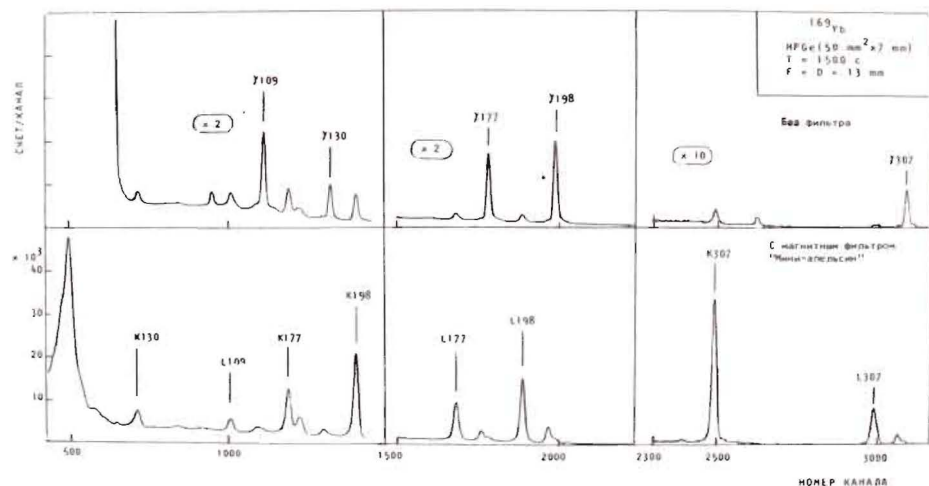


Рис.8. Фрагменты спектра излучения ^{169}Yb , полученные с помощью HPGe-детектора в сочетании с магнитным фильтром и без него.

нитного фильтра в сочетании с HPGe-детектором позволило значительно увеличить избирательность регистрации электронов в диапазоне $100 \div 1000$ кэВ и эффективность измерения. На рис.8 показаны фрагменты спектров электронов внутренней конверсии ^{169}Yb , полученные с помощью "Мини-апельсина", и дано сравнение с измерениями без магнитного фильтра. Видно подавление γ -квантов и рост интенсивности пиков ЭВК /в 8 раз в области 300-600 кэВ/. Применение HPGe-детектора помимо высокого энергетического разрешения привело к появлению важного качества спектрометра - возможности точной энергетической калибровки в процессе эксперимента с помощью внешних γ -источников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные в ЛЯП ОИЯИ HPGe-детекторы с диффузионными резкими $p-n$ переходами отличаются более высокой технологичностью и простотой изготовления по сравнению, например, с аналогичными детекторами, полученными с использованием лазерной методики /12/. Глубина залегания перехода, т.е. мертвый слой хорошо воспроизводится при одинаковых технологических режимах. За счет увеличения концентрации лития у поверхности улучшается качество контакта, что ведет к уменьшению контактных шумов. При этом отсутствие разогрева основной массы кристалла позволяет сохранить характеристики исходного материала. Ступенчатый характер $p-n$ перехода улучшает спектрометрические характеристики детекторов.

Возможность изготовления детекторов с контролируемыми тонкими нечувствительными областями дает возможность их успешного использования для создания различных многокристалльных спектрометров, обладающих большей тормозной способностью и лучшими эксплуатационными характеристиками по сравнению с кремниевыми телескопами.

Говоря о достоинствах HPGe-детекторов с диффузионными переходами, нельзя не отметить два реальных недостатка разработанной методики. Это - размытие с временем диффузионного перехода при нахождении детекторов в комнатной температуре и невозможность термического отжига радиационных повреждений. С этой точки зрения более предпочтительными являются HPGe-детекторы с имплантированными выпрямляющими и омическими контактами.

Работа многокристалльных спектрометров во многом определяется наличием стабильной поверхности детекторов. Поэтому дальнейший путь повышения надежности спектрометров - создание технологичных методов пассивации поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Heijne E. et al. Nucl.Instr.Meth., 1980, vol.178, p.331; Silicon Detectors for High Energy Physics - Proceedings of a Workshop held at Fermilab, October 15-16, 1981.
2. Walton J.T. et al. Nucl.Instr.Meth., 1982, vol.196, p.107.
3. Pehl R.H. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1982, NS-29, No.3, p.1101.
4. Рип Ж. и др. Атомная техника за рубежом, 1981, № 11, с.35.
5. Frisel D.L. et al. Nucl.Instr.Meth., 1983, vol.207, p.403.
6. Vegaki J. et al. Nucl.Instr.Meth., 1981, vol.179, p.55.
7. Горнов и др. ОИЯИ, 13-82-621, Дубна, 1982.
8. Голиков В.М. и др. ОИЯИ, 13-83-669, Дубна, 1983.
9. Вылов Ц. и др. ОИЯИ, Р6-84-554, Дубна, 1984.
10. Маринов А. и др. ОИЯИ, 13-85-99, Дубна, 1985.
11. Гринберг А.П. и др. Прикладная ядерная спектроскопия. Сб. статей. Атомиздат, вып.10, 1981, с.3.
12. Pearton S.J.Nucl.Instr.Meth., 1981, vol.189, p.589.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 сентября 1985 года