шение токов ванадиевого ДПЗ к эталонному, находим чувствительность ванадиевого ДПЗ с эмиттером диаметром 1 *мм*:

$$\varphi_T^V = (1{,}2 \pm 0{,}26)\cdot 10^{-20}\ a\cdot см^2\cdot сек/нейтр\cdot м.$$

Поступило в Редакцию 23/II 1971 г.
В окончательной редакции 15/VII 1971 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Е. Алексеев и др. «Атомная энергия», 28, 139 (1970).
2. К. Бекурц, К. Виртц. Нейтронная физика. М., Атомиздат, 1968.

Детекторы γ-излучения из германия с *i*-проводимостью

В. С. ВАВИЛОВ, Л. А. ГОНЧАРОВ, Т. И. ПАВЛОВА, Я. УХРИН, М. В. ЧУКИЧЕВ

УКД 539.1.074.55

До последнего времени германиевые детекторы для γ-спектрометрии изготовлялись введением ионов лития в *p*-тип материал [Ge (Li)-детекторы] или компенсированием γ-квантами *n*-типа германия (радиационные детекторы). В случае Ge (Li)-детекторов поведение лития при комнатной температуре в кристаллической решетке германия требует непрерывного охлаждения, что усложняет их применение.

Преимуществом метода компенсации германия радиационными дефектами является возможность получения стабильных при комнатной температуре детекторов. Однако технология изготовления спектрометрических детекторов связана с большими трудностями.

Новым этапом развития полупроводниковой спектрометрии γ-квантов является создание детектора на основе высокочистого германия с проводимостью, близкой к собственной [1]. Поскольку терминология для такого типа детекторов еще не установлена, предлагается называть его *i*-германиевый гамма-детектор.

Благодаря работам Р. Холла по очистке германия [2] появилась возможность изготовлять монокристаллы с $N_D - N_A$ до $2\cdot 10^{10}$ $см^{-3}$, что теоретически позволяет получить чувствительный слой толщиной более 10 *см* и хорошее энергетическое разрешение при отсутствии глубоких рекомбинационных центров и центров захвата. Однако Р. Холл при оценке степени чистоты (или остаточной концентрации примесей) ограничивается лишь значением разностной концентрации электрически активных примесей. Ввиду этого дальнейший прогресс применения *i*-германия для изготовления детекторов Холл связывает лишь с глубокой очисткой материала, приводящей к уменьшению $N_D - N_A$, и не рассматривает при этом влияние суммарной концентрации примесей.

Признавая необходимость проведения дальнейших работ по более глубокой очистке германия, не следует под «чистотой» в строгом смысле подразумевать лишь низкое значение $N_D - N_A$.

В работе [3] показано, что при $N_D - N_A \approx 10^{12} \div 10^{11}$ $см^{-3}$ общая концентрация примесей $(N_D - N_A)$ может достигать $\sim 10^{13}$ $см^{-3}$, что характеризует высокий уровень компенсации. При высоком уровне компенсации возрастает рассеяние носителей на заряженных центрах и объемная неоднородность материала, что даже при отсутствии эффектов прилипания будет приводить к ухудшению разрешающей способности детектора. Поэтому исследование влияния степени компенсации на характеристики *i*-детекторов представляется весьма целесообразным.

В нашем эксперименте использовался германий с $N_D - N_A = 1{,}5\cdot 10^{12}$ $см^{-3}$ и $\mu = 3{,}8\cdot 10^4$ $см^2/в\cdot сек$ при 77° К. Кроме того, была измерена суммарная концентрация $N_D + N_A = 1{,}35\cdot 10^{14}$ $см^{-3}$. Значения $(N_D - N_A)$, μ и $(N_D + N_A)$ измерялись на образцах, вырезанных из пластины, непосредственно прилегающей к образцу, использованному для изготовления *i*-германиевого детектора. Ориентация оси роста кристалла была ⟨111⟩, диаметр 28 *мм* при плотности дислокаций $2\cdot 10^3$ $см^{-2}$.

При изготовлении детектора после обычной механической обработки образца был нанесен никель химическим способом. Задняя поверхность образца защищалась маской, и никель с остальной поверхности снимался азотной кислотой. Образец травили в CP4A (три раза по 1 *мин*) и обмывали деионизированной водой. После этого его травили в смеси $HF : H_2O_2$ (1 : 1), время травления 2 *мин*. Затем образец тщательно промывали деионизированной водой. На травленную поверх-

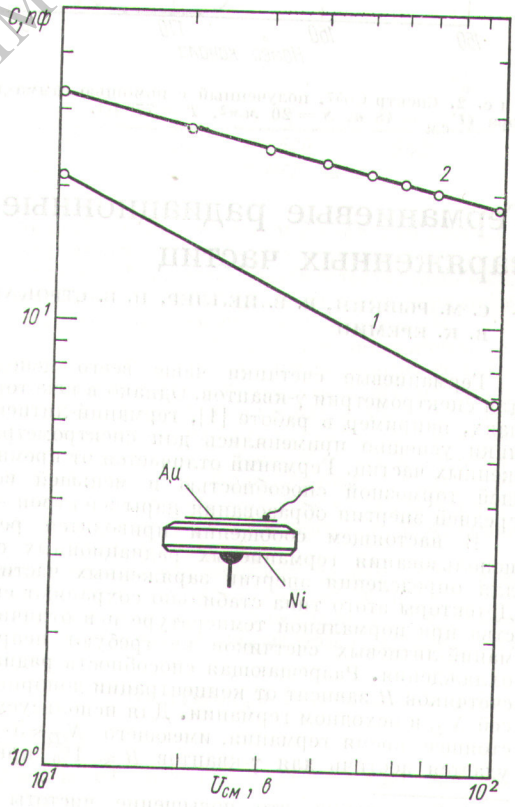

Рис. 1. Вольт-емкостная характеристика *i*-Ge-гамма-детектора:

1 — емкость детектора; *2* — емкость детектора и криостата.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

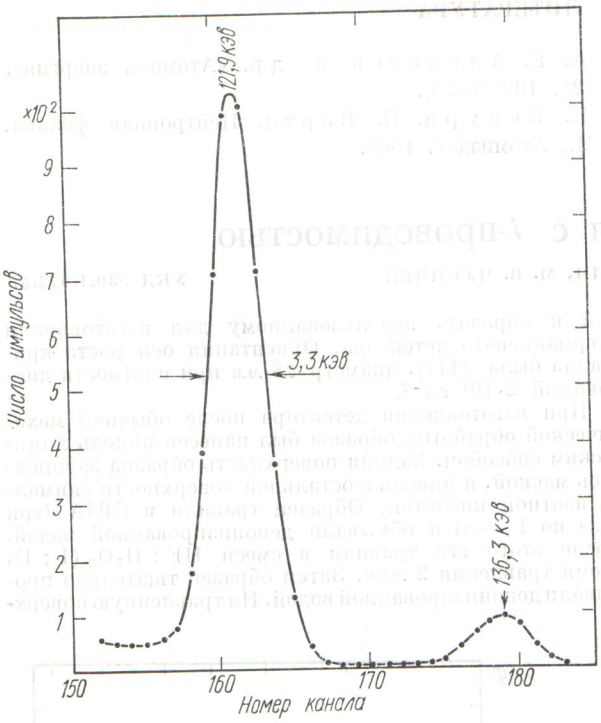

Рис. 2. Спектр Co^{57}, полученный с помощью гамма-детектора ($U_{см} = 48$ *в*, $S = 20$ *мм*², $T = 77°$ К).

ность напылялось золото, к которому приклеивался вывод с помощью серебряной пасты (FSP-49). Поверхностно барьерный детектор упаковывали в криостат для проведения последующих измерений.

Была снята вольт-емкостная характеристика детектора (рис. 1). Наклон кривой получается порядка 0,5 — типичный результат для резкого p — n-перехода. На этом детекторе был снят спектр источника Co^{57} при смещении 50 *в*. Полученный результат показан на рис. 2. Собственные шумы электроники составляли ~ 1,6 *кэв*. Как видно из рисунка, полное разрешение равно 3,3 *кэв*.

Таким образом, полученные результаты показывают, что приемлемая для изготовления спектрометрических детекторов однородность исходного материала может быть достигнута даже при значительном уровне компенсации, и, следовательно, с уменьшением суммарной концентрации примесей спектрометрические свойства детекторов могут быть улучшены. Полученные результаты также указывают на возможность применения сильнокомпенсированного материала при изготовлении детекторов для решения некоторых физических задач.

Поступило в Редакцию 30/VII 1971 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Tavendale. Nucl. Instrum. and Methods, 84, 314 (1970).
2. R. Hall. Semiconductor Nuclear-Particle Detectors and Circuits. Publ. No. 1593, Washington, National Academy of Sciences, 1969, p. 171.
3. Б. А. Сахаров и др. «Цветные металлы», № 7, 52 (1970).

Германиевые радиационные счетчики как спектрометры заряженных частиц

С. М. РЫВКИН, В. В. ПЕЛЛЕР, Н. Б. СТРОКАН, В. П. СУБАШИЕВА, Н. И. ТИСНЕК, В. К. ЕРЕМИН

УДК 539.1.074.55

Германиевые счетчики чаще всего используются для спектрометрии γ-квантов. Однако в некоторых случаях, например в работе [1], германий-литиевые счетчики успешно применялись для спектрометрии заряженных частиц. Германий отличается от кремния большей тормозной способностью и меньшей величиной средней энергии образования пары электрон — дырка.

В настоящем сообщении приводятся результаты использования германиевых радиационных счетчиков для определения энергии заряженных частиц [2—4]. Детекторы этого типа стабильно сохраняют свои свойства при нормальной температуре и в отличие от германий-литиевых счетчиков не требуют непрерывного охлаждения. Разрешающая способность радиационных счетчиков R зависит от концентрации донорных примесей N_D в исходном германии. Для используемого в настоящее время германия, имеющего $N_D \approx 5 \cdot 10^{12}$ *см*$^{-3}$, удается достичь для γ-квантов $R \lesssim 1\%$ при рабочей зоне $d = 5$ *мм* [4]*. Однако если ионизация возникает вблизи p-контакта и дырки должны перемещаться на расстояния менее 1 *мм*, следует ожидать заметного улучшения разрешения (по сравнению с $R \approx 1\%$).

Другим путем улучшения R является использование анизотропии дрейфовой скорости электронов. Известно [6], что в кристаллографическом направлении [100] предельная дрейфовая скорость в 1,6 раза выше, чем при движении в [111]-направлении, обычно используемом при росте германия. Действительно, наблюдение импульсов тока непосредственно в счетчике подтвердило факт большей скорости по [100]. Поэтому в спектрометрии короткопробежных частиц представляется целесообразным использовать счетчики, выполненные на германии, выращенном в направлении [100]. При этом спектрометрию частиц следует проводить, облучая счетчик через p-контакт.

В проведенных измерениях использовались счетчики, полученные из германия с исходной концентрацией примесей $\sim 5 \cdot 10^{12}$ *см*$^{-3}$ и имевшие ориентацию как [111], так и [100]. Детекторы монтировались в разборные капсулы и облучались α-частицами Pu^{238} и электронами препарата Bi^{207} (см. рисунок). Несмотря на значительный шум электроники, наблюдается тен-

* Естественно, что повышение чистоты германия позволит улучшить R или расширить рабочую зону. В случае особо чистого германия с концентрацией нескомпенсированных примесей $\sim 10^{10}$ *см*$^{-3}$ [5] можно получить $d \approx 1$ *см*.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. СКОРИНЫ