

ния ядер в 3—4 порядка при однократном режиме обработки или 5—6 порядков в сочетании со ступенчатым режимом травления, могут оказаться полезными при измерениях пространственного распределения плотности нейтронного потока, при регистрации событий с неизвестной заранее дозой облучения, например в роли аварийных дозиметров, и т. п.

Поступило в Редакцию 23/IX 1974 г.

УДК 621.315.592

## Детекторы гамма-квантов радиационного типа на основе «чистого» германия

ЕРЕМИН В. К., ДУДНИК Е. П., ЛЕВИНЗОН Д. И., СТРОКАН Н. Б., ТИСНЕК Н. И., ЧИКАЛОВА О. П.

В последнее время разработка полупроводниковых детекторов ядерных излучений вызывает большой интерес к материалам с концентрацией нескомпенсированных примесей  $|N_D - N_A| \leq 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Столь малые концентрации могут быть достигнуты за счет чрезвычайно высокой чистоты материала или применения различных методов компенсации. Первый путь реализован в работах [1, 2], где получен германий с  $|N_D - N_A| \approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Среди методов компенсации известны способ дрейфа ионов  $\text{Li}^+$  [3], а также методика «холодного легирования» [4], позволяющая получить детекторы, не нуждающиеся в непрерывном охлаждении даже в режиме хранения. В настоящей сообщении описаны возможности холодного легирования на примере германия с  $N_D - N_A \approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

Для получения детектора холодным легированием с большим рабочим объемом и высокой разрешающей способностью примесный состав исходного материала должен быть таким, чтобы при компенсации создавались радиационные дефекты с достаточно «глубокими» акцепторными уровнями и исключалась нежелательная раскомпенсация в области сильного поля [5, 6]. Если возникают уровни, способные дать раскомпенсацию, то необходимо достичь таких концентраций радиационных дефектов, при которых они не заполнены электронами. Кроме того, материал должен обладать высокой однородностью для исключения  $n - p$ -конверсии при компенсации в некоторых областях, следствием чего является резкая неоднородность поля [7].

Поскольку разрешающая способность детектора зависит от времени жизни неравновесных носителей, определенное условие налагается на произведение концентраций центров, введенных при компенсации (т. е. исходные  $N_D - N_A$ ), и сечений захвата ими носителей. Система радиационных дефектов в германии при облучении  $\gamma$ -квантами в принципе удовлетворяет указанным требованиям [8].

Проиллюстрируем сказанное на примере использования достаточно «чистого» германия  $n$ -типа с концентрацией  $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Материал был получен по методу Чохральского на печи «Редмет-4М» с использованием турбомолекулярного (ТМН-200) и титанового (ГВН-0,2) насосов, обеспечивающих вакуум в печи  $1 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$

В качестве исходного использовался зонно-очищенный германий с удельным электросопротивлением при

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gold R., Armani R., Roberts J. «Nucl. Sci. and Engng», 1968, v. 34, N 1, p. 13.
2. Малыхин А. П. и др. «Изв. АН БССР. Сер. физ.-энерг. наук», 1970, № 2, с. 16.
3. Физические основы использования кинетической энергии осколков деления в радиационной химии. Под ред. А. К. Красина. Минск, «Наука и техника», 1972.

температуре  $-78^\circ \text{C}$  более 500 Ом-см, полученный из королькового с удельным электросопротивлением при комнатных температурах более 20 Ом-см. В процессе зонной плавки путем воздействия кислородсодержащей среды на расплав (использовался аргон, содержащий 0,02% кислорода) [9] исходный германий дополнительно очищался от примесей Si, C, B, Al и др.

Большое внимание уделялось выбору материала контейнера для плавки. Лучшим оказался материал спеченной двуокиси кремния, из которого были изготовлены тигель и экраны. Монокристалл выращивался со скоростью 2 мм/мин при оборотах затравки 60 об/мин. После расплавления германия расплав подвергался дегазации при температуре  $1200^\circ \text{C}$  в течение 30 мин, затем температура снижалась и кристалл выращивался в бездислокационном режиме, т. е. затравление проводилось по Дешу, угол разрачивания кристалла не превышал  $60^\circ$ .

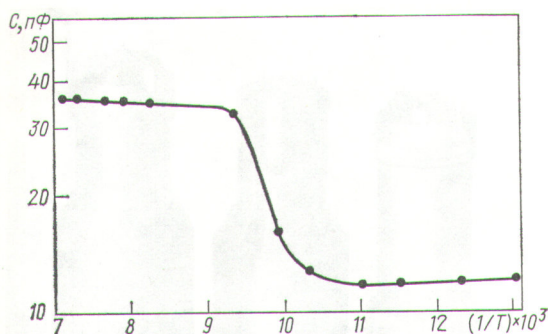
При компенсации проводимости образец облучался такой дозой  $\gamma$ -излучения, чтобы в  $s$ -зоне осталась концентрация  $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Последнее позволяет в принципе достичь области поля  $\sim 5 \text{ мм}$  при смещениях около 300 В аналогично случаю сверхчистого германия.

Для выяснения уровней, возникающих в запрещенной зоне при компенсации, были проведены исследования изменений емкости с температурой  $C(T)$  и примесной подсветкой  $C(h\nu)$ . Из хода  $C(T)$  следует наличие уровня  $E_c = 0,27 \text{ эВ}$  в концентрации  $1,45 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  (рис. 1). Фотоемкостные измерения указывают на присутствие еще одного более глубокого уровня  $E_{x+} + 0,33 \text{ эВ}$  (рис. 2). Положение наблюдаемых уровней таково, что они не могут дать раскомпенсацию при рабочей температуре детектора.

Ступенчатый ход зависимости  $C(T)$  показывает также, что при компенсации в образце не возникли области  $p$ -типа, так как при наличии областей с  $n - p$ -конверсией функция  $C(T)$  должна иметь максимум.

Спектротрические характеристики детектора достаточно высоки. Так, разрешение на линии  $^{60}\text{Co}$  (1,33 МэВ) составляло 0,24% при толщине рабочей области 5 мм. Это разрешение лишь в два раза превышает предельное, определяемое флюктуациями ионизации.

Определенное из собирающего компонента разрешения эффективное сечение захвата дырок довольно



Р и с. 1. Температурная зависимость емкости детектора. Напряжение смещения 30 В, частота пробного сигнала 330 Гц

велико ( $\sigma_{эф} = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^2$ ), однако концентрация  $N_D - N_A$  обеспечила сохранение достаточно большого времени жизни.

В последнее время в связи с экспрессным анализом химического состава веществ особое значение приобрела спектроскопия излучения низких энергий в области 5—50 кэВ. Разрешение 0,24% безусловно достаточно для этих целей, поскольку в указанной области шум электроники дает вклад в разрешение  $> 1\%$ .

Можно утверждать, что очистка материала до  $N_D - N_A \approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$  при последующем применении холодного легирования достаточна для получения детекторов с высокими спектротметрическими характеристиками, по крайней мере в области мягкого излучения.

Поступило в Редакцию 24/IX 1974 г.

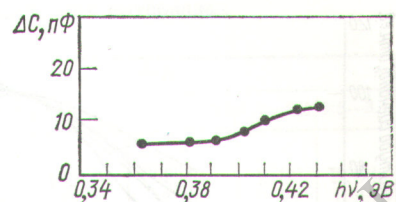
УДК 539.1.074

## Сравнительная характеристика детекторов NaI(Tl) и CsI(Tl)

СОБОРНОВ О. П., ЩЕГЛОВ О. П.

Путем сопоставления характеристик и спектротметрических параметров детекторов аналогичных размеров определяли возможность применения детекторов CsI(Tl) в исследованиях, где обычно используются детекторы NaI(Tl). На рис. 1 представлены обобщенные характеристики изменения световых выходов (амплитуды сигнала) детекторов и сцинтилляционных блоков с кристаллами NaI(Tl), CsI(Tl) и CsI(Na), полученные на основе исследований [1] и анализа данных [2—7].

Сравнение фотоэффективностей спектротметрических детекторов проводилось на кристаллах NaI(Tl) и CsI(Tl) наиболее употребительных диаметров  $40 \times 40$ ;  $63 \times 63$  и  $80 \times 80$  мм. Кроме того, использовались сцинтилляционные блоки с кристаллами NaI(Tl), CsI(Tl) и CsI(Na) диаметрами  $76 \times 76$ ;  $63 \times 63$  и  $40 \times 40$  мм и ФЭУ-110, ФЭУ-93, ФЭУ «Комета» (с многощелочным катодом диаметром 40 мм). На рис. 2 показан внешний вид сцинтилляционных блоков. Все измерения проводились на низкофоновой установке, ослабляющей излучение внешней среды до 100 раз [8]. Спектротметрические параметры всех детекторов определяли на одном



Р и с. 2. Зависимость изменения емкости детектора при примесной подсветке от энергии квантов. Напряжение смещения 15 В, частота пробного сигнала 1 кГц, температура 78 К, время подсветки 15 мин

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hall R., Soltys T. «IEEE Trans», 1971, v. NS-18, N 1, p. 160.
- Hansen W. «Nucl. Instrum. and Methods», 1971, v. 94, N 2, p. 381.
- Pell E. «Appl. Phys.», 1961, v. 31, p. 291.
- Рывкин С. М. и др. ЖТФ, 1964, т. 34, с. 1535.
- Ryvkin S. e. a. «IEEE Trans», 1968, v. NS-15, N 3, p. 226.
- Маковский Л. Л. и др. В сб.: Физика электронно-дырочных переходов и полупроводниковых приборов. М., Л., «Наука», 1969.
- Рывкин С. М. и др. «Физика и техника полупроводников», 1970, т. 4, с. 1303.
- Сборник тезисов Всесоюз. симп. «Радиационные дефекты в твердых телах». Минск, изд. БГУ, 1972.
- Левинзон Д. И., Нефедов В. Н. «Изв. АН СССР. Неорганические материалы», 1974, т. 10, № 1, с. 9.

ФЭУ-110. Энергетический диапазон исследований 0,6—3,0 МэВ. Использовали точечный ( $^{137}\text{Cs}$ ) и распределенные ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) источники  $\gamma$ -излучения. В последнем случае контейнеры с источниками окружали исследуемый детектор слоем  $\sim 12$  мм, создавая геометрию облучения, близкую к 4л. Это позволило наиболее полно охарактеризовать качественные показатели детекторов в условиях, близких к реальным при проведении многих геофизических и космофизических исследований. В табл. 1 приведены основные спектротметрические параметры сравниваемых детекторов и их относительные фотоэффективности, полученные при измерениях одних и тех же распределенных источников  $\gamma$ -излучения в идентичных условиях. Погрешности в определении фотоэффективностей обусловлены главным образом допуском на размеры кристаллов ( $-1$  мм для кристаллов диаметром  $40 \times 40$  мм и  $-2$  мм для кристаллов диаметром  $80 \times 80$  мм) и оцениваются в 10%. Погрешности измерений при использовании сцинтилляционных блоков не превышают 3%. Так как параметры детекторов зависят от геометрии