

УДК 539.1.08.074.55

Детекторы ионизирующих излучений на основе радиационно-стойких кристаллических полупроводников типа In_2Te_3

КОШКИН В. М., ГАЛЬЧИНЕЦКИЙ Л. П., КУЛИК В. Н., ГУСЕВ Г. К., УЛМАНИС У. А.

Использование полупроводниковых детекторов для дозиметрии больших доз и интенсивностей считалось принципиально невозможным из-за радиационной нестойкости и полной деградации их физических параметров под действием даже сравнительно малых доз ионизирующего излучения [1]. В работе [2] был обнаружен эффект аномально высокой радиационной стойкости целого класса полупроводниковых кристаллов типа In_2Te_3 , что создало возможность конструирования принципиально новых твердотельных детекторов ионизирующих излучений.

Все методы детектирования ионизирующих излучений, например калориметрический, калориметрический (за исключением ионизационных камер), основываются на измерениях дозы, а не интенсивности потока, что, в частности, принципиально исключает возможность автоматизации процессов, связанных с применением ионизирующих частиц для технологических целей. По сравнению с ионизационными камерами полупроводниковые детекторы обладают рядом преимуществ: высокой чувствительностью, малогабаритностью, простотой конструкции, малым напряжением питания, простым согласованием с измерительными усилителями и т. д.

В работах [2—5] показано, что физические параметры — электропроводность и ее температурная зависимость, время жизни неравновесных носителей заряда, подвижность, концентрация носителей заряда, абсолютная величина фотопроводимости, спектральная зависимость фотопроводимости, спектральный коэффициент оптического поглощения, микротвердость полупроводниковых кристаллов In_2Te_3 , Ga_2Te_3 и Ga_2Se_3 — обладают аномально высокой стойкостью к облучению различными видами ионизирующих излучений по сравнению с известными полупроводниковыми материалами (германий, кремний и т. д.).

Облучение быстрыми нейтронами ($E_n \geq 1,0 \text{ МэВ}$) $F_n = 1,0 \cdot 10^{18} \text{ нейтр./см}^2$, быстрыми электронами ($E_e = 100 \text{ МэВ}$) $F_e = 1,0 \cdot 10^{19} \text{ электр./см}^2$ и γ -квантами (^{60}Co) $F_\gamma = 3,0 \cdot 10^{18} \text{ квант./см}^2$ не изменяет значения указанных физических параметров в пределах погрешности эксперимента. Экспери-

ментальные данные пока отсутствуют, однако по теоретическим расчетам [6, 7] радиационная стойкость сохраняется и при значительно больших значениях флюенса.

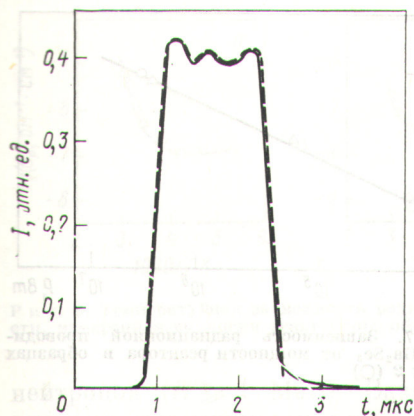
Важное свойство материалов In_2Te_3 , Ga_2Te_3 и Ga_2Se_3 , в которых примесные атомы электрически неактивны, было экспериментально и теоретически исследовано в работах [8—10]. Это свойство предопределяет, с одной стороны, высокую «технологичность» материалов этого типа, не требующих глубокой очистки от примесей, а с другой — приводит к тому, что проводимость таких материалов всегда является собственной или близкой к таковой, так как равновесная концентрация носителей заряда определяется только шириной запрещенной зоны. Ширина запрещенной зоны In_2Te_3 , Ga_2Te_3 и Ga_2Se_3 составляет 1,18; 1,27 и 1,95 эВ соответственно. Поэтому все кристаллы независимо от технологических условий приготовления являются высокоомными.

Для использования радиационно-стойких материалов в качестве рабочих элементов детекторов необходимо, чтобы наряду с радиационной стойкостью какие-либо параметры обратимо изменялись в зависимости от интенсивности и энергетического спектра ионизирующего излучения, т. е. обладали бы достаточной чувствительностью по отношению к параметрам ионизирующего излучения.

Настоящая работа посвящена изучению возможности применения указанных материалов в качестве рабочих элементов детекторов различного вида ионизирующих излучений. С этой целью исследовалась радиационная проводимость, вызванная различными видами ионизирующих излучений.

Испытания проводились на γ -установках с источниками ^{60}Co и ^{137}Cs ($E_\gamma = 1,2$ и $0,66 \text{ МэВ}$ соответственно) на ускорителе электронов с энергией в диапазоне 10—290 МэВ и на атомном реакторе ИРТ-2000.

Детекторы быстрых электронов. Исследования проводились на импульсном ускорителе электронов. Длительность импульса электронов 1,5 мкс, частота следования: одиночные; 0,125; 0,25; 12,5; 25 и 50 Гц. Изученный диапазон энергии электронов 10—295 МэВ, диапазон

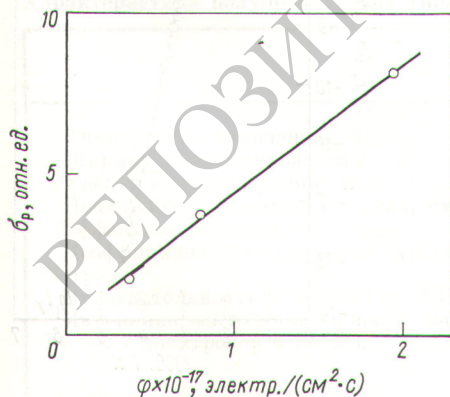


Р и с. 1. Импульс тока ускорителя (---) и импульс напряжения на образце (—)

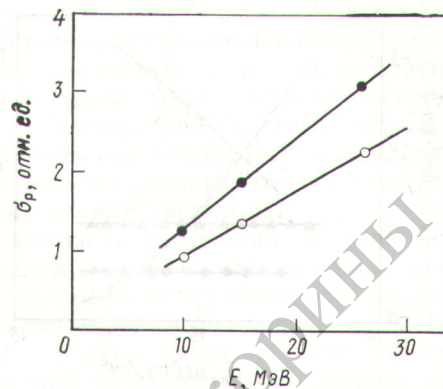
плотности потока электронов в импульсе тока ускорителя 10^{16} – 10^{18} электр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Во время облучения для охлаждения образцы обдувались сжатым воздухом. Температура образцов 310 ± 10 К. Размеры образцов In_2Te_3 , Ga_2Te_3 , Ga_2Se_3 составляют $2 \times 4 \times 5$ мм.

Характерный импульс тока в образце In_2Te_3 , возбужденный импульсом потока электронов с энергией 25 МэВ, представлен на рис. 1. На рис. 2 приведена зависимость радиационной проводимости σ_p в точке максимума сигнала от плотности потока электронов, на рис. 3 — зависимость радиационной проводимости полупроводника Ga_2Te_3 от энергии быстрых электронов.

Эти характеристики кристаллов не изменяются после облучения максимально достигнутым в этих экспериментах флюенсом быстрых электронов ($F_3 = 4 \cdot 10^{17}$ электр./ см^2). Не изме-



Р и с. 2. Зависимость относительной радиационной проводимости Ga_2Te_3 от плотности потока электронов с энергией 275 МэВ

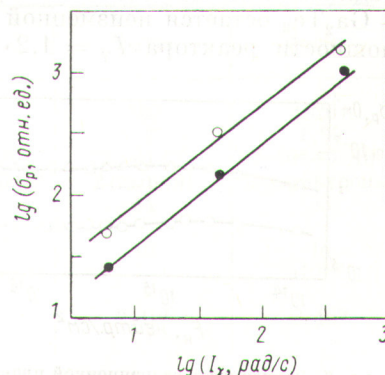


Р и с. 3. Зависимость относительной радиационной проводимости Ga_2Te_3 от энергии электронов при плотности потока $2,8 \cdot 10^{17}$ (○) и $5,6 \cdot 10^{17}$ (●) электр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$

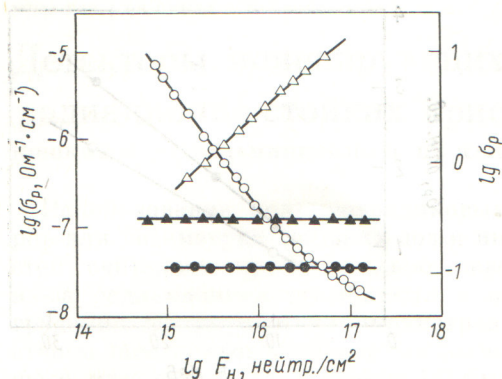
няется время жизни неравновесных носителей заряда, о чем свидетельствует неизменность спадающей релаксационной ветви радиационной проводимости в образцах. Подобные результаты получены также на образцах материалов In_2Te_3 и Ga_2Se_3 .

Результаты свидетельствуют о возможности создания радиационно-стойких спектрометров и детекторов быстрых электронов на основе материалов типа In_2Te_3 .

Детекторы гамма-излучения. Исследования проводились на аттестованных γ -установках: источник ^{60}Co ($E_\gamma = 1,2$ МэВ), мощность дозы $I_\gamma = 500$ рад/с; источник ^{137}Cs ($E_\gamma = 0,66$ МэВ), мощность дозы $I_\gamma = 50$ и 8 рад/с. Исследовались образцы Ga_2Se_3 . Температура образцов во время эксперимента 295 ± 5 К. На рис. 4 представлена зависимость радиационного тока в кристаллах Ga_2Se_3 от мощности дозы γ -излуче-



Р и с. 4. Зависимость радиационной проводимости Ga_2Se_3 от мощности дозы в образцах 1 (○) и 2 (●)

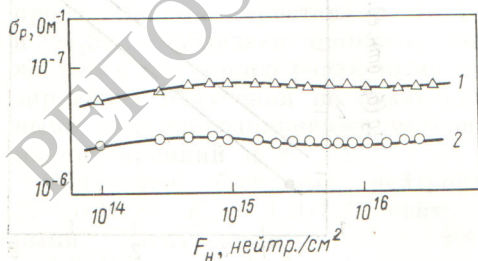


Р и с. 5. Зависимость радиационной проводимости от флюенса быстрых нейтронов во время облучения на реакторе для n -Ge (Δ), CdTe (○), In_2Te_3 (▲) и Ga_2Te_3 (●) при температуре облучения 190 К и мощности дозы γ -излучения $1,2 \cdot 10^4$ рад/с

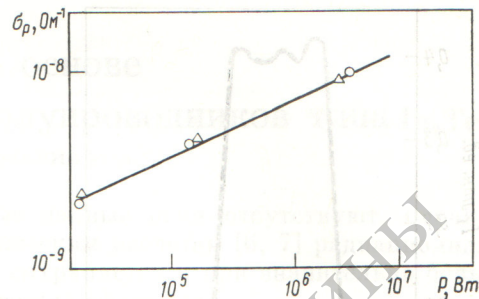
ния. Приведенная линейная зависимость указывает на высокую чувствительность полупроводникового кристалла Ga_2Se_3 к γ -излучению, которая не изменялась после облучения дозой 120 Мрад.

Таким образом, указанные радиационно-стойкие полупроводниковые кристаллы с успехом могут быть использованы для измерения мощности дозы γ -излучения.

Детекторы энерговыделения. Испытания проводились в горизонтальном канале атомного реактора ИРТ-2000 в диапазоне температуры от 190 до 350 К. На рис. 5 приведена радиационная проводимость кристаллов In_2Te_3 и Ga_2Te_3 , вызванная смешанным излучением реактора. На этом же рисунке показаны аналогичные зависимости для германия и теллурида кадмия, полученные в тех же термических и радиационных условиях. Как видно из рисунка, радиационная проводимость кристаллов In_2Te_3 и Ga_2Te_3 остается неизменной (при постоянной мощности реактора $I_\gamma = 1,2 \cdot 10^4$ рад/с вплоть



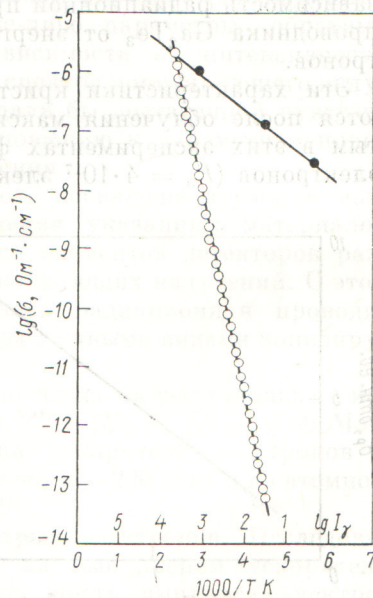
Р и с. 6. Зависимость радиационной проводимости Ga_2Se_3 от флюенса быстрых нейтронов при температуре облучения 330 К и мощности дозы γ -излучения $1,2 \cdot 10^4$ рад/с в образцах 1 (Δ) и 2 (○)



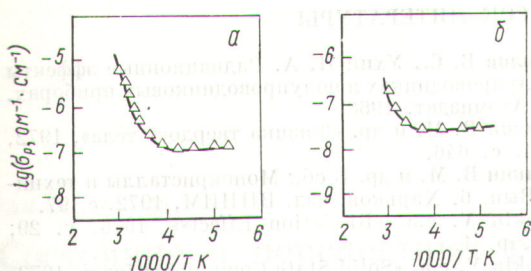
Р и с. 7. Зависимость радиационной проводимости Ga_2Se_3 от мощности реактора в образцах 1 (Δ) и 2 (○)

до флюенса ($E_n \geq 1$ МэВ) $F_n = 2 \cdot 10^{17}$ нейтр./см². Как и следовало ожидать, радиационная проводимость n -Ge, CdTe существенно изменяется в зависимости от флюенса быстрых нейтронов, что подтверждает невозможность измерения большой интенсивности стационарных потоков ионизирующих излучений с использованием классических полупроводниковых материалов.

На рис. 6 приведена радиационная проводимость Ga_2Se_3 , полученная в том же канале реактора при температуре 330 ± 20 К. Как и для кристаллов In_2Te_3 и Ga_2Te_3 , радиационная проводимость Ga_2Se_3 ($I_\gamma = 1,2 \cdot 10^4$ рад/с) не изменяется с увеличением флюенса быстрых



Р и с. 8. Зависимость удельной проводимости от обратной температуры (○) и радиационной проводимости (●) от интенсивности γ -излучения для Ga_2Te_3



Р и с. 9. Температурная зависимость радиационной проводимости, измеренная во время реакторного облучения

нейтронов ($E \geq 1$ МэВ). Зависимость радиационной проводимости кристаллов Ga_2Se_3 от мощности атомного реактора, определенная в том же канале реактора, показана на рис. 7. Измерения проведены при температуре 330 ± 15 К. Радиационная проводимость изменяется линейно в исследованном интервале мощности и остается постоянной после облучения флюенсом быстрых нейтронов $F_n = 5,0 \times 10^{16}$ нейтр./см².

Основываясь на данных работы [11], согласно которым возможно определение энерговыделения реактора по мощности дозы мгновенного γ -излучения, следует сделать вывод, что радиационно-стойкие полупроводниковые кристаллы могут быть использованы в качестве датчиков энерговыделения. Необходимо подчеркнуть, что эти полупроводники обладают высокой чувствительностью к γ -потoku и хорошими временными характеристиками (быстродействие ~ 1 мкс, см. рис. 1), что особенно важно в автоматизации процессов управления и защиты реакторов.

Так как кристаллы In_2Te_3 , Ga_2Te_3 и Ga_2Se_3 обладают собственной (или очень близкой к собственной) проводимостью и в связи с этим высокой чувствительностью удельной электропроводности к температуре (до 15%/град [8]), они могут быть использованы для определения энерговыделения по измерению температуры в различных точках реактора.

На рис. 8 показана зависимость электропроводности от температуры и радиационной проводимости от интенсивности γ -потока для Ga_2Se_3 . Аналогичные зависимости получены для In_2Te_3 и Ga_2Te_3 . Из рисунка видно, что при относительно невысокой температуре и большой интенсивности γ -потока рабочие элементы работают в режиме γ -детекторов. При более высокой температуре и сравнительно небольшой мощности дозы γ -потока равновесная термически возбужденная проводимость превышает значения радиационной проводимости, и датчики работают в режиме термисторов. По заданным интервалам температуры и мощности дозы γ -потока легко установить режим, в котором может функционировать рабочий элемент.

На рис. 9 представлена полученная экспериментально зависимость проводимости In_2Te_3 (а) и Ga_2Te_3 (б) от температуры непосредственно в канале реактора при мощности дозы γ -потока $1,2 \cdot 10^4$ рад/с. Эти данные находятся в соответствии с теоретической диаграммой (см. рис. 8), при достаточно низкой температуре (ниже 250 и 270 К для In_2Te_3 и Ga_2Te_3 соответственно) проводимость определяется исключительно мощностью дозы γ -потока и не зависит от температуры, а при более высокой температуре электропроводности, напротив, не зависит от

Характеристика полупроводников типа In_2Te_3 и детекторов на их основе

Параметр	In_2Te_3	Ga_2Te_3	Ga_2Se_3
Температура плавления, °С	667	790	1020
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,18	1,27	1,95
Удельное сопротивление при 20° С, Ом·см	$(1 \div 3) \cdot 10^6$	$(2 \div 4) \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^8 \div 7 \cdot 10^9$
Подвижность носителей заряда, см ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹	40 (электроны)	2 (дырки)	10 (электроны)
Эффективный заряд ядер $z_{\text{эфф}}$	51	44	33
Коэффициент температурной чувствительности при $T_0 = 20^\circ \text{C}$, %/град	7	10	14
Чувствительность к γ -квантам (^{60}Co), А/рад	—	—	10^{-9}
Изменение электропроводности на единицу плотности тока быстрых электронов с энергией $25 \pm 0,3$ МэВ, %/(А/см ²) *	$6 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^9$

* Время полуспада радиационной проводимости при детектировании импульсов потока электронов с энергией 25 МэВ и плотность потока в импульсе 5 мА/см² составляет не более десятков наносекунд.

Поступила в Редакцию 16/VI 1976 г.

1. Вавилов В. С., Ухин Н. А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М., Атомиздат, 1968.
2. Кошкин В. М. и др. «Физика твердого тела», 1972, т. 14, с. 646.
3. Кошкин В. М. и др. В сб.: Монокристаллы и техника. Вып. 6. Харьков, изд. ВНИИМ, 1972, с. 97.
4. Koshkin V. e.a. «Radiation Effects», 1976, v. 29, N 1, p. 1.
5. Koshkin V. e.a. «Solid State Communications», 1973, v. 13, p. 1.
6. Кошкин В. М. и др. «Физика твердого тела», 1973, т. 15, с. 128.
7. Кошкин В. М., Забродский Ю. М. «Физика твердого тела», 1974, т. 16, с. 3480.
8. Жузе В. П., Сергеева В. М., Шельх А. И. «Физика твердого тела», 1960, т. 2, с. 2858.
9. Кошкин В. М., Фрейман Ю. А., Атрошенко Л. В. «Докл. АН СССР», 1968, т. 183, с. 83.
10. Кошкин В. М., Гальчинский Л. П., Корин А. И. «Физика и техника полупроводников», 1971, т. 5, с. 1983.
11. Емельянов И. Я., Константинов Л. В., Постников В. В. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 3, с. 275.