

Табл. 3. — Полупроводниковые приборы с одним  $p-n$ -переходом, гетеропереходом или переходом металл-диэлектрик

Внешнее воздействие	Используемое явление	Название прибора	Число электродов
Свет	Вентильная фотоодс	Полупроводниковый фотоэлемент, солнечная батарея	2
E	Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода	Полупроводниковый диод-выпрямитель	2
"	Зависимость сопротивления $p-n$ -перехода от приложенного напряжения	Варистор (переменное сопротивление)	2
"	Зависимость ёмкости $p-n$ -перехода от приложенного напряжения	Варактор (переменная ёмкость)	2
"	Излучат. рекомбинация электронов и дырок в области гомо- или гетеро- $p-n$ -перехода (спонтанная)	Светоизлучающий диод (электролюминесцентный диод)	2
"	$N$ -образная вольт-амперная характеристика сильнолегированного (с двух сторон) $p-n$ -перехода (вырождение)	Туннельный диод (усиление и генерирование электрич. колебаний с частотами 10 ТГц)	2
"	Излучат. рекомбинация (вынужденная) в области гомо- или (чаще) гетеро- $p-n$ -переходов	Инжекционный лазер	2
"	Резкое возрастание тока через $p-n$ -переход из-за лавинного пробоя и туннелирования	Стабилизатор напряжения	2
"	Генерация колебаний СВЧ, связанная с лавинным умножением и задержкой на время пролёта	Лавинно-пролётный диод (генератор)	2
"	Вольт-амперная характеристика контакта металл-полупроводник	Диод Шоттки, диод Мотта, точечный диод	2
"	Генерация электронно-дырочных пар частицей, влетающей в обеднённый носителями слой вблизи контакта полупроводник-металл или вблизи $p-n$ -перехода	Полупроводниковый детектор частиц	"
$\Phi$	Зеебека эффект	Термопара, термогенератор	"
E, T	Пельтье эффект	Холодильник Пельтье	"
Свет, E	Генерация электронов и дырок в области $p-n$ -перехода под действием света	Фотодиод (детектор света и др.)	"

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДЕТЕКТОР** — детектор частиц, осн. элементом к-рого является  $p-n$ -переход. П. д. состоит из слоя полупроводника с нанесёнными на него с обеих сторон металлич. электродами, на к-рые подаётся напряжение. При попадании частицы или  $\gamma$ -кванта в полупроводник в нём в результате ионизации образуются неравновесные носители заряда — электроны и дырки, к-рые под воздействием электрич. поля перемещаются к электродам. В результате в электрич. цепи, соединённой с П. д., возникает импульс тока

$$I(t) = \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t},$$

где  $\Delta Q(t) = \Delta Q_0(t) + \Delta Q_D(t)$  — заряд, наводимый на электродах. Импульс тока преобразуется в импульс напряжения, амплитуда к-рого пропорциональна энергывыделению  $\Delta \mathcal{E}$  частицы в полупроводнике.

Необходимым условием, обеспечивающим возможность измерения заряда  $\Delta Q$ , возникающего в П. д. под действием ионизирующей частицы, является малая величина темновбго тока  $I_0$ , протекающего через П. д. в отсутствие ионизации. Это означает, что полупроводник должен обладать высоким уд. сопротивлением  $\rho$ .

Если флуктуации темновбго тока  $\sqrt{I_0 \Delta t/e}$  за время собирания носителей  $\Delta t(I_0 \Delta t/e)$  сравнимы с числом носителей  $N_0$ , созданных в объёме П. д. частицей, то выделение полезного сигнала оказывается невозможным. Чем меньше  $N_0$  и чем с большей точностью необходимо измерить  $\Delta Q$ , тем большим сопротивлением  $\rho$  должен обладать полупроводник. Для измерения энергывыделения  $\Delta \mathcal{E} = 1 \text{ МэВ}$  с точностью 1% необходимо  $\rho > 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .

Число носителей заряда  $N_0$ , возникающих в П. д. при энергывыделении  $\Delta \mathcal{E}$ , равно  $\Delta \mathcal{E}/\mathcal{E}_0$ , где  $\mathcal{E}_0$  — энергия, необходимая для образования пары электрон — дырка. Т. к. в полупроводниках  $\mathcal{E}_0 \sim 3 \text{ эВ}$ , а в газах  $\mathcal{E}_0 \sim 30 \text{ эВ}$ , то в П. д. при том же  $\Delta \mathcal{E}$  создаётся в 10 раз больше носителей заряда, чем в газовой ионизац. камере. В этом заключается одно из важных преимуществ П. д. перед газовыми детекторами.

Время жизни носителей заряда  $\tau$  должно превышать время сбора  $\Delta t$  заряда на электроды (иначе сбор будет не полным). В полупроводниках, используемых для П. д., времена жизни свободных электронов и дырок  $\tau$  составляют неск. мс, что достаточно для полного сбора носителей. Скорость  $v$  сбора носителей или время их сбора  $\Delta t$  определяются подвижностью носителей заряда  $\mu$  и напряжённостью электрич. поля  $E: v = \mu E$ . В случае однородного электрич. поля  $\Delta t = W/v$ , где  $W$  — толщина чувствит. области. Материал для П. д. не должен содержать большого кол-ва примесных центров, к-рые привели бы к захвату носителей заряда, образующихся при ионизации.

В природе не существует веществ, к-рые имели бы значения  $\rho, \mu, \tau, \mathcal{E}_0$ , необходимые для П. д. Диэлектрики обладают высоким  $\rho$ , но очень малым  $\tau$ , поэтому на их основе возможно создание детекторов лишь с тонкой чувствит. областью. Так, на основе алмазов созданы детекторы с толщиной рабочей области  $D \leq 300 \text{ мкм}$ . Полупроводники обладают нужными  $\mu, \mathcal{E}_0, \tau$ , однако их сопротивление  $\rho$  (даже при высокой степени очистки от примесей) оказывается ниже требуемого для обеспечения малого темновбго тока (табл.).

Характеристики некоторых полупроводников, применяемых для полупроводниковых детекторов

Вещество ( $T=300 \text{ К}$ )	Плотность, г/см <sup>3</sup>	$\mathcal{E}_0$ , эВ	$\mathcal{E}_g$ , эВ	$\mu$ , см <sup>2</sup> /Вс		$\tau$ , с	
				электр-роны	дырки	электр-роны	дырки
Si	2,33	1,12	3,61	1350	480	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Ge (77 К)	5,33	0,79	2,98	$3,6 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
CdTe	6,06	1,47	4,43	1000	80	$10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$
GaAs	5,32	1,42	4,2	$8 \cdot 10^3$	450	$10^{-8}$	$10^{-8}$
HgI <sub>2</sub>	6,4	2,13	4,2	100	4	$10^{-6}$	$10^{-6}$

Необходимые условия реализуются в области  $p-n$ -перехода, обеднённой носителями, где  $\rho$  на неск. порядков выше, чем вне перехода. Обычно толщина области  $p-n$ -перехода  $W$ , обеднённой носителями заряда, — чувствит. область П. д. — мала ( $\leq 10^{-4} \text{ см}$ ). Практич. значения такой  $p-n$ -переход не представляет, т. к. пробеги  $R$  заряд. частиц, как правило, существенно больше  $\tau$  в области  $p-n$ -перехода выделяется малая часть энергии частицы. Для увеличения  $W$  на  $p-n$ -переход подают обратное смещение  $U$ , к-рое увеличивает размер обеднённой области в соответствии с соотношением  $W = b\sqrt{\rho U}$ , где  $b$  — константа, характеризующая полупроводник. Так, для  $n$ -Si  $b = 0,5$ , для  $p$ -Si  $b = 0,3$ , для  $n$ -Ge  $b = 1$ , для  $p$ -Ge  $b = 0,65$ . При этом через  $p-n$ -переход течёт темновбй ток разл. происхождения: за счёт тепловой генерации электронов и дырок  $I_{\text{ген}} = \exp(-\mathcal{E}_g/kT)$ , где  $\mathcal{E}_g$  — ширина запрещённой зоны в полупроводнике; ток диффузии  $I_{\text{диф}}$  за счёт неравномерной концентрации носителей.