

лия, осн. технол. методами изготовления — диффузия, сплавление, эпитаксия и ионная имплантация.

Вторая важная область применения *pin*-диодов — оптоэлектроника, где они используются в качестве высокочувствительных быстродействующих фотоприемников. На рис. 3 показана фоточувствительная  $p^+i(v)n^+$ -структура при обратном смещении, величина *k*-рого выбирается такой, чтобы ОПЗ  $p^+ - v$ -перехода занимала всю базу. Падающее на прозрачное окно фотодиода излучение  $h\nu$  с незначит. потерями в  $p^+$ -слое достигает  $i(v)$ -базы, в *k*-рой поглощается с генерацией электронно-дырочных пар.

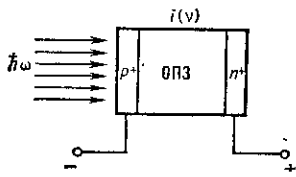


Рис. 3.  $p^+i(v)n^+$ -структура фотодиода.

Пары разделяются в поле ОПЗ и дрейфуют к соответствующим электродам, вызывая появление фототока. Предельное быстродействие *pin*-фотодиода ограничивается временем пролета носителей через  $i(v)$ -базу с насыщенной скоростью, а предельная чувствительность — шумовым током. Осн. материалом для *pin*-фотодиодов является кремний, осн. технол. методами изготовления — планарно-эпитаксиальные.

$p^+i(v)n^+$ -структура лежит в основе конструкции полупроводникового элемента совр. выпрямит. диодов большой мощности, в *k*-рых толщина  $i(v)$ -базы выбирается так, чтобы ОПЗ  $p^+ - i(v)$ -перехода занимала всю толщину базы при напряжении лавинного пробоя, соответствующем уд. сопротивлению материала базы. Такая геометрия позволяет сочетать высокое блокируемое напряжение с относительно малым напряжением в проводящем состоянии при большой плотности тока, определяемой в осн. толщиной базы и временем жизни носителей в ней. Однако при этом необходимо использовать спец. конструкцию краевого контура  $p - n$ -перехода, препятствующую смыканию ОПЗ  $p^+ - v$ -перехода с  $n^+$ -контактом на поверхности полупроводника, граничащей с окружающей средой.

Лит.: Дзехцер Г. В., Орлов О. С., *pin*-диоды в широкополосных устройствах СВЧ, М., 1970; Носов Ю. Р., Оптоэлектроника, 2 изд., М., 1989; Тучкевич В. М., Грехов И. В., Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами, Л., 1988. И. В. Грехов.

**ПИНЧ-ЭФФЕКТ** (от англ. pinch — сужение, сжатие) — эффект сжатия, стягивания сильнотокового газового разряда (плазменного образования) в результате взаимодействия тока разряда с магн. полем, собственным или внешним. Впервые подобное явление описано в 1934 У. Беннеттом (W. H. Bennett) применительно к потокам быстрых заряж. частиц в газоразрядной плазме. Термин «П.-э.» введен в 1937 Л. Тонксом (L. Tonks) для описания физ. процессов в сильнотоковой дуге.

В зависимости от направления тока в плазменном столбе различают *z*- и  $\theta$ -пинч. Если ток *J* протекает вдоль оси *z* цилиндрич. плазменного столба и взаимодействует с собственным магн. полем, П.-э. наз. *z*-пинчем. Если к цилиндрич. разрядной камере приложено внеш. продольное магн. поле, то в плазме индуцируется азимутальный ток  $J_\theta$ , в результате взаимодействия плазмы к оси —  $\theta$ -пинч. Сжатие плазмы наблюдается и в конфигурациях, имеющих вид тонкого плоского плазменного слоя с током — нейтральный токовый слой.

Механизм П.-э. можно рассмотреть на примере *z*-пинча. Силовые линии магн. поля *B*, создаваемого током, имеют вид концентрич. окружностей, плоскости *k*-рых перпендикулярны оси. Возникающая электродинамич. сила *F*, действующая на единицу объема проводящей среды с плотностью тока *j*, равна  $c^{-1}[jB]$ , направлена по радиусу к оси цилиндра и вызывает сжатие токового канала. Сжимающее действие протекающего тока можно считать также простым следствием закона Ампера о магн. притяжении отд. параллельных токо-

вых нитей с одинаковым направлением, создающих полный ток *J*.

При описании П.-э. в терминах магн. гидродинамики для случая идеально проводящей среды объемная электродинамич. сила *F* может быть заменена на поверхностное магн. давление  $p_{\text{магн}} = B^2/8\pi$ , *k*-рому в случае П.-э. в металлич. проводнике противодействует сила упругости, а при сжатии газоразрядной плазмы — газокинетич. давление, обусловленное тепловым движением частиц — ионов и электронов.

При нек-рой величине тока магн. давление на поверхности подвижной, легко сжимаемой газовой среды (плазмы) может стать больше газокинетического и токовый канал начнет уменьшать своё сечение — возникает П.-э.

П.-э. может наблюдаться только в проводящих средах, где подвижные носители заряда (электроны и ионы в газоразрядной плазме, электроны и дырки — в полупроводниках) присутствуют в приблизительно одинаковом кол-ве. Если же имеется только один тип носителей тока, то электрич. поле пространственного заряда эффективно препятствует сжатию тока к оси. Протекание больших токов ( $10^5 - 10^8$  А) через газ сопровождается ионизацией и нагревом вещества и переходом его в состояние плазмы. Нагрев плазмы происходит при токовом тепловыделении на омич. сопротивлении плазменного канала (джоулев нагрев) и при адиабатич. сжатии пинча как целого (образуется высокотемпературная плазма).

Магн. поле тока отжимает плазменный канал от стенок разрядной камеры, и образуется изолиров. токовый шнур — пинч. Само магн. поле сосредоточено в пристеночном вакуумном зазоре между пинчем и стенкой, тем самым создаются условия для магн. термоизоляции высокотемпературной плазмы. Линии магн. поля параллельны поверхности пинча, и вылетающие из плазмы заряж. частицы движутся поперёк магн. поля, процесс диффузии плазмы (и перенос тепла) на стенку существенно замедляется: характерная длина — свободный пробег частиц  $\lambda$  заменяется на ларморовский радиус  $\rho = emv/B$ , *k*-рый, в зависимости от величины магнитного поля *B*, меньше  $\lambda$  на несколько порядков величины.

Этим свойством пинчей — магн. термоизоляцией высокотемпературной плазмы — объясняется возникший в связи с проблемой УТС интерес к П.-э. Исследование пинчей в действии началось в 50-х гг. одновременно в СССР, США и Великобритании в рамках нац. программы по УТС. Осн. внимание при этом уделялось двум типам пинчей — линейному и тороидальному.

Ток пинча *J* должен был выполнять ещё одну необходимую для УТС ф-цию — обеспечивать магн. удержание пинча в состоянии равновесия. Неограниченному магн. сжатию при П.-э. противодействует газокинетич. давление плазмы  $p_{\text{пл}} = k(n_e T_e + n_i T_i)$ , *k*-рое в плотной высокотемпературной плазме в силу её квазинейтральности ( $n_e = n_i = n$ ) и обычно выполняющемуся условию  $T_e = T_i$  становится равным  $p_{\text{пл}} = 2nkT$  (*n* — плотность, а *T* — темп-ра пинча). При равновесии легкоподвижная граница пинча располагается на поверхности равного давления, т. е. после нек-рого нач. сжатия на границе плазменного образования должно непрерывно выполняться условие квазиравновесия пинча  $p_{\text{пл}} = p_{\text{магн}} = B^2/8\pi$ .

Из этого условия следует т. н. соотношение Беннетта  $B^2/8\pi = 2nkT$ . Т. к. для цилиндрич. проводника  $B = 2J/cr$ , то  $J^2 = 4c^2 kNT$ , где  $N = \pi r^2 n$  — число частиц в сечении пинча. Это соотношение показывает, что для достижения в плазме  $T \approx 10^8$  К, при *k*-рой скорость протекания термоядерных реакций в равнокомпонентной дейтерий-тритиевой смеси уже настолько велика, что синтез ядер может стать энергетически выгодным, требуется хотя и большой, но вполне достижимый ток пинча ( $\approx 10^5 - 10^7$  А, в зависимости от *N*).