

слой (р-слой); около контакта возникает т. н. физический  $p - n$ -переход.

Для получения стабильных выпрямляющих и инжектирующих контактов в полупроводнике создают специально легированный слой с противоположным объёмным типом проводимости (рис. 6). Высокая эмиссионная способность образующегося т. н. металлургич.  $p - n$ -перехода достигается, если дырочный слой легирован акцепторами значительно сильнее, чем объём полупроводника донорами ( $p^+ - n$ -переход или  $n^+ - p$ -переход). Инжекция неосновных носителей лежит в основе работы эмиттеров биполярных транзисторов.

Двойная инжекция (одновременная инжекция с двух сторон дырок и электронов) происходит в образцах полупроводника, ограниченных с одной стороны  $p^+ - n$ -контактом, а с другой  $n^+p$ -контактом ( $p^+nn^+$ -диоды или  $p^+ - pn^+$ -диоды). Рост концентрации электронов и дырок в средней части образцов ограничен только скоростью рекомбинации носителей. Инжекция, ограниченная рекомбинацией, более эффективна, чем инжекция, ограниченная пространственным зарядом.

**Реальные контакты.** Инжекция и экстракция неосновных носителей контактом с обеднённым слоем эффективны лишь в случае, когда контакт не является допант. источником рекомбинации или генерации носителей, т. е. если потоки носителей каждого типа переносятся через обеднённый слой без «потерь» и «приобретений». Последние обусловлены тремя причинами.

1) Поверхностная рекомбинация и генерация через центры, локализованные на границе металл — полупроводник или диэлектрич. прослойка — полупроводник. Это же происходит и в тонкой приконтактной области, где концентрация центров рекомбинации существенно выше, чем в объёме полупроводника, из-за дефектной структуры этой области и из-за диффузии сюда примесей из металла или оксида.

2) Скорость термич. генерации и рекомбинации носителей в обеднённом слое через глубокие уровни (расположенные вблизи середины запрещённой зоны) выше по сравнению с теми же процессами в объёме полупроводника (механизм Са — Нойса — Шокли). Напр., отношение скоростей термич. генерации в обеднённом слое и объёме порядка  $Wn/2ln_iT$ , где  $n$  — концентрация основных носителей,  $W$  — толщина слоя,  $l$  — длина диффузии носителей,  $n_i$  — концентрация собственных носителей. В Ge, Si и др. полупроводниках, как правило,  $W < l$ , но в легированных полупроводниках  $n \gg n_i$ , что делает этот механизм существенным.

3) Туннельная (полевая) генерация и рекомбинация носителей в обеднённых слоях. В отличие от объёма полупроводника, где возможны только вертикальные

переходы или энергопоглощение на одну пару электрон—дырка меньше ширины запрещённой зоны  $\epsilon_g$ .

Высокий темп генерации и рекомбинации носителей в обеднённом слое ухудшает выпрямляющие и инжекционные свойства такого контакта. При обратном смещении он становится источником генерации неравновесных носителей, а при прямом смещении — источником их рекомбинации. Для контактов с очень высокой скоростью рекомбинации также применяют термин «омический», подразумевая контакт, на к-ром при любых  $j$  поддерживаются равновесные значения концентрации носителей. Инжекционные

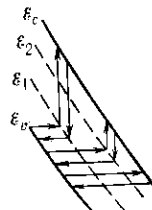


Рис. 8. Туннельные и комбинированные переходы в областях с наклоном энергетических зон.

свойства таких контактов проявляются лишь при очень больших  $j$ , тем больших, чем выше скорость рекомбинации в нём.

Лит.: Пикус Г. Е., Основы теории полупроводниковых приборов, М., 1965; Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г., Физика полупроводников, М., 1977; Стриха В. И., Контактные явления в полупроводниках, К., 1982; Родерик Э. Х., Контакты металл—полупроводник, пер. с англ., М., 1982. *Э. С. Грибников.*

**КОНТИНУАЛЬНЫЙ ИНТЕГРАЛ** — то же, что *функциональный интеграл*.

**КОНТРАВАРИАНТНОСТЬ** — см. в ст. *Ковариантность и контравариантность*.

**КОНТРАГЬИРОВАННЫЙ РАЗРЯД** (от лат. *contra* — стягиваю, сжимаю) — *электрический разряд в газе*, диаметр столба к-рого существенно уменьшен по сравнению с тем же разрядом при меньших силах тока. При контракции (самосжатии) разряда в неск. раз возрастает объёмная плотность энергии в плазме столба и поэтому резко увеличивается общая яркость свечения и изменяется его спектральный состав. Контракция происходит вследствие к.-л. качественного изменения условий энергетич. баланса с ростом силы тока в радиально неоднородном столбе плазмы. В плазме молекулярных газов, напр., это изменение возникает вследствие резкого увеличения скорости переноса тепла при приближении степени диссоциации к полной. В атомарных газах при значительно больших токах (десяти или сотни кА) условия баланса резко меняются и возникает контракция, когда собственное магн. давление становится больше газокинетического (см. *Пинч-эффект*). Чем выше давление газа, тем при меньших токах может произойти переход к К. р. Сжатие столба за счёт действия внеш. причин (стенок, внеш. полей) не наз. контракцией. *В. Н. Колесников.*

**КОНТРАКЦИЯ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА** (сжатие газового разряда) — резкое, скачкообразное уменьшение поперечного размера области, заполненной разрядным током, возникающее при превышении нек-рого критич. значения давления газа или разрядного тока. При К. г. р. в неск. раз возрастает объёмная плотность энергии в плазме столба и поэтому резко увеличивается общая яркость свечения и изменяется его спектральный состав. Это явление, характерное для всех типов газового разряда, ограничивает возможность практич. использования газоразрядных устройств областью относительно малых давлений и разрядных токов.

К. г. р. происходит при одновременном выполнении двух условий: 1) эффективность образования заряд. частиц резко падает от оси к стенкам разрядной трубки; 2) характерное время объёмной рекомбинации (нейтрализации) заряд. частиц  $(\alpha_{рек}N)^{-1}$  много меньше времени их диффузии на стенки разрядной трубки  $R_0^2/D_a$  (здесь  $N$  — плотность заряд. частиц в разряде,  $\alpha_{рек}$  — коэф. объёмной рекомбинации заряд. частиц,  $R_0$  — радиус разрядной трубки,  $D_a$  — коэф. амбиполярной диффузии). За время рекомбинации заряд. час-

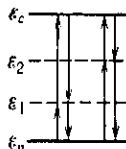


Рис. 7. Рекомбинационные и генерационные переходы электронов в нейтральном объёме полупроводника:  $\epsilon_c$  — край зоны проводимости;  $\epsilon_v$  — край валентной зоны;  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  — комбинационные уровни.

переходы между рекомбинационными уровнями  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  в запрещённой зоне и состояниями в разрешённых зонах, сопровождающиеся поглощением энергии при генерации и её выделением при рекомбинации (рис. 7), в обеднённых слоях ввиду изгиба зон возможны горизонтальные переходы (рис. 8). Они обусловлены тунелированием из состояний в разрешённых зонах на уровни рекомбинационных центров или даже непосредственно между валентной зоной и зоной проводимости (межзонное, или зиннеровское, тунелирование). С участием рекомбинационных центров возможен комбинированный процесс, включающий горизонтальные и вертикальные переходы. При этом полное энерговыде-