

## КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

### 8.1. ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Во многих случаях требуется, чтобы контакт обладал минимальным сопротивлением и был омическим: такой контакт не искажает форму переменного синусоидального тока, не вносит гармоник и пропускает без искажений импульсы (рис. 8.1, а). Идеализированная характеристика выпрямляющего контакта должна иметь вид, представленный на рис. 8.1, б, в пропускном направлении его сопротивление должно быть равным нулю, в запиорном — бесконечным.

Требования нелинейности контакта возникают всякий раз, когда требуется преобразование сигнала, для выпрямления и детектирования, модуляции и умножения частоты, ограничения сигналов и стабилизации напряжений, для усиления и генерации и т. д.

Кроме этого, как мы видели в гл. 1, контакт дырочного и электронного полупроводника обладает чрезвычайно важным свойством, на котором основана вся транзисторная электроника, — способностью инжектировать неосновные носители.

В зависимости от конкретной задачи, выполняемой нелинейным контактом, к нему предъявляются различные требования.

Как уже упоминалось, для технических выпрямителей желательно, чтобы сопротивление и допустимое напряжение в запиорном направлении были бы максимальными. Для этого в контакте не должны происходить так называемые явления в сильных полях (электростатическая

и ударная ионизация),  $p$ - $n$  переход не должен быть слишком толстым, чтобы в нем не мог развиваться лавинный эффект. В то же время контакт должен быть достаточно толстым, чтобы исключить туннельный эффект, и длина свободного пробега в нем не должна быть велика, чтобы исключить ударную ионизацию.

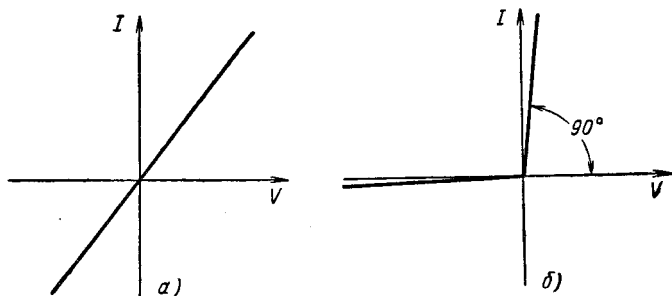


Рис. 8.1. Вольтамперная характеристика идеального омического (а) и идеального выпрямляющего (б) контактов.

Однако прямая характеристика толстого запирающего слоя хуже, чем тонкого, поэтому здесь приходится идти на известный компромисс \*).

При пропускном направлении тока электроны диффундируют в  $p$ -область и там рекомбинируют с дырками,

\*) Здесь следует отметить, что слишком толстый контакт вообще теряет выпрямляющие свойства. Критерием в данном случае является отношение двух характерных длин: дебаевского радиуса экранировки  $r_0 = \sqrt{\kappa kT/4\pi e^2 n}$  (где  $n$  — число подвижных носителей заряда и  $\kappa$  — диэлектрическая постоянная) и расстояния  $x_0$ , на котором значительно меняется концентрация  $N$  активных примесей (доноров или акцепторов),

$$x_0 = N/(dN/dx).$$

Как известно, радиус Дебая характеризует расстояние, на котором в данной среде восстанавливается нейтральность, т. е. любой локальный неподвижный заряд нейтрализуется окружающими подвижными зарядами.

Если  $x_0 \gg r_0$ , то это означает, что нейтральность практически вообще не нарушается и слой объемного заряда не образуется; такой плавный  $p$ - $n$  переход (или контакт полупроводника с металлом) не будет обладать выпрямляющими свойствами.

дырки диффундируют в  $n$ -область и рекомбинируют с электронами. Поэтому ток в пропускном направлении будет тем больше, чем больше коэффициент диффузии (подвижность) носителей и чем больше коэффициент рекомбинации, так как тем больше будут градиент концентрации неосновных носителей и скорость их диффузии.

Совершенно иные требования предъявляются к  $p$ - $n$  переходу детектора малых сигналов; в данном случае высокое обратное напряжение не играет существенной роли, к величине прямого и обратного сопротивления также предъявляются обычно более низкие требования. На первый план здесь выступает низкий уровень шумов и крутой подъем пропускной характеристики.

Для детектирования без искажений сигналов в широком диапазоне частот должны быть малы также электростатическая и диффузионная емкости (см. ниже) и время пролета через  $p$ - $n$  переход неосновных носителей.

В ряде случаев характер детектирования ставит также вполне определенные требования перед формой прямой характеристики  $p$ - $n$  перехода (линейное детектирование, квадратичное и др.).

В рассмотренных выше случаях и электростатическая, и барьерная емкости  $p$ - $n$  переходов играли отрицательную роль. В то же время имеется ряд приборов, так называемые варикапы, действие которых основано на зависимости барьерной емкости от приложенного напряжения. Варикапы в настоящее время находят ряд важных применений: в параметрических усилителях, для стабилизации напряжения, для преобразования сигналов, в счетно-решающих устройствах и др. Каждое из этих применений предъявляет свои конкретные требования к величине емкости  $p$ - $n$  перехода, к ее частотной зависимости и зависимости от приложенного напряжения, а также ко всем остальным характеристикам  $p$ - $n$  перехода.

Во всех рассмотренных выше случаях туннельный эффект является отрицательным побочным явлением. Однако за последнее время были разработаны новые приборы, так называемые обращенные диоды и туннельные диоды, основанные на этом эффекте и нашедшие широкое применение в технике высоких частот (см. ниже).

Совершенно иные требования предъявляются к  $p$ - $n$  переходам в транзисторах. Выше говорилось, что для силового выпрямителя желательны большие коэффициенты

рекомбинации и в  $p$ - и  $n$ -области. Для хорошей работы транзистора необходимо, чтобы эмиттерный  $p$ - $n$  переход обладал высоким коэффициентом инжекции, а для этого он должен быть асимметричным; чтобы число инжектируемых в базу носителей было велико, должна быть велика концентрация основных носителей в эмиттерной области; чтобы неосновные носители проходили без потерь базовую область, их диффузионная длина в базовой области должна быть велика, т. е. велики коэффициент диффузии и время жизни. Следует заметить, что так как напряжение на базе обычно очень мало, ее емкость не играет существенной роли и поэтому для уменьшения времени пролета неосновных носителей базу делают достаточно тонкой. Время пролета носителей через базу можно также уменьшить созданием специального «тянущего» поля. За последнее время был разработан новый тип транзисторов — дрейфовые. В дрейфовых транзисторах примеси в базе распределены не равномерно, а таким образом, что создается поле, тянущее носители по направлению к коллектору, что во много раз уменьшает время их пролета через базу и повышает высокочастотные характеристики прибора.

Упомянем еще об одном типе транзисторов, разработанных за последнее время, так называемых лавинных триодах, в которых дополнительное усиление тока достигается за счет ударной ионизации и развития лавинного эффекта в коллекторной области. Для того чтобы развился лавинный эффект, толщина коллекторной области и длина свободного пробега носителей в ней должны быть достаточно велики.

Наконец, за последнее время расширились неудавшиеся в 30-х годах опыты по использованию выпрямления на контакте двух металлов, разделенных изоляционной прослойкой, и на контакте металла с полупроводником.

Приведенные выше примеры в какой-то мере показывают, насколько сложна и многообразна картина контактных явлений.

Следует отметить, что простой механический контакт двух металлов, металла и полупроводника и двух полупроводников никогда не дает ожидаемых свойств, так как при этом неизбежно сохраняется слой адсорбированного воздуха, глубже слой поверхностных пленок, еще глубже слой деформированного, богатого примесями и дефектами

основного материала. При этом сама поверхность имеет характер ступенчатых пирамид, высота которых может колебаться в зависимости от характера обработки в пределах от  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$  см. Поверхность этих пирамид также испещрена впадинами, каналами и наростами. Все перечисленные выше дефекты и загрязнения поверхности смазывают всю картину, и поэтому для получения хорошо выпрямляющего контакта с заданной характеристикой требуется сложный технологический процесс.

Переход типа  $p$ - $n$  получается, как правило, в единой пластинке полупроводника, в котором граница с заданными свойствами между  $p$ - и  $n$ -слоями создается путем сплавления или диффузии  $p$ -примеси в монокристалл  $n$ -типа или сплавления или диффузии примеси  $n$ -типа в монокристалл  $p$ -типа.

Для успешной разработки технологии контакта, обладающего необходимыми свойствами, необходимо детальное знание всех физических процессов, происходящих в области контакта. В этой главе читатель сможет начать знакомство с теорией контактных явлений. Более детально этот вопрос можно изучить, пользуясь литературой [4, 31].

## 8.2. КОНТАКТ ПОЛУПРОВОДНИКА И МЕТАЛЛА

На рис. 1.17 было представлено распределение заряда, поля и потенциала на границе полупроводника и металла \*).

В зазоре между металлом и полупроводником поле постоянно и равно полю в плоском конденсаторе:

$$E_0 = 4\pi q_0 \quad (8.1)$$

и разность потенциалов

$$V_0 = dE_0, \quad (8.2)$$

где  $q_0$  — заряд на единицу поверхности полупроводника и металла и  $d$  — толщина зазора.

---

\*) Мы при этом предполагаем, что все примеси в слое  $d$  полупроводника ионизованы, весь расчет будет вестись для единицы поверхности, рис. 1.17 построен в предположении, что диэлектрическая постоянная  $\epsilon = 1$ .