

носителей заряда и удельная электрическая проводимость полупроводника быстро возрастают.

Все сказанное выше относится к химически чистым полупроводникам, технология изготовления которых, в частности кремния, представляет большие трудности.

§ 13.5. Примесная проводимость полупроводников

1. Введение в полупроводник примесей сильно влияет на его электрические свойства. Под примесями подразумевают как атомы или ионы посторонних элементов, так и различного рода дефекты и искажения в кристаллической решетке: пустые узлы, сдвиги, возникающие при деформациях кристалла, трещины и т.п. Все эти примеси и включения вносят дополнительные изменения в периодическое поле кристалла и влияют на поведение электронов и их энергетические состояния. Если в основную кристаллическую решетку полупроводника вносятся примесные атомы, то независимо от того, где эти атомы располагаются в кристалле, возникают дополнительные энергетические уровни расположенные в запрещенной зоне и называемые **примесными энергетическими уровнями**.

2. Примеси могут играть двоякую роль. Они могут служить, с одной стороны, дополнительными поставщиками электронов в кристалл, с другой стороны — центрами «прилипания» имеющихся в кристалле электронов. Рассмотрим, например, что произойдет, если в решетке германия один его атом будет замещен атомом примеси, обладающим пятью валентными электронами (фосфор, мышьяк, сурьма). Четыре электрона примесного атома будут находиться в химической связи с соседними атомами германия, а пятый электрон не может образовать валентную связь. Этот «лишний» электрон слабее связан с ядром и его сравнительно легко перевести в зону проводимости полупроводника.

Энергия «лишних» примесных электронов несколько меньше, чем энергия, соответствующая нижней границе незаполненной зоны проводимости полупроводника. Поэтому энергетические уровни примесных электронов располагаются вблизи дна зоны проводимости. Эти уровни заполнены некоторым числом электронов и потому называются **донорными**, а атомы примесей, поставляющие «лишние» электроны в решетку, называются **атомами-донорами**. Для перевода электрона с донорного уровня в зону проводимости нужна незначительная энергия ΔW_e , которую он может получить при тепловом возбуждении. Так, например, если для кремния примесью является мышьяк, то $\Delta W_e = 0,054$ эВ.

В результате переброса электронов с донорных уровней в зону проводимости в полупроводнике возникает **электронная примесная проводимость (проводимость n -типа)**. Полупроводники такого типа называются **электронными (или полупроводниками n -типа)**. На рис. 13.15 показана схема энергетических уровней полупроводника n -типа.

3. Предположим теперь, что в решетку германия введен примесный атом с тремя валентными электронами (бор, алюминий, индий). Такой атом не может сформировать полного комплекта необходимых связей в решетке германия (см. рис. 13.13), так как у него для этого не хватает одного электрона. Однако он сможет насытить все связи, если позаймствует электрон у ближайшего атома германия.

Тогда на месте электрона, ушедшего из атома германия, появится «положительная дырка», которая будет заполняться электроном из соседнего атома германия. Процесс последовательного заполнения свободной связи эквивалентен движению дырки в полупроводнике.

Трехвалентные примеси приводят к появлению в запрещенной энергетической зоне примесных энергетических уровней, не занятых

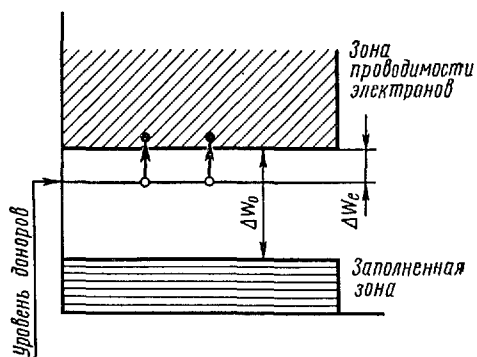


Рис. 13.15

электронами. Они называются **уровнями прилипания** или «**акцепторными**» уровнями. Атомы примесей в этом случае называются **атомами акцепторами**. Акцепторные уровни располагаются несколько выше верхнего края заполненной энергетической зоны основного кристалла. Например, в кристаллах кремния при введении трехвалентного бора акцепторные уровни лежат на $\Delta W_a = 0,08$ эВ выше заполненной зоны. Эта энергия во много раз меньше общей ширины запрещенной зоны. Возникновение **дырочной примесной проводимости** в таком полупроводнике связано с тем, что электроны, расположенные у верхнего края заполненной зоны, легко могут быть переведены на уровни прилипания. В результате нижняя зона будет содержать «вакантные» электронные уровни, проявляющие себя как «положительные дырки»; она становится **зоной дырочной проводимости**. Под действием электрического поля электроны в нижней зоне будут последовательно заполнять дырки, а это эквивалентно перемещению дырки в направлении, противоположном движению электронов. Описанный тип проводимости называется **проводимостью p-типа**, а полупроводники с такой проводимостью — **дырочными** или **полупроводниками p-типа**.

На рис. 13.16 показана схема энергетических уровней полупроводника p-типа.

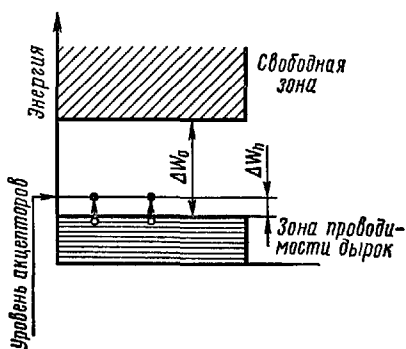


Рис. 13.16

4. При одновременном введении в полупроводник донорных и акцепторных примесей характер проводимости (n - или p -тип) будет зависеть от того, какие из примесей создают повышенную концентрацию носителей заряда.

Акцепторные энергетические уровни лежат ниже донорных. Поэтому происходит своеобразная «компенсация примесей»: электроны доноров опускаются на свободные уровни акцепторов, и происходит рекомбинация электронов и дырок. Электроны доноров «закрепляются» на акцепторных атомах, и общее число носителей заряда в полупроводнике уменьшается. Так, например, если в германий с n -типом проводимости, обусловленной донорными примесями, вводится 10% трехвалентной примеси (от числа доноров), то это эквивалентно убыли донорных примесей на 10% — электроны доноров «заполняют дырки», созданные акцепторами. При этом электропроводность германия уменьшится. Наоборот, если в германий p -типа будет введена акцепторная примесь, то его электропроводность увеличится. Это связано с появлением новых свободных уровней, расположенных у верхнего края валентной зоны. На эти уровни будут дополнительно переходить электроны из валентной зоны германия, и число дырок в ней возрастает.

5. В заключение обратим внимание на одно очень существенное отличие свойств носителей заряда в полупроводниках от свойств электронов в металлах. Выше было указано (см. § 13.1), что в металлах число-носителей заряда и их энергия практически не зависят от температуры. В полупроводниках при любом характере их проводимости число носителей заряда значительно меньше, чем в металлах и, что особенно важно, концентрация носителей заряда и их энергия в е с ь м а с и л ь н о з а в и с я т о т т е м п е р а т у р ы: они возрастают при ее повышении.

§ 13.6. Выпрямляющее действие контакта металла с полупроводником

1. Изучение контактных явлений на границе полупроводника и металла привело к открытию **выпрямляющего действия** этого контакта на переменный электрический ток. Для пояснения выпрямляющего действия такого контакта воспользуемся зонной теорией твердых тел.

Рассмотрим вначале более простой случай контакта металлов 1 и 2 с различными работами выхода A_1 и A_2 , т.е. с различной высотой верхнего заполненного электронами энергетического уровня Ферми (рис. 13.17).

Пусть в противоположность тому, что мы предполагали в § 10.2, $A_1 < A_2$. В первом металле электронами заполнены более высокие энергетические уровни, чем во втором. Поэтому электроны будут переходить через поверхность контакта преимущественно в направлении от металла 1 к металлу 2, вследствие чего первый металл заряжается положительно, а второй — отрицательно. Одновременно происходит относительное смещение энергетических уровней электронов в контак-