

В обоих случаях при увеличении степени легирования τ_0 уменьшается и стремится к значению τ_{p0} . Аналогично, в полупроводнике p -типа τ_0 уменьшается при увеличении концентрации мелких акцепторов и стремится к τ_{n0} . Таким образом, введенные нами ранее времена τ_{p0} и τ_{n0} суть предельные времена жизни в сильно легированных материалах n - и, соответственно, p -типов.

Чтобы выяснить зависимость τ от уровня инжекции $\delta n / (n_0 + p_0)$, перепишем формулу (6.7) в виде

$$\tau = \tau_0 \frac{1 + \frac{\tau_\infty}{\tau_0} \frac{\delta n}{n_0 + p_0}}{1 + \frac{\delta n}{n_0 + p_0}}. \quad (6.7a)$$

Отсюда видно, что с возрастанием уровня инжекции τ увеличивается, если $\tau_\infty > \tau_0$, и уменьшается при $\tau_\infty < \tau_0$. Так как τ_0 зависит от n_0 и p_0 , а также от температуры, то при изменении температуры и равновесной электропроводности могут наблюдаться оба эти случая. Сказанное иллюстрирует рис. 9.7, где, помимо зависимости $\tau_0(n_0)$, показана еще горизонталь $\tau_\infty = \tau_{p0} + \tau_{n0}$. Обе линии пересекаются в двух точках, одна из которых определяет некоторую равновесную концентрацию электронов n'_0 в материале n -типа (основные носители), и концентрацию электронов n''_0 в материале p -типа (неосновные носители; соответствующая концентрация основных носителей есть $p''_0 = n''_0/n''_0$). При этих концентрациях $\tau_0 = \tau_\infty$ и τ вообще не зависит от уровня инжекции. Если фактическая концентрация $n_0 > n'_0$ (в материале n -типа) или, соответственно, $p_0 > p''_0$ (p -тип), то τ будет увеличиваться при возрастании уровня инжекции. При $n_0 < n'_0$ или $p_0 < p''_0$ время τ будет уменьшаться.

§ 7. Многозарядные ловушки

В случае многозарядных примесных атомов (или дефектов) (ср. § II.9), создающих несколько энергетических уровней, результирующий темп рекомбинации будет равен сумме темпов рекомбинации через каждый из этих уровней. Если известны положения всех уровней и известны коэффициенты захвата электронов и, соответственно, дырок для каждого из уровней, то, рассуждая, как и выше, можно определить неравновесные степени заполнения каждого уровня и найти результирующий темп рекомбинации (а следовательно, и времена жизни электронов и дырок). Более детально путь такого расчета приведен в Приложении V.

Существенной особенностью рекомбинации через многозарядные ловушки является то, что при изменении температуры или равновесной концентрации электронов может происходить изменение зарядового состояния ловушек, что равносильно изменению

природы центров рекомбинации. Поясним это на конкретном примере атомов никеля в германии. Они создают два акцепторных уровня E_1 и E_2 (рис. 9.8) и могут, следовательно, находиться в трех зарядовых состояниях: Ni^0 , Ni^- и Ni^{2-} . Положим, что в равновесии уровень Ферми (F_1 на рис. 9.8) расположен ниже уровня E_1 на несколько kT . Тогда (ср. § V.11) подавляющее большинство центров будет находиться в виде Ni^0 . Это будет справедливо и при нарушении равновесия, если нарушение достаточно мало (например, при слабом освещении кристалла). Поэтому электроны будут захватываться только центрами Ni^0 (что соответствует пустому уровню E_1), а дырки — только центрами Ni^- (возникающими после захвата электрона на Ni^0), т. е. на заполненный уровень E_1 , а следовательно, в рекомбинации будет участвовать только один энергетический уровень E_1 . Если при этом концентрация центров мала ($\delta p \simeq \delta n$), то при увеличении равновесной концентрации основных носителей — дырок время жизни электронно-дырочных пар будет стремиться к $\tau_{p0} = (\alpha_n^0 N_t)^{-1}$, где α_n^0 — коэффициент захвата электронов нейтральными атомами никеля.

Однако если мы будем смещать уровень Ферми вверх (например, увеличивая концентрацию мелких доноров или повышая температуру), то после пересечения последним уровня E_1 начнут появляться ионы Ni^{2-} , которые тоже будут участвовать в рекомбинации. Когда уровень Ферми окажется выше E_2 (F_2 на рис. 9.8), практически все центры будут в состоянии Ni^{2-} . Поэтому дырки будут захватываться только этими центрами (т. е. на заполненный уровень E_2), а электроны — центрами Ni^- (на пустой уровень E_2). И в этом случае рекомбинация будет происходить через один энергетический уровень, однако теперь уже через уровень E_2 . При увеличении концентрации равновесных электронов время жизни будет стремиться к $\tau_{p0} = (\alpha_p^{2-} N_t)^{-1}$, где α_p^{2-} — коэффициент захвата дырок дважды отрицательными ионами никеля.

Если нарушение равновесия не мало, то концентрации центров в различных зарядовых состояниях могут сильно отличаться от равновесных (перезарядка уровней). Это может быть и при малых нарушениях равновесия, если величины коэффициентов захвата дырок и электронов сильно отличаются друг от друга. При увеличении уровня возбуждения неравновесные концентрации центров перестают зависеть от δp и δn и достигают предельных значений, зависящих от соотношения между коэффициентами захвата для разных уровней и глубины залегания уровней.

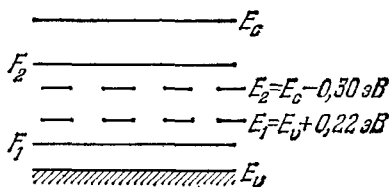


Рис. 9.8. Энергетические уровни никеля в германии.

Исследуя на опыте, как зависят времена жизни τ_n и τ_p от концентраций электронов и дырок и от температуры, и зная из независимых измерений концентрацию ловушек (рекомбинационной примеси) и их энергетические уровни, можно определить коэффициенты захвата α_n и α_p для данных центров (и в данном полупроводнике) и сечения захвата S_n и S_p . Такие измерения показывают, что S_n и S_p могут изменяться в чрезвычайно широких пределах, от $\sim 10^{-12}$ см² до $\sim 10^{-22}$ см². Исследуя зависимость сечений захвата от условий опыта — концентрации носителей заряда, температуры, внешнего электрического поля, — а также анализируя излучение, возникающее при рекомбинации, можно выяснить, какие именно элементарные процессы играют главную роль в явлениях захвата и рекомбинации. К этому вопросу мы вернемся в гл. XVII.

Укажем в заключение на практическую важность рассматриваемых вопросов. Как отмечалось выше, значения сечений захвата для разных примесей можно определить экспериментально. Эти сечения совместно с энергетическими уровнями примеси являются важнейшими характеристиками рассматриваемой примеси в данном полупроводнике и вполне определяют ее влияние на равновесные свойства полупроводника и кинетику электронных процессов. Зная эти характеристики, можно затем рассчитать необходимый состав и количество примесей для получения заданных свойств полупроводника — равновесных концентраций электронов и дырок (по формулам гл. V) и нужных времен их жизни (по формулам настоящей главы), необходимых для изготовления тех или иных полупроводниковых приборов.