

почти не влияет и даже несколько его увеличивает, так как увеличивает тянущее поле и уменьшает таким образом потери на рекомбинацию. В этом состоит большое преимущество фотодиодов перед фотоспротивлением.

Второе преимущество фотодиода заключается в том, что он обладает очень малой инерционностью и поэтому удобен для регистрации коротких сигналов.

Учет рекомбинации. Если учесть и объемную и поверхностную рекомбинацию, то выражение для фототока принимает вид

$$I_{\Phi} = eg(1 - \beta), \quad (9.92)$$

где β — коэффициент, учитывающий оба вида рекомбинации и равный

$$\beta = \beta_{об} + \beta_s = \frac{\frac{d}{L_s + \frac{1}{2} \left(\frac{d}{L_n} \right)^2}}{1 + \frac{d}{L_s}}, \quad (9.93)$$

где L_n — диффузионная длина в объеме: $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ и L_s — диффузионная длина вблизи поверхности: $L_s = D_n/s$ (где s — скорость поверхностной рекомбинации). Выражение для тока насыщения I_s при учете поверхностной рекомбинации приобретает также более сложный вид [31].

9.4. ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНС

Явление циклотронного резонанса в настоящее время широко используется как один из наиболее тонких методов исследования зонной структуры полупроводников. Есть два подхода к изучению этого явления — классический и квантовомеханический.

Классический подход. Как было показано в гл. 7, свободный (или зонный) электрон в магнитном поле движется по винтовой линии. Если составляющая скорости электрона вдоль магнитного поля равна нулю, то эта винтовая линия вырождается в окружность с радиусом

$$r = \frac{m\omega v}{eH}, \quad (9.94)$$

При этом круговая частота обращения электрона по ней (так называемая циклотронная частота) не зависит от его скорости:

$$\omega_0 = \frac{eH}{mc} . \quad (9.95)$$

Представим теперь, что одновременно с постоянным магнитным полем на электрон действует слабое электромагнитное излучение, поляризованное по кругу, направление распространения которого совпадает с направлением постоянного магнитного поля и частота которого $\omega = \omega_0$, причем направление вращения плоскости поляризации совпадает с направлением движения электрона по окружности. Тогда электрическая составляющая излучения будет ускорять электрон, скорость его при этом будет увеличиваться, но так как согласно (9.95) частота обращения не зависит от скорости *), то этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока электрон в результате какого-либо столкновения не отдаст накопленную энергию, и затем все начнется сначала.

Если частота ω заметно отличается от ω_0 , то действие излучения на электрон будет ничтожным, так как в среднем за большой промежуток времени оно будет столько же времени ускорять электрон, сколько и замедлять (так как разность фаз все время будет меняться).

Таким образом, соблюдение условия $\omega = \omega_0$ выразится в резонансном поглощении электромагнитной энергии; на этом и основано явление циклотронного резонанса, позволяющее согласно формуле (9.94) определить эффективную массу электрона. Если в исследуемом материале масса электрона анизотропна, то, изменяя направление магнитного поля и одновременно с ним направление электромагнитного излучения (или просто вращая кристалл), можно изучить форму эллипсоида эффективных масс.

Квантовомеханический подход. Как мы уже упоминали, любое движение электрона в ограниченном объеме квантуется; это, следовательно, должно относиться и к движению электрона по окружности в магнитном поле. Условия квантования в данном случае можно получить несколькими способами:

*) До тех пор пока скорость не достигнет релятивистских значений и масса электрона не начнет зависеть от скорости.

1. Согласно гипотезе Бора — де Бройля на орбите должно укладываться целое число волн:

$$2\pi r = n\lambda = \frac{n\hbar}{mv} \quad (9.96) *$$

или

$$mv = \frac{n\hbar}{r}, \quad (9.97)$$

с другой стороны,

$$\frac{v}{r} = \omega. \quad (9.98)$$

Умножая (9.97) на (9.98), найдем, что кинетическая энергия электрона

$$T = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} n\hbar\omega. \quad (9.99)$$

Формула (9.84) дает точное значение энергии для первого уровня, соответствующего при $n = 1$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \hbar\omega. \quad (9.100)$$

Для всех остальных уровней строгая теория дает выражение

$$\varepsilon = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_0. \quad (9.101)$$

2. Соотношение (9.99) можно также получить, если учесть, что движение по кругу с частотой ω_0 эквивалентно сложению двух колебаний с той же частотой, но, как мы видели выше, энергия колебаний может принимать значения, удовлетворяющие формуле (9.101).

Так или иначе энергия электрона в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, может принимать лишь квантованные значения, удовлетворяющие соотношению (9.99).

Следовательно, для того чтобы падающее электромагнитное излучение резонансно поглощалось, его кванты должны удовлетворять условию

$$\hbar\omega = \hbar\omega_0 \quad (9.102)$$

или

$$\omega = \omega_0. \quad (9.103)$$

*) Соотношение (9.96) совершенно эквивалентно условию квантования момента количества движения.

К сказанному выше следует сделать ряд дополнений. Падающее электромагнитное излучение не должно быть обязательно поляризовано по кругу — вместо вращающегося поля можно применять и линейно поляризованное; при правильном соотношении фаз электрон все время будет ускоряться.

Условие правильного соотношения фаз не является обязательным: если оно не соблюдается, электрон будет тормозиться, потеряет свою скорость и начнет снова ускоряться уже в правильной фазе. Таким образом, здесь так же, как в циклотроне, имеет место самосинхронизация.

Значительно более жесткие ограничения на условия опыта накладывает ширина резонансных линий. Оценка резонансной частоты ω_0 по формуле (9.95) показывает, что при эффективной массе, равной массе свободного электрона, и магнитном поле $H \approx 10^3 \div 10^4$ эрст резонансная частота ω_0 лежит в области сантиметрового диапазона, $\omega_0 \approx 10^{10}$, т. е. период обращения электрона на орбите $T \approx 10^{-10}$. Для того чтобы резонанс был заметным, электрон должен совершить без столкновений несколько оборотов, иначе соотношение фаз при столкновениях будет нарушаться слишком часто.

Таким образом, время свободного пробега должно удовлетворять условию

$$\tau \geq T \approx 10^{-10}. \quad (9.103a)$$

На языке квантовой механики это означает, что ширина уровней

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{\hbar}{\tau} \quad (9.104)$$

должна быть меньше расстояния между уровнями $\hbar\omega$:

$$\hbar\omega = \frac{\hbar}{T} > \frac{\hbar}{\tau} \quad (9.105)$$

или

$$\tau > T, \quad (9.106)$$

т. е. опять получим для времени свободного пробега то же условие (9.103a).

В настоящее время этому требованию удовлетворяет лишь весьма ограниченное число очень чистых полупроводников (притом при низких температурах), на которых до сих пор и проводились опыты по циклотронному резонансу.

Так как плавные изменения частоты излучения в сантиметровом диапазоне представляют весьма сложную задачу, то практически в условиях опыта меняется не ω , а ω_0 , т. е. плавно меняется постоянное магнитное поле при фиксированной частоте падающего электромагнитного излучения. При этом, когда магнитное поле достигает величины, соответствующей условию $\omega = \omega_0$, наблюдается пик поглощения. Если в материале имеется несколько сортов носителей, то наблюдается несколько пиков.

9.5. СТИМУЛИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Представим себе какую-либо систему частиц (например, газ, жидкость, твердое тело), в которой электроны могут находиться в состояниях с двумя энергиями, 1 и 2, при этом возможны два типа переходов.

Переход из нижнего состояния в верхнее требует энергии $\Delta\mathcal{E}$; поэтому такие переходы могут быть осуществлены, если электрон в результате взаимодействия (которое мы называем столкновением) с какой-либо другой частицей (фононом, фотоном или другим электроном) получит необходимую энергию.

Переход из одного состояния в другое в результате взаимодействия с другой частицей называется вынужденным или индуцированным. Таким образом, переходы «снизу — вверх» могут быть только вынужденными.

Переход из верхнего состояния в нижнее не требует затраты энергии, поэтому он может происходить двумя путями: 1) спонтанно (самопроизвольно) и при этом освободившаяся энергия выделится в виде кванта света и 2) вынужденно (индуцированно), т. е. в результате столкновения с какой-либо другой частицей; при этом освободившаяся энергия может также выделиться в виде кванта света, фонона или перейти в кинетическую энергию одной из частиц, участвовавших в столкновении.

Для того чтобы индуцированный переход осуществился под действием кванта света, этот квант должен удовлетворять резонансному условию

$$h\nu = \Delta\mathcal{E}.$$

В результате этого рождается второй фотон с той же частотой, с той же фазой, с тем же направлением движения и поляризации, т. е. неотличимый от первого.