

у два зоны проводимости (\mathcal{E}_c) и потолка валентных подзон ($\mathcal{E}_{v1}, \mathcal{E}_{v2}$) для кристаллов $A^{III}B^V$. Зоны \mathcal{E}_c и \mathcal{E}_v образуются вырожденными s - и p -атомными состояниями, к-рым соответствуют величины спина $S = 1/2$, $S = 3/2$ и $S = 1/2$ (в единицах \hbar). Каждый подуровень характеризуется проекцией спина на ось квантования, в качестве k -рой выбирается направление светового луча (ось z , рис. 2).

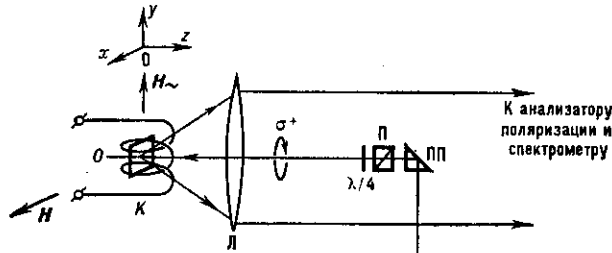


Рис. 2. Схема эксперимента по наблюдению оптической ориентации спинов методом поляризованной люминесценции; О — образец, К — катушка, создающая переменное магнитное поле $H \sim \cos \omega t$ для наблюдения резонансов, $\lambda/4$ — четверть-волновая фазовая пластинка, П — поляризатор, ПП — поворотная призма.

Отношение интенсивностей переходов $-3/2 \rightarrow -1/2$ и $-1/2 \rightarrow 1/2$, проходящих при поглощении правополяризованных (σ^+) фотонов с энергией $\hbar\omega$, удовлетворяющее условию $\mathcal{E}_g < \hbar\omega < \mathcal{E}_g + \Delta$ (\mathcal{E}_g — ширина запрещенной зоны, Δ — величина спин-орбитального расщепления валентной зоны), в соответствии с правилами отбора составляет 3:1. Это приводит к степени ориентации (P) электронов при их рождении, равной $P = (N_{-1/2} - N_{+1/2}) / (N_{-1/2} + N_{+1/2}) = 50\%$. Здесь $N_{\pm 1/2}$ — заселенности спиновых состояний в зоне проводимости. Средний по ансамблю спин электронов $\langle S \rangle = 0,5P = 0,25$. При увеличении энергии фотона до значений $\hbar\omega > \mathcal{E}_g + \Delta$ включаются переходы из отщепленной валентной подзоны \mathcal{E}_{v2} , к-рые уменьшают разность заселенностей состояний в зоне проводимости с $S = \pm 1/2$ и величину P . Зависимость $P(\omega)$ позволяет определить параметр Δ .

Трудность наблюдения О. о. в твердом теле заключается в её быстрой релаксации. Характерные времена спиновой релаксации для электронов $\tau_s^e \sim 10^{-7} - 10^{-10}$ с, а для дырок $\tau_s^h \sim 10^{-10} - 10^{-13}$ с (что на много порядков меньше времён спиновой релаксации свободных атомов в газах). Спиновая система ядер релаксирует медленно: $\tau_s^N \sim 10^{-2} - 1$ с в кристаллах $A^{III}B^V$ и $\tau_s^N \sim 10^2 - 10^5$ с в Si.

Методы обнаружения О. о. в полупроводниках базируются либо на возможности наблюдения ориентированных носителей за времена, меньшие τ_s^e (метод поляризованной люминесценции), либо на наблюдении равновесной ядерной намагниченности (см. ниже), сохраняющейся длит. время (метод ядерного магнитного резонанса) и квантовой магнитометрии, использующей скиндр. Развита также метод, основанный на циркулярном фотогальваническом эффекте, в к-ром О. о. спинов приводит к появлению тока.

Метод поляризованной люминесценции основан на измерении степени (ρ) циркулярной поляризации рекомбинационного излучения (люминесценции) с участием ориентированных носителей. При наблюдении люминесценции вдоль возбуждающего луча $\rho = \langle S \rangle$. Если время жизни фотовозбужденного неравновесного состояния $\tau \leq \tau_s^e$, то наблюдается значит. величина $\rho_0 = (n_+ - n_-) / (n_+ + n_-)$, где n_{\pm} — числа фотонов рекомбинац. излучения, поляризованных по правому и левому

кругу. При наблюдении люминесценции кристаллов $A^{III}B^V$ в направлении возбуждающего луча $\rho_0 = 0,25\tau_s^e / (\tau_s^e + \tau_s^h)$; из-за быстрой релаксации вклад поляризации дырок пренебрежимо мал.

Наложение поперечного магн. поля (напр., вдоль оси ox) приводит к ларморовой прецессии спина и уменьшению ρ в дополнение к его понижению вследствие рекомбинации ориентиров. электронов и их спиновой релаксации. Вращение S в поперечном магн. поле H приводит к уменьшению ρ по закону

$$\rho = \rho_0 / [1 + (\omega T_S)^2],$$

где

$$T_S^{-1} = \tau^{-1} + (\tau_s^e)^{-1}, \quad \omega = \mu_B g H / \hbar$$

(g — фактор спектроскопич. расщепления в магн. поле, μ_B — магнетон Бора). По внеш. проявлениям электронный эффект магн. деполаризации люминесценции аналогичен Ханле эффекту. Осн. информация об О. о. в кристаллах $A^{III}B^V$ получена с помощью поляризов. люминесценции (рис. 2).

Методы ЯМР и квантовой магнитометрии. Большие времена спиновой релаксации ядер τ_s^N позволяют «накопить» в освещаемом полупроводнике ядерную поляризацию, на неск. порядков превышающую её термодинамическое равновесное значение. Процессы О. о. электронных спинов и наблюдение её результатов разделены во времени. Созданную путём освещения в слабом магн. поле ядерную поляризацию измеряют с помощью ЯМР-спектрометра или скинда. Этот метод эффективен для чистого Si, в к-ром наблюдение поляризации люминесценции при О. о. затруднено из-за соотношения $\tau \gg \tau_s^e$. Отказ от регистрации люминесценции позволяет использовать непрямые оптич. переходы с малыми квантовым выходом и коэф. поглощения. Это обеспечивает поляризацию ядерных спинов в объёме образца.

Фотогальванический метод основан на эффекте асимметричного рассеяния ориентированных по спину электронов относительно плоскости, содержащей их спин и импульс p . Эдс возникает за счёт асимметричного рассеяния. Изменение внеш. магн. поля, «разворачивающего» вектор $\langle S \rangle$ относительно импульса p электрона, позволяет варьировать и наблюдать фототок, пропорц. $[\langle S \rangle p]$, обусловленный О. о.

Применение. Методом О. о. в полупроводнике исследуются кинетич. и релаксац. явления, параметры зонной структуры, дефекты кристаллич. структуры. Деполаризация рекомбинац. излучения в магн. поле, наблюдаемая в $A^{III}B^V$, даёт информацию о механизмах рекомбинации и спиновой релаксации носителей. Для полупроводников характерны специфич. типы спиновой релаксации: при низких темп-рах существенны обмен спином с быстро релаксирующей дыркой (механизм Бира — Аронова — Пикуса), при комнатной темп-ре — механизм Дьяконова — Переля, обусловленный снятием спинового вырождения зон в кристаллах без центра инверсии.

Спиновая «метка» фотовозбужденных электронов,двигающихся через области переменного состава в варизонных полупроводниках и полупроводниковых структурах, позволяет изучать диффузию и подвижность неравновесных носителей, исследовать процесс переизлучения. Параметры зонной структуры исследуются по зависимости степени поляризации люминесценции или эммитруемых в вакуум электронов от энергии квантов возбуждающего света.

О. о. электронов в кристаллах используется для получения интенсивных поляризов. пучков свободных электронов, т. к. при спец. обработке поверхности кристаллов в высоком вакууме удаётся достичь отрицат. электронного родства и обеспечить высокий квантовый выход фотоэлектронной эмиссии.