

ФОТОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ В УСЛОВИЯХ СПИНОВОГО РЕЗОНАНСА

А.М.Палкин, В.Н.Созинов

В антимониде индия в условиях спинового резонанса обнаружен аналог фотоэлектромагнитного эффекта. Наблюдаемые сигналы фотоэдс имеют аномальную зависимость от направления импульса фотона и направления постоянного магнитного поля относительно кристаллографических направлений. Обсуждаются возможные механизмы возникновения эффекта.

В работах ¹ было показано, что в узкозонных полупроводниках без центра инверсии оптические переходы с переворотом спина могут возбуждаться электрическим вектором проходящего через кристалл излучения, причем интенсивность переходов зависит от угла между кристаллографическими направлениями и магнитным полем.

Недавно ^{2, 3} было экспериментально и теоретически показано, что коэффициент поглощения при спиновом резонансе зависит от направления импульса фотона относительно осей кристалла и изменяется при обращении магнитного поля. Это связано с интерференцией электродипольного и магнитодипольного (ЭДМД) матричных элементов переходов.

В настоящем сообщении приводятся экспериментальные результаты по обнаружению фотомагнитного эффекта при возбуждении оптических переходов с переворотом спина.

Эксперименты проводились при гелиевой температуре в параллельной геометрии Фойгта: $\mathbf{E} \parallel \mathbf{H} \perp \mathbf{q}$, где \mathbf{E} и \mathbf{q} — поляризация и волновой вектор излучения, \mathbf{H} — постоянное магнитное поле (рис. 1, а). Источником излучения служил субмиллиметровый лазер с длиной волны $\lambda = 118,8$ мкм. Энергетический зазор между спиновыми подуровнями основного уровня Ландау подстраивался под резонанс изменением магнитного поля. Использовались образцы антимонида индия с параметрами: образец 1 — с концентрацией $n_{77} = 1,3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $\mu_{77} = 8 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, образец 2 — $n_{77} = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $\mu_{77} = 4 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Образцы были ориентированы так, чтобы направление $[110]$ было параллельно магнитному полю, а излучение падало в одном из направлений: $[001]$, $[110]$, $[111]$. Толщины образцов подбирались таким образом, чтобы $\alpha_{\pm} d < 1$, где α_{\pm} — коэффициент поглощения в резонансе для разных направлений магнитного поля.

На рис. 1, б приведены магнитополевые зависимости наблюдаемого эффекта для образца 1 при $\mathbf{q} \parallel [110]$. Пик 1 соответствует спиновому резонансу электронов проводимости, пик 2 — примесному переходу. Изменение знака магнитного поля или направления падающего излучения приводит к изменению полярности фотоэдс. Как видно из рис. 1, б, для образца 1 абсолютная величина пиков фотоэдс изменяется в 3,3 раза. Измеренные в этих же условиях коэффициент поглощения или сигнал фотопроводимости меняются при изменении направления \mathbf{H} или \mathbf{q} в 1,9 раза. Измерения фотоэдс, (рис. 2), фотопроводимости и коэффициента поглощения были проведены также на образце 2 в ориентации $\mathbf{q} \parallel [110]$. Однако при этом при изменении направлений \mathbf{H} или \mathbf{q} на противоположные абсолютная величина сигнала фотоэдс изменялась в 1,8 раза, т. е. повторяла поведение коэффициента поглощения. Отметим, что при высоких концентрациях примесей наблюдается только резонанс на свободных электронах. Примесный спиновый резонанс пропадает из-за слияния уровней мелкой примеси с дном зоны проводимости. Аналогичные измерения, проведенные на обоих образцах, в ориентации $\mathbf{q} \parallel [001]$, показывают, что при инверсии \mathbf{H} или \mathbf{q} абсолютные величины сигналов поглощения, фотоэдс и фотопроводимости не меняются. Такое поведение связано с отсутствием ЭДМД интерференции в такой геометрии.

Как видно из наших экспериментов, для образцов с малой концентрацией абсолютная величина наблюдаемого эффекта пропорциональна квадрату коэффициента поглощения. Такая зависимость возможна в случае, когда эффект вызывается неоднородным поглощением излучения в объеме полупроводника при $\alpha_{\pm} d \ll 1$.

Как было показано для циклотронного резонанса ⁴, связанный с градиентом поглощения фотомагнитный эффект возникает за счет различия поперечных коэффициентов диффузии горячих и холодных электронов на нижнем подуровне, причем существенную роль в возникновении эффекта вносят поверхностные диамагнитные токи. Величина такого эффекта будет пропорциональна времени энергетической релаксации τ_e на нижнем подуровне, которое при низких концентрациях примесей связано с остыванием электронов за счет испускания акустических фононов. По-видимому, аналогичная ситуация возникает при спиновом резонансе. После возбуждения в результате квазиупругого рассеяния с переворотом спина на ионизованных примесях или акустических фононах ⁵ горячие носители появляются на нижнем спиновом подуровне. В случае примесного спинового резонанса электроны на нижнем подуровне появляются в результате автоионизации возбужденного примесного уровня.

С увеличением концентрации электронов резко уменьшается время релаксации по энергии на нижнем спиновом подуровне за счет электрон-электронных столкновений в присутствии ионизованных примесей ⁶, и фотомагнитный эффект, пропорциональный τ_e , будет подавлен.

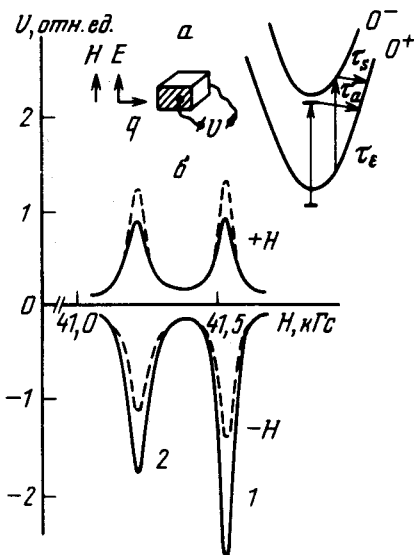


Рис. 1. *a* – Схема оптических и релаксационных переходов и геометрия эксперимента; τ_s – время спиновой релаксации, τ_a – время автоионизации. *б* – Магнитополевая зависимость фотоэдс для образца 1 – сплошная линия – $q \parallel [110]$, пунктир – $q \parallel [001]$

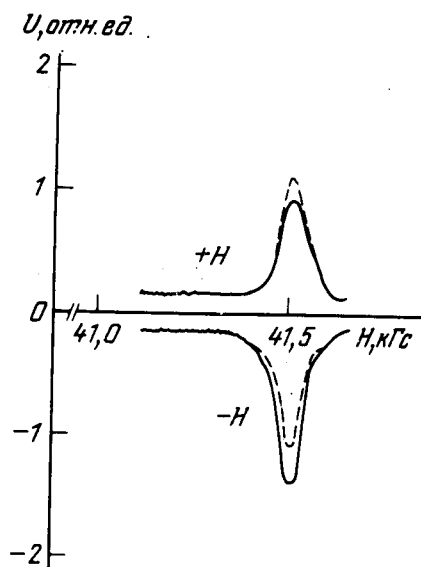


Рис. 2. Магнитополевая зависимость фотоэдс для образца 2: сплошная линия – $q \parallel [110]$, пунктир – $q \parallel [001]$

В то же время в данном эксперименте может проявляться эффект увлечения электронов фотонами. До сих пор этот эффект изучался только в классических магнитных полях ⁷. Феноменологическое выражение для тока увлечения в геометрии нашего эксперимента может быть записано следующим образом: $J_{\text{фму}} = \text{const} \alpha [q \hbar]$, где $\hbar q$ – импульс фотона, \hbar – единичный вектор вдоль магнитного поля. В случае тонких образцов эффект пропорционален коэффициенту поглощения. Полученные нами экспериментальные данные для образцов с большой концентрацией позволяют говорить об обнаружении фотомагнитного эффекта увлечения в квантующем магнитном поле. В пользу такого объяснения говорят те факты, что эффект нечетен по направлению импульса фотона и поляризационная зависимость эффекта определяется поляризационной зависимостью коэффициента поглощения, что позволяет экспериментально отделить его от возможного фотогальванического эффекта в полупроводниках без центра инверсии, к которым принадлежит InSb.

Для более детального анализа экспериментальных результатов требуется теоретическое рассмотрение эффектов.

В заключение авторы выражают благодарность Л.И.Магариллу и М.В.Энтину за полезные обсуждения.

Литература

1. *Рашба Э.И., Шека В.И.* ФТТ, 1961, 3, 1735, 1863.
2. *Chen Y.F., Dobrovolska M., Furdyna J.K., Rodriguez S.* Phys. Rev. B, 1985, 32, 890.
3. *Шека В.И., Хазан Л.С.* Письма в ЖЭТФ, 1985, 68, 1377.
4. *Магарилл Л.И., Палкин А.М., Созинов В.Н., Энтин М.В.* III Международное совещание по фотоэлектрическим и оптическим явлениям в твердых телах. Тезисы докладов, Варна, 1986, 59.
5. *Маргулис А.Д., Маргулис В.А.* ФТТ, 28, 1452.
6. *Коган Ш.М., Шадрин В.Д., Шильман А.Я.* ЖЭТФ, 1975, 68, 1377.
7. *Рывкин С.М., Ярошецкий И.Д.* Сб. Проблемы современной физики, 1980, Ленинград, Наука, 173.

Институт физики полупроводников
Академии наук СССР СО

Поступила в редакцию
1 августа 1987 г.