

ЭФФЕКТ СПИНОВОГО ЭХА В ВАРИЗОННОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ

А.С.Волков, А.Л.Липко, Ш.М.Меретлиев, Б.В.Царенков

Обнаружен новый спиновый эффект, возникающий в полупроводнике, в объеме которого g -фактор электронов меняет знак: возбуждаемые на поверхности ориентированные электроны, спины которых прецессируют в магнитном поле, на некотором расстоянии от поверхности, независимо от величины поля, принимают первоначальную ориентацию.

1. Как известно, при оптической накачке ориентированных по спину электронов в процессе их переноса в отсутствие магнитного поля вектор спиновой плотности S в любой точке полупроводника сохраняет свою ориентацию.

При наложении поперечного магнитного поля вектор спиновой плотности прецессирует. В случае поверхностной накачки это приводит к тому, что проекция вектора на направление переноса оказывается осциллирующей знакопеременной функцией координаты с затухающей вследствие процессов рекомбинации и спиновой релаксации амплитудой.

Когда g -фактор электронов не зависит от координаты, эти осцилляции синусоидальны.

Когда g -фактор зависит от координаты, осцилляции уже не синусоидальны. Если при этом g -фактор меняет знак – возникает спиновый эффект типа "эха".

2. Рассмотрим варизонный полупроводник, в котором g -фактор электронов и ширина запретной зоны E_g линейно зависят от координаты x , при этом в некоторой точке x_0 g -фактор меняет знак. Пусть на широкозонной поверхности ($x = 0$) циркулярно поляризованным светом σ^- возбуждаются ориентированные по спину электроны, так что вектор спиновой плотности S направлен по оси x (рис. 1).

В этом случае перенос спинов в магнитном поле H происходит следующим образом. В процессе дрейфа электронов от широкозонной поверхности прецессия S сначала замедляется, а затем, изменив направление вращения в точке x_0 , ускоряется с постоянным угловым ускорением. В результате в точке x_e , представляющей собой зеркальное отображение начала координат относительно точки x_0 , фаза вектора спиновой плотности будет совпадать с первоначальной. Такое синфазное с возбуждением выстраивание спинов можно трактовать как своеобразное спиновое эхо. Важно подчеркнуть, что фаза S в точке x_e всегда соответствует фазе S на поверхности, тогда как во всех других точках полупроводника она зависит от величины магнитного поля. Естественно, что при усреднении S в изменяющемся во времени магнитном поле должен наблюдаться всплеск амплитуды S в области x_e .

3. Строгое решение задачи о переносе спинов сводится к решению системы уравнений для проекций S_x и S_y :

$$L_s^2 \frac{d^2 S_{x,y}}{dx^2} - l_s \frac{dS_{x,y}}{dx} - S_{x,y} + \Omega T S_{y,x} = 0.$$

Здесь L_s – диффузионная и l_s – дрейфовая длины смещения спиновой плотности, T – спиновое время жизни, а угловая скорость прецессии спинов Ω является линейной функцией координаты x : $\Omega = \Omega_0 (1 + g_0^{-1} \frac{dg}{dx} x)$, где $\Omega_0 = g_0 \mu_B H / \hbar$ и $dg/dx = \text{const}$.

На рис. 2, а, б представлены результаты расчета двух серий кривых $S_x(x)$ при различных магнитных полях; серии отличаются значением координаты x_0 . При расчете полагалось, что dE_g/dx , T и подвижность электронов не зависят от координаты. Границные условия соответствовали генерации S_x при $x = 0$ и затуханию S на бесконечности. Как видно из рисунков, изменение координаты x_0 приводит к соответствующему смещению координаты спинового эха x_e .

4. Одним из фундаментальных свойств варизонного полупроводника является соответствие энергии кванта рекомбинационного излучения $h\nu$ координате точки x_e , где произошел

акт излучательной рекомбинации. Например, при $dE_g/dx = \text{const}$ и межзонной излучательной рекомбинации $h\nu = E_g(0) - x |dE_g/dx|$. Это свойство позволяет изучать перенос неравновесных носителей заряда и их спинов в направлении уменьшения E_g люминесцентными методами¹.

В² на структуре $p\text{-GaAlAs}$ при измерении спектров поляризованной ФЛ $J^+(h\nu) - J^-(h\nu)$ в поперечном магнитном поле были обнаружены знакопеременные осцилляции, соответствующие колебательному характеру $S_x(x)$. Однако, поскольку изменение состава по структуре было таким (от 28 до 16% AlAs), что g -фактор не менял знак, спиновое эхо не возникало.

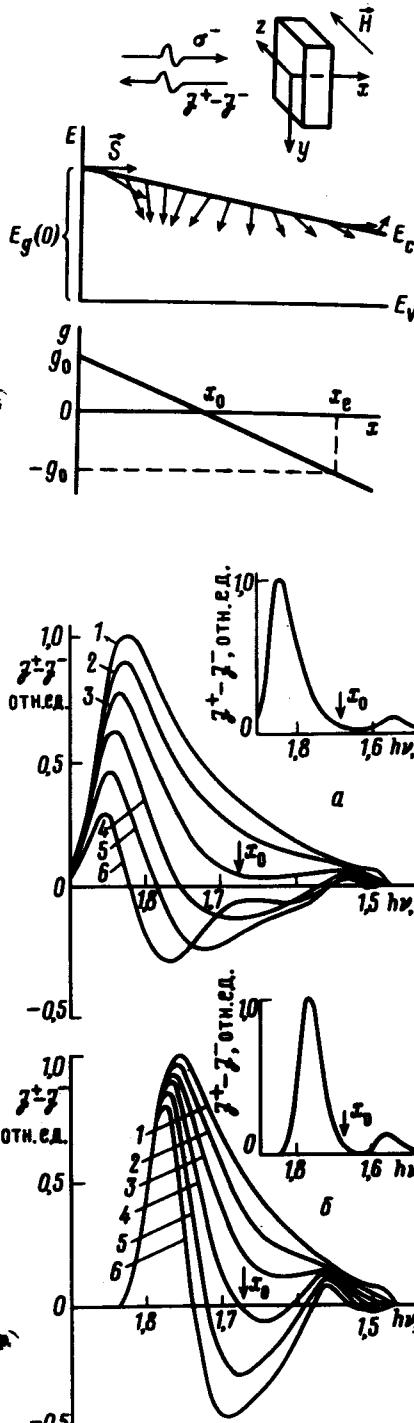


Рис. 1. Энергетическая диаграмма варизонного полупроводника и зависимость g -фактора от координаты x . На вставке — геометрия задачи

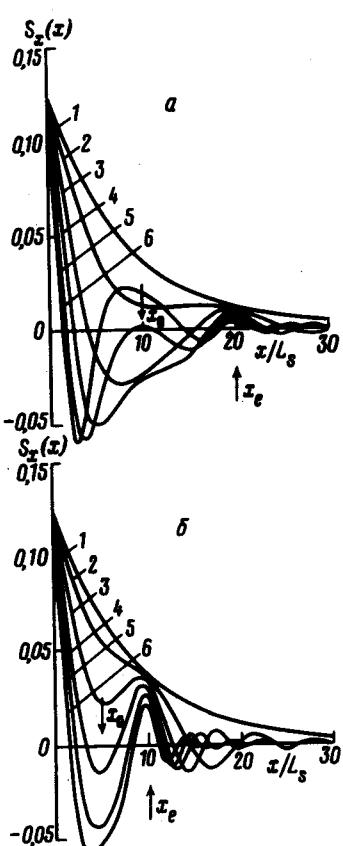


Рис. 2. Зависимость x -компоненты спиновой плотности S_x от безразмерной координаты x/L_s при $L_s/2L_s = 4$ и различных значениях $\Omega_0 T$, $\Omega_0 T$: 1 — 0, 2 — 2, 3 — 4, 4 — 6, 5 — 8, 6 — 10; $g_0^{-1} \frac{dg}{dx} L_s$: а — 0,1, б — 0,2



Рис. 3. Спектры поляризованной ФЛ до (а) и после (б) травления структуры при температуре 14 К и различных магнитных полях H . H , кЭ: 1 — 0, 2 — 2, 3 — 3, 4 — 4, 5 — 5, 6 — 6

5. Для экспериментального обнаружения эффекта спинового эха была изготовлена вариационная структура p -GaAlAs : Zn, в которой состав твердого раствора менялся от 25 до 1% AlAs, что соответствует изменению g -фактора электронов от 0,35 до (-0,4)³. При этом dE_g/dx менялся от 250 эВ/см на широкозонной поверхности до 100 эВ/см на узкозонной, а среднее значение градиента g -фактора составляло 380 см⁻¹. Структура возбуждалась Не-Не-лазером ($h\nu = 1,96$ эВ).

На рис. 3, *a, b* приведены две серии спектров поляризованной ФЛ при различных магнитных полях. Спектры на рис. 3, *b* получены после стравливания 3-микронного слоя со стороны широкозонной поверхности исходной структуры (спектры на рис. 3, *a*). Видно, что травление, смещающее энергию максимума спектров ФЛ в длинноволновую область, приводит к смещению в коротковолновую область энергии фотонов, соответствующей координате эха x_e . Однако, поскольку dE_g/dx и dg/dx в структуре не постоянны, положение x_e относительно x_0 уже не является точным зеркальным отображением начала координат.

На обеих сериях при $h\nu = 1,49$ эВ в отсутствие магнитного поля наблюдается еще один максимум. Этот максимум связан с подкоплением у узкозонной поверхности электронных спинов, продрейфовавших через всю структуру.

На вставках рис. 3, *a, b* приведены спектры поляризованной ФЛ, полученные путем интегрирования люминесцентного сигнала по времени, когда магнитное поле меняется синусоидально с амплитудой 6 кЭ. Спиновое эхо проявляется как всплеск поляризованного излучения при соответствующей энергии фотонов.

Мы признательны В.И.Перелю и А.А.Рогачеву за обсуждение результатов этой работы.

Литература

1. Волков А.С., Царенков Г.В. ФТП, 1977, 11, 1709.
2. Волков А.С.; Екимов А.И., Никишин С.А., Сафаров В.И., Царенков Б.В., Царенков Г.В. Письма в ЖЭТФ, 1977, 25, 560.
3. Weisbuch C., Hermann C. Phys. Rev., 1977, 15, 1850.