

## ОПТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА В ГЕТЕРОПЕРЕХОДЕ GaAs - GaAlAs

С.И.Губарев, А.А.Дремин, К.фон Клитцинг<sup>1)</sup>, И.В.Кукушкин,  
А.В.Малявкин, М.Г.Тяжлов

Институт физики твердого тела АН СССР  
142432 Черноголовка, Московская обл., СССР

<sup>1)</sup> Max-Planck-Institut für Festkörperforschung  
Stuttgart, FRG

Поступила в редакцию 26 августа 1991 г.

Обнаружен сигнал оптически детектируемого циклотронного резонанса в спектрах люминесценции гетероперехода GaAs-GaAlAs. Возникновение сигнала связано с увеличением числа электронов в верхней размерно квантованной подзоне при насыщении циклотронного резонанса.

В последнее время спектры люминесценции успешно применяются для изучения энергетических уровней двумерного электронного газа в гетеропереходах GaAs-GaAlAs <sup>1</sup>. Циклотронный резонанс повсеместно используется для исследования свойств двумерных электронных систем большой плотности. Известно, что в полупроводниках в условиях насыщения циклотронного резонанса, повышение средней энергии электронов или дырок вызывает заметные изменения в спектрах люминесценции, это делает возможным наблюдение сигнала оптически детектируемого циклотронного резонанса (ОДЦР) <sup>2</sup>. В данной статье впервые описывается наблюдение ОДЦР в системе двумерных электронов в гетеропереходе GaAs-GaAlAs, а также дано объяснение причин его появления.

Использовался образец, содержащий одиночный гетеропереход GaAs-GaAlAs со спейсером из нелегированного GaAlAs и слоем GaAlAs *n*-типа, доноры из которого поставляют электроны в двумерный канал. Концентрация двумерных электронов в темноте составляла  $n_s = 2,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , после засветки  $5,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . На расстоянии 300 Å от гетероперехода в GaAs находился тонкий слой селективно легированного акцепторами (Be) GaAs ( $\delta$ -слой) с концентрацией Be  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . При освещении гетероперехода HeNe-лазером в GaAs создаются неравновесные дырки, при этом фотовозбужденные электроны уменьшают степень ионизации доноров в GaAlAs. В результате рекомбинации с неравновесными дырками уменьшается концентрация электронов в двумерном канале. Изменение мощности оптической накачки позволяет варьировать плотность двумерных электронов в широком диапазоне <sup>3</sup>. В спектрах люминесценции доминируют линии рекомбинации двумерных электронов с дырками, связанными на акцепторах  $\delta$ -слоя.

Излучение HeNe-лазера мощностью до 15 мВт фокусировалось в световод диаметром 1 мм, световод подводился к поверхности образца в криостате под углом около 30°. С помощью монохроматора ДФС-24 и фотоумножителя записывался спектр люминесценции, прошедшей обратно через тот же световод. Источником циклотронного излучения служил субмиллиметровый (СММ) лазер с CO<sub>2</sub>-накачкой. В работе использовались линии лазера  $\hbar\omega = 10,4 \text{ мэВ}$  (мощностью 80 мВт) и 7,6 мэВ (20 мВт). Соответствующие резонансные магнитные поля составили около 6,1 и 4,4 Тл, соответственно. Изменения

резонансных полей при изменении мощности оптической накачки связаны с изменением  $n_s$  и составляли  $\sim 4\%$ .

СММ излучение заводилось в криостат сверху по металлической трубе и фокусировалось на образец фторопластовой линзой в пятно размером  $\sim 5$  мм. СММ излучение детектировалось угольным болометром, помещенным за образцом. Особое внимание уделялось совпадению на образце пятен оптического излучения и зондирующего СММ излучения, для этого перед образцом устанавливалась металлическая диафрагма диаметром 1 мм. Совпадение положения линий циклотронного резонанса и ОДПР при различных мощностях оптической накачки указывает на хорошее совпадение пятен. При записи спектра люминесценции опорный сигнал для синхронного детектора снимался с обтюлятора, прерывающего излучение HeNe-лазера, для измерения ОДПР использовался опорный сигнал с обтюлятора CO<sub>2</sub>-лазера. Магнитное поле, перпендикулярное к поверхности образца, создавалось сверхпроводящим соленоидом, измерения проводились при  $T = 4,2$  К.

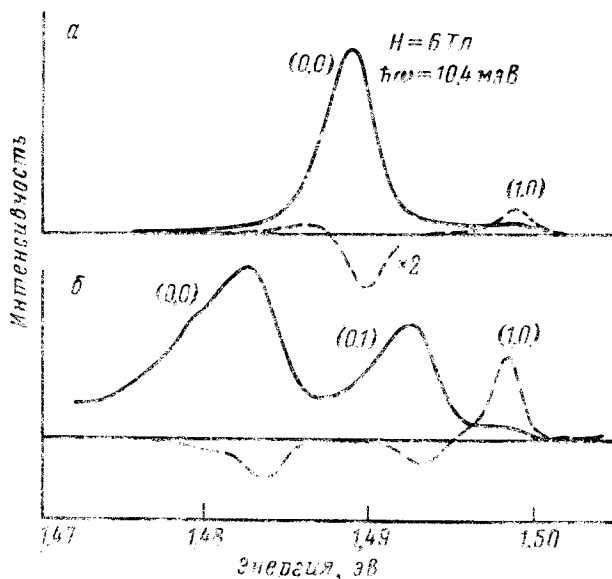


Рис. 1. Спектры люминесценции (сплошная линия) и спектральная зависимость сигнала ОДПР (пунктир) для линии СММ излучения  $\hbar\omega = 10,4$  мэВ в магнитном поле 6 Тл при мощности оптической накачки 2 мВт ( $n_s = 2,6 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>) (а) и 20 мВт ( $n_s = 4,4 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>) (б)

В спектрах люминесценции в исследуемом диапазоне магнитных полей наблюдались линии, соответствующие уровням Ландау основной разномерно-квантованной ползоны (0,0) и (0,1) (при максимальной мощности оптической накачки только линия (0,0)) и нижайшему уровню вышележащей ползоны (1,0) (рис.1). Интенсивность люминесценции для электронов на уровне (1,0) примерно на порядок больше, чем для нижайшей ползоны. Плотность состояний на уровне Ландау в поле 6 Тл составляет  $1,45 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>, поэтому из сравнения интенсивности линий полностью заселенного уровня (0,0) и (1,0) (рис.1б) следует, что концентрация электронов на уровне (1,0) значительно меньше  $10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Сигнал ОДПР возникает в тех же магнитных полях, что и циклотронный резонанс, и форма линии ОДПР как функции магнитного

поля, примерно совпадает с формой линии циклотронного резонанса (рис.2). Из спектральной зависимости ОДЦР видно (рис.1), что циклотронная накачка приводит к значительному усилению линии (1,0) (до 5 раз) и уменьшению интенсивности линий (0,0) и (0,1), причем изменения в линиях (0,0) и (0,1) происходят, в основном, на фиолетовом краю. Особенно заметно это на спектрах с низкой мощностью накачки (около 20 мкВт), где сигнал ОДЦР полностью отсутствует на красном фронте этих линий. Следует заметить, что насыщение циклотронного резонанса не приводит к возгоранию линии (0,2) (рис.1б), хотя это самый нижний пустой уровень Ландау, на который при циклотронном резонансе непосредственно переходят электроны. С другой стороны, амплитуда сигнала ОДЦР для линий (0,0) и (0,1) пропорциональна их интенсивности, хотя эти уровни находятся на существенно разном расстоянии от уровня Ферми, и повышение электронной температуры в циклотронном резонансе должно по-разному влиять на их интенсивность. Это заставляет нас сделать вывод, что сигнал ОДЦР полностью обусловлен изменением числа электронов на уровне (1,0).

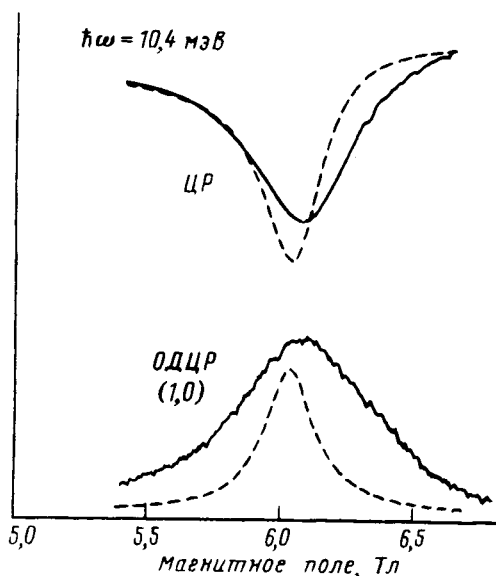


Рис.2. Спектры циклотронного резонанса и ОДЦР, записанные на линии (1,0) спектра люминесценции для СММ линии  $\hbar\omega = 10,4$  мэВ при мощности оптической накачки 2 мВт (пунктир) и 20 мкВт (сплошная линия)

Механизм возникновения сигнала ОДЦР выглядит следующим образом. Резонансное циклотронное излучение забрасывает электроны на незаселенный уровень (0,2) (или (0,1)), который находится выше уровня (1,0). Время жизни электронов на этом уровне очень мало (меньше  $10^{-9}$  с), поэтому заметной заселенности этого уровня создать не удастся. С верхнего уровня Ландау электроны релаксируют на нижние, часть их переходит на уровень (1,0) верхней подзоны. Время жизни на уровне (1,0) оказывается достаточно длинным, чтобы создать на нем заметную населенность. При этом, с одной стороны, увеличение числа электронов в верхней подзоне приводит к изменению распределения заряда в  $z$ -направлении, что меняет форму самосогласованного потенциала. Из-за этого понижаются уровни основной подзоны, и линии в спектре люминесценции смещаются в красную сторону. С другой стороны, из-за большой скорости рекомбинации электронов верхней подзоны

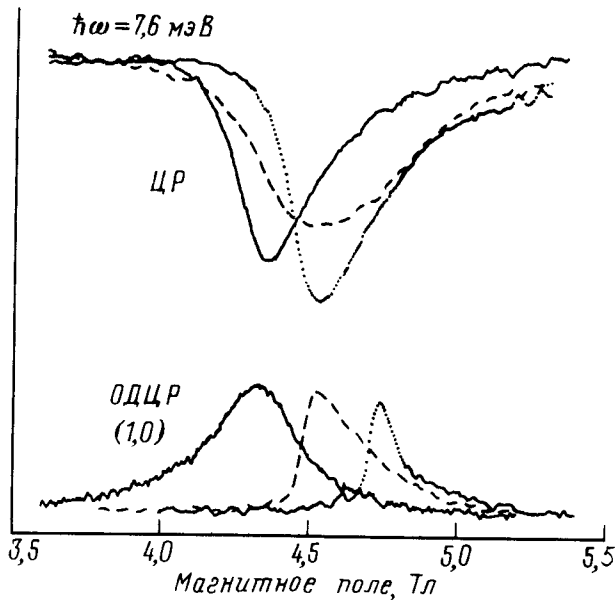


Рис.3. Спектры циклотронного резонанса и ОДЦР, записанные на линии (1,0) спектра люминесценции для СММ линии  $\hbar\omega = 7,6$  мэВ при мощности оптической накачки 2 мВт (сплошная линия), 20 мкВт (пунктир) и 8 мкВт ( $n_e = 4,7 \cdot 10^{11}$  см $^{-2}$ ) (точки)

возрастание ее заселенности уменьшает число дырок в  $\delta$ -слое, из-за чего снижается интенсивность линий (0,0) и (0,1).

В пользу этой интерпретации свидетельствует следующий факт. В спектрах ОДЦР для линии СММ излучения  $\hbar\omega = 7,6$  мэВ при мощности оптической накачки около 20 мкВт искажается форма линии: часть линии со стороны малых магнитных полей оказывается как бы "отрезанной" (рис.3). Возрастание сигнала ОДЦР, как показало изучение полевой зависимости спектров люминесценции, связано с пересечением уровней (0,2) и (1,0). Когда слабозаселенный уровень Ландау (0,2) находится ниже (1,0), переход неравновесных электронов с уровня (0,2) в верхнюю подзону невозможен, и сигнал ОДЦР отсутствует. После пересечения (0,2) и (1,0) появляется возможность перехода неравновесных электронов в верхнюю подзону, и возникает сигнал ОДЦР. Ширина перехода в спектрах ОДЦР соответствует температуре. Резкое возрастание сигнала ОДЦР приблизительно совпадает с резким спадом интенсивности линии (1,0) при пересечении уровней.

Предложенный механизм подразумевает, что уровень (1,0) является "бутылочным горлом" в процессе релаксации горячих электронов. Это подтверждают прямые измерения времени жизни электронов на уровне (1,0)<sup>4</sup>, которые показали, что оно превышает  $2 \cdot 10^{-8}$  с. Пока неясно, почему время жизни на уровне (1,0) оказывается таким длинным.

Авторы выражают благодарность К.Плогу, предоставившему образцы для эксперимента, В.Е.Кирпичеву, В.Б.Тимофееву и В.И.Фалько за полезные обсуждения.

1. Kukushkin I.V., K. von Klitzing, Ploog K., Timofeev V.B. Phys.Rev.B, 1989, 40, 7788.

2. Romenstein R., Weisbuch C. Phys. Rev. Lett., 1980, 45, 2067.

3. Kukushkin I.V., K. von Klitzing, Ploog K. et al. Phys. Rev. B, 1989, 40, 4179.

4. Дите А.Ф., Кукушкин И.В., К. фон Клитцинг, и др. Письма в ЖЭТФ, 1991, этот выпуск.