

## ПРОЯВЛЕНИЕ ЦИКЛОТРОННОЙ МОДЫ В СПЕКТРАХ ГОРЯЧЕЙ МАГНИТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И РАМАНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В ОДИНОЧНОМ ГЕТЕРОПЕРЕХОДЕ GaAs/AlGaAs

В.Е.Кирпичев, И.В.Кукушкин, Б.Н.Шепель, К.фон Клитцинг\*<sup>1)</sup>,  
К.Еберл\*<sup>1)</sup>

Институт физики твердого тела РАН  
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

\*Max-Planck-Institut für Festkörperforschung  
Stuttgart, FRG

Поступила в редакцию 30 октября 1995 г.

В одиночном гетеропереходе GaAs/AlGaAs обнаружена и исследована линия излучения, смещенная от лазерной линии на циклотронную энергию электронов. Показано, что наряду с рамановским сигналом от двумерных электронов в спектре доминирует схожая по свойствам линия рекомбинации горячих объемных электронов и тяжелых дырок, что следует из анализа магнитоосцилляций интенсивности этой линии.

1. Изучение свойств двумерных (2D) слоев заряда в различных полупроводниковых структурах уже длительное время привлекает внимание исследователей. Большое разнообразие фундаментальных эффектов в таких системах требует привлечения различных методик измерений. В последнее время значительно возросла активность в области исследования 2D систем посредством спектроскопии рамановского рассеяния света (PPC) [1]. Этим методом были измерены характерные энергии 2D систем – межподзонные расщепления, циклотронная энергия и энергия ротонного минимума в дисперсии магнитоплазмона, спиновое расщепление и щель в условиях дробного квантового эффекта Холла [1,2]. Для этих измерений использовались наиболее совершенные одиночные гетеропереходы (ОГ) или квантовые ямы GaAs/AlGaAs, а измерения PPC проводятся, как правило, в резонансных условиях, а именно, когда энергия фотона накачки  $E_L$  или рассеянного фотона  $E_S$  совпадают с энергией реального состояния. В таких условиях нетривиальным является вопрос о разделении сигналов резонансного PPC и горячей магнитолюминесценции (ГМЛ) фотовозбужденных носителей как из 2D-канала, так и из объема GaAs [3]. Систематическое изучение этого вопроса до сих пор не проводилось, а разделение сигналов осуществлялось, исходя из предположения, что спектральная позиция линий ГМЛ в фиксированном магнитном поле  $H$  также фиксирована и не зависит от  $E_L$ , а сигнал PPC отслеживает  $E_L$ . Как будет показано ниже, этот простой критерий не работает в случае высококачественных гетероструктур.

Данная работа посвящена экспериментальному разделению различных эффектов, происходящих в ОГ в условиях резонансного фотовозбуждения и приводящих к наличию в спектрах люминесценции совпадающих линий, а также исследованию ГМЛ фотовозбужденных носителей в GaAs.

2. Мы исследовали несколько ОГ GaAs/AlGaAs высокого качества (с подвижностью электронов  $2-3 \cdot 10^6$  см<sup>2</sup>/В·с при концентрации  $0.8-1.1 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>),

<sup>1)</sup>К. von Klitzing, K.Eberl

имеющих толщину AlGaAs спейсера и буферного слоя GaAs 60 нм и 2000 нм, соответственно. Фотовозбуждение осуществлялось перестраиваемым Ti/Sp-лазером в пределах 1530–1580 мэВ. Спектральным прибором служил двойной монохроматор Ramalog U-1000. Все измерения выполнены при температуре 4.2 К. Высокое качество образцов подтверждается очень малой шириной исследуемых линий (0.2 мэВ) и резонансов (0.05 мэВ).

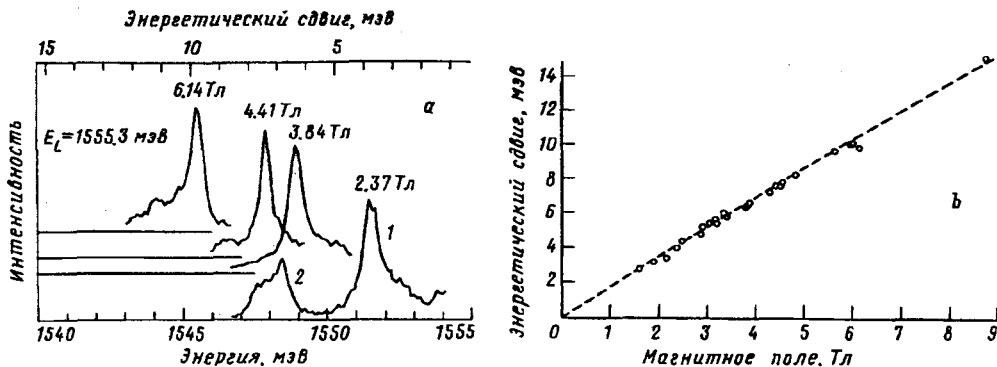


Рис.1. а – Спектры излучения, измеренные при различных значениях  $H$  и энергии кванта накачки  $E_L = 1555,3$  мэВ. б – Зависимость энергетического сдвига линии от магнитного поля. Штриховой линией показана аппроксимация, соответствующая измерениям электронного циклотронного резонанса в GaAs (см. текст)

3. На рис.1а приведена серия спектров, измеренных в различных магнитных полях (направление поля близко к нормали) при резонансном фотовозбуждении. Во всех спектрах присутствуют две линии – 1 и 2 (на рис.1а вторая линия для наглядности приведена только для  $H = 2.37$  Тл), отстоящие от лазера на энергию  $\delta$  и  $2\delta$ , соответственно. Энергия  $\delta$  определяется только величиной магнитного поля, и ее зависимость от  $H$  представлена на рис.1б. Штриховой линией показана аппроксимация зависимости циклотронной энергии электронов  $\hbar\omega_c$  от магнитного поля (с учетом непараболичности зоны проводимости), полученная в экспериментах по циклотронному резонансу  $\hbar\omega_c = 1.766H - 0.008H^2$  [4]. Видно, что наши экспериментальные данные хорошо согласуются с этой зависимостью, которая соответствует циклотронной массе электронов  $m_c = 0.066m_0$ .

На рис.2а приведена зависимость спектрального положения линии 1 от  $E_L$ , измеренная при  $H = 6.02$  Тл. Как видно из этого рисунка, спектральное положение исследуемой линии отслеживает энергию кванта накачки и всегда соответствует спектральному сдвигу на  $\hbar\omega_c$  от  $E_L$ . Отметим, что изменение  $E_L$  при фиксированном  $H$  сопровождается осцилляциями интенсивности линии 1, которые показаны на рис.2б. Свойства линии 1, показанные на рис.2, на первый взгляд указывают на ее рамановское происхождение, однако в общем случае можно обсуждать три альтернативных возможности объяснения природы этой линии: а) РРС на электронах 2D-канала, б) РРС на фотовозбужденных электронах в объеме GaAs, в) ГМЛ фотовозбужденных носителей. Для выбора между 2D и 3D природой эффекта мы применили стандартный тест – изменение угла наклона  $H$  к интерфейсу. При этом  $\hbar\omega_c$  2D электронов должна отслеживать перпендикулярную к интерфейсу компоненту  $H$ . Одна-

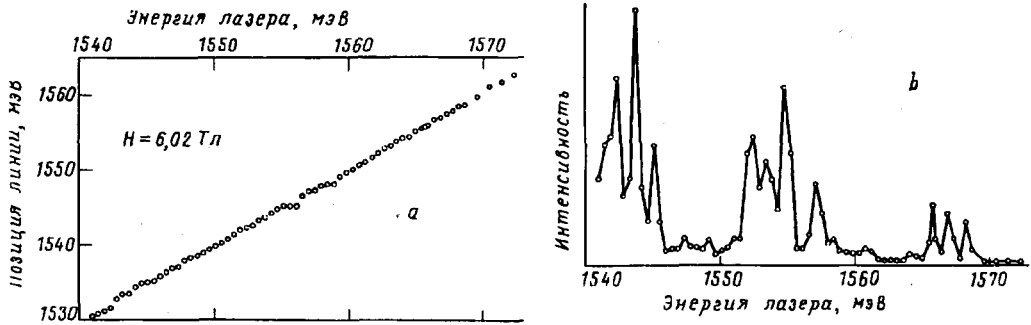


Рис.2. Зависимость спектрального положения линии (а) и ее интенсивности (б) от  $E_L$  при  $H = 6,02$  Тл

ко нами было обнаружено, что свойства доминирующей линии и величина  $\delta$  практически не изменяются при всех значениях угла. Кроме того, мы обнаружили также значительно более слабую линию, положение которой зависело от угла, и которая была интерпретирована нами как РРС на 2D-электронах. Исследованию ее свойств будет посвящена отдельная работа. Возвращаясь к исследуемой в этой работе линии 1, можно сделать вывод об ее 3D-природе. Выбирая между упомянутыми выше вариантами б) и в), можно сказать, что в случае РРС на фотовозбужденных носителях следует ожидать квадратичной зависимости интенсивности линии от интенсивности накачки, так как плотность фотовозбужденных носителей пропорциональна мощности лазера. Поскольку в эксперименте была обнаружена линейная зависимость интенсивности линии от мощности фотовозбуждения, то можно однозначно идентифицировать исследуемый эффект как ГМЛ фотовозбужденных носителей в объеме GaAs. Отметим, что обнаруженные свойства линии 1 полностью отвечают характерным признакам РРС, создавая иллюзию того, что наблюдается резонансное РРС. Чтобы подчеркнуть главное отличие обнаруженной нами ГМЛ от исследовавшейся ранее (спектральное положение которой не зависело от  $E_L$ ), мы будем называть ее раманоподобной ГМЛ (РПГМЛ). Линии, отстоящие от линии лазера на  $\delta$  и  $2\delta$ , соответствуют рекомбинации фотовозбужденных дырок с электронами, средаксировавшими в процессе остывания на ближайший и следующий за ним уровни Ландау. Возможность наблюдать подобную "лесенку" линий в спектре ГМЛ свидетельствует о высоком качестве использовавшихся образцов, приводящем, как следствие, к достаточно длинным временам энергетической релаксации фотовозбужденных носителей. Полученное из эксперимента значение  $\tau_c$ , совпадающее с величиной  $\tau_c$  электронов в объеме GaAs, указывает на то, что мы исследуем ГМЛ, связанную с энергетической релаксацией горячего электрона, тогда как время релаксации дырки оказывается значительно длиннее, и дырка рекомбинирует из того же состояния, в котором была рождена. Отметим, что один из оптических переходов (либо поглощение, либо рекомбинация) является дипольно-запрещенным ( $\Delta n = N_e - N_h \neq 0, -2$ ), так как изменение квантового номера у электрона  $N_e$  в процессе релаксации не сопровождается соответствующим изменением номера у дырки  $N_h$  [3].

Для изучения энергетической структуры уровней, с которыми связана РПГМЛ, можно исследовать зависимости типа показанных на рис.2б - ска-

нирование  $E_L$  при  $H = \text{const}$ . Однако нами была применена другая методика – при фиксированной  $E_L$  одновременно разворачивались  $H$  и монохроматор так, что спектральная позиция щели монохроматора всегда была сдвинута на величину  $\Delta = \hbar\omega_c$  от  $E_L$  в сторону меньших энергий, при этом измерялась зависимость интенсивности линии от  $H$ .

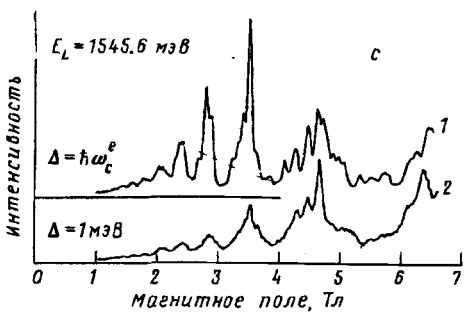
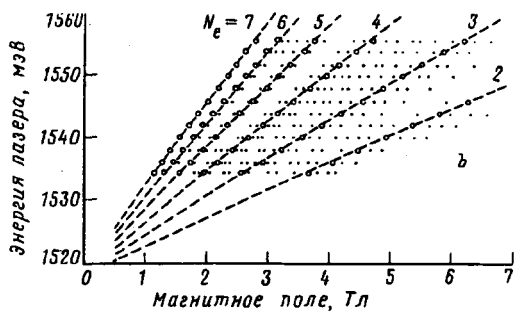
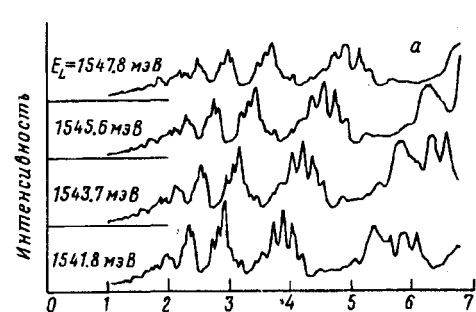


Рис.3. а – Зависимость интенсивности линии РПГМЛ от магнитного поля для различных значений  $E_L$ . б – Веер уровней Ландау резонансного фотовозбуждения, полученный из магнитоосцилляций интенсивности линии РПГМЛ. Символы большего размера, через которые проведены штриховые линии, отвечают наиболее интенсивным резонансам РПГМЛ. в – Магнитоосцилляции интенсивности: 1 – линии РПГМЛ (позиция спектрометра сдвинута на  $\Delta = \hbar\omega_c^e$  от  $E_L$ ), 2 – линии ГМЛ ( $\Delta = 1$  мэВ);  $E_L = 1545.6$  мэВ

На рис.3а показаны осцилляции интенсивности линии РПГМЛ в параллельном магнитном поле, измеренные описанным способом, при различных значениях  $E_L$ . Эти осцилляции имеют довольно сложную форму, однако, если менять  $E_L$  достаточно частыми шагами, то можно проследить генезис каждого максимума и однозначно определять его при всех  $E_L$ . После обработки серии таких осцилляций при различных  $E_L$  был получен веер уровней Ландау, приведенный на рис.3б. Линии на веере проведены для наиболее интенсивных резонансов, а цифра возле каждой линии соответствует номеру уровня Ландау электронов. Из аппроксимации положения основных максимумов можно получить, что расщепление между соседними уровнями соответствует приведенной циклотронной массе электрона и тяжелой дырки. Наличие в осцилляциях большого числа пиков объясняется сильным перемешиванием волновых функций тяжелых дырок, что дает возможность наблюдать запрещенные переходы электронов и тяжелых дырок (с  $\Delta n \neq 0, -2$ ). Для легких дырок упоминавшееся перемешивание значительно слабее вследствие большего энергетического расщепления их уровней, что приводит к значительно более сильному запрету на переходы с  $\Delta n \neq 0, -2$ . Поэтому такие переходы в исследовавшихся осцилляциях не проявляются. Участие в процессе рекомбинации тяжелой дырки

объясняет квазирамановское поведение линии РПГМЛ, всегда отстоящей на  $\hbar\omega_c$  от лазера: – меняя  $E_L$ , мы последовательно перемещаемся по различным резонансам в поглощении, связанным с разными магнитными уровнями тяжелой дырки, расщепление между которыми мало.

Для сравнения наших результатов с результатами предыдущих исследований ГМЛ мы применили также методику измерения осцилляций, описанную в работе [5]. А именно – при фиксированной  $E_L$  была также фиксирована позиция щели монохроматора на расстоянии  $\Delta$  от лазера и разворачивалось  $H$ . Величина  $\Delta$  была выбрана достаточно малой – 1 мэВ. Такая методика, в отличие от применявшейся нами, позволяет наблюдать рекомбинацию носителей с тех же уровней, на которых они были рождены, и поэтому чувствительна к дипольно-разрешенным переходам – наиболее интенсивные пики соответствуют рождению и рекомбинации электронов и дырок с  $\Delta n = 0, -2$ . Применение такой методики позволило авторам работы [5] измерить массу и  $g$ -фактор легких дырок, которые полностью были воспроизведены в наших образцах. Дополнительно нами было обнаружено, что в случае, когда  $H$  направлено перпендикулярно к интерфейсу, в осцилляциях доминируют переходы с участием легких дырок, которые при наклоне  $H$  начинают ослабевать (предположительно, из-за влияния параллельной компоненты магнитного поля на релаксацию легких дырок, находящихся вблизи интерфейса), и в случае  $H$ , направленного вдоль интерфейса, доминируют переходы с участием тяжелых дырок. Это дает нам возможность в одном образце самосогласованно измерить массы электронов, тяжелых и легких дырок, а также анизотропию этих масс и вклад от непараболичности зон и определить все параметры зонной структуры GaAs, этому будет посвящена отдельная работа.

На рис.3с сравниваются осцилляции, полученные двумя альтернативными методиками, для случая, когда позиция  $E_L$  для методики 1 совпадает с позицией щели монохроматора для методики 2. Можно видеть, что позиции основных резонансов совпадают, а дипольно-запрещенные переходы сильнее проявляются для осцилляций типа 1.

В данной работе были экспериментально отделены друг от друга каналы резонансного РРС и ГМЛ, а также был исследован новый тип магнитооптических осцилляций – осцилляций интенсивности рекомбинации горячих электронов и тяжелых дырок в объеме GaAs, что дает инструмент для определения параметров, описывающих структуру валентной зоны GaAs.

Работа была выполнена при поддержке программы "Физика твердотельных наноструктур" (проект 1-062/3) и фонда Фольксвагена.

- 
1. A.Pinczuk, *Festkorperprobleme* **32**, 45 (1992).
  2. A.Pinczuk, B.S.Denis, L.N.Pfeiffer, and K.W.West, *Semicond. Sci. Technol.* **9**, 1865 (1994).
  3. M.Cardona, *Light Scattering in Solids*, Springer-Verlag (1975).
  4. H.Sigg, J.Perenboom, P.Pfeffer, and W.Zawadzki, *Solid State Comm.* **61**, 685 (1987).
  5. S.I.Gubarev, T.Ruf, M.Cardona, and K.Ploog, *Phys. Rev.* **B48**, 1647 (1993).