

## ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНС НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В НАПРЯЖЕННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ $Ge/Ge_{1-x}Si_x$

*В.И.Гавриленко, И.Н.Козлов, О.А.Кузнецов, М.Д.Молдавская,  
В.В.Никоноров, Л.К.Орлов, А.Л.Чернов\**

*Институт физики микроструктур РАН  
603600 Нижний Новгород, Россия*

*\*Научно-исследовательский физико-технический институт при ННГУ  
603003, Нижний Новгород, Россия*

Поступила в редакцию 17 января 1994 г.

Впервые исследован циклотронный резонанс фотоносителей в напряженной многослойной нелегированной гетероструктуре  $Ge/Ge_{1-x}Si_x$ . В спектрах поглощения и миллиметровой фотопроводимости наблюдалась линия ЦР носителей с эффективной массой  $m_c \approx 0,07m_0$ , соответствующей поперечной массе дырок на дне деформированных квантовых ям в слоях Ge. Обнаружена остаточная фотопроводимость, обусловленная дырками, сохраняющимися в слоях Ge после выключения межзонной подсветки.

В работах [1,2] сообщалось о получении газовым гидридным методом селективно легированных многослойных гетероструктур (ГС)  $Ge/Ge_{1-x}Si_x:B$  с квантовыми ямами в слоях Ge и о наблюдении в них целочисленного квантового эффекта Холла. Существенной особенностью этих ГС является упругая деформация, обусловленная рассогласованием параметров решетки Ge и  $Ge_{1-x}Si_x$ , в результате чего слои Ge оказываются сжатыми в плоскости ГС. Такая деформация может быть представлена как результат всестороннего сжатия и одноосного растяжения Ge вдоль оси ГС ( $P \parallel [111]$ ). Одноосная деформация, изменяя симметрию кристаллической решетки, приводит к расщеплению края валентной зоны, а также снимает междолинное вырождение в зоне проводимости [3]. Исследования селективно легированных ГС р-типа в сильных магнитных полях показали, что эффективная масса дырок, определяемая из температурной зависимости амплитуды осцилляций Шубникова - де Гааза ( $m^* \approx (0,10 \div 0,14)m_0$ ), зависит от концентрации носителей и оказывается заметно больше величины поперечной (в плоскости слоя) массы дырок в одноосно растянутом Ge ( $m_1^* \approx 0,053m_0$ ) [4]. Несомненный интерес в этой связи представляет прямое определение эффективной массы носителей в слоях Ge напряженных квантовых ГС методом циклотронного резонанса (ЦР).

В работе исследовался ЦР носителей в нелегированных многослойных ГС  $Ge/Ge_{1-x}Si_x$  ( $x \approx 0,13$ ), выращенных на подложке монокристаллического Ge:Sb (111) марки ГЭС-45 ( $\rho_{300K} \approx 45 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) толщиной 0,3 мм. ГС состояла из 243 периодов  $Ge/Ge_{1-x}Si_x$  по 500 Å, а ширина квантовых ям (слои Ge) была около 180 Å. Величина упругой деформации определялась рентгено-дифракционным методом и соответствовала одноосному растяжению слоев Ge вдоль оси ГС усилием  $P \approx 6,0$  кбар. Исследования ЦР проводились в двухмиллиметровом диапазоне длин волн; в качестве источника излучения использовался генератор сигналов Г4-161 на основе лампы обратной волны. Излучение генератора по квазиоптическому тракту заводилось в криомагнитную вставку в транспортный гелиевый дьюар СТГ-40, в которой в центре сверхпроводящего соленоида

излучение детектировалось фотосопротивлением из  $n$ -InSb, расположенным вне сверхпроводящего соленоида. Для возбуждения неравновесных носителей использовалась межзонная подсветка излучением арсенид-галлиевого светодиода АЛ319А ( $\lambda \approx 0,9$  мкм), вмонтированного в стенку квазиоптического тракта непосредственно над образцом. Излучение светодиода модулировалось с частотой 1 кГц; для регистрации сигнала поглощения миллиметрового излучения фотоносителями использовалась стандартная схема синхронного детектирования. ЦР носителей заряда исследовался также методом миллиметровой фотопроводимости. В этом случае приемником излучения являлась сама ГС, на поверхность которой наносились два омических контакта. Использовалась та же схема синхронного детектирования, но в отличие от опытов по поглощению светодиод запитывался постоянным током, а осуществлялась модуляция излучения генератора Г4-161.

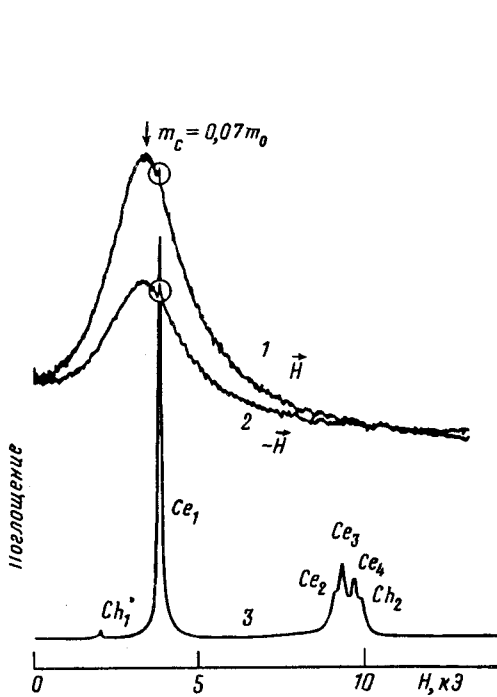


Рис.1

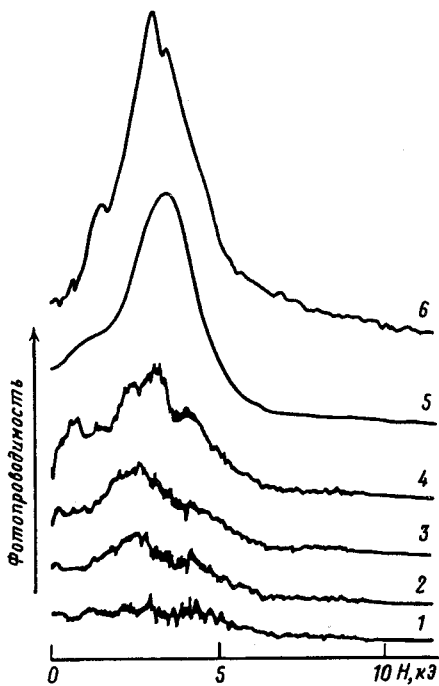


Рис.2

Рис.1. ЦР фотоносителей в многослойной ГС  $Ge/Ge_{0,87}Si_{0,13}$  (1 -  $H||[111]$ , 2 -  $H||\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ ) и в подложке ГЭС-45 (3);  $\lambda = 2,3$  мм,  $T = 4,2$  К

Рис.2 Спектры миллиметровой фотопроводимости в многослойной ГС  $Ge/Ge_{0,87}Si_{0,13}$  ( $\lambda = 2,3$  мм,  $T = 4,2$  К,  $H||[111]$ ): записи 1÷4 сделаны последовательно в течение нескольких минут после охлаждения образца до гелиевой температуры; запись 5 сделана при межзонной подсветке, запись 6 сделана после выключения подсветки

На рис.1 представлен спектр ЦР носителей в образце, полученный при модуляции межзонной подсветки. Записи 1 и 2 сделаны при противоположных направлениях магнитного поля; наблюдаемые существенные изменения величины сигнала для этих двух случаев свидетельствуют о том, что поляризация электрического поля миллиметрового излучения в образце была

эллиптической<sup>1)</sup>. В спектре доминирует широкая линия поглощения с максимумом при  $H \simeq 3,5 \text{ кЭ}$ , на фоне которой виден небольшой узкий пик при  $H \simeq 3,9 \text{ кЭ}$ . Положение узкого пика совпадает с положением электронной линии  $Ce_1$  ( $m_c = 0,082m_0$ ) в спектре ЦР в монокристаллическом Ge (запись 3 на рис.1), полученном на том же самом образце, повернутом на  $180^\circ$  подложкой вверх. Таким образом, узкий пик в спектрах 1 и 2 на рис.1 обусловлен ЦР электронов в Ge в долине, расположенной в направлении магнитного поля (111). Его ширина соответствует частоте релаксации импульса  $\nu \simeq 10^{10} \text{ с}^{-1}$ , которая характерна для рассеяния фотоносителей на акустических фоновых и нейтральных примесях в умеренно легированном Ge. Поэтому естественно предположить, что наблюдаемый узкий пик обусловлен ЦР электронов в подложке Ge, где они генерируются излучением светодиода, сильно ослабленным при прохождении через ГС.

Как видно из рис.1, интенсивность широкой линии поглощения с максимумом при  $H \simeq 3,5 \text{ кЭ}$  выше для направления магнитного поля, соответствующего записи 1, в то время, как амплитуда узкого пика больше при противоположном направлении H (запись 2). Поскольку эти измерения выполнены при эллиптической поляризации миллиметрового излучения, которая во втором случае, очевидно, более близка к круговой поляризации "электронного" направления ("резонансной" для линии  $Ce_1$ ), а в первом случае - к круговой поляризации "дырочного" направления, можно сделать вывод, что широкая линия поглощения обусловлена ЦР носителей с положительным зарядом, то есть дырками. Положение линии соответствует величине эффективной массы  $m_c^* \simeq (0,07 \div 0,075)m_0$ , что значительно отличается как от массы легких ( $m_{1h} \simeq 0,042m_0$ ), так и от массы тяжелых ( $m_{1h} \simeq 0,39m_0$ ) дырок в недеформированном Ge. Ширина этой линии соответствует частоте релаксации  $\nu \simeq 3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$  ( $\mu \simeq 10^5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ )<sup>2)</sup> и, как видно из рис.1, заметно превосходит характерные ширины линий в монокристаллическом Ge. Все это вместе взятое позволяет заключить, что обнаруженная линия поглощения обусловлена ЦР дырок в ГС Ge/Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub>.

Рис.2 иллюстрирует наблюдение линии ЦР дырок в ГС в спектрах миллиметровой фотопроводимости. Поглощение миллиметрового излучения приводило к росту статической проводимости образца, по-видимому, вследствие уменьшения частоты столкновений при разогреве свободных носителей. В работе было обнаружено, что линия ЦР дырок, возникающая в спектрах фотопроводимости при межзонной подсветке, сохранялась после ее выключения в течение нескольких часов вплоть до отогрева образца; более того она возникала в течение нескольких десятков минут после охлаждения образца и без включения межзонной подсветки, по-видимому, вследствие генерации носителей фоновым излучением от теплой части криостата. Обнаруженная остаточная фотопроводимость свидетельствует о пространственном разделении дырок и электронов в ГС; последние по-видимому захватываются на какие-то ловушки, что также объясняет отсутствие электронных линий в спектрах ЦР.

<sup>1)</sup> В данном эксперименте поляризация электромагнитного излучения не контролировалась и формировалась случайным образом вследствие переотражений в квазиоптическом тракте.

<sup>2)</sup> Эту величину следует рассматривать как оценку сверху, поскольку ширина наблюдаемой линии поглощения может быть обусловлена также дисперсией циклотронных частот дырок. Для выяснения вклада различных факторов в уширение линии ЦР необходимо провести эти измерения в широком интервале частот.

При одноосном растяжении Ge величина расщепления подзон в точке  $k=0$  составляет около 4 мэВ/кбар, поэтому в исследуемом образце ( $P \simeq 6,0$  кбар) при гелиевой температуре дырки населяют лишь нижнюю подзону (соответствующую подзоне тяжелых дырок в недеформированном Ge). На дне зоны эффективная масса в плоскости слоев  $m_{\parallel} \simeq 0,053m_0$  оказывается много меньше массы в направлении оси роста ГС  $m_{\perp} \simeq 0,49m_0$ <sup>3)</sup> Для оценки влияния размерного квантования на энергетический спектр дырок в плоскости ГС можно подставить в закон дисперсии для одноосно растянутого объемного Ge величину поперечного импульса, полученную из принципа неопределенности:  $p_{\perp} \simeq \hbar/a$ , где  $a$  – ширина квантовой ямы. Полученное значение поперечной массы на дне первой подзоны размерного квантования  $m_{\perp} \simeq 0,08m_0$  удовлетворительно согласуется с величиной, определенной из положения линии ЦР. Исследования зависимости положения наблюдаемой линии ЦР в ГС от угла наклона магнитного поля  $\theta$  к плоскости ГС выявили прямую пропорциональность  $H_{res}$  и  $(\cos\theta)^{-1}$ , что однако не может рассматриваться как прямое доказательство двумерности дырочного газа, так как вследствие большого отношения  $m_{\parallel}/m_{\perp} \simeq 9$  близкая зависимость должна наблюдаться и в объемном одноосно растянутом Ge. Первые предварительные исследования ЦР горячих дырок в ГС показывают, что разогрев носителей электрическим полем приводит к дальнейшему росту эффективной массы вплоть до  $m_c \simeq 0,1m_0$ , что обусловлено сильной непараболичностью закона дисперсии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 93-02-14720).

- 
1. Л.К.Орлов, О.А.Кузнецов, Р.А.Рубцова и др., ЖЭТФ **98**, 1028 (1990).
  2. О.А.Кузнецов, Л.К.Орлов, Р.А.Рубцова и др., Письма в ЖЭТФ, **54**, 351 (1991).
  3. Г.Л.Бир, Г.Е.Пикус. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М.: Наука, 1972.
  4. Ю.Г.Арапов, Н.А.Городилов, О.А.Кузнецов и др., ФТП (в печати).

---

<sup>3)</sup>Линия ЦР дырок с эффективной массой  $m_c \simeq 0,053m_0$  наблюдалась нами в сравнительно толстом ( $d \simeq 700 \text{ \AA}$ ) напряженном эпитаксиальном слое Ge, выращенном на буфере из твердого раствора  $\text{Ge}_{0,9}\text{Si}_{0,1}$  толщиной 1,4 мкм.