

ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНС В СВЕРХРЕШЕТКАХ $(\text{GaAs})_n (\text{InAs})_m$

О. А. Шегай, Н. Т. Мошегов, А. М. Палкин, А. И. Торпов

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия
(Получено 11.03.1992. Принято к печати 26.03.1992)

В недавних работах [1–3] исследовался циклотронный резонанс (ЦР) свободных носителей заряда в сверхрешетках (СР) GaAs/AlGaAs с туннельно-прозрачными барьерами. Теоретические представления в рамках модели Кронига—Пенни в присутствии сильного магнитного поля ($l \approx d$, где l — магнитная длина, d — период СР), лежащего в плоскости слоев СР («вертикальный транспорт») [4], позволили объяснить наблюдаемое расщепление полосы поглощения, соответствующей ЦР, переходами между орбитами, центрированными в слоях GaAs и в барьерах AlGaAs [3]. В настоящей работе приводятся результаты исследования ЦР в напряженных СР $(\text{GaAs})_n (\text{InAs})_m$ с тонкими слоями InAs.

Нами исследовались СР $(\text{GaAs})_n (\text{InAs})_m$, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на полуизолирующих подложках GaAs ориентации (001) с различными периодами: при $m = 2$, $n = 6, 8, 23, 40$, и при $m = 1$, $n = 6$, где m и n — число монослоев. Количество периодов в СР варьировалось от образца к образцу и составляло 30–40. Как известно, рассогласование параметров решеток компонент СР GaAs ($a_0 = 5.65 \text{ \AA}$) и InAs ($a_0 = 6.04 \text{ \AA}$) велико ($\approx 7\%$), и это приводит к ограничению возможных толщин InAs и GaAs. Выращенные структуры исследовались методами рентгеновской дифракции и электронной микроскопии, результаты исследований подтверждают наличие дополнительной периодичности и свидетельствуют о резкости гетерограниц. Полученные СР ранее исследовались методом комбинационного рассеяния света [5] и фотолюминесценции [6].

Измерения проводились на установке субмиллиметровой (СММ) лазерной магнитоспектроскопии [7], состоящей из СММ лазера, оптически накачиваемого излучением CO_2 -лазера, и оптического криостата со сверхпроводящим соленоидом до 7.5 Т. Спектры фотопроводимости регистрировались в процессе сканирования по магнитному полю при фиксированной длине волны СММ лазера. Измерения проводились в геометрии Фойгта, когда магнитное поле направлено вдоль слоев СР, а свет — по нормали к образцу. Сигнал снимался с омических контактов, полученных вжиганием In по методике, обычной для объемного GaAs. Так как СР не подвергались преднамеренному легированию, для создания электронов в зоне проводимости при низких температурах ($T = 4.2 \text{ К}$) использовалась немодулированная межзонная подсветка.

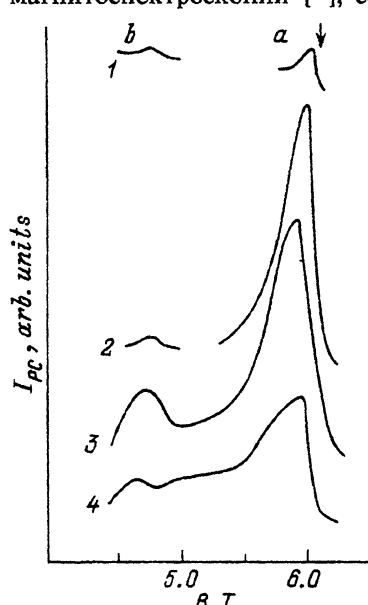


Рис. 1. Спектры фотопроводимости в СР $(\text{GaAs})_n (\text{InAs})_m$ с различными периодами. Геометрия Фойгта. $m = 2$; n : 1 — 40, 2 — 23, 3 — 8, 4 — 6. Стрелкой обозначено положение пика ЦР в объемном GaAs. $\lambda = 118.8 \text{ мкм}$; $T = 4.2 \text{ К}$.

На рис. 1 показаны спектры фотоотклика при $\lambda = 118.8$ мкм, полученные для СР $(\text{GaAs})_n (\text{InAs})_m$ с толщиной InAs $m = 2$ и различными n (т. е. с различными периодами). Видно, что в спектре каждой СР в области ЦР наблюдается пик a , положение которого отличается от характерного для ЦР в объемном GaAs и показанного на рисунке стрелкой. Форма и положение линии a различаются для образцов с различными периодами. С уменьшением периода СР пик несколько смещается в область меньших магнитных полей, ширина линии возрастает и линия становится асимметричной. В поле, приблизительно на 1 T меньшем относительно пика a , наблюдается пик b , с меньшей интенсивностью, не связанный с особенностями примесного спектра в объемных кристаллах GaAs (см., например, [8]) и InAs [9].

В идеальных СР $(\text{GaAs})_n (\text{InAs})_m$, выращенных на подложках GaAs, деформации должны быть сконцентрированы в псевдоморфных слоях InAs (сжатие на уровне 7%), в то время как слои GaAs не деформированы. С учетом дислокаций несоответствия остаточная деформация в слоях GaAs (деформация растяжения) мала и составляет $\approx 0.2\%$ [5]. Однако резонанс b невозможно объяснить просто сдвигом ЦР, свойственного объемному InAs [9], за счет деформации сжатия, присутствующей в слоях InAs.

Наблюдаемые резонансы обусловлены различием энергии перехода между уровнями Ландау для орбит, центрированных в середине слоя GaAs и на его краю. Действительно, если в СР GaAs/AlGaAs в магнитном поле, лежащем в плоскости слоев, когда магнитная длина сравнима с периодом СР, переходы для орбит, центрированных в барьерах, смещаются в область меньших энергий [2] относительно переходов для орбит, центрированных в слое GaAs (вызывающих в свою очередь незначительное смещение в спектре по сравнению с объемом GaAs), то для СР $(\text{GaAs})_n (\text{InAs})_m$ — картина обратная. Резонансам a соответствуют переходы между нулевым и первым уровнями Ландау для орбит, центрированных в слоях GaAs, а резонансам b — аналогичные переходы для орбит, центрированных в слоях InAs, что находится в качественном согласии с расчетами работы [4] для СР GaAs/AlGaAs с предельно широкими барьерами и узкими ямами. С уменьшением периода СР на магнитной длине укладывается большее число периодов СР, что приводит к большему рассеянию на несовершенствах, присутствующих в слоях InAs, и это проявляется в уширении линии ЦР. Асимметрия формы линии пика a отражает энергетическое изменение расстояния между уровнями Ландау для орбит, отклоняющихся относительно центра слоя GaAs.

На рис. 2. показан спектр ЦР для СР $(\text{GaAs})_n (\text{InAs})_m$ с $n = 6$ и $m = 1$. Из рисунка видно, что спектр ЦР качественным образом изменяется по сравнению с изображенным на рис. 1. Ширина линии существенно уменьшается, и наблюдается дублетная структура, которая не может быть объяснена спиновым дублетом [10] в силу большей величины расщепления. Эти особенности мы также объясняем наличием двух типов орбит, так как уменьшение толщины ямы приводит к более «плоским» уровням Ландау [4], т. е. к уменьшению энергетического зазора между орбитами двух типов. Сужение линии ЦР можно объяснить большей «прозрачностью» более тонких ям InAs в этой СР по сравнению со СР, показанными на рис. 1.

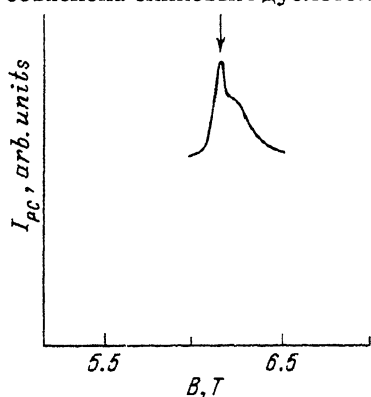


Рис. 2. Спектр фотопроводимости в СР $(\text{GaAs})_n (\text{InAs})_m$ с $m = 1$, $n = 6$ (геометрия Фойгта). Стрелкой обозначено положение пика ЦР в объемном GaAs. $\lambda = 118.8$ мкм, $T = 4.2 \text{ K}$.

Для количественного описания полученных результатов необходим расчет энергетического спектра.

Таким образом, в спектре циклотронного резонанса CP $(GaAs)_n$ $(InAs)_m$ обнаружены резонансы, связанные с различием энергий перехода между уровнями Ландау для орбит, центрированных в середине и на краях слоев $GaAs$.

Авторы благодарны А. В. Ефанову и М. В. Энтину за полезные обсуждения результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] T. Duffield, R. Bhat, M. Koza, F. DeRosa, D. M. Hwang, P. Grabber, S. J. Allen. Phys. Rev. Lett., **56**, 2724 (1986).
- [2] T. Duffield, R. Bhat, M. Koza, F. DeRosa, K. M. Rush, S. J. Allen. Phys. Rev. Lett., **59**, 2693 (1987).
- [3] T. Duffield, R. Bhat, M. Koza, D. M. Hwang, F. DeRosa, D. M. Hwang, P. Grabber, S. J. Allen. Sol. St. Commun., **65**, 1483 (1988).
- [4] J. C. Maan Phys. Appl. Quant. Wells Superlatt.: NATO AST Series. Ser. B. Physics, **170**, 347. N. Y. (1987).
- [5] В. А. Гайслер, А. О. Говоров, Т. В. Курочкина, Н. Т. Мошегов, С. И. Стенин, А. И. Торопов, А. П. Шебанин. ЖЭТФ, **98**, 1081 (1990).
- [6] А. В. Браславец, К. С. Журавлев, Н. Т. Мошегов, А. И. Торопов, С. И. Стенин. Письма ЖЭТФ, **53**, 96 (1991).
- [7] И. Г. Неизвестный, И. К. Олзоев, А. М. Палкин, О. А. Шегай. ФТТ, **29**, 570 (1987).
- [8] S. Holmes, C. C. Phillips, R. A. Stradling, Z. Wasilewski, R. Droopad, S. D. Parker, W. T. Yuen, P. Balk, A. Brauers, H. Heinecke, C. Plass, M. Weyers, C. T. Foxon, B. A. Joyce, G. W. Smith, C. R. Whitehouse. Semicond. Sci. Techn., **4**, 782 (1989).
- [9] И. Г. Неизвестный, А. М. Палкин, Н. Т. Мошегов, С. И. Стенин, А. И. Торопов, О. А. Шегай. В кн.: Тр. XI Всес. конф. по физике полупроводников, т. 2, 226. Кишинев (1988).
- [10] В. Г. Голубев, В. И. Иванов-Омский, И. Г. Минервин, А. В. Осутин, Д. Г. Поляков. ЖЭТФ, **88**, 2052 (1985).

Редактор Л. В. Шаронова

ФТП, том 26, вып. 11, 1992

СПЕКТР СОСТОЯНИЙ МЕЛКОГО ДОНОРА В СВЕРХРЕШЕТКАХ $(GaAs)_n$ $(InAs)_m$

О. А. Шегай, Н. Т. Мошегов, А. М. Палкин, А. И. Торопов

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия
(Получено 27.03.1992. Принято к печати 10.04.1992)

В работе [1] было показано, что при однородном распределении фоновых примесей по объему полупроводника энергия основного состояния мелкого донора в квантовой яме зависит от геометрического положения примеси. Для примесей, расположенных в центре ямы, волновая функция основного состояния зануляется на барьерах бесконечной высоты, что приводит к ее сжатию вблизи примесного остова и, следовательно, к заглублению основного состояния по сравнению с объемным случаем. Соответственно для примесей, расположенных на краях ямы, энергия связи меньше, чем в объеме. В спектре примесного перехода должно наблюдаться расщепление из-за вкладов примесей, локализованных в центре ямы и на краях [2]. Это различие наблюдалось в экспериментах по модулированному легированию различных участков квантовой ямы [3, 4]. В случае сверхрешеток (CP) энергия залегания примеси становится периодической функцией