

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. Шерай. 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. Шерай. 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

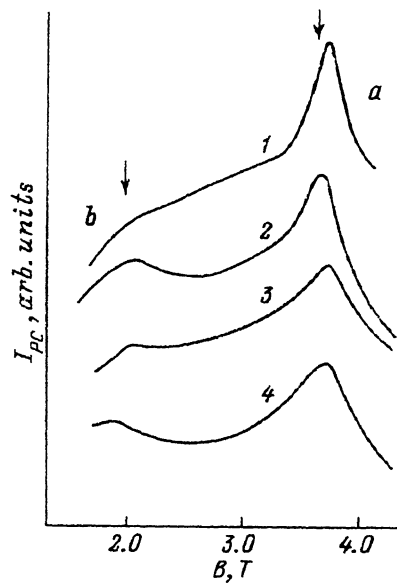
СПЕКТР СОСТОЯНИЙ МЕЛКОГО ДОНОРА В СВЕРХРЕШЕТКАХ $(GaAs)_n$ $(InAs)_m$

О. А. Шерай, 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

Рис. 1. Спектры фотопроводимости I_{PC} в области примесного перехода $1s \rightarrow 2p_+$ в СР $(\text{GaAs})_n(\text{InAs})_m$, $m=2$, n : 1 — 40, 2 — 23, 3 — 8, 4 — 6; геометрия Фарадея, $\lambda = 118.8$ мкм, $T = 4.2$ К.



ее пространственного положения вдоль оси СР. В спектре примесного перехода в СР $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ [5] с туннельно-прозрачными барьерами наблюдалось неоднородное уширение основного перехода, которое авторы связывают с вкладом примесей, расположенных в яме и в барьерах.

В предыдущей работе [6] нами исследовался циклотронный резонанс в СР $(\text{GaAs})_n(\text{InAs})_m$ (n , m — число монослоев), в ней содержится более подробное описание выращенных структур и методики измерения. В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты по исследованию примесного спектра остаточных доноров в этих СР.

Эксперимент был выполнен на установке субмиллиметровой (СММ) лазерной магнитоспектроскопии [7]. Спектр записывался при сканировании по магнитному полю в геометрии Фойгта (магнитное поле лежит в плоскости слоев СР, излучение СММ лазера направлено по нормали к образцу) и геометрии Фарадея (магнитное поле — вдоль оси СР, излучение СММ лазера — по нормали к образцу).

На рис. 1 показан спектр фотопроводимости (ФП) СР в геометрии Фарадея, соответствующий переходам между состояниями $1s \rightarrow 2p_+$ мелкого донора, для различных толщин слоев GaAs при толщине InAs $m=2$. Из рисунка видно, что положение резонанса a в СР отличается от характерного для объемного GaAs (показанного стрелкой), а ширина пика с уменьшением периода СР увеличивается. В поле, меньшем приблизительно на 1.7 Т, наблюдается пик b меньшей интенсивности, не относящийся к спектру с участием вышележащих возбужденных состояний в объемном GaAs [8] и близкий к примесному переходу $1s \rightarrow 2p_+$ в объемном InAs (обозначенному стрелкой) [9].

В магнитном поле ≈ 3.7 Т, при котором наблюдается резонанс a , магнитная длина l составляет ≈ 130 Å, а боровский радиус основного состояния мелкого донора в GaAs — ≈ 100 Å, поэтому реализуется ситуация, когда на длине боровского радиуса укладывается один ($n=40$) или несколько (меньшие n) периодов СР. Известно, что концентрация остаточных примесей в пленках InAs примерно на порядок выше, чем в GaAs . Поэтому при увеличении числа слоев InAs на длине боровского радиуса происходит более эффективное рассеяние на примесях, что проявляется в уширении примесного резонансного пика a на рис. 1. Смещение резонанса a в область больших магнитных полей относительно резонанса, связанного с переходами $1s \rightarrow 2p_+$ в объемном GaAs , соответствует уменьшению энергии основного состояния примеси в барьерах GaAs [5].

Резонансный максимум b , гораздо меньший по интенсивности, чем a , мы связываем с основным переходом $1s \rightarrow 2p_+$ мелкого донора, расположенного в слоях InAs . По мере уменьшения периода СР интенсивность резонансного максимума b возрастает относительно пика a , что связано с увеличением доли InAs в СР. Необычным здесь является то, что примесный спектр наблюдается в тонком слое InAs , включающем в себя всего лишь два монослоя. Здесь также наблюдается сдвиг относительно положения примесного перехода $1s \rightarrow 2p_+$ в объемном InAs [9] в сторону уменьшения энергии основного состояния примеси. Это противоречие [1, 2],

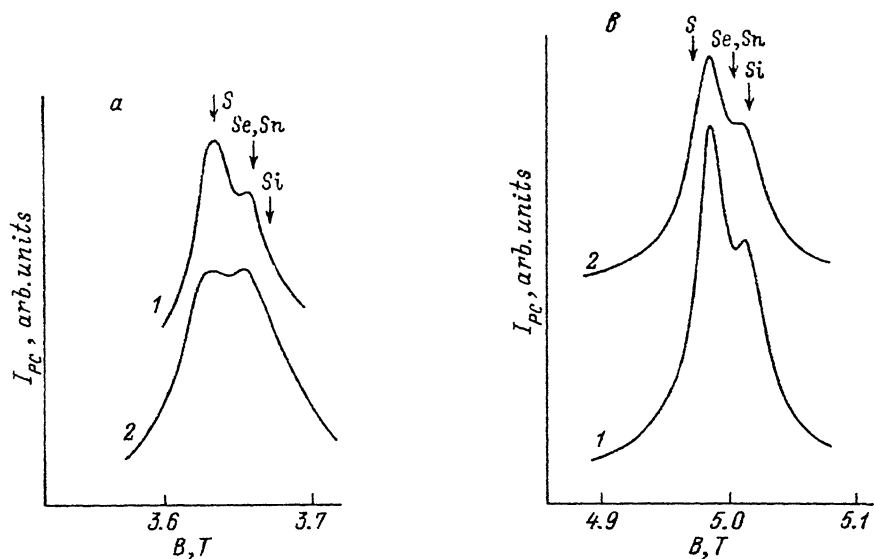


Рис. 2. Спектры фотопроводимости I_{PC} в области примесного перехода $1s \rightarrow 2p_+$ в СР $(GaAs)_n$ $(InAs)_m$ с $m=1$, $n=6$. а: 1 — геометрия Фойгта, 2 — геометрия Фарадея; $\lambda=118.8$ мкм, $T=4.2$ К. б: геометрия Фойгта; 1 — $e \parallel B$, 2 — $e \perp B$; $\lambda=96.5$ мкм, $T=4.2$ К.

однако, по-видимому, может быть связано с неприменимостью приближения эффективной массы для квантовой ямы в два монослоя.

На рис. 2, а показан спектр ФП в области перехода $1s \rightarrow 2p_+$ мелкого донора для СР с $n=6$, $m=1$ как в геометрии Фойгта (кривая 1), так и в геометрии Фарадея (кривая 2). Неожиданным здесь является очень малая ширина линий, сравнимая с шириной в чистых объемных образцах GaAs [10]. Кроме существенного уменьшения ширины линии по сравнению со СР, спектры которых представлены на рис. 1, наблюдается и ее расщепление. Величина расщепления значительно превышает спиновое расщепление донорных переходов в объемном GaAs [11]. Стрелками показаны положения резонансов в объемном GaAs, связанные с вкладами от примесей различной химической природы [8]. Измерения при других длинах волн показали, что положения резонансов не коррелируют ни с одной из известных примесей. Сравнение со спектром для $\lambda=96.5$ мкм (рис. 2, б) свидетельствует о том, что величина расщепления почти не изменилась, в то время как расстояние между резонансами, обусловленными примесями различной химической природы, в объемном GaAs увеличивается из-за увеличения химического сдвига с магнитным полем. Измерения примесного спектра в объемных кристаллах GaAs, выращенных в той же серии, что и СР, показали наличие серы S в качестве основной остаточной донорной примеси, что согласуется с идентификацией мелких примесей в пленках GaAs, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией в [11]. Поэтому мы полагаем, что наблюдаемый на рис. 2, а спектр обусловлен донорной примесью S, а расщепление связано с разным вкладом от этой примеси в случаях расположения атомов на краю (левый пик) и в центре (правый) барьера GaAs. При этом мы считаем, что в процессе роста слоев InAs химическая природа мелких доноров не изменяется, так как не изменяется величина расщепления дублета для разных длин волн.

Из сравнения двух кривых на рис. 2, а наблюдается уширение линий при переходе от геометрии Фойгта к геометрии Фарадея. Аналогично работе [12], посвященной исследованию циклотронного резонанса в GaAs с легированными Si-плоскостями, расположенными на расстоянии d друг от друга, это связано с

неоднородным распределением остаточных примесей, которых, как уже упоминалось выше, больше в слоях InAs по сравнению с GaAs. Хотя здесь и не выполнены условия сильного магнитного поля ($l \cong d$), когда должна наблюдаться сильная анизотропия в ширине линий [12], все же эффект анизотропии проявляется. На классическом языке — в геометрии Фойгта орбита электрона, находящегося в возбужденном связанном состоянии, перпендикулярна слоям InAs, и примесное рассеяние мало по сравнению со случаем геометрии Фарадея, когда орбита лежит в этих плоскостях.

На рис. 2, *в* показаны спектры ФП в поляризованном излучении СР с $n = 6$, $m = 1$ в геометрии Фойгта для двух случаев: вектор поляризации e направлен вдоль (кривая 1) и поперек (кривая 2) магнитного поля B . Видно, что поведение резонансов дублета различно: в случае $e \parallel B$ ширина линии несколько меньше, чем для $e \perp B$. Также из рисунка видно, что в геометрии $e \parallel B$ интенсивность резонансов не только не ослабевает, как в объемном GaAs, а даже превышает интенсивность в геометрии $e \perp B$, что, по-видимому, связано с нарушением правил отбора в сверхрешетках.

Тонкая структура спектра на рис. 2, по-видимому, связана с упорядоченным расположением примесей вдоль оси СР, расположенных преимущественно в монослое InAs, что понижает тем самым вероятность рассеяния.

Таким образом, в спектре ФП в области основного перехода $1s \rightarrow 2p_+$ мелкого донора обнаружены резонансы, связанные с различием пространственного положения примесных атомов в СР (GaAs)_{*n*} (InAs)_{*m*} расположенных в слоях GaAs и InAs.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] G. Bastard. Phys. Rev. B, **24**, 4714 (1981).
- [2] G. Bastard., E. E. Mendez, L. L. Chang, L. Esaki. Sol. St. Commun., **45**, 367 (1983).
- [3] N. C. Jarosik, B. D. McComber, B. V. Shanabrook, J. Comas, J. Ralston, G. Wicks. Phys. Rev. Lett., **54**, 1283 (1985).
- [4] J.-M. Mercy, Y.-H. Chang, A. A. Reeder, G. Brozak, B. D. McComber, Superlatt. Microstruct., **4**, 213 (1988).
- [5] T. Duffield, R. Bhat, M. Koza, M. C. Tamargo, J. P. Harbison, F. DeRosa, D. M. Hwang, P. Grabbe, S. J. Allen. Sol. St. Commun., **60**, 557 (1986).
- [6] О. А. Шерай, Н. Т. Мошегов, А. М. Палкин, А. И. Торопов. ФТП, **26**, 1987 (1992).
- [7] И. Г. Неизвестный, И. К. Олзоев, А. М. Палкин, О. А. Шерай. ФТТ, **29**, 570 (1987).
- [8] C. J. Armistead, P. Knowles, S. P. Najda, R. A. Stradling. J. Phys. C, **17**, 6415 (1984).
- [9] И. Г. Неизвестный, А. М. Палкин, Н. Т. Мошегов, С. И. Стенин, А. И. Торопов, О. А. Шерай. В кн.: Тр. XI Всес. конф. по физике полупроводников, т. 2, с. 226. Кишинев (1988).
- [10] B. J. Skromme, S. S. Bose, B. Lee, T. R. Lepkowski, R. Y. DeJule, G. E. Stillman, J. C. M. Hwang. J. Appl. Phys., **58**, 4685 (1985).
- [11] В. Г. Голубев, В. И. Иванов-Омский, И. Г. Минервин, А. В. Осутин, Д. Г. Поляков. ЖЭТФ, **88**, 2052 (1985).
- [12] H. Sigg, K. Ploog, Ye Qiu-Yi, F. Koch. Phys. Rev. Lett., **64**, 1951 (1990).

Редактор Л. В. Шаронова