

Проявление $A(+)$ центров в люминесценции двумерных структур GaAs / AlGaAs

© Ю.Л. Ив́анов, Н.В. Агринская, П.В. Петров, В.М. Устинов, Г.Э. Цырлин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 31 января 2002 г. Принята к печати 31 января 2002 г.)

Исследовались фотолюминесцентные свойства структур множества квантовых ям на основе GaAs / AlGaAs, содержащие положительно заряженные акцепторные состояния мелкой примеси бериллия (так называемые $A(+)$ центры). Обнаружена новая линия люминесценции, которая является результатом излучательной рекомбинации свободных электронов с $A(+)$ центрами. Показано, что энергетическое положение линии однозначно определяется энергией связи $A(+)$ центров. Показано также, что энергия связи $A(+)$ центров возрастает по мере уменьшения ширины квантовых ям в случае, когда размер ям сопоставим с радиусом локализации дырок на $A(+)$ центрах.

1. Введение

К настоящему времени хорошо известно, что в условиях низких температур нейтральные донорные и акцепторные примеси могут захватывать соответственно электрон или дырку, образуя заряженные состояния, так называемые $D(-)$ или $A(+)$ центры. В объемном материале типа GaAs их энергия связи составляет доли мэВ, однако она значительно возрастает в двумерных структурах по сравнению с трехмерными, что облегчает их исследование. Вместе с тем в двумерных структурах легко получить стационарные $D(-)$ или $A(+)$ центры методом так называемого двойного селективного легирования [1] (одновременного легирования в квантовые ямы и барьеры). Исследованию отрицательно заряженных мелких доноров, $D(-)$ центров, в квантовых ямах типа GaAs / AlGaAs к настоящему времени посвящено уже значительное количество работ (см., например, [2,3]). Что касается соответствующих состояний мелких акцепторов ($A(+)$ центров), то их исследование ограничивается лишь некоторыми теоретическими работами [4]. Недавно нами были экспериментально обнаружены $A(+)$ центры в квантовых ямах типа GaAs / AlGaAs шириной 15 нм и проведено первое предварительное их исследование. С помощью измерений эффекта Холла [5] и низкотемпературного прыжкового транспорта по $A(+)$ зоне [6] были определены энергетическое положение и боровский радиус $A(+)$ центров.

Существенным дополнением к определению природы $A(+)$ центров является анализ их люминесцентных свойств. В настоящей работе исследованы спектры фотолюминесценции в квантовых ямах p -типа GaAs / AlGaAs, содержащих $A(+)$ центры, которые получены методом двойного селективного легирования мелкой акцепторной примесью бериллия.

2. Эксперимент

Исследовались структуры множества квантовых ям GaAs / Al_{0.3}Ga_{0.7}As, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Исследование основано на сравне-

нии картин люминесценции, полученных от структур с шириной ям 15 нм и от структур с шириной ям 9 нм, причем в каждом случае легировались либо только ямы (ямы содержали $A(0)$ центры), либо как ямы, так и барьеры (ямы содержали $A(+)$ центры). И в том, и другом случаях ямы разделяют барьеры Al_{0.3}Ga_{0.7}As шириной 20 нм. Структуры содержат 10 квантовых ям, со стороны подложки отделенных 100 нм слоем Al_{0.3}Ga_{0.7}As, а со стороны поверхности — 200 нм слоем Al_{0.3}Ga_{0.7}As во избежание влияния поверхностного потенциала на картину зонной структуры ям. Легирование осуществлялось в слое 5 нм в средней части ям (или ям и барьеров) мелкой примесью бериллия с концентрацией $(3-5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Концентрация примеси выбрана таким образом, чтобы, с одной стороны, она была меньше критической для перехода изолятор-металл, с другой — достаточно высокой для наблюдения примесной люминесценции. Возбуждение структур осуществлялось с помощью гелий-неонового лазера ЛГН-215, а доставка луча лазера на образец и съём люминесценции происходили с помощью стеклянного светопровода. Максимальная мощность лазерного луча в месте образца (на выходе светопровода) составляла 10 мВт/мм². Регистрация фотолюминесценции осуществлялась в режиме счета фотонов с помощью охлаждаемого фотоумножителя ФЭУ-62. Образцы структур погружались непосредственно в жидкий гелий.

Типичный спектр фотолюминесценции структур с шириной ям 15 нм показан на рис. 1. Кривой 1 представлен спектр фотолюминесценции структур, содержащих $A(0)$ центры. Спектр состоит из четырех линий. Линия при 1.5352 эВ представляет свободный экситон и появляется только при наибольшей, достижимой в настоящих экспериментах, накачке вследствие квадратичной зависимости ее интенсивности от накачки. Ее положение, учитывая ширину квантовых ям, соответствует литературным данным [7], а энергия связи равна 7.6 мэВ. Линия при 1.5287 эВ соответствует связанному на примеси экситону с энергией связи 9 мэВ. Зависимость ее интенсивности от накачки линейна, что соответствует связанному состоянию. Линия при 1.5136 эВ связана с

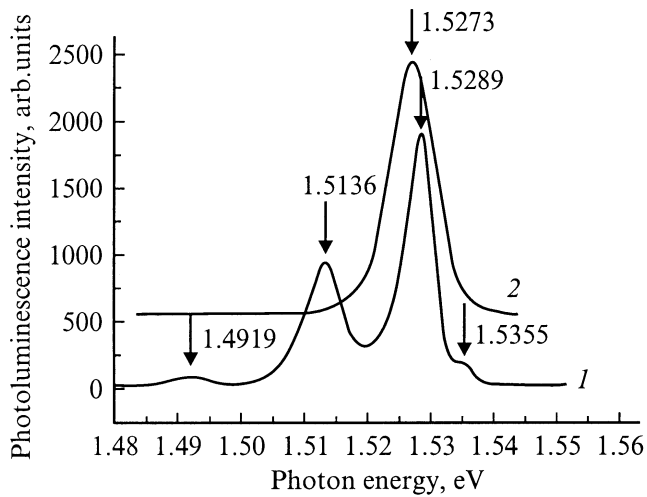


Рис. 1. Фотолюминесценция структур с шириной квантовых ям 15 нм.

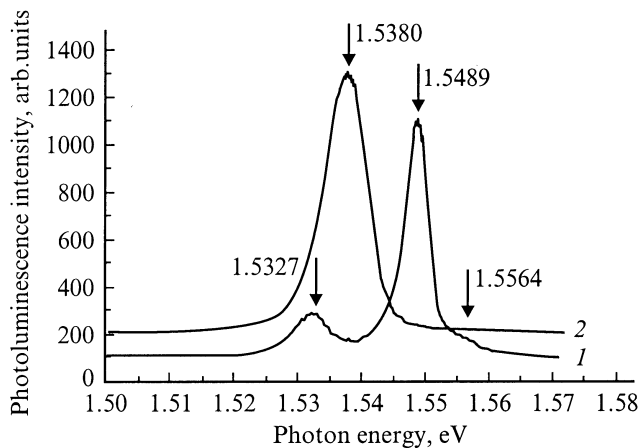


Рис. 2. Фотолюминесценция структур с шириной квантовых ям 9 нм.

излучательной рекомбинацией на примесь. Она отстоит от линии связанного экситона на ~ 14 мэВ и от линии свободного экситона на ~ 21 мэВ ниже по энергии. Зависимость ее интенсивности от накачки сублинейна. Ее энергетическое положение определяется энергией связи $A(0)$ центра, которая составляет ~ 30 мэВ, что согласуется с литературными данными [8]. Линия при 1.4919 эВ соответствует фотолюминесценции объемного материала подложки GaAs и проявляется во всех спектрах. Кривой 2 на рис. 1 представлен спектр фотолюминесценции структур, содержащих $A(+)$ центры. Характерной особенностью этого спектра является отсутствие обычной примесной линии. Линии свободного и связанного экситонов практически не видны. Основной пик, находящийся при 1.5278 эВ, отстоит от пика связанного экситона на ~ 1 мэВ ниже по энергии.

Типичный спектр фотолюминесценции структур с шириной ям 9 нм показан на рис. 2. Здесь также кривая 1 представляет спектр фотолюминесценции структур, содержащих $A(0)$ центры, а кривая 2 представляет спектр фотолюминесценции структур, содержащих $A(+)$ центры. На кривой 1 свободный экситон проявляется слабо, по существу виден только пик фотолюминесценции связанного экситона и пик излучательной рекомбинации на примесь, который отстоит от пика связанного экситона примерно на 16 мэВ. Кривая 2 так же, как и на рис. 1, выражена одним пиком, без примесного пика, но этот пик отстоит от пика связанного экситона в отличие от 15 нм ям на 11 мэВ, т.е. на 10 мэВ больше.

3. Обсуждение результатов

Факт отсутствия обычного примесного пика фотолюминесценции от структур, содержащих только $A(+)$ центры, объясняется отсутствием состояний нейтральной примеси. Иными словами, $A(+)$ центр является обычным многозарядным центром, подобно компенсированной меди в германии [9]. При этом в состоянии, близком к равновесию, в оптических свойствах этого центра участвует только верхний уровень. В нашем случае $A(+)$ центров в 15 нм ямах этот уровень отстоит от края валентной зоны на 7–8 мэВ, как это было определено нами ранее из холловских измерений [5]. Поэтому основной уровень примеси, отстоящий от края валентной зоны на 30 мэВ, проявиться не может. (Основной уровень примеси может проявиться при достаточно больших уровнях возбуждения вследствие захвата неравновесных электронов $A(+)$ центрами). Однако необходимо выяснить природу пика, связанного с $A(+)$ центром, — является ли этот пик результатом излучательной рекомбинации на $A(+)$ центр, или этот пик обязан связанному на $A(+)$ центре экситону.

Как было отмечено выше и показано в [5], энергия связи $A(+)$ центров в квантовых ямах вследствие ограничения интерфейсами становится больше, чем в объеме, и должна увеличиваться при уменьшении ширины ямы в определенных пределах. Можно ожидать, что в квантовых ямах шириной 9 нм энергия связи будет еще больше, чем в ямах шириной 15 нм. Действительно, пик, связанный с $A(+)$ центрами в структурах с квантовыми ямами шириной 15 нм, отстоит от пика связанного экситона на 1 мэВ, тогда как для структур с ямами шириной 9 нм эта разница составляет 11 мэВ, т.е. пик смещается на 10 мэВ. Можно сделать предположение, что пик в структурах с $A(+)$ центрами есть результат излучательной рекомбинации на этот центр. В этом случае положение пика определяет энергию связи $A(+)$ центра, полученную из оптических измерений. Это предположение подтверждается ниже приведенной таблицей, в которой приведены положения всех пиков для структур с ямами шириной 15 и 9 нм. Четвертый столбец указывает разницу в положении пиков, которая возникла в результате увеличения ширины запрещенной зоны

Ширина ям, нм; разница в энергии пиков, эВ	9	15	$\Delta\varepsilon$
Энергия пика свободного экситона, ε , эВ	1.5564	1.5355	0.0209
Энергия пика связанного экситона, ε , эВ	1.5489	1.5289	0.0200
Энергия пика излучательной рекомбинации на примесь, ε , эВ	1.5327	1.5136	0.0191
Энергия пика излучательной рекомбинации на $A(+)$ центр, ε , эВ	1.5380	1.5273	0.0107

при уменьшении толщины ямы. Видно, что наибольшая разница в энергиях присуща пику свободного экситона, несколько меньше — связанному экситону и переходу на примесь. Это можно объяснить большим увеличением энергии связи примесных состояний при уменьшении ширины ям, чем экситонных. Действительно, согласно литературным данным, энергия связи свободного экситона увеличивается на 0.8 эВ при уменьшении ширины квантовых ям от 15 до 9 нм [10], тогда как энергия связи примеси бериллия — приблизительно на 2 эВ [8]. Вместе с тем смещение пиков свободного и связанного экситонов и примесного пика в среднем вдвое больше, чем пика $A(+)$ центра. Это означает, если верно вышеуказанное предположение об излучательной рекомбинации электронов на $A(+)$ центр, что уровень $A(+)$ центра в ямах 9 нм становится глубже. Действительно, проведенные измерения эффекта Холла структур с шириной ям 9 нм показали, что энергия связи $A(+)$ центра в этих ямах возросла до 14 мэВ, т.е. она на 7 мэВ больше, чем в ямах шириной 15 нм. Отметим, что все энергии связи, полученные посредством измерений эффекта Холла, как это отмечалось в [5], могут отличаться от истинной на величину $1/2W$, где W — ширина примесной зоны. Учитывая это, можно констатировать вполне хорошее согласие изменения энергетического положения $A(+)$ центра, полученное посредством люминесцентных и термических измерений.

Из этих экспериментальных фактов можно сделать вывод, что пик фотолюминесценции, связанный с $A(+)$ центрами, действительно является результатом излучательной рекомбинации электронов с этими центрами.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе обнаружена новая линия люминесценции, связанная с излучательными переходами на $A(+)$ центры. Ее энергетическое положение однозначно определяется энергетическим положением $A(+)$ центра и сильно зависит от ширины квантовой ямы в случае, когда размер ям сопоставим с радиусом локализации дырок на $A(+)$ центрах.

Настоящая работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 01-02-17917)

и программой „Физика твердотельных наноструктур“ по теме „Оптические и нелинейно-оптические свойства наноструктур“.

Список литературы

- [1] S. Huant, S.P. Najda, B. Etienne. Phys. Rev. Lett., **65**, 1486 (1990).
- [2] S. Huant, A. Mandray, J. Zhu, C.G. Louie, T. Pang, B. Etienne. Phys. Rev. B, **48**, 2370 (1993).
- [3] D. Mikhailov, F.J. Betancur, J.H. Marin, L.E. Oliveira. Phys. St. Sol. (b), **210**, 605 (1998).
- [4] I.N. Yassievich, K. Schmalz, M.A. Odobudov, M.S. Kagan. Sol. St. Electron., **40**, 97 (1996).
- [5] Н.В. Агринская, Ю.Л. Иванов, В.М. Устинов, Д.В. Полоскин. ФТП, **35**, 571 (2001).
- [6] Н.В. Агринская, Ю.Л. Иванов, В.М. Устинов, А.В. Черняев, Д.В. Шамшур. ЖЭТФ, **120**, 480 (2001).
- [7] A.C. Ferreira, P.O. Holtz, B.E. Sernelius, I. Buyanova, B. Monemar, O. Mauritz, U. Ekenberg, M. Sundaram, K. Campman, J.L. Merz, A.C. Gossard. Phys. Rev. B, **54**, 16 989 (1996).
- [8] W.T. Masselink, Yia-Chung Chang, H. Morkoç. Phys. Rev. B, **32**, 5190 (1985).
- [9] Ю.Л. Иванов, С.М. Рывкин. ФТТ, **4**, 1482 (1962).
- [10] Y. Fu, R.A. Chao. Phys. Rev. B, **43**, 12 629 (1991).

Редактор Л.В. Беляков

Manifestation of $A(+)$ centers in luminescence of two dimensional GaAs/AlGaAs structures

Yu.L. Ivánov, N.V. Agrinskaya, P.V. Petrov, V.M. Ustinov, G.E. Cirlin

loffe Physicotechnical Institute of the Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Photoluminescence properties of GaAs/AlGaAs MQW (multiple quantum wells) containing positively charged shallow impurities of Be (so called $A(+)$ centers) have been studied. A novel line of photoluminescence have been found, which is a result of the free electrons $A(+)$ centers radiative recombination. It is shown that the energy position of the line is unambiguously determined by the binding energy of $A(+)$ centers. It is shown also that the binding energy of $A(+)$ centers increases with decreasing QW width when $A(+)$ center radius is commensurable with the QW width.