

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ВЫРОЖДЕННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА В СЛОЯХ GaAs: Si, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ

А. П. Абрамов, И. Н. Абрамова, С. Ю. Вербин,¹ И. Я. Герловин,
С. Р. Григорьев,¹ И. В. Игнатъев,¹ О. З. Каримов,¹ А. Б. Новиков,¹
Б. В. Новиков¹

Санкт-Петербургский государственный оптический институт им. С. И. Вавилова, 199064, Санкт-Петербург, Россия

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, 199164, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 19 февраля 1993 г. Принята к печати 26 февраля 1993 г.)

При $T = 4.2$ К исследованы спектры люминесценции эпитаксиальных слоев GaAs, легированных Si в широком диапазоне концентраций свободных носителей $10^{16} \div 7.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Наблюдаемая асимметричная полоса приписана процессам рекомбинации вырожденного электронного газа с локализованными фотодырками. Сделан вывод о том, что свойства электронного газа в сильно легированных полупроводниковых эпитаксиальных слоях GaAs определяются не столько видом легирующей примеси, сколько условиями выращивания.

Исследование спектров фотолюминесценции является одним из наиболее эффективных методов анализа качества эпитаксиальных полупроводниковых структур, предназначенных для использования в электронных и оптоэлектронных устройствах. При гелиевых температурах спектры номинально чистых и слабо легированных слоев GaAs содержат сравнительно узкие линии, приписываемые излучению свободного экситона и экситонов, связанных на дефектах. Переход к обладающим высокой проводимостью сильно легированным слоям сопровождается резким изменением спектров люминесценции — в них появляются широкие полосы, связанные как с нарушением структуры слоя, так и с возникновением в слое вырожденного газа свободных носителей.

Наиболее детальное исследование фотолюминесценции сильно легированных слоев GaAs n -типа проводимости, являющихся базовыми для большинства используемых в настоящее время эпитаксиальных гетероструктур, проведено в работах [1, 2]. В работе [1] изучалась люминесценция слоев, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, в которых роль легирующей примеси играли атомы Te. Было обнаружено, что в спектрах низкотемпературной люминесценции сильно легированных слоев с концентрацией носителей N_c , лежащей в пределах $10^{17} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$, преобладает широкая асимметричная полоса, форма и положение которой существенно зависят от величины N_c . Анализ полученных спектров и их температурных изменений позволил авторам приписать эту полосу излучению, обусловленному рекомбинацией электронов из вырожденного электронного газа с фотовозбужденными дырками, локализованными вблизи вершины валентной зоны.

В спектрах фотолюминесценции легированных слоев n -GaAs, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений с использованием в качестве легирующей примеси Si [2], также наблюдалась широкая асимметричная полоса, но с существенно иным концентрационным и температурным поведением. По мнению авторов работы, это отчетливо указывало на

зависимость свойств вырожденного электронного газа от вида легирующей примеси.

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования спектров низкотемпературной фотолюминесценции выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии слоев GaAs, легированных Si в широком диапазоне концентраций.

Эпитаксиальные слои выращивались на полуизолирующих подложках GaAs, вырезанных в плоскости (100). Рост осуществлялся на установке молекулярно-пучковой эпитаксии «Катунь» в вертикальной геометрии при температуре подложки $T = 520^\circ\text{C}$. Скорость роста, контролируемая по осцилляциям зеркального рефлекса в картине дифракции быстрых электронов (ДБЭ), составляла 1 мкм/ч, толщины выращенных слоев 1 мкм. Для легирования использовался тепловой эффузионный источник, заполненный кристаллическим Si. Концентрация легирующей примеси задавалась температурой источника. Была выращена серия образцов с проводимостью n -типа, концентрация носителей в которых изменялась от $1.6 \cdot 10^{16}$ до $7.8 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$. Определенные методом Ван-дер-Пау значения холловской подвижности для соответствующих концентраций носителей оказались близкими к данным, приведенным в [1, 3], что указывало на хорошее качество выращенных слоев.

Фотолюминесценция выращенных слоев исследовалась при температуре 4.2 К. Возбуждение люминесценции осуществлялось излучением гелий-неонового лазера ($\lambda = 632.8$ нм); для наблюдения использовался спектрометр ДФС-12 с фотоприемником ФЭУ-83 и системой автоматической регистрации и накопления сигнала. Спектральное разрешение составляло 0.3 нм.

При проведении экспериментов было обнаружено, что интегральная интенсивность люминесценции слабо зависит от концентрации свободных носителей вплоть до значений $N_e = 1.1 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, а при дальнейшем повышении концентрации начинает резко падать. Люминесценция образца с $N_e = 7.8 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ в исследуемой области вообще не наблюдалась. Сильное концентрационное тушение люминесценции легированных слоев GaAs зафиксировано и в работе [4].

Результаты спектральных измерений приведены на рис. 1. Как видно из рисунка, основная доля интенсивности в спектрах сильно легированных образцов приходится на широкую коротковолновую полосу, имеющую отчетливо асимметричную форму. Помимо этой полосы, в спектрах представлена группа сравнительно узких менее интенсивных линий, отличающихся немонотонным поведением при изменении концентрации. Линии, расположенные вблизи 1.49 эВ, наблюдались ранее в легированных Si эпитаксиальных слоях GaAs и были приписаны излучению с участием мелких акцепторов [2, 4].¹ Линия 1.513 эВ (кривые 1, 2), приписываемая излучению связанных экситонов [5], по мере роста концентрации исчезает из спектра, скорее всего, вследствие экранирования экситонов свободными носителями.

Форма и положение коротковолновой полосы близки к наблюдавшимся в сильно легированных слоях GaAs [1, 2, 6]. Полосы с характерным резким коротковолновым краем и аналогичным поведением в зависимости от концентрации наблюдались и в легированных полупроводниках группы II—VI [7].

Появление подобных полос в спектрах люминесценции интерпретируется как результат рекомбинации свободных электронов с локализованными дырочными состояниями. Наличие локальных состояний разрешает не прямые переходы, благодаря чему в процессе участвуют все электроны зоны проводимости. При рекомбинации с дырками на фиксированном по энергии локальном уровне положение крутого коротковолнового фронта полосы люминесценции задается электронным уровнем Ферми и по мере заполнения зоны проводимости с ростом N_e

¹ В спектре фотолюминесценции подложек при $T = 4.2$ К наблюдалась лишь полоса с максимумом при 1.485 эВ (донорно-акцепторная рекомбинация [4]). Возможно, она дает небольшой вклад в спектры исследованных слоев.

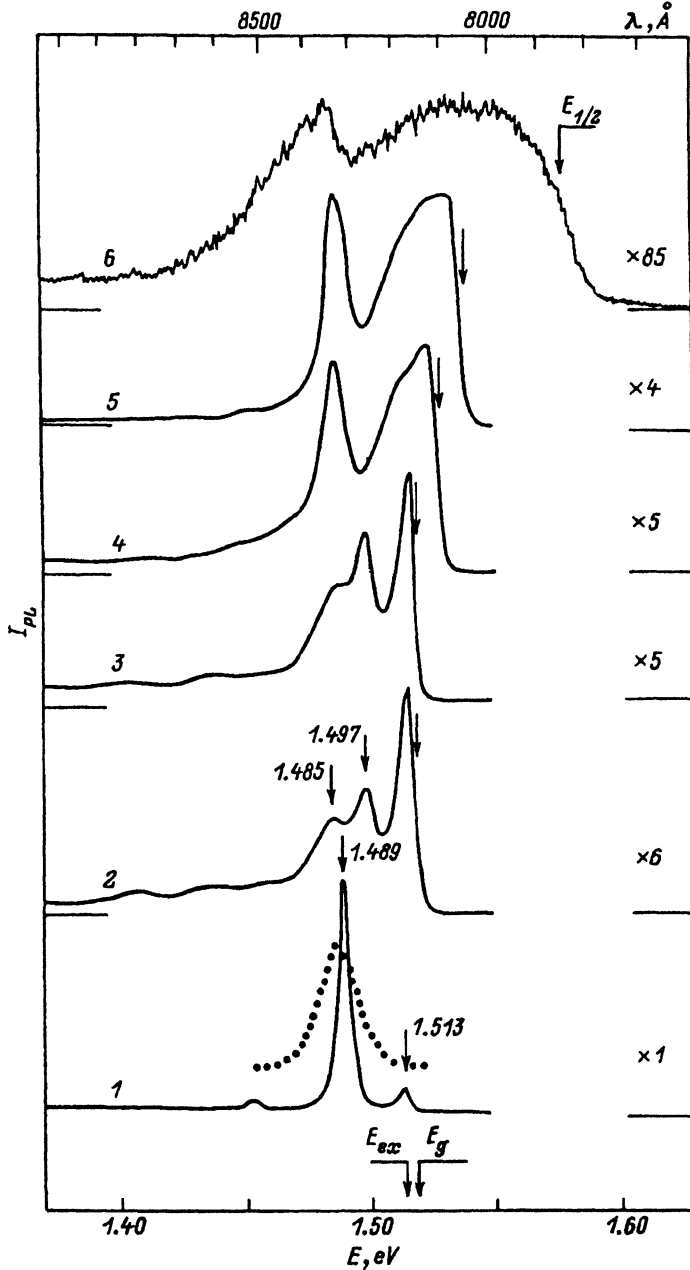


Рис. 1. Спектры интенсивности фотолуминесценции I_{PL} подложки (штриховая линия) и эпитаксиальных слоев n -GaAs; Si (1–6). $T = 4.2$ К. Концентрация электронов N_e , см^{-3} : 1 – $1.6 \cdot 10^{16}$, 2 – $5 \cdot 10^{16}$, 3 – $1.6 \cdot 10^{17}$, 4 – $6.6 \cdot 10^{17}$, 5 – $1.1 \cdot 10^{18}$, 6 – $3.4 \cdot 10^{18}$. Стрелками указаны положения коротковолнового края полосы на полувысоте ($E_{1/2}$), энергия свободного экситона (E_{ex}) и ширина запрещенной зоны (E_g). Числа со стрелками – энергии максимумов линий в эВ.

должно смещаться в сторону больших энергий (сдвиг Бурштейна—Мосса [8, 9]). В эпитаксиальных слоях GaAs, легированных Te [1], такой сдвиг действительно наблюдался, однако его величина и концентрационная зависимость отличались

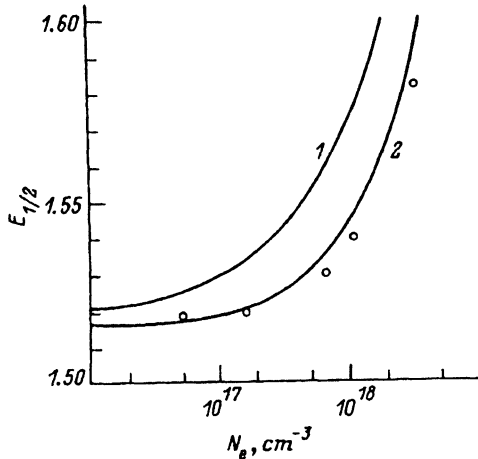


Рис. 2. Зависимость положения коротковолнового края $E_{1/2}$ от концентрации электронов N_e при $T = 4.2$ К. Точки — эксперимент, линии — расчет $E_g + E_F$ (1) и $E_g + E_F - E_t$ (2).

от предсказываемых моделью Бурштейна-Мосса для переходов в локальное состояние, совпадающее по энергии с вершиной валентной зоны.

Наилучшее согласие с экспериментом было достигнуто в модели [10], предполагающей наличие группы «хвоста», по терминологии авторов [10]) отщепленных от вершины валентной зоны акцептороподобных состояний, образующихся в результате флуктуации пространственного распределения легирующей примеси. Согласно этой модели, величина E_t , характеризующая положение центра тяжести группы относительно вершины валентной зоны, должна зависеть от концентрации N_e по закону

$$E_t = KN_e^{5/12}, \quad (1)$$

где величина коэффициента K для слоев заданного состава может быть вычислена из параметров кристалла. Энергия коротковолнового края полосы люминесценции E задается при этом выражением

$$E = E_g + E_F - E_t, \quad (2)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны, а E_F — энергия Ферми.

Результаты настоящей работы, полученные на слоях, легированных Si, также хорошо согласуются с этой моделью. Как видно из рис. 2, экспериментально измеренные значения частот, соответствующих середине коротковолнового фронта, для образцов всех концентраций хорошо ложатся на кривую, вычисленную с использованием выражений (1), (2), и значения коэффициента K , взятого из работы [1]. Хорошее качественное и количественное согласие результатов, полученных на слоях, легированных Si и Te, позволяет утверждать, что вид легирующей примеси не сказывается существенным образом на свойствах вырожденного электронного газа.

Этот вывод не совпадает с заключением работы [2], где коротковолновая полоса в спектрах низкотемпературной люминесценции легированных Si эпитаксиальных слоев GaAs либо не обладала заметной асимметрией, либо положение ее крутого коротковолнового края не зависело от концентрации носителей. Отсутствие концентрационного сдвига интерпретировалось авторами работы [2] как следствие специфического поведения Si в качестве легирующей примеси, образующего локальные состояния в зоне проводимости, что должно

приводить к «пиннингу» (связыванию) уровня Ферми. Анализ приведенных выше данных позволяет приписать наблюдавшиеся в работе [2] отклонения не свойствам легирующей примеси, а особенностям газофазной технологии, при которой используемый для легирования кремния силан может быть загрязнен неконтролируемым количеством других газов (скорее всего, O_2 [3]). Наблюдавшееся при этом размытие коротковолнового края полосы могло быть обусловлено распределением состояний, на которых локализованы дырки.

На основании приведенных здесь результатов можно заключить, что свойства вырожденного электронного газа в сильно легированных эпитаксиальных слоях GaAs определяются не столько видом легирующей примеси, сколько условиями выращивания. Для определения конкретных механизмов влияния примесей и дефектов структуры на люминесценцию вырожденного электронного газа, существующих на настоящий момент, экспериментальных данных явно недостаточно, и этот вопрос требует дальнейшего исследования.

В заключение авторы выражают свою признательность группе сотрудников ИФП СО РАН, руководимой Д. И. Лубышевым, за помощь в освоении технологии выращивания эпитаксиальных слоев GaAs.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] De-Sheng Jiang, Y. Makita, K. Ploog, H. J. Queisser. *J. Appl. Phys.*, **53**, 999 (1982).
- [2] T. Lideikis, G. Treideris. *Semicond. Sci. Techn.*, **4**, 938 (1989).
- [3] T. Lideikis, G. Treideris. *J. Cryst. Growth*, **96**, 790 (1989).
- [4] T. Kamijoh, N. Sugiyama, Y. Katayama. *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 1862 (1989).
- [5] H. Kuenzel, K. Ploog. *Appl. Phys. Lett.*, **37**, 416 (1980).
- [6] T. Takamori, T. Fukunaga, J. Kobayazshi, K. Ishida, H. Nakashima. *Japan. J. Appl. Phys.*, **26**, 1097 (1987).
- [7] Miguel Levy, W. K. Lee, M. P. Sarachik, S. Geschwind. *Phys. Rev. B*, **45**, 11685 (1992).
- [8] E. Burstein. *Phys. Rev.*, **93**, 632 (1954).
- [9] T. S. Moss. *Proc. Phys. Soc. (London)*, **B67**, 775 (1954).
- [10] Б. Г. Арnaudов, В. А. Вилькоцкий, Д. С. Доманевский, С. К. Евтимова, В. Д. Ткачев. *ФТП*, **11**, 1799 (1977).

Редактор Л. В. Шаронова
