

- [ 1 ] Г и р и н а М.Г., С о б о л е в Г.А. // Опт. и спектр. 1972. Т. 32. В. 1. С. 216.
- [ 2 ] А л е к с е е в - П о п о в А.В., Г е в е л ю к С.А. В кн.: Оптическая голография. Л.: Наука, 1983. С. 14.
- [ 3 ] Б а ж е н о в В.Ю., Б у р ы к и н Н.М., В а с н е - ц о в М.В. и др. // Укр. физич. журнал. 1982. Т. 27. № 7. С. 1018.
- [ 4 ] Б а р м е н к о в Ю.О., К о ж е в н и к о в Н.М., Л и - п о в с к а я М.Ю. // Опт. и спектр. Т. 64. В. 1. С. 225.
- [ 5 ] К о г е л н и к Н. // Bell. Syst. Tech. J. 1969. V. 48. N 9. P. 2909.
- [ 6 ] К а л ы ш о в Е.В., Т ю т ч е в М.В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 20. С. 61.

Поступило в Редакцию  
17 апреля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 20

26 октября 1990 г.

06.1; 06.2

© 1990

### ЭФФЕКТ РАСПАДА ФОТОИНДУЦИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЫ В ОДИНОЧНЫХ СЕЛЕКТИВНО-ЛЕГИРОВАННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

А.В. Б о б ы л ь, П.С. К о п ь е в,  
Н.Н. Л е д е н ц о в, А.М. М и н т а и р о в,  
В.М. У с т и н о в

Эффекты, обусловленные взаимодействием между неравновесными носителями заряда и двумерным (2Д) электронным и дырочным газом, привлекают к себе в настоящее время большое внимание [1-3] как с точки зрения исследования фундаментальных свойств двумерных систем, так и с точки зрения возможности их использования в приборных структурах. В данной работе исследовались комбинационное рассеяние (КР) и фотолюминесценция (ФЛ) осадочных селективно-легированных  $(Al, Ga)As/GaAs$  - гетероструктур от толщины слоя  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ .

Структуры были получены методом молекулярно-пучковой эпитаксии [4,5] на  $GaAs(100)$  подложках при  $630^\circ C$  и состояли из буферного слоя  $GaAs(N_A - N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3})$  толщиной 1.5 мкм, нелегированного слоя  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  толщиной  $d_H = 30-400 \text{ \AA}$  и слоя  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ , легированного  $Si$  ( $N = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ).

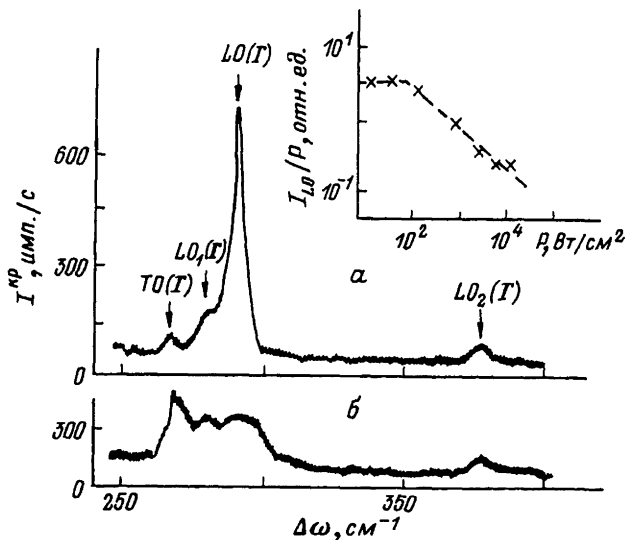


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света  $(Al,Ga)/GaAs$  СЛГС с  $d_H = 30 \text{ \AA}$ . Мощность возбуждения: а -  $1 \text{ Вт/см}^2$ , б -  $3 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$ . На вставке показана зависимость интенсивности линии рассеяния на  $LO(T)$ -фононах от плотности возбуждения.

Исследовались также структуры, в которых селективное легирование осуществлялось размещением в широкозонной области  $\delta$ -легированного  $Si$  слоя ( $N = 2-3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ). В некоторых случаях для улучшения планарности и геттерирования примесей в буферный слой вставлялась короткопериодная сверхрешетка (КПСР), состоящая из чередующихся слоев  $GaAs$  ( $30 \text{ \AA}$ ) и  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  ( $30 \text{ \AA}$ ) суммарной толщиной  $1000 \text{ \AA}$ . Подвижность 2Д электронов при температуре  $4.2 \text{ К}$  составляла  $(50-400) \cdot 10^3 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  в зависимости от  $d_H$  и типа распределения легирующей примеси. Изменение толщины широкозонного слоя  $d$  производилось анодным окислением ( $13 \text{ \AA/В}$ ). Спектры возбуждались линией  $Ar$ -лазера ( $2.41 \text{ эВ}$ ) и регистрировались спектрометрами ДФС-52, МДР-23. Зондирующее пятно в зависимости от величины необходимой плотности возбуждения  $P = 10^{-2} - 4 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$  имело размеры  $30-1000 \text{ мкм}$ . Положение пятна на структуре контролировалось с помощью микроскопа. В спектрах ФЛ ( $4.2 \text{ К}$ ) наблюдались линии излучения, обусловленные рекомбинацией свободных и связанных экситонов, переходами с участием мелкого акцептора  $CaS$  [6]. Для структур с КПСР при  $P < 1 \text{ Вт/см}^2$  наблюдается линия, обусловленная мелкими акцепторами, расположенными в КПСР [6]. При  $300 \text{ К}$  наблюдается полоса межзонной люминесценции  $GaAs$  с полушири-

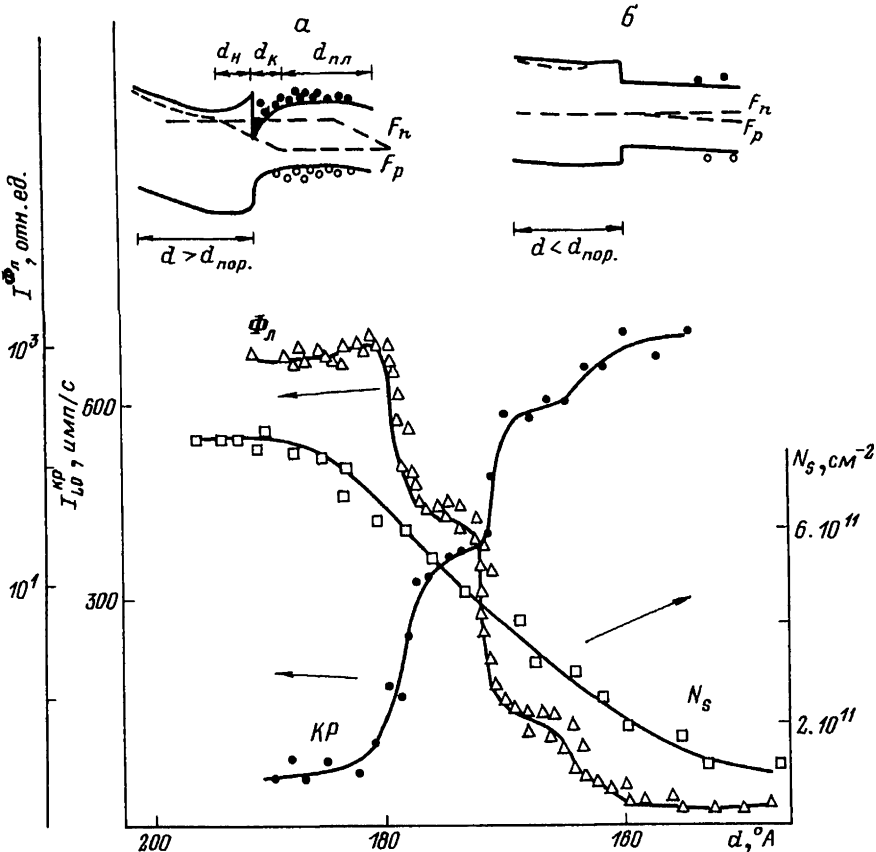


Рис. 2. Зависимость интенсивности линии рассеяния на  $LO(\Gamma)$ -фононах, интенсивности полосы краевой люминесценции при  $P = 2 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup> и концентрации равновесных электронов в 2Д канале от толщины широкозонного слоя  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  СЛГС с  $d_H = 30$  Å. На вставке схематически показаны зонные диаграммы структур для случаев а)  $d > d_{\text{нор}}$  и б)  $d < d_{\text{нор}}$ .  $F_n$  и  $F_p$  - квазиуровни Ферми для электронов и дырок.

ной до 26 мэВ и максимумом 1.44 эВ. Внутренняя квантовая эффективность излучательной рекомбинации при  $P > 1$  Вт/см<sup>2</sup> была близка к 100%.

В спектрах КР при 300 К (рис. 1, а, б) наблюдаются линии рассеяния на  $LO(\Gamma)$ ;  $TO(\Gamma)$ -фононах  $GaAs$  (291 и 268 см<sup>-1</sup>) и  $LO_1(\Gamma)$ -,  $LO_2(\Gamma)$ -фононах  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  (281 и 377 см<sup>-1</sup>). С увеличением  $P$  распределение интенсивности линий существенно изменяется. При  $P = 10$  Вт/см<sup>2</sup> (рис. 1, а) в спектре доминирует линия рассеяния на  $LO(\Gamma)$ -фононах  $GaAs$ , в то время как при  $P = 3 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> (рис. 1, б) ее интенсивность сравнивается с интенсивностью остальных линий. Изменения

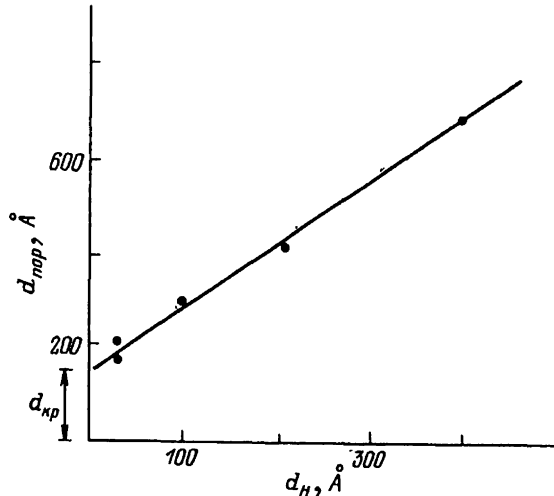


Рис. 3. Зависимость  $d_{пор}$  от толщины нелегированного широкозонного слоя  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  СЛГС. Точки — эксперимент, прямая — аппроксимация  $d_{пор} = d_{кр} + d_n$  ( $d_{кр} = 150 \pm 10 \text{ \AA}$ ).

спектра КР обусловлены уменьшением эффективности рассеяния на  $LO(\Gamma)$ -фонах, которое, как видно из вставки на рис. 1, начинает проявляться при достижении перегиба при  $P_{пр} = 10^2 \text{ Вт/см}^2$  и обусловлено взаимодействием  $LO$ -фононов с возникающей при этих мощностях фотоиндуцированной электронно-дырочной ( $e-h$ ) плазмой и образованием плазмон-фононной моды.

При фиксированной плотности возбуждения  $P = 2 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$  исследовалась зависимость интенсивности линии рассеяния на  $LO(\Gamma)$ -фонах  $GaAs$  от толщины  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ -слоя, то есть от глубины залегания гетерограницы. При уменьшении  $d$  до  $d_{пор} = 200 \text{ \AA}$  наблюдается резкое (до 20 раз) возрастание интенсивности линии рассеяния на  $LO$ -фонах (рис. 2). Одновременно происходит резкий спад (до  $10^4$  раз) интенсивности межзонной люминесценции. Обе зависимости выявляются при изменении толщины на  $15 \text{ \AA}$  и имеют ступенчатый характер с размером ступеньки  $5.6 \pm 0.3 \text{ \AA}$  (рис. 2), что примерно соответствует двум мономолекулярным слоям  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ . Величина  $d_{пор}$  практически не зависит от  $P$  вплоть до  $10^{-2} \text{ Вт/см}^2$ , то есть при  $P \ll P_{пр}$ . Как следует из холловских измерений, при данной толщине  $d_{пор}$  происходит и спад концентрации равновесных электронов (рис. 2) вплоть до их полного исчезновения (спад в этом случае не столь резок и составляет  $\sim 30 \text{ \AA}$ , что, по-видимому, связано с большей площадью образца для холловских измерений и, соответственно, с трудностью его однородного окисления). Эти совпадения, на наш взгляд, не являются случайными и указывают на необходимое условие распада фотоиндуцированной плазмы, а именно, исчезновение 2Д-канала.

При  $d > d_{пор}$  (см. вставку рис. 2, а) существует 2Д-канал, который, с одной стороны, является стоком для неравновесных электронов, а с другой — удерживает возле себя неравновесные дырки. Вблизи канала образуется изолированная от гетерограницы (слоем  $d_k$ )  $e-h$  плазма (в слое  $d_{пл}$ ) с высокой эффективностью межзонной излучательной рекомбинации даже при низких уровнях возбуждения  $P > 1$  Вт/см<sup>2</sup>, а при больших уровнях  $P$  ( $> 10^2$  Вт/см<sup>2</sup> для случая рис. 1) плазма эффективно экранирует взаимодействие излучения с  $LO$ -фононами. В точке перегиба зависимости, показанной на рис. 1, величина  $d_{пл}$  (порядка длины формирования КР-сигнала, т.е. 600 Å.) При  $d < d_{пор}$  2Д-канал исчезает, эффективность безизлучательной рекомбинации резко возрастает за счет ухода и рекомбинации неравновесных носителей через состояния на гетерогранице и на глубокие центры в подложке GaAs; концентрация плазмы, необходимая для эффективной экранировки взаимодействия излучения с  $LO$ -фононами, становится в используемом диапазоне  $P$  не достижимой.

Как видно из рис. 3, пороговая толщина широкозонного слоя следует соотношению  $d_{пор} = d_{кр} + d_n$ , где  $d_{кр} = 150 \pm 10$  Å. Величина  $d_{кр}$  соответствует минимальной толщине широкозонного слоя, при которой легированный слой может еще служить источником электронов для 2Д-канала.  $d_{кр}$  не зависит от  $d_n$  и характера легирования. В случае  $\delta$ -легированных структур спад ФЛ и возрастание КР сигнала происходит при приближении границы окисел-полупроводник на  $d_{кр}$  к  $\delta$ -легированному слою. Наличие ступенек в зависимостях КР и ФЛ сигналов от  $d$ , по нашему мнению, связано с дискретным характером анодного окисления GaAs (100), которое, по-видимому, осуществляется сразу на один параметр решетки при достижении соответствующего критического напряжения. Наиболее интересным является, на наш взгляд, резкий пороговый характер наблюдаемых зависимостей от  $d$ , который обусловлен, по нашему мнению, резким характером перераспределения зарядов между 2Д каналом и состояниями на поверхности или на границе окисел-полупроводник, где при  $d < d_{пор}$  энергетически более выгодно оказывается размещение заряда.

Таким образом, впервые обнаружен эффект распада фотоиндуцированной  $e-h$  плазмы СЛГС. Критическая толщина легированного широкозонного слоя  $d_{кр} = 150 \pm 10$  Å определяет минимальную толщину подзатворной области в нормально открытых транзисторах с высокой подвижностью электронов и, следовательно, максимальную величину их крутизны. Резкая зависимость эффективности излучательной рекомбинации с СЛГС от  $d$  вблизи  $d_{пор}$  и ее связь с наличием 2Д канала позволяет надеяться на использование таких структур в качестве сверхбыстродействующих светоизлучающих элементов, управляемых потенциалом затвора.

В заключение авторы благодарят Ж.И. Алферова за внимание и интерес к работе и Р.В. Конакову, А.А. Рогачева, Р.А. Суриса, М.К. Шейнкмана за полезные обсуждения.

- [1] A l f e r o v Z h. I. // *Czech. J. Phys. B.* 1980. V. 30. N 3. P. 245-261.
- [2] А л т у х о в П. Д., Б а к у н А. А., М е д в е д е в Б. К., Р о г а ч е в А. А., Р у б ц о в Г. П. // *ФТП.* 1987. Т. 21. № 3. С. 449-455.
- [3] К у к у ш к и н И. В., М е ш к о в С. В., Т и м о ф е - е в В. Б. // *УФН.* 1988. Т. 155. № 2. С. 219-264.
- [4] К о р ' е в Р. S., I v a n o v S. V., L e d e n t - s o v N. N., M e l ' t s e r В. Я., N a d t o - c h i M., U s t i n o v V. M. // *Crustal. Res. and Prep.* 1989. V. 19-20. P. 63-66.
- [5] К о п ь е в П. С., Л е д е н ц о в Н. Н. // *ФТП.* 1988. Т. 22. № 10. С. 1729-1742.
- [6] В а с и л ь е в А. М., К о п ь е в П. С., К о ч е р е ш - к о В. П., Л е д е н ц о в Н. Н., М е л ь ц е р Б. Я., У р а п ь ц е в И. Н., Я к о в л е в Д. Р. // *ФТП.* 1986. Т. 20. № 2. С. 353-356.

П о с т у п и л о в Р е д а к ц и ю  
10 и ю л я 1990 г.