

ЭКСИТОНЫ, СВЯЗАННЫЕ СО СЛОЕМ ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА В КРЕМНИИ

*П.Д.Алтухов, А.А.Бакун, А.В.Крутицкий,
А.А.Рогачев, Г.П.Рубцов*

При малой плотности поверхностного заряда в спектрах рекомбинационного излучения кремниевых структур металл – окисел – полупроводник (МОП-структур) обнаружена новая линия излучения, обусловленная экситонами, связанными со слоем поверхностного заряда.

При связывании экситонов со слоем поверхностного заряда в МОП-структурах на поверхности кремния образуется двумерная электронно-дырочная ($e - h$)-система, состоящая из

двумерного слоя основных носителей (первый слой) и дополнительного более удаленного от поверхности и менее плотного двумерного слоя неравновесных носителей противоположного знака (второй слой) ^{1, 2}. Формирование такой системы приводит к появлению новой линии рекомбинационного излучения — *S*-линии ^{1, 2}. При большой плотности поверхностного заряда n_s из-за отталкивания $e-h$ пар, связанного с пространственным разделением электронного и дырочного слоев, поверхностные пары существуют в виде двумерной плазмы с плотностью пар, возрастающей при увеличении уровня возбуждения. При этом с ростом плотности пар наблюдается коротковолновый сдвиг *S*-линии излучения (рис. 1), равный потенциалу отталкивания, и увеличение проводимости носителей во втором слое ². В области малых n_s в условиях эксперимента ² поверхностные пары существуют в виде электронно-дырочных капель (ЭДК), связанных со слоем поверхностного заряда. Критическая величина n_s , разделяющая области существования поверхностной плазмы и поверхностных ЭДК, в случае [100]-дырочного слоя поверхностного заряда равна $n_s^0 \approx 10 \text{ см}^{-2}$ ².

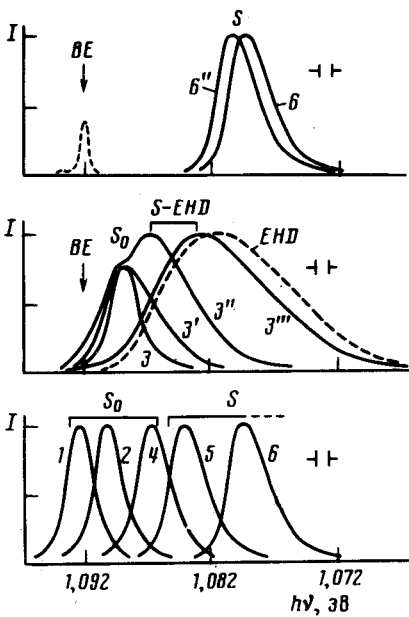


Рис. 1

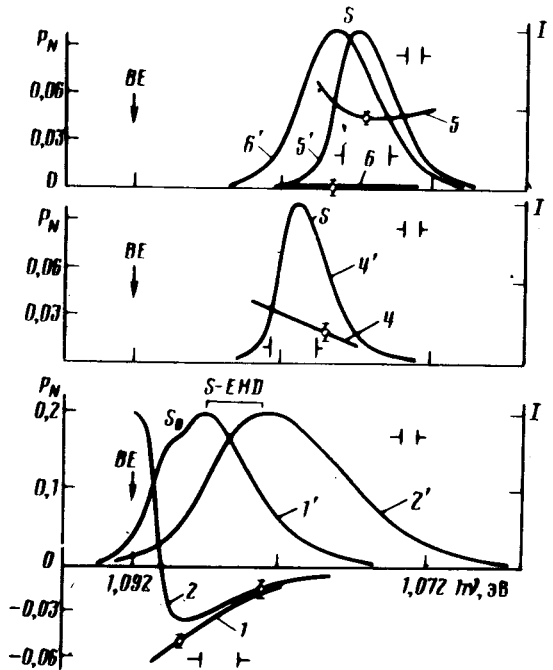


Рис. 2

Рис. 1. Спектральное распределение рекомбинационного излучения кремния I при температуре $T = 1,9 \text{ К}$ (МОП-структура [100]-дырочный слой, $TO-LO$ -линии, максимальная подвижность носителей в электронном и дырочном слоях поверхностного заряда $\mu_e = 1,05 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и $\mu_h = 2,4 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$). Плотность поверхностного заряда (дырок) $n_s, \text{ см}^{-2}$: 1 — 0; 2 — $1,6 \cdot 10^{11}$; 3 — $3,1 \cdot 10^{11}$; 4 — $5,3 \cdot 10^{11}$; 5 — $1,0 \cdot 10^{12}$; 6 — $2,1 \cdot 10^{12}$. Уровень возбуждения $I_p, \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$: 1 — $6 \cdot 2 \cdot 10^{-4}$; 3' — $3 \cdot 10^{-3}$; 3'', 6'' — $4 \cdot 10^{-2}$; 3''' — 3

Рис. 2. Спектральное распределение излучения (I' — δ') и степени циркулярной поляризации P_N (1 — 6) МОП-структуры при температуре $T = 1,9 \text{ К}$ в магнитном поле $H = 50 \text{ кЭ}$, перпендикулярном поверхности [100] ($TO-LO$ -линии, геометрия Фарадея, [100]-дырочный слой). Плотность поверхностного заряда $n_s, (\text{см}^{-2})$: 1, 1', 2, 2' — $3,1 \cdot 10^{11}$; 4, 4' — $2,1 \cdot 10^{12}$; 5, 5', 6, 6' — $3,2 \cdot 10^{12}$. Уровень возбуждения $I_p (\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2})$: 1, 1', 4, 4', 5, 5' — $4 \cdot 10^{-2}$; 2, 2', 6, 6' — 3

Притяжение электронов к дырочному слою в области существования двумерной плазмы при низкой плотности пар обусловлено электронно-дырочным корреляционным взаимодействием. Электрон во втором слое индуцирует в дырочном слое положительный коллектив-

ный заряд, который притягивает электрон к поверхности. При больших n_s на больших расстояниях от поверхности взаимодействие электрона с дырочным слоем можно приближенно описать потенциалом изображения ¹. В этих условиях экранирование дырками кулоновского взаимодействия электронов и дырок может препятствовать образованию экситонно-связанного состояния электрона из второго слоя и добавочной (неравновесной) дырки из первого слоя. При этом спектральное положение S -линии удовлетворительно описывается теорией, не учитывающей экситонные эффекты. Однако, в области достаточно малых n_s , при которых радиус экситона a_B становится меньше среднего расстояния между дырками в первом слое $n_s^{-1/2}$, образование экситонов, связанных со слоем поверхностного заряда, становится возможным из-за уменьшения экранирования. Этот случай теоретически рассмотрен в работе ³, в которой показано, что энергия связи экситонов со слоем поверхностного заряда существует и при малых n_s , причем предельным положением поверхностной линии излучения в спектре в области малых n_s является положение экситонной линии в объеме полупроводника, а природа этой линии радикально меняется.

Экситоны, связанные со слоем поверхностного заряда, должны наблюдаться при $n_s < n_s^0$ в виде поверхностной газовой фазы, сосуществующей с поверхностными ЭДК, и могут проявляться в спектрах рекомбинационного излучения в виде линии, расположенной с коротковолновой стороны от линии поверхностных ЭДК. Линия поверхностных экситонов (S_0 -линия, рис. 1) была обнаружена нами в спектрах излучения МОП-структур с большим временем жизни поверхностных пар в области $n_s < n_s^0$ при образовании [100]-дырочного слоя. Интенсивность S_0 -линии с ростом уровня возбуждения возрастает сублинейно, и она доминирует в спектре при низких уровнях возбуждения. Объемные линии связанных экситонов при этом отсутствуют. При $n_s = 0$ эта линия обусловлена экситонами, связанными с поверхностными центрами. С ростом n_s S_0 -линия смещается в спектре в длинноволновую сторону и при $n_s > n_s^0$ превращается в S -линию излучения. Спектральное положение S_0 -линии согласуется с результатами теоретических расчетов ³. Ее спектральная ширина существенно меньше ширины линии излучения поверхностных ЭДК и определяется флуктуациями поверхностного потенциала, что отличает ее от S -линии, спектральная ширина которой при низкой плотности пар определяется энергией ферми-дырок. При повышении уровня возбуждения с длинноволновой стороны от линии поверхностных экситонов в спектре излучения появляется линия поверхностных ЭДК, которая уширяется, смещается в длинноволновую сторону и постепенно трансформируется в линию излучения объемных ЭДК в результате увеличения размеров поверхностных капель.

Изложенная выше интерпретация S_0 -линии подтверждается результатами исследования циркулярной поляризации излучения в магнитном поле, перпендикулярном поверхности. В области $n_s > n_s^0$ двумерные электроны во втором слое находятся в двух нижних по энергии долинах. Согласно ⁴ TO -линия излучения электронов из этих долин в направлении распространения света, перпендикулярном поверхности, в магнитном поле неполяризована. Наблюдаемая слабая поляризация $TO - LO - S$ -линии излучения положительного знака (рис. 2) обусловлена ориентацией невырожденных двумерных электронов в магнитном поле и определяется поляризацией слабой LO -линии. Из-за большой энергии ферми-дырок в первом слое дырки в магнитном поле не ориентируются и вклада в поляризацию излучения не вносят. При больших уровнях возбуждения S -линия практически неполяризована из-за большой энергии ферми-электронов. Знак поляризации S_0 -линии противоположен знаку поляризации S -линии (рис. 2). Этот результат может свидетельствовать о том, что энергия орбитально-долинного расщепления электронных состояний в поверхностных экситонах мала, а наблюдаемая поляризация $TO - LO - S_0$ -линии обусловлена ориентацией электронов в магнитном поле и определяется поляризацией TO -линии. С ростом температуры степень поляризации S_0 -линии излучения и S -линии излучения уменьшается. Поскольку линия излучения поверхностных ЭДК в магнитном поле практически неполяризована, наблюдаемая сте-

пень поляризации максимальна на коротковолновом краю спектра в области максимального вклада излучения поверхностных экситонов. С ростом уровня возбуждения вклад S_0 -линии в излучение уменьшается, вызывая уменьшение средней степени поляризации излучения. Отметим, что при низких уровнях возбуждения существенный вклад в S - EHD -линию (рис. 1, 2) может вносить излучательная рекомбинация многоэкситонных комплексов, связанных со слоем поверхностного заряда.

Авторы приносят благодарность Н.С.Аверкиеву и Г.Е.Пикусу за полезные обсуждения.

Литература

1. Алтухов П.Д., Иванов А.В., Ломасов Ю.Н., Рогачев А.А. Письма в ЖЭТФ, 1983, 38, 5; 1984, 39, 432.
2. Алтухов П.Д., Бакун А.А., Концевой Ю.А., Кузнецов Ю.А., Рогачев А.А., Романова Т.Л., Рубцов Г.П. ФТТ, 1987, 29, 2412.
3. Аверкиев Н.С., Пикус Г.Е. ФТП, 1987, 21, 1539.
4. Пикус Г.Е. ФТТ, 1977, 19, 1653.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
8 сентября 1987 г.