

ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ В СТРУКТУРАХ МЕТАЛЛ-ОКИСЬ-ПОЛУПРОВОДНИК

П.Д. А л т у х о в, А.А. Б а к у н, Г.П. Р у б ц о в

В спектрах рекомбинационного излучения структур металл-окисел-полупроводник на поверхности кремния наблюдается линия излучения электронно-дырочных пар, связанных со слоем поверхностного заряда (S -линия [1, 2]). При большой плотности поверхностного заряда n_s поверхностные пары существуют в виде двумерной плазмы с пространственно-разделенными электронным и дырочным слоями. Спектральное положение S -линии при этом определяется глубиной уровня Ферми двумерных носителей в слое поверхностного заряда и небольшой энергией электронно-дырочного корреляционного взаимодействия $\sim (2-3)$ мэВ [1]. При малых n_s поверхностные пары существуют в виде экситонов, связанных со слоем поверхностного заряда [3].

В настоящей работе на ряде структур на [100] - поверхности кремния, легированного фосфором, с длинноволновой стороны от S -линии в спектре обнаружена новая линия, обусловленная излучательной рекомбинацией двумерных электронов и дырок, локализованных на поверхностных центрах (D -линия (рис. 1)). При увеличении напряжения на затворе она возникает порогом при образовании электронного слоя поверхностного заряда. Спектральное положение D -линии определяется глубиной уровня Ферми двумерных электронов в квантовой яме и энергией связи дырки на поверхностном центре. При малой плотности двумерных электронов энергия связи дырки на поверхностном центре примерно равна 45 мэВ, а максимум этой линии расположен в спектре на 25 мэВ ниже по энергии линии излучения экситона, связанного на нейтральном доноре (фосфоре). С ростом n_s эта линия смещается в спектре в длинноволновую сторону из-за увеличения глубины уровня Ферми электронов в квантовой потенциальной яме. При малых n_s спектральная ширина D -линии определяется шириной полосы уровней энергии дырок, расположенных в области изгиба валентной зоны вблизи поверхности, а также флуктуациями поверхностного потенциала и существенно превышает энергию Ферми двумерных электронов. В области больших n_s ее спектральная ширина становится близкой к энергии Ферми двумерных электронов и возрастает при увеличении n_s . Из-за пространственного разделения электронов и дырок при увеличении уровня возбуждения наблюдается коротковолновый сдвиг D -линии, примерно равный величине $\Delta\mu_D \approx 4\pi e^2 \epsilon_0^{-1} \times n_p z_d/2$, где n_p - плотность локализованных дырок, $z_d/2$ - среднее расстояние дырок от поверхности, ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость кремния, e - заряд электрона. Измерив плотность неравновесных дырок n_p по величине коротковолнового сдвига

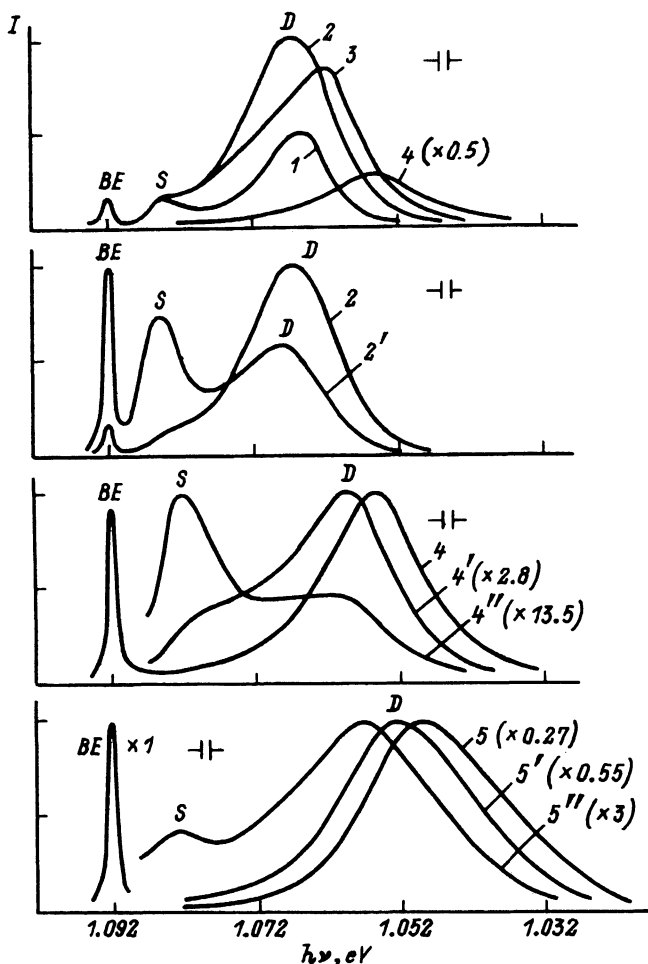
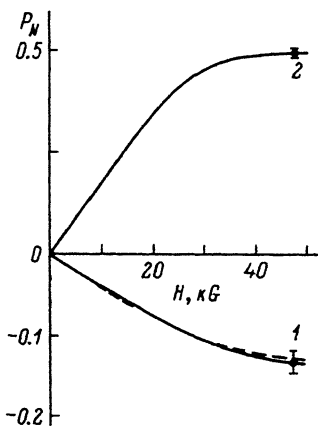


Рис. 1. Спектры рекомбинационного излучения кремния при температуре $T=1.9$ К (МОП-структура, $Si:P$ с концентрацией доноров $\sim 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $TO-L0$ -линии). Плотность электронов в канале $n_S, 10^{12} \text{ см}^{-2}$: 1 - 0.07; 2, 2' - 0.3; 3 - 0.54; 4-4'' - 1.47; 5-5'' - 3.35. Уровень возбуждения, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}$: 1-5 - 10^{-3} ; 2'-5' - 10^{-2} ; 4'', 5'' - 10^{-1} .

S -линии в случае $[100]$ - дырочного слоя [4], по величине ΔM_D мы определили среднее расстояние локализованных дырок от поверхности $\bar{z}_d/2 \sim (2-3) \cdot 10^{-6} \text{ см}$. Максимальной величине коротковолнового сдвига при этом соответствуют полностью заполненные поверхностные центры с плотностью $n_d = n_p \sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Можно предположить, что такими поверхностными центрами являются акцепторные атомы бора. Избыточная концентрация бора ($\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$) может появиться вблизи поверхности при нанесении на окисел полупрозрач-

Рис. 2. Зависимость степени циркулярной поляризации рекомбинационного излучения кремния P_N от магнитного поля H при температуре $T=1.9$ К. 1 - $LO-D$ -линия, $h\nu \approx 1.071$ эВ, $n_S = 5.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. 2 - TO -линия связанного экситона (BE), $h\nu \approx 1.092$ эВ. Уровень возбуждения - $5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$.



ного металлического затвора из поликристаллического кремния, легированного бором. При регистрации излучения вдоль направления, перпендикулярного поверхности, в геометрии Фарадея наблюдается циркулярная поляризация $LO-D$ -линии излучения, обусловленная ориентацией тяжелых дырок в магнитном поле (рис. 2). Уровень энергии легких дырок при этом отщеплен поверхностным электрическим полем и вклад в излучение не вносит. $TO-D$ -линия излучения в магнитном поле неполяризована из-за орбитально-долинного расщепления состояний двумерных электронов. Средняя степень циркулярной поляризации суммарной $TO-LO-D$ -линии излучения равна

$$P_N = I_{LO} (I_{LO} + I_{TO})^{-1} \tanh(3g_1 \mu_0 H / 2kT),$$

где $I_{LO}/I_{TO} \approx 0.14$, μ_0 - магнетон Бора, H - магнитное поле, kT - температура, $g_1 \approx 0.6$ - g - фактор дырок. При этом степень поляризации излучения практически не зависит от уровня возбуждения, от n_S и максимальна на коротковолновом краю линии в области максимального вклада LO -линии излучения. Отсутствие гашения $TO-D$ -линии в магнитном поле при больших n_S свидетельствует о сильном смешивании состояний дырок с моментом $\pm 3/2$ и $\pm 1/2$. При регистрации излучения вдоль направления, параллельного поверхности, $TO-D$ -линия в отсутствие магнитного поля оказалась поляризованной вдоль поверхности со степенью линейной поляризации $(I_{||} - I_{\perp}) / (I_{||} + I_{\perp}) \approx 0.30$, что подтверждает вывод о двумерности электронов. Отметим, что уменьшение интенсивности D -линии с ростом n_S (рис. 1) может быть связано с уменьшением перекрытия волновых функций электронов и дырок в результате уменьшения радиуса волновой функции двумерных электронов.

В заключение авторы выражают благодарность А.А. Рогачеву за полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

- [1] Алтухов П.Д., Иванов А.В., Ломасов Ю.Н., Рогачев А.А. - Письма в ЖЭТФ, 1983, т. 38, № 1, с. 5-8; 1984, т. 39, № 9, с. 432-436.

- [2] Алтухов П.Д., Рогачев А.А., Силлов А.Ю. - ФТТ, 1986, т. 28, № 4, с. 1212-1215.
- [3] Алтухов П.Д., Бакун А.А., Крутицкий А.В., Рогачев А.А., Рубцов Г.П. - Письма в ЖЭТФ, 1987, т. 46, № 11, с. 427-430.
- [4] Алтухов П.Д., Бакун А.А., Кенцовой Ю.А., Кузнецов Ю.А., Рогачев А.А., Романова Т.Л., Рубцов Г.П. - ФТТ, 1987, т. 29, № 8, с. 2412-2419.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
14 июня 1986 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 17 12 сентября 1988 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДРОБЛЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ СОУДАРЕНИИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА

И.А. Духовский, П.И. Ковалев

В работах [1, 2] проведено экспериментальное исследование обтекания затупленного тела сверхзвуковым потоком запыленного газа. Авторами обнаружен эффект образования зоны повышенной концентрации дисперсной фазы в области ударного слоя. Относительно упомянутого эффекта высказано предположение, что он является следствием дробления твердых частиц при соударении с поверхностью. С целью уточнения предложенной модели образования зоны повышенной концентрации твердой фазы были проведены эксперименты по исследованию соударения одиночных частиц с плоской поверхностью.

Оценки, проведенные авторами, показали, что большинство осколков, образующихся при дроблении, имеют размер меньше 10 мкм. Отсюда следует, что для измерения скоростей осколков следует устранить их торможение в газовой среде. В работах [3, 4] проводилось исследование соударения твердых частиц с поверхностью при различных углах встречи. Ускорение частиц осуществлялось при помощи газовой струи, максимальная скорость удара составляла величину ~ 100 м/с.

Для проведения аналогичных исследований нами использован баллистический метод, который позволяет устранить влияние газа на движение частиц и исследовать процесс удара при скоростях встречи ~ 850 м/с. Изучалось соударение твердой частицы, находящейся в свободном падении, с объектом, метаемым лабораторным ускорителем. Объекты представляли собой стальные, закаленные цилиндры, передний торец которых был усечен плоскостью, наклоненной к оси.