

## ЧИСТАЯ ПОВЕРХНОСТЬ Si(111) – 2 × 1: БОЛЬШИЕ НЕРАВНОВЕСНЫЕ ИЗГИБЫ ЗОН

*Л.С. Свиридовский, А.А. Галаев, И.И. Горюнова*

Обнаружены большие приповерхностные изгибы зон  $\sim 10$  эВ на сколоте в сверхвысоком вакууме кремнии  $p$  и  $n$ -типа при межзонном (поверхностном) оптическом поглощении.

Величина фотоэдс как объемной, так и поверхностной, обычно не превышает ширины запрещенной зоны полупроводника. В некоторых случаях проявляется аномальный фотовольтаический эффект, когда фотоэдс достигает больших величин, причем точный механизм этого явления до конца не выяснен<sup>1</sup>. Нам<sup>2</sup> было обнаружено аномально большое значение поверхностной фотоэдс (ПФЭДС) в несколько раз превышающее ширину запрещенной зоны кремния.

На чистой поверхности Si(111) – 2 × 1  $p$ - и  $n$ -типа было проведено исследование спектральной зависимости ПФЭДС, температурных зависимостей работы выхода электрона (РВЭ), ПФЭДС в области энергий фотонов  $h\nu = 0,45$  эВ и ее кинетики. Измерение РВЭ ПФЭДС осуществлялось методом Кельвина с вибрирующим электродом и (постоянным освещением). Чистую поверхность кремния ( $p$ -тип: удельное сопротивление  $\rho = 2000$  Ом · см,  $n$ -тип:  $\rho = 750$  Ом · см) получали сколом по плоскости (111) в вакууме  $5 \cdot 10^{-9}$  Па.

На спектральной зависимости ПФЭДС (рис. 1) можно выделить несколько характерных интервалов энергий фотонов. Для Si  $p$ -типа (рис. 1, а) в области энергий фотонов  $0,36$  эВ  $< h\nu < 0,5$  эВ с  $h\nu_{max} = 0,45$  эВ наблюдается положительный сигнал ПФЭДС, а в области энергий фотонов  $h\nu > 0,5$  эВ обнаружен отрицательный сигнал ПФЭДС. Разность между значениями ПФЭДС в этих двух областях достигает величины  $\sim 12$  В. Для Si  $n$ -типа (рис. 1, б) в интервале энергий фотонов  $0,36$  эВ  $< h\nu < 0,72$  эВ обнаружен отрицательный сигнал с  $h\nu_{max} = 0,45$  эВ, а в интервале  $h\nu > 0,72$  эВ сигнал ПФЭДС становится положительным. Разность между значениями ПФЭДС для этих двух областей составляет  $\sim 10$  В. При "окислении" поверхности (экспозиция  $O_2 - 10$  Па · сек) положительный сигнал ПФЭДС для Si  $p$ -типа и отрицательный сигнал ПФЭДС для Si  $n$ -типа исчезают, а оставшийся сигнал составляет десятые доли вольта.

Величина сигнала ПФЭДС ( $\Delta v_s$ ) в длинноволновой области ( $h\nu \sim 0,45$  эВ) зависит от направления поляризации света относительно сколотой поверхности при нормальном падении: отношение максимального сигнала к минимальному  $\sim 2$ , а угол между направлениями поляризации для этих двух сигналов составляет  $90^\circ$ .  $\Delta v_s$  и время релаксации сигнала ( $\tau$ ) увеличивается с уменьшением температуры (соответственно  $\Delta v_s \sim \exp 0,1/kT$ ,  $\tau \sim \exp 0,05/kT$ ), причем последний параметр  $\tau$  достигает величины порядка сотен секунд.

РВЭ на исследуемой поверхности кремния  $p$ - и  $n$ -типа практически не изменяется в температурном интервале 300 – 120 К. Ниже 120 К начинается экспоненциальное изменение РВЭ ( $\Delta\phi \sim \mp \exp 0,16/kT$ ), причем для Si  $p$ -типа РВЭ уменьшается (становится даже отрицательной), а для Si  $n$ -типа – увеличивается. Величина этого изменения при  $T = 90$  К с точностью до десятых вольта равна значению ПФЭДС для Si  $p$ -типа при  $h\nu > 0,5$  эВ и Si  $n$ -типа при  $h\nu > 0,72$  эВ (см. рис. 1).

Хотя экспериментальных данных еще недостаточно для однозначного описания указанных выше явлений, можно обсудить несколько качественных моделей, объясняющих полученные результаты. На чистой сколотой поверхности Si(111) – 2 × 1 существуют две зоны поверхностных состояний (ПС) "оборванных" связей: зона заполненных ПС (ЗПС) и зона незаполненных ПС (ЗНПС)<sup>2-5</sup>. В  $3-5$  были обнаружены переходы электронов между

этими зонами ПС, причем максимум сигнала приходился на энергию 0,45 эВ и соответствовал максимуму комбинированной плотности состояний этих двух зон. Величина энергии фотонов для максимума обнаруженного нами сигнала ПФЭДС, а также его поляризационная зависимость<sup>5</sup>, свидетельствуют о том, что сигнал в области  $h\nu \sim 0,45$  эВ связан с оптическими переходами электронов между ЗЗПС и ЗНПС. ПФЭДС — это изменение приповерхностного изгиба зон и для его возникновения необходимо, чтобы существовал обмен носителями заряда между поверхностью и объемом. В<sup>5</sup> для объяснения небольшого изгиба зон  $\sim 0,3$  эВ для Si *p*-типа было предположено, что неравновесные электроны из ЗНПС рекомбинируют с дырками объемной валентной зоны (ОВЗ). Однако, с увеличением изгиба зон этот канал обмена носителями зарядов перестает вносить существенный вклад в сигнал ПФЭДС, так как концентрация основных носителей заряда у поверхности значительно уменьшается. Можно предположить, что обмен в указанных выше условиях обусловлен механизмом, связанным с диффузионным перемещением носителей заряда через локализованные состояния, такие как глубокие примесные уровни в области пространственного заряда (ОПЗ), дислокации, одномерные ступени скола.

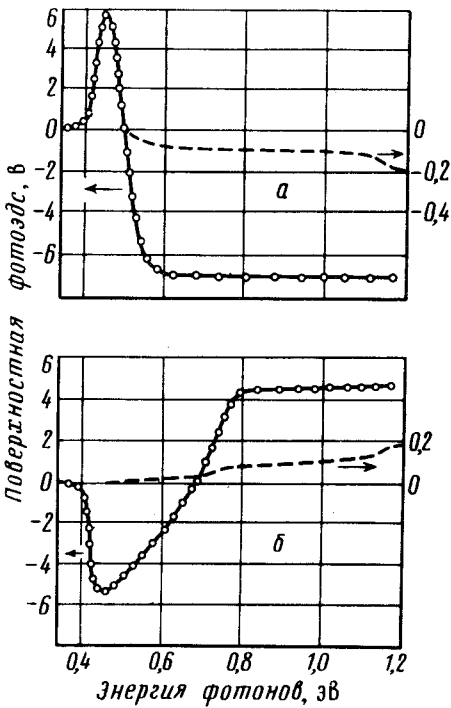


Рис. 1

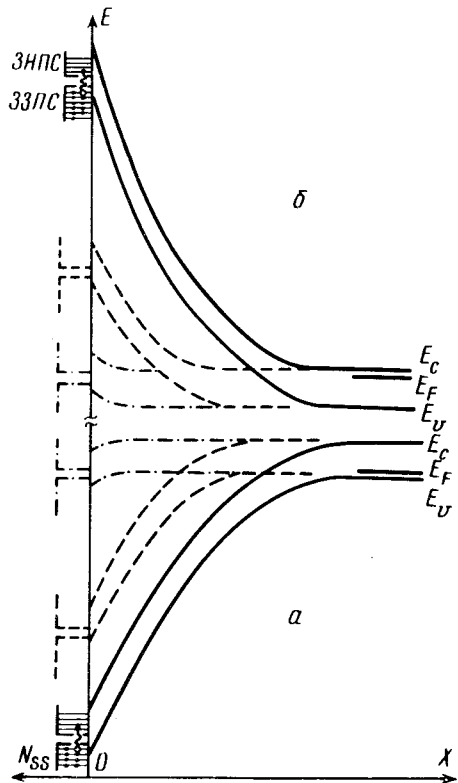


Рис. 2

Рис. 1. Спектральная зависимость ПФЭДС для Si *p*-типа (а) и Si *n*-типа (б),  $T = 90\text{К}$ , интенсивность  $10^{13}$  фотон/см<sup>2</sup>·с. ——— — чистая поверхность, - - - - окисленная поверхность

Рис. 2. Зонная схема поверхности Si *p*-типа (а) и Si *n*-типа (б). ——— — при освещении  $h\nu = 0,45$  эВ, - - - - при освещении  $h\nu = 0,9$  эВ, ······ без освещения.  $E_c, E_v, E_F$  — зона проводимости, валентная зона, уровень Ферми соответственно;  $N_{ss}$  — плотность поверхностных состояний

Другое объяснение anomalно больших значений ПФЭДС связано с предположением, что данное явление есть проявление anomalного фотовольтаического эффекта<sup>1</sup>. Асимметричной ячейкой, в которой генерируется элементарная ЭДС служит искажение поверхностной

зонной структуры, а именно ЗЗПС и ЗНПС, вызванное наличием ступеней скола, всегда присутствующих на поверхности. Потенциалы ("плавающие") возникшей ЭДС на поверхности будут стремиться распределиться таким образом, чтобы один потенциал был равен примерно потенциалу подложки, а другой создавал в ней обедняющий слой. При измерении ПФЭДС мы измеряем средний потенциал.

Таким образом, если до освещения ОПЗ для Si *p*- и *n*-типа представляла обедненный слой, то после освещения ( $h\nu \sim 0,45$  эВ) первоначальный изгиб зон увеличивается (рис. 2). Образование инверсионного слоя затруднено из-за низкой скорости генерации неосновных носителей заряда вследствие низкой температуры, а также в связи с рекомбинацией этих носителей с неравновесными носителями заряда одной из зон на поверхности: для Si *p*-типа — ЗЗПС, для Si *n*-типа — ЗНПС. Смена знака сигнала ПФЭДС в коротковолновой области энергий фотонов связана с появлением дополнительного механизма, обусловленного переходом электронов из ОВЗ на глубокие уровни примеси ОПЗ или в ЗНПС (Si *p*-типа), с глубоких уровней примеси или с ПС — в объемную зону проводимости (Si *n*-типа).

Установлено, что изменение работы выхода с уменьшением температуры также связано с присутствием неравновесного излучения, так как эталонный электрод и образец находятся при разных температурах.

Авторы благодарят Жохова Г.И. за техническое содействие в проведении данной работы.

#### Литература

1. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. Пер. с англ. под ред. Ж.И.Алферова и В.С.Вавилова, М. Мир, 1973, с. 346.
2. Allen F.G., Gobel G.W. Phys. Rev., 1962, 127, 150.
3. Chiarotti G., Nannarone S., Pastore R., Chiaradia P. Phys. Rev. B, 1971, 4, 3398.
4. Froitzheim H., Ibach H., Mills D.L. Phys. Rev., B, 1975, 11, 3917.
5. Assmann J., Mönch W. Surf. Sci., 1980, 99, 34.

Московский  
институт стали и сплавов

Поступила в редакцию  
21 октября 1983г.