

**О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ЗАВИСИМОСТИ
КОНДЕНСАТОРНОЙ ФОТОЭДС ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
В СИСТЕМЕ Si—SiO₂**

С. А. ЗАЙДМАН, Н. К. КУРЫНДИНА, Д. И. СВИРЯКИН

(Представлена научным семинаром НИИ ЭИ)

Метод конденсаторной фотоэдс нередко используется для определения как объемных параметров полупроводников [1, 2], так и характеристик поверхности [3, 4]. Нас интересовали возможности метода при исследовании энергетического спектра и определении плотности поверхностных состояний в системе полупроводник—диэлектрик в условиях работы с системами без нанесения металлического электрода непосредственно на пленку диэлектрика. Это давало принципиальную возможность исследования пленок произвольных толщин.

В качестве объекта исследования была выбрана система Si—SiO₂, для которой, благодаря малой концентрации центров захвата, мы могли определить поверхностный потенциал U_{so} методом эффекта поля и для которой наблюдалась модуляция сигнала фотоэдс внешним электрическим полем. В работе использовался Si р-типа с удельным сопротивлением 700 ом·см. Окисление проводилось в цикле сухой—влажной—сухой кислород при температуре 1200°С с последующим подтравливанием пленки в кислотном травителе. Для измерения конденсаторной фотоэдс и эффекта поля применялись методики, описанные в работах [3, 5]. Знак фотоэдс определялся при несимметричной импульсной модуляции света по калибровочному сигналу от стандартного импульсного генератора. Положительным считался сигнал, когда к поверхности двигаются дырки. Частота модуляции светового потока обеспечивала получение стационарного значения фотоэдс.

Для оценки возможностей метода нами были проведены расчеты зависимости конденсаторной фотоэдс ΔU_{ϕ} от U_{so} для параметров системы Si—SiO₂, использовавшейся в работе. Расчеты проводились в предположении постоянства квази-уровней Ферми в приповерхностной области пространственного заряда как для случая отсутствия поверхностных состояний, так и при учете влияния поверхностных состояний одного или нескольких типов. Для расчета зависимостей $\Delta U_{\phi} = \Delta U_{\phi}(U_{so})$ при малых уровнях инжекции мы воспользовались формулой, полученной Фрэнклом и Альмером [6].

Вычисления были проведены с помощью ЭВМ «Мир-1». Некоторые результаты представлены на рис. 1, они имеют вполне ясный физический смысл. Здесь даны расчетные зависимости конденсаторной фотоэдс от поверхностного потенциала для различных параметров поверхностных центров:

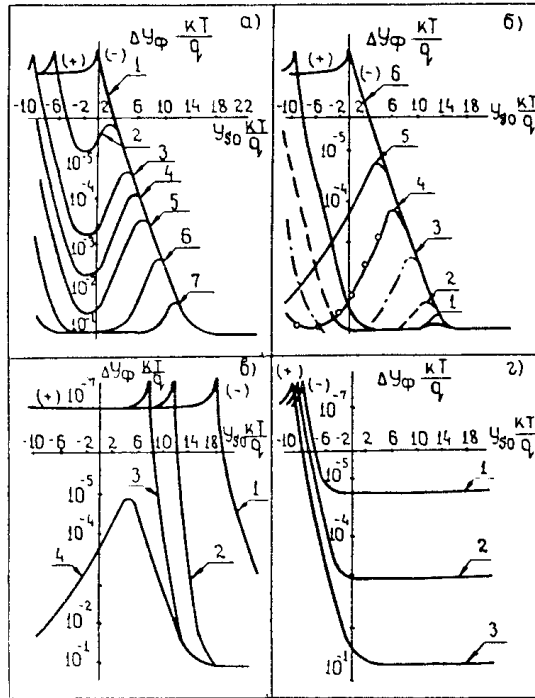


Рис. 1. Расчетные зависимости конденсаторной фотоэдс от поверхностного потенциала для различных параметров поверхностных центров

- а) $\lambda = \frac{P_0}{n_i} = 10^3$. $\nu = \frac{E_t - E_i}{kT} = -kT$. Отношение сечений захвата $\frac{C_p}{C_n} = 0$. $N_t \frac{\text{СОСТ}}{\text{см}^2} = 0, 10^6, 10^8, 10^9, 10^{10}, 10^{12}, 10^{14}$ для кривых 1—7 соответственно.
- б) $\lambda = 10^3$. $\frac{C_p}{C_n} = 0$. $N_t = 10^{12} \frac{\text{СОСТ}}{\text{см}^2}$ $\nu [kT] = 0, -5, -10, -15, -20, +20$ для кривых 1—6 соответственно;
- в) $\lambda = 10^3$. $\nu = -20kT$. $N_t = 10^{12} \frac{\text{СОСТ}}{\text{см}^2}$ $\frac{C_p}{C_n} = \infty, 10^5, 10^3, 0$ для кривых 1—4 соответственно;
- г) $\nu = 0$. $N_t = 10^{12} \frac{\text{СОСТ}}{\text{см}^2}$ $\frac{C_p}{C_n} = 0$, $\lambda = 10, 10^2, 10^3$ для кривых 1—3 соответственно.

При любых значениях параметров поверхностных состояний фотоэдс изменяется между предельными значениями насыщения [3], но форма кривой в целом и особенности, обусловленные наличием центров захвата, весьма чувствительны к параметрам поверхностных состояний, что позволяет, имея набор зависимостей $\Delta U_\phi = \Delta U_\phi(Y_{s0})$ с учетом влияния захвата на поверхностные центры, оценить значения их параметров. Как видно из рис. 1, а, в области плоских зон, где при отсутствии поверхностных состояний значение фотоэдс равно нулю (Демберовский потенциал мал), захват неравновесных электронов приводит к дополнительному «изгибу зон» вверх, чему соответствует отрицательный знак фотоэдс.

Начало процесса захвата зависит от концентрации поверхностных состояний (1, а) и их энергетического положения (рис. 1, б). При дости-

жении некоторого обогащения захват неосновных носителей не может привести к существенному дополнительному изгибу зон. В связи с этим при некоторых U_{sc} (величина U_{s0} при этом зависит от N_t и энергетического положения поверхностных состояний) начинается падение сигнала фотоэдс. Захват основных носителей (дырок) приводит к появлению фотоэдс противоположного (по сравнению со случаем $N_t = 0$) знака, при этом величина суммарной фотоэдс падает. Если N_t велико и захват дырок эффективен, то это приводит даже к смене знака в области инверсии (рис. 1, в). В случае, когда сечения захвата электронов и дырок равны, основное влияние на ход зависимости $\Delta U_\phi = \Delta U_\phi(U_{s0})$ оказывает захват основных носителей. Уменьшение λ ведет к уменьшению барьерной фотоэдс в области инверсии; при $\lambda < 10^3$ захват неравновесных электронов на поверхностные состояния вносит основной вклад в фотоэдс в

области потенциалов $-8 \frac{kT}{q} < U_{s0} < 22 \frac{kT}{q}$ (рис. 1, г).

Экспериментальные зависимости $\Delta U_\phi = \Delta U_\phi(U_{s0})$ при различных уровнях инжекции неравновесных носителей $\delta = \frac{\delta_p}{n_i}$ приведены на рис. 2 (уровень инжекции определялся по фотопроводимости). Здесь кри-

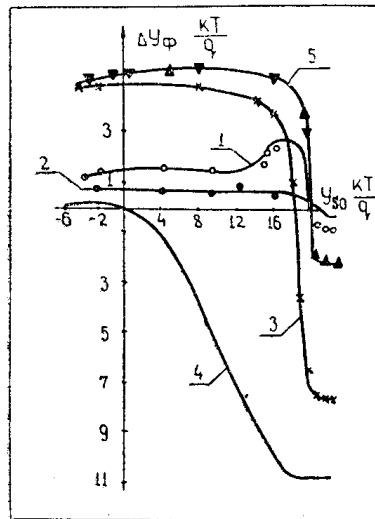


Рис. 2. Зависимость конденсаторной фотоэдс от поверхностного потенциала

вая 1 дана для малых уровней инжекции; 2 — то же при постоянной подсветке; 3 — для больших уровней инжекции ($\delta = 50$) при объемной генерации; 4 — расчетная зависимость для $\delta = 50$, $N_t = 0$; 5 — экспериментальная зависимость при коротковолновой поверхностной генерации ($\delta < 50$).

Рисунок показывает, что зависимость $\Delta U_\phi = \Delta U_\phi(U_{s0})$ при малых δ имеет две особенности: присутствие избыточного положительного сигнала в области обеднения и инверсии и появление максимума в области $+17 \frac{kT}{q}$. Действие постоянной подсветки сглаживает максимум и приводит к уменьшению положительного сигнала. Особенно ярко максимум проявляется при понижении температуры до $T = 227^\circ \text{K}$ (рис. 3).

Сравнение расчетных зависимостей $\Delta U_\phi = \Delta U_\phi(U_{s0})$ с экспериментальной зависимостью показывает, что наблюдаемый ход экспериментальной кривой можно по крайней мере качественно объяснить захватом неравновесных электронов на поверхностные состояния (рис. 1, а и 2) и наличием избыточного положительного сигнала. Одной из особенностей избыточного сигнала является возрастание его величины при

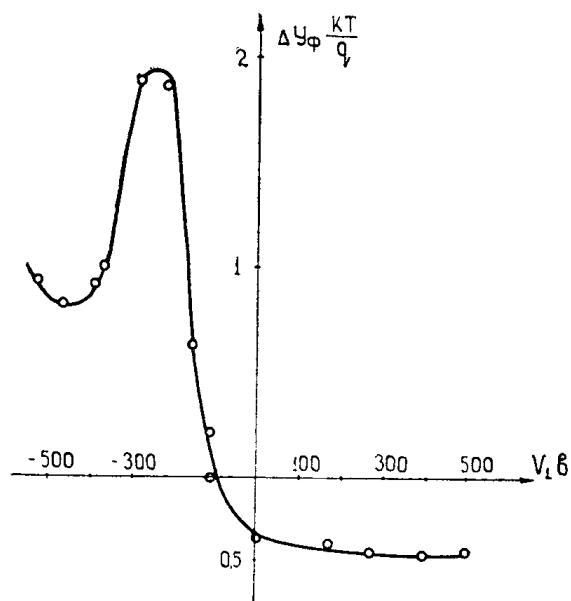


Рис. 3. Зависимость конденсаторной фотоэдс от напряжения на полевом электроде при $T = 227^\circ \text{K}$

переходе от объемной генерации неравновесных носителей к поверхностной (сравните кривые 3, 5 на рис. 2), что свидетельствует в пользу диффузионного механизма возникновения избыточного положительного сигнала. В работе [7] было показано, что конденсаторная фотоэдс представляет собой суперпозицию барьерной и диффузионной эдс. Однако рассчитанная по обычной формуле [8] эдс Дембера в условиях нашего эксперимента не превышала 10 тВ, что существенно ниже наблюдаемого экспериментально избыточного положительного сигнала. Учет влияния рекомбинации неравновесных носителей в приповерхностной области согласно работе [9] также не приводит к появлению избыточного сигнала. Таким образом, присутствие этого сигнала не объясняется в рамках существующей теории фотоэдс; его возникновение предположительно можно связать с диффузионными процессами в приповерхностной области при определенной обработке поверхности или с процессами в приконтактной области на границе диэлектрик — металл.

Поставленные дополнительно эксперименты показали, что в системе металл — диэлектрик — металл, если металлы имеют различную работу выхода, возникает разность потенциалов, по-видимому, вызванная химической реакцией в твердом теле с дефектами [4]. В нашем случае система довольно сложная и представляет М, ПД, D_2M_2 структуру. По-видимому, потенциал, возникающий на электродах при наличии разных металлов, вначале для малых значений U_{so} складывается, а затем с ростом U_{so} вычитается из фотоэдс.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. M. Loodman. Journ. Appl. Phys. 32, 2550, 1961.
2. Р. С. Нахмансон. ФТП. 4, 439, 1970.
3. E. O. Lonson Phys. Rev. 111, 153, 1958.
4. А. Риз. Химия кристаллов с дефектами. М., Изд. иностр. лит., 1956.
5. В. Г. Литовченко, О. В. Снитко. ФТТ, 2, 591, 1960.
6. D. R. Transe. E. A. Ulmer Surface Science, 6, 115, 1967.
7. И. А. Акимов, А. М. Мешков. ДАН, 162. 306, 1965.
8. С. М. Рывкин. Фотоэлектрические влияния в полупроводниках. М., Физматгиз, 1963.
9. К. А. Зуев, В. Г. Литовченко. Surface Science. 16, 751, 1966.