

УДК 621.382

МАЛОСИГНАЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ФОТОЭДС В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МДП-СТРУКТУРАХ

Н.С. АРАМЯН

Институт радиофизики и электроники НАН Армении

(Поступила в редакцию 15 сентября 2006 г.)

Проведен расчет малосигнальной поверхностной фотоэдс полупроводниковой МДП-структуры. В предположении постоянства заряда приповерхностной области полупроводника при освещении, для режима сильной инверсии получена простая формула для поверхностной фотоэдс, содержащая в явном виде мощность падающего света и параметры полупроводника. Из выражения для предельной частоты сигнала фотоэдс следует, что поверхностная фотоэдс обладает большой инерционностью, которая определяется зарядкой и разрядкой емкости приповерхностной области объемного заряда фоторожденными носителями. Измерена малосигнальная поверхностная фотоэдс на образцах МДП-структур из кремния *n*- и *p*-типов. Результаты расчета и эксперимента находятся в хорошем согласии.

1. Введение

Известно, что полупроводниковые МДП-структуры являются перспективными фотоприемниками, обладающими высокой чувствительностью [1-3]. Функционирование МДП-фотоприемников основано на явлении поверхностной фотоэдс, исследованной в ряде работ [4-6]. Расчет поверхностной фотоэдс усложняется необходимостью учета изменения заряда в приповерхностной области полупроводника при освещении, а также учета концентрации избыточных носителей, созданных светом. Результатом такого расчета является семейство кривых зависимости заряда в приповерхностной области полупроводника от величины изгиба зон, соответствующее различным мощностям падающего излучения, из которого можно графически определить изменение величины изгиба зон, т.е. поверхностную фотоэдс, при данном освещении [5]. Наличие поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик приводит к рекомбинации неравновесных носителей, что также влияет на величину поверхностной фотоэдс. При исследовании чувствительности МДП-фотоприемника желательно иметь аналитическое выражение для величины сигнала фотоэдс, учитывающее зависимость сигнала от мощности падающего излучения и параметров полупроводника.

В данной работе в предположении малости сигнала и при условии постоянства заряда в приповерхностной области полупроводника проведен расчет поверхностной фотоэдс, а также измерена малосигнальная поверхностная фотоэдс в МДП-структурах из кремния *n*- и *p*-типов. Результаты расчета сравниваются с экспериментом.

2. Расчет малосигнальной поверхностной фотоэдс

Рассмотрим МДП-структуру из полупроводника n -типа, к которой приложено постоянное напряжение обедняющей полярности (рис.1). Полагаем, что фиксированный заряд в слое диэлектрика, а также заряд быстрых поверхностных состояний малы, так что в отсутствие смещения соблюдается условие плоских зон. Наличие быстрых поверхностных состояний приводит к рекомбинации части рожденных светом носителей у поверхности. Расчет проведем при следующих допущениях:

1. В процессе освещения заряд в приповерхностной области полупроводника остается постоянным

$$Q_s = \text{const} . \quad (1)$$

Данное условие, относительно просто реализуемое на практике, означает, что ток во внешней измерительной цепи является минимальным (отсутствует натекание заряда к обкладкам МДП-конденсатора), поэтому наблюдаемая поверхностная фотоэдс есть в «чистом» виде фотоэдс холостого хода.

2. Величина сигнала поверхностной фотоэдс мала

$$|\phi_s| \ll \frac{kT}{q} , \quad (2)$$

где ϕ_s – комплексная амплитуда сигнала фотоэдс, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, q – заряд электрона. Малость сигнала поверхностной фотоэдс характерна при использовании МДП-структуры в качестве порогового фотоприемника, при этом величина сигнала бывает порядка единиц и десятков микровольт, так что условие (2) выполняется с большим запасом.

3. Имеет место режим сильной инверсии в приповерхностной области, при котором сигнал поверхностной фотоэдс максимален:

$$p_{s_0} \gg N_d , \quad (3)$$

где p_{s_0} – темновая поверхностная концентрация неосновных носителей (дырок); N_d – концентрация легирующей примеси (доноров) в полупроводнике.

Допустим, что МДП-структура освещается светом, модулированным по гармоническому закону:

$$W(t) = \dot{W} e^{j\omega t} , \quad (4)$$

где $W(t)$ – зависящая от времени мощность падающего излучения на единицу поверхности полупроводника, $\dot{W}$ – комплексная амплитуда, ω – круговая частота.

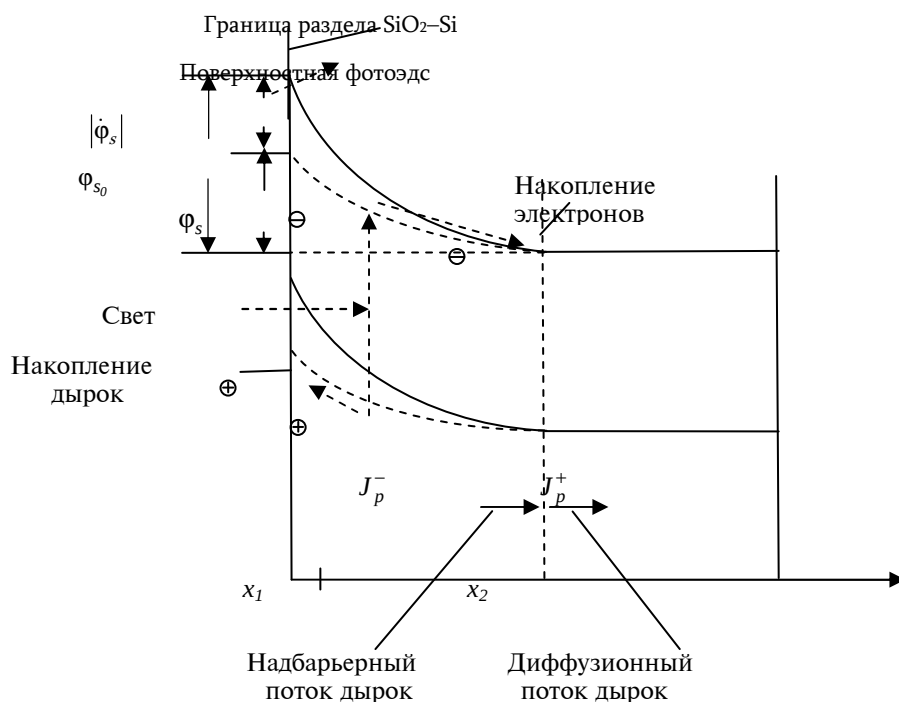


Рис.1. Зонная диаграмма МДП-структуры, используемая при расчете малосигнальной поверхностной фотоэдс, x_1 – граница области сильной инверсии $p(x_1) = N_d$; x_2 – граница области объемного заряда.

Можно показать [7], что имеет место соотношение

$$Q_s = (2q\epsilon\epsilon_0)^{\frac{1}{2}} \left(N_d \varphi_s + p_s \frac{kT}{q} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость полупроводника; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; Φ_s и p_s – величины изгиба зон и поверхностной концентрации дырок в полупроводнике. Q_s – заряд приповерхностной области полупроводника на единицу поверхности. Условие малости сигнала фотоэдс позволяет написать

$$\varphi_s(t) = \varphi_{s_0} + \dot{\varphi}_s e^{j\omega t}, \quad p_s(t) = p_{s_0} + \dot{p}_s e^{j\omega t}, \quad (6)$$

где Φ_{s_0} и p_{s_0} – постоянные составляющие, а $\dot{\Phi}_s$ и $\dot{p}_s$ – комплексные амплитуды переменных составляющих. При $Q_s = \text{const}$ из (5) получаем

$$\dot{p}_s = -N_d \frac{q\dot{\phi}_s}{kT}. \quad (7)$$

Формула (7) отражает тот факт, что при освещении у поверхности накапливаются дырки, что приводит к уменьшению величины изгиба зон, т.е. $\dot{p}_s$ и $\dot{\phi}_s$ находятся в противофазе. От

поверхности в глубь полупроводника возникает надбарьерный поток дырок, которые за пределами области объемного заряда диффундируют совместно с электронами (рис.1). В стационарном состоянии должно быть

$$J_p^- = J_p^+, \quad (8)$$

где J_p^- – поток дырок от поверхности полупроводника к границе объемного заряда; J_p^+ – поток дырок от границы объемного заряда в глубь полупроводника. Для нахождения J_p^- рассмотрим кинетику накопления дырок в при-поверхностной области объемного заряда при освещении, описываемую уравнением

$$\frac{dp_{об}}{dt} = \frac{W(t)\lambda}{hc} G - J_p^-, \quad (9)$$

где $p_{об}$ – полное количество дырок в обогащенной области, приходящееся на единицу поверхности полупроводника; λ – длина волны падающего света; h – постоянная Планка, c – скорость света; G – коэффициент, учитывающий потери фоторожденных носителей на рекомбинацию у поверхности раздела полупроводник–диэлектрик и в области объемного заряда, а также потери света на отражение от поверхности МДП-структуры. Решение уравнения Пуассона для обогащенной области с использованием условия (3) приводит к формуле

$$p_{об} = \left(\frac{2kT\epsilon\epsilon_0}{q^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(p_s^{\frac{1}{2}} - N_d^{\frac{1}{2}} \right). \quad (10)$$

Из уравнения (9) с использованием (10) можно получить

$$J_p^- = \frac{1}{2} \left(\frac{2kT\epsilon\epsilon_0}{q^2 p_{s_0}} \right) j\omega N_d \frac{q\dot{\phi}_s}{kT} + \frac{W\lambda}{hc} G. \quad (11)$$

Для нахождения J_p^+ рассмотрим уравнение диффузии дырок при $x \geq x_2$ в нейтральной области полупроводника

$$\frac{d^2 \dot{p}(x)}{dx^2} - \frac{(1 + j\omega\tau_p)}{(L_p)^2} \dot{p}(x) = 0, \quad (12)$$

где $\dot{p}(x)$ – комплексная амплитуда переменной составляющей концентрации дырок; τ_p – время жизни дырок; L_p – диффузионная длина. Уравнение (12) приводит к формуле

$$J_p^+ = -D_p \left. \frac{d\dot{p}(x)}{dx} \right|_{x=x_2} = -\frac{D_p}{L_p} \left(1 + j\omega\tau_p \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{q\phi_{s_0}}{kT}} \left(p_{s_0} + N_d \right) \frac{q\dot{\phi}_s}{kT}, \quad (13)$$

где D_p – коэффициент диффузии дырок. Подстановка выражений (11) и (13) в соотношение (8) приводит к уравнению для $\dot{\phi}_s$ решение которого имеет вид

$$\Phi_s = -\frac{kT}{q} \frac{\frac{\dot{W}\lambda}{hc} G}{e^{-\frac{q\Phi_{s_0}}{kT}} (p_{s_0} + N_d) \frac{D_p}{L_p} (1 + j\omega\tau_p)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \left(\frac{2kT\epsilon\epsilon_0}{q^2 p_{s_0}} \right)^{\frac{1}{2}} j\omega N_d}. \quad (14)$$

Из опыта известно, что поверхностная фотоэдс обладает большой инерционностью, поэтому для получения высокой чувствительности МДП-фотоприемника выбирают частоты модуляции излучения порядка нескольких десятков герц, т.е. практически можно полагать для кремниевой МДП-структуры $\omega\tau_p \ll 1$. С учетом этого для действующего значения поверхностной фотоэдс получаем

$$|\dot{\Phi}_s| = \frac{kT}{q} \frac{\frac{|\dot{W}| \lambda}{hc} G}{e^{-\frac{q\Phi_{s_0}}{kT}} (p_{s_0} + N_d) \frac{D_p}{L_p} \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{np}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (15)$$

где $\omega_{np} = \frac{e^{-\frac{q\Phi_{s_0}}{kT}} (p_{s_0} + N_d) \frac{D_p}{L_p}}{\frac{1}{2} \left(\frac{2kT\epsilon\epsilon_0}{q^2 p_{s_0}} \right)^{\frac{1}{2}} N_d}$. Оценки показывают, что для образца МДП-струк-

туры из кремния КЭФ-4,5 предельная частота равна $\omega_{np} \approx 3,8 \cdot 10^{-2}$ Гц. На практике для произвольных образцов $\omega_{np} \ll \omega$. С учетом этого из (15) получаем выражение для вольт-ваттной чувствительности S_u :

$$S_u = \frac{kT}{q} \frac{\frac{\lambda}{hc} G}{\frac{1}{2} \left(\frac{2kT\epsilon\epsilon_0}{q^2 p_{s_0}} \right)^{\frac{1}{2}} N_d \omega}. \quad (16)$$

Из (16) видно, что в выражение для вольт-ваттной чувствительности входят параметры, определяющие емкость приповерхностной области объемного заряда. Влияние емкости на параметр S_u можно прояснить, если преобразовать выражение для ω_{np} к виду

$$\omega_{np} = \frac{1}{\left(\frac{kT}{q} \frac{L_p}{q p_n D_p} \right) \left(\frac{q^2 \epsilon \epsilon_0}{2kT p_{s_0}} \right)^{\frac{1}{2}} N_d} = \frac{1}{RC}, \quad (17)$$

где p_n – концентрация равновесных дырок в n -области; $R = \frac{kT}{q} \frac{L_p}{q p_n D_p}$ – сопротивление приповерхностной области объемного заряда постоянному току при малых постоянных

смещениях порядка $\frac{kT}{q}$; $C = q \frac{dp_{об}}{d\phi_s} = \left(\frac{q^2 \epsilon \epsilon_0}{2kTp_{s_0}} \right)^{\frac{1}{2}} N_d$ – емкость приповерхностной области

объемного заряда. Можно полагать, что рожденные светом электронно-дырочные пары разделяются в приповерхностной области объемного заряда и накапливаются по краям этой области, вызывая зарядание емкости приповерхностной области полупроводника. Этот процесс является достаточно медленным и ограничивает быстродействие МДП-фотоприемника.

3. Экспериментальные результаты

Измерения проводились при $T = 300$ К на МДП-структурах из термически окисленного кремния n - и p -типов с толщиной слоя $\text{SiO}_2 \sim 0,1$ мкм. На слой SiO_2 напылялась термическим испарением в вакууме полупрозрачная пленка Al или Au , пропускающая $\sim 80\%$ падающего света. Освещение производилось последовательностью прямоугольных импульсов света, источником излучения служил калиброванный арсенид-галлиевый светодиод АЛ106Б с максимумом излучения на длине волны $\sim 0,9$ мкм. Схема измерения содержала R_1C_1 -цепочку с МДП-структурой в качестве емкости. Частота модуляции излучения $f_{изл}$ удовлетворяла условию $f_{изл} \gg (1/R_1C_1)$, которое обеспечивает постоянство заряда в приповерхностной области объемного заряда при освещении. На рис.2 показана зависимость измеренных значений вольт-ваттной чувствительности S_u от концентрации легирующей примеси, по данным измерений на четырех образцах МДП-структур из кремния n -типа (КЭФ-4,5 и КЭФ-7,5) и из кремния p -типа (КДБ-5,2 и КДБ-0,5).

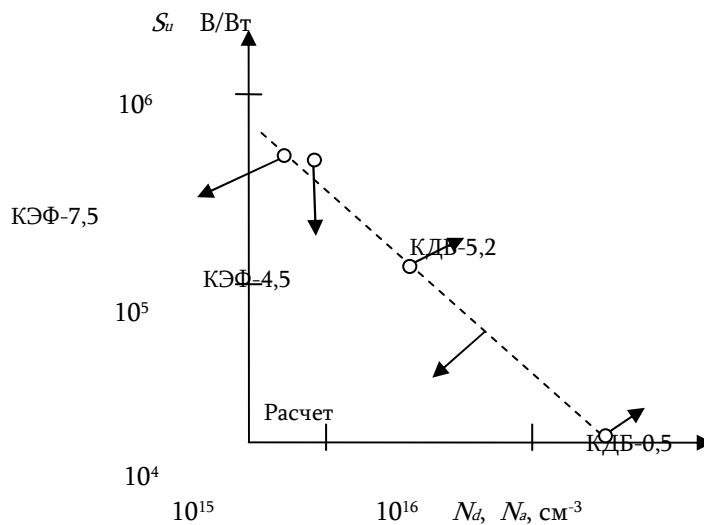


Рис.2. Зависимость измеренных значений вольт-ваттной чувствительности S_u от концентрации легирующей примеси по данным измерений на четырех образцах МДП-структур из кремния. Кружками обозначены экспериментальные точки.

Частота модуляции излучения равнялась 20 Гц, мощности падающего излучения и величины

сигналов были равны: КЭФ-7,5(2,0(10⁻⁹ Вт и 0,86 мВ); КЭФ-4,5(3,4·10⁻¹² Вт и 1,3 мкВ); КДБ-5,2(4,65·10⁻¹⁰ Вт и 51,2 мкВ); КДБ-0,5(2,0·10⁻⁹ Вт и 22,4 мкВ). Поскольку параметр G нам не был известен, расчетная кривая “привязывалась” вначале к образцу КДБ-0,5, затем вычислялись значения S_u для других образцов. Учитывая возможный разброс G от образца к образцу, согласие между расчетом и экспериментом можно считать хорошим.

4. Заключение

В приближении малости сигнала поверхностной фотоэдс получено выражение для расчета фотоэдс, содержащее в явном виде мощность падающего света и параметры полупроводниковой МДП-структуры. Показано, что поверхностная фотоэдс обладает большой инерционностью, которая определяется зарядкой и разрядкой емкости приповерхностной области объемного заряда фоторожденными электронами и дырками. Измерена малосигнальная поверхностная фотоэдс на образцах МДП-структур из кремния n - и p -типов. Результаты расчета и эксперимента находятся в хорошем согласии.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.Sher, R.K.Crouch, et al. Appl. Phys. Lett., **32**, 713 (1978).
2. В.А.Зуев, В.Г.Попов. Фотоэлектрические МДП-приборы. М., Наука, 1983.
3. Н.В.Ковтонюк, В.П.Мисник, А.В.Соколов. ФТП, **39**, 1336 (2005).
4. А.В.Ржанов. Электронные процессы на поверхности полупроводников. М., Наука, 1971.
5. А.Ф.Плотников, В.С.Вавилов. ФТП, **7**, 878 (1973).
6. Н.А.Пенин. ФТП, **35**, 1208 (2001).
7. С.Зи. Физика полупроводниковых приборов. М., Мир, 1984.

ՀԻՍԱՀԱՂՈՂՐԶԱՅԻՆ ՄՐԿ-ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՓՈՔՐ-ԱԶԴԱՆՇԱՆԱՅԻՆ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ՖՈՏՈԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱԿԱՆ Ն.Ս. ԱՐԱՄՅԱՆ

Հաշվարկված է կիսահաղորդչային ՄՐԿ-կառուցվածքի փոքր-ազդանշանային մակերևութային ֆոտոէլեկտրոնային ճնշմանը: Ենթադրելով կիսահաղորդչի մերձմակերևութային լիցքի անփոփոխությունը լուսավորման ընթացքում, ուժեղ ինվերսիայի ռեժիմի համար ստացված է ֆոտոէլեկտրոնային հասարակ բանաձև, որը պարունակում է ընկնող լույսի հզորությունը և կիսահաղորդչի պարամետրները: Չափված է n - և p -տիպի սիլիցիումից պատրաստված ՄՐԿ-կառուցվածքների փոքր-ազդանշանային մակերևութային ֆոտոէլեկտրոնային ճնշմանը: Հաշվարկի և փորձի արդյունքները գտնվում են լավ համաձայնության մեջ:

SMALL-SIGNAL SURFACE PHOTOEMF IN SEMICONDUCTOR MIS-STRUCTURES

N.S. ARAMYAN

The small-signal surface photoemf in semiconductor MIS-structures is calculated. Assuming near-surface region charge constancy at illumination, for strong inversion regime a simple formula for the surface photoemf is obtained containing the power of illumination and semiconductor parameters. Small-signal photoemf on MIS-structure samples from silicon of n - and p -types is measured. The calculated and experimental results are in good agreement.