



УДК 621.382

## ФАЗОВЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ФОТООТКЛИКА МДП – КОНДЕНСАТОРНОЙ ЯЧЕЙКИ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

БОРОДИН Б.Г., СМУГЛИЙ В.И.

Исследуется фазовый метод регистрации фотоотклика МДП – конденсаторной структуры с целью оптимизировать условия выделения сигнала многоэлементного фотопреобразователя, основанный на измерении фазового сдвига напряжения на структуре относительно возбуждающего. Показывается, что при оптимальном выборе параметров электрического возбуждения выходной сигнал обнаруживает слабую зависимость от количества фоточувствительных ячеек, а предлагаемую методику можно использовать в системах преобразования изображений с высоким разрешением.

Предъявляемые к ИК – приемным системам требования высокого отношения сигнал/шум и пространственного разрешения приводят к необходимости, с одной стороны, увеличить площадь чувствительной поверхности приемника, а с другой – применять многоэлементный приемник с высокой плотностью упаковки отдельных элементов малого размера. Среди известных в настоящее время типов фотопреобразователей указанные характеристики весьма высоки у МДП – фотоконденсаторов, что объясняет повышенный интерес к ним [1, 2].

По способу регистрации сигнала МДП – фотоконденсаторы делятся на три группы, в которых измерительную информацию получают, соответственно, путем непосредственной регистрации изменения емкости при освещении (фотоварикапы); посредством измерения конденсаторной фото – ЭДС; определением тока дозарядки емкости структуры [1, 3].

В предлагаемой работе исследуются возможности фазового метода регистрации фотоотклика МДП – конденсатора, основанного на измерении фазового сдвига напряжения на структуре относительно возбуждающего. Важным достоинством метода является обеспечение слабой зависимости выходного сигнала от паразитного влияния параметров неподключенных ячеек в многоэлементной структуре, а также высокая чувствительность фотопреобразователя при высокой плотности упаковки значительного числа фоточувствительных элементов. Исследования были проведены с помощью анализа математической модели линейного фотоемкостного эффекта в МДП – конденсаторной структуре (рис.1), предложенной авторами [4], где для расчета параметров использован импедансный метод.

Импеданс анализируемой структуры без учета влияния центров захвата и рекомбинации границы раздела диэлектрик – полупроводник может быть записан в следующем виде [4]:

$$Z^{-1} = -\frac{e}{kT} j\omega \sum_{n,p} \frac{\partial Q_{n,p}}{\partial y_s} - \frac{e}{kT} \omega^2 \sum_{n,p} \frac{\partial Q_{n,p}}{\partial \Delta_n} \times \frac{\partial Q_p}{\partial y_s} \times \frac{\partial Q_p}{\partial \Delta_n} \cdot \frac{1}{e^2} \cdot \frac{1}{Z_d}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота питающего напряжения;  $Q_{n,p}$  – заряд электронов и дырок в области пространственного заряда (ОПЗ), соответственно;  $y_s$  – безразмерный поверхностный потенциал;  $\Delta_n = \Delta n/n_0$  – уровень фотовозбуждения структуры;  $n_0$  – равновесная концентрация электронов;

$Z_d = \frac{kT}{e^2} \cdot \frac{\sqrt{\tau_v(1+\Delta_n)}}{\sqrt{D_p n_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+j\omega\tau_v}}$  – импеданс диффузионной области квазинейтрального объема;  $\tau_v$  – объемное время жизни неосновных носителей заряда;  $D_p$  – диффузионная константа для дырок.

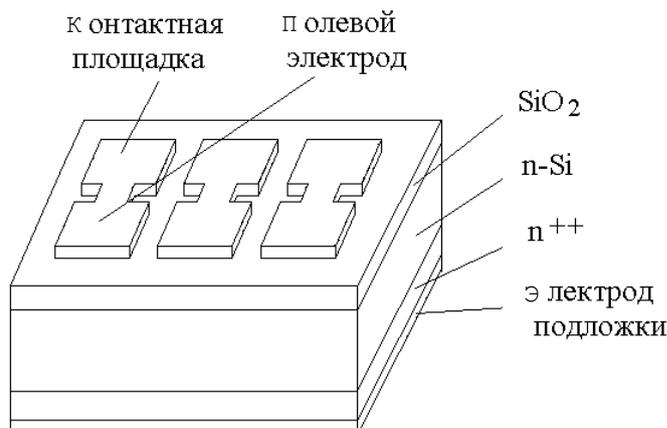


Рис.1. Схематическое изображение линейки фоточувствительных МДП-конденсаторных ячеек

Величина фазового сдвига находилась в результате выделения активной ( $Z'$ ) и реактивной (емкостной  $Z''$ ) составляющих проводимости структуры:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Z''}{Z'}. \quad (2)$$

Чтобы обеспечить максимальный фотоемкостный эффект в структуре и слабое влияние емкости диэлектрического слоя ( $C_d$ ) на величину исследуемого фазового сдвига, выбор параметров структуры и режимов электрического возбуждения осуществлялся из условия  $C_d \gg C_{опз}$ . Учитывая, что типичное значение толщины  $\text{SiO}_2$  большинства современных интегральных схем составляет 12,5 нм (а расчетное значение его удельной емкости –  $8,5 \cdot 10^{-3}$  ф/м), такое условие легко реализовать в структурах со степенью легирования подложки  $n_0 < 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (для n-

Si) на частоте модуляции питающего напряжения выше 100 кГц в области истощающих и инверсионных изгибов зон у поверхности полупроводника.

Вместе с чисто емкостным сопротивлением области основных носителей вклад в измеряемый на опыте импеданс могут внести емкость и проводимость области неосновных носителей заряда, а также поверхностных электронных состояний. В связи с этим даже в простейшем случае, когда плотность состояний на поверхности пренебрежимо мала, эквивалентная схема МДП-конденсатора содержит несколько активных и реактивных сопротивлений (рис. 2) [3]. Природа активной проводимости связана с конечным временем установления генерационно-рекомбинационного равновесия в МДП-структуре, которое в темновых условиях однозначно определяется параметрами генерационно-рекомбинационных центров и состоянием приповерхностной ОПЗ.

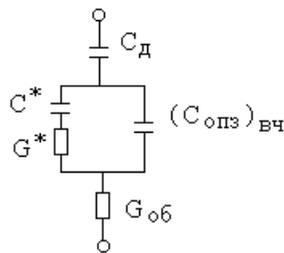


Рис. 2. Эквивалентная схема структуры МДП без поверхностных электронных состояний:

$C_d$  – емкость диэлектрика;

$C^* = (C_{опз})_{нч} - (C_{опз})_{вч}$ ;  $G^*$  – эффективная дифференциальная проводимость ОПЗ;  $G_{об}$  – проводимость объема полупроводникового материала;  $(C_{опз})_{нч}, (C_{опз})_{вч}$  – низко- и высокочастотная емкость ОПЗ, соответственно

Освещение системы МДП приводит к увеличению генерационного потока, что в стационарных по освещению условиях сопровождается равным ему по величине возрастанием темпа рекомбинации. Соответственно с ростом интенсивности света уменьшаются характеристические времена установления генерационно-рекомбинационного равновесия, что равносильно увеличению активной проводимости [3].

На рис. 3, а, б приведены результаты численного расчета темновых значений фазового сдвига переменного напряжения на МДП-структуре в зависимости от его частоты ( $\omega$ ), уровня постоянного смещения ( $U_{см}$ ) и параметров кремниевой подложки.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что в области инверсионных изгибов зон у поверхности полупроводника при высокочастотном смещении МДП-структуры емкости, а соответственно и проводимость ОПЗ мала по сравнению с проводимостью диффузионной области квазинейтрального объема. Таким образом, доминирующий вклад в измеряемое значение фазового сдвига вносит ОПЗ, которая имеет чисто реактивный (емкостной) характер проводимости и, соответственно, величина фазового сдвига напряжения на структуре относительно питающего в рассматриваемой области стремится в сторону значений, близких к  $90^\circ$ .

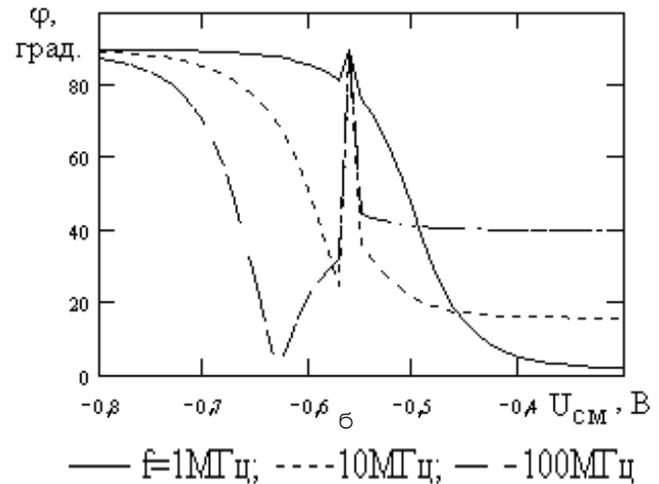
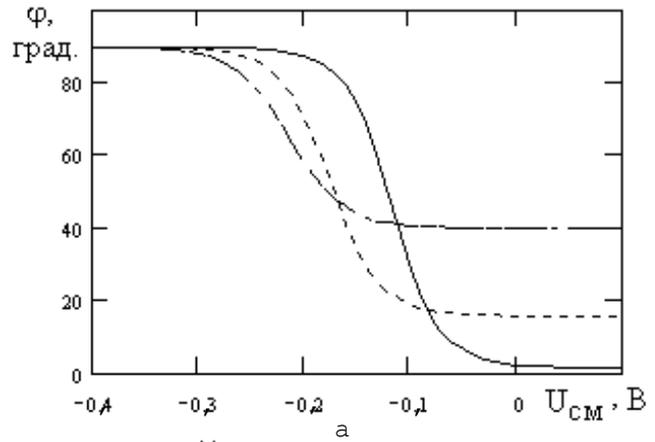


Рис. 3. Темновое значение фазового сдвига напряжения на МДП-структуре относительно питающего:  $\tau_v = 10^{-8}$  с; а –  $n_0 = 10^{15}$  см $^{-3}$ ; б –  $n_0 = 10^{11}$  см $^{-3}$

В области обогащающих изгибов зон у поверхности полупроводника – наоборот, доминирующий вклад в измеряемое значение темнового фазового сдвига вносит диффузионная область квазинейтрального объема. При этом, как следует из аналитического выражения для  $Z_d$  [4], его величина не зависит от уровня фотовозбуждения структуры, а определяется соотношением вида

$$\varphi = \arctg \frac{Z''}{Z'} = 0,5 \cdot \arctg \omega \tau_v. \quad (3)$$

В случае высокоомной подложки (рис. 3, б) равенство проводимости ОПЗ и диффузионной области квазинейтрального объема обнаруживается при истощающих изгибах зон у поверхности полупроводника и проявляется в виде характерного "всплеска" фазовой зависимости.

Из сказанного выше следует, что освещение МДП-конденсаторной структуры не будет вносить изменение в измеряемое значение фазового сдвига при обогащающих и инверсионных изгибах зон у поверхности полупроводника. Эти режимы электрического возбуждения структуры могут быть использованы для исходной калибровки измерительного тракта.

На рис. 4, а, б показано изменение фазового сдвига напряжения на МДП-фотоконденсаторе при его освещении.

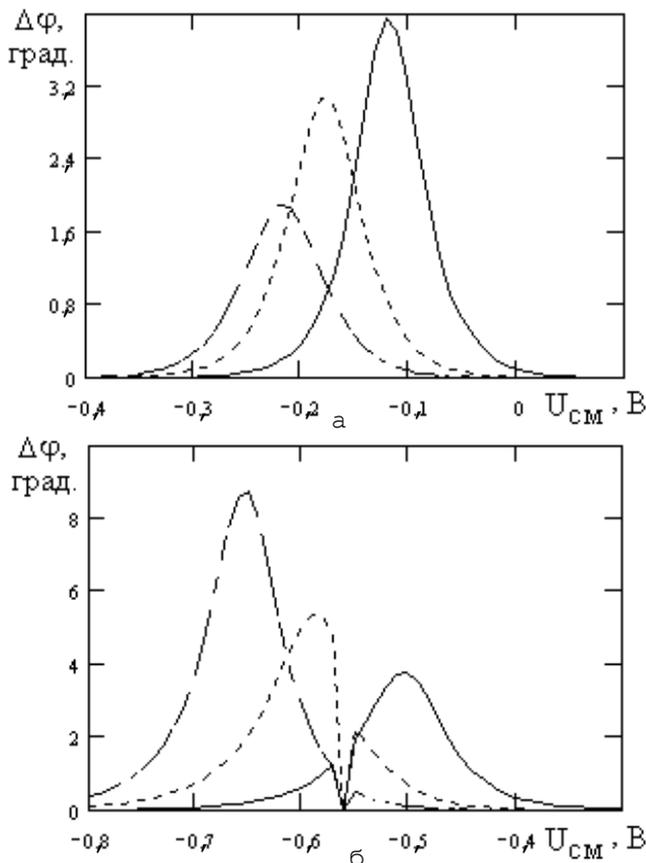


Рис. 4. Зависимости изменения фазового сдвига при освещении структуры ( $\Delta n = 0.1$ )

Из представленных зависимостей следует, что измеряемый фазовый сдвиг чувствителен к фотовозбуждению конденсаторной МДП-структуры в области истокающих изгибов зон у поверхности полупроводника, причем его величина слабо зависит от параметров полупроводникового материала и определяется выбором режимов электрического возбуждения. Дополнительные исследования показали, что в рамках линейной модели фотоемкостного эффекта в МДП-структуре величина  $\Delta\phi$  также линейно связана с уровнем фотовозбуждения.

Оценка чувствительности регистрации фотоотклика конденсаторной МДП-структуры свидетельствует о достаточно высоких показателях рассмотренного типа фотоприемных устройств. Так, современные кремниевые приемники ИК-излучения МДП и резистивного типа обеспечивают максимальную обнаружительную способность порядка  $(1..5) \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$  [2]. При этом число неравновесных фотогенерированных носителей заряда составляет порядка  $(2..5) \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ . Учитывая, что минимальное регистрируемое значение фазового сдвига составляет  $0,1..1 \text{ м}^\circ$  [5], указанное значение обнаружительной способности, как следует из численного решения (1), реализуется в МДП-структурах конденсаторного типа со слабо легированной подложкой ( $n_0 < 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ).

Таким образом, можно предложить следующий оптимизированный режим электрической коммутации МДП-конденсаторной ячейки многоэлементного фотопреобразователя. В неактивном состоянии структуры приповерхностная ОПЗ находится в области обогащения, причем требуемая величина посто-

янного напряжения смещения (меньше 400 мВ) легко обеспечивается встроенным в окисел частотно-независимым зарядом (рис. 1). При этом измеряемое значение фазового сдвига обнаруживает минимальную величину и также не зависит от уровня фотовозбуждения структуры. Выбор параметров электрического возбуждения целесообразно осуществлять из условия равенства нулю измеряемого фазового сдвига (рис. 3). При этом неподключенные ячейки многоэлементного фотопреобразователя не вносят дополнительного фазового сдвига в измеряемое значение. Этот режим оптимален для осуществления исходной (темновой) калибровки измерительного тракта.

В активном состоянии на структуру подается отрицательное постоянное напряжение смещения, которое в большинстве случаев не превышает 500 мВ. При этом приповерхностная ОПЗ выводится в рабочую область – истощение, где фоточувствительность структуры обнаруживает максимальную величину.

Рассматриваемые режимы электрической коммутации обеспечивают хорошее взаимное невлияние параметров отдельных элементов на измеряемый параметр выходного сигнала фотопреобразователя. При этом чувствительность фотопреобразователя слабо зависит от количества фоточувствительных элементов. Значит, предлагаемая методика регистрации фотоотклика может использоваться в системах преобразования изображений с высоким разрешением (например, HDTV [6]). Другие известные типы фотопреобразователей в настоящее время не могут быть использованы в системе HDTV по двум причинам, связанным с требуемым количеством элементов и частотой сканирования изображения. При слишком большом количестве фоточувствительных элементов ( $1125 \times 2200$ ) и высокой частоте их сканирования (74,25 МГц) измеряемый параметр выходит за пределы чувствительности регистрируемой техники.

**Литература:** 1. Ковтонюк Н. Ф., Сальников Е. Н. Фоточувствительные приборы для преобразования изображений. М.: Радио и связь, 1990. 160 с. 2. Зуев В. А., Попов В. Г. Фотоэлектрические МДП-приборы. М.: Радио и связь, 1983. 160 с. 3. Литовченко В. Г., Горбань А. П. Основы физики микроэлектронных систем металл – диэлектрик – полупроводник. К.: Наук. думка, 1978. 316 с. 4. Sachenko A. V., et. al. Photocapacitive Effect in MIS Structures // Phys. Stat. Sol. (A) 21, 345 (1974). 5. Stane Ciglaric, et. al. Special considerations for alternatively designed digital phase angle standard // IEEE Trans. on Instrum. and Meas., Vol. 47, No. 1, Feb. 1998. P. 199–203. 6. ATSC Digital Television Standard. Doc. A/53. 16 Sep. 95.

Поступила в редколлегия 02.03.99

**Рецензент:** д-р техн. наук Алешин Г. В.

**Бородин Борис Григорьевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры МЭПУ ХТУРЭ. Научные интересы: твердотельные преобразователи изображений. Адрес: Украина, 310022, Харьков, пр. Правды, 5, кв. 255. тел. 30–31–58.

**Смутлий Виталий Игоревич**, аспирант кафедры МЭПУ ХТУРЭ. Научные интересы: твердотельные преобразователи изображений. Адрес: Украина, 310047, Харьков, ул. Плиточная, 65А, кв. 44.