Известия НАН Армении, Физика, т.61, №2, с.314–324 (2026)

УДК 530.839
DOI: 10.54503/0002-3035-2026-61.2-314

ТРАНСИМПЕДАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ВЫСОКООМНЫХ СЕНСОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ МОП-ФОТОВАРИКАП

Б.О. СЕМЕРДЖЯН, Д.А. КАНАНОВ*, М.С. АЛЕКСАНЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: d.kananov@ysu.am

(Поступила в редакцию 15 апреля 2026 г.)

В работе анализируются основные характеристики нового динамического конденсатора, являющегося поверхностным МОП-фотоварикапом, который используется в качестве модулирующего элемента при обнаружении сигналов от высокоомных сенсоров. Поверхностные МОП-фотоварикапы были изготовлены на высокоомных кремниевых подложках *p*-типа с тонким изолирующим слоем SiO_2 и полупрозрачным металлическим электродом. Модуляция емкости при трансимпедансном преобразовании осуществлялась путем освещения светодиодом фотоварикапа в оптроне, что приводило к появлению переменного напряжения на нагрузочном резисторе, которое впоследствии усиливалось и регистрировалось. При увеличении входного напряжения более 0.3 В выходной сигнал усилителя стремится к насыщению. При этом ёмкостью барьера является ёмкость слоя SiO_2. Это насыщение объясняется вхождением МОП-фотоварикапа в режим инверсионного канала. Результаты показывают, что МОП-фотоварикапы могут эффективно использоваться при измерении малых постоянных и медленно изменяющихся токов и напряжений от высокоомных сенсоров. Такой подход позволяет использовать этот электрометрический усилитель для регистрации величин: медленно изменяющихся концентраций газа, различных видов излучений и видов пучков частиц и т. д.

1. Введение

В настоящее время активно разрабатываются многоэлементные резисторные высокоомные сенсоры, чувствительные к различным видам излучения, потокам частиц и концентраций газов, которые имеют высокое сопротивление. С целью регистрации слабых токовых сигналов от резисторных сенсоров предлагается специализированный интерфейс — электрометрический усилитель, использующий структуру металл–оксид–полупроводник (МОП) и являющийся динамическим конденсатором в оптроне в качестве модулирующего устройства.

Принцип электрометрического измерения тока заключается в регистрации напряжения, генерируемого измеряемым током. Первичным преобразователем тока в напряжение является резистор, конденсатор или элемент с логарифмической зависимостью между током и напряжением [1–4].

В прецизионных электрометрических усилителях при измерении малых токов в высокоомных цепях используется, в основном, метод модуляции–демодуляции (МДМ). Кроме того, усилитель МДМ легко реализует необходимую

иногда гальваническую развязку входной и выходной цепей [5].

Существует три типа электрометрических усилителей с модуляцией на основе динамических конденсаторов. Это модуляторы на основе электромеханических динамических конденсаторов, которые имеют короткий срок службы и не надёжны, MOSFET-транзисторов или фотоварикапов на основе *p-n* переходов. Как электрометрический усилитель мы предлагаем усилители МДМ на основе оптрона с МОП-фотоварикапным трансимпедансным преобразователем.

Если в оптроне используется полупроводниковый конденсатор, чувствительный к световому потоку фотоварикап, то в результате получается реактивный управляемый элемент, который можно назвать реактивным оптроном [6–9]. Для использования в реактивном оптроне предпочтительны фотоварикапы на основе МОП-структуры, поскольку они обладают более высоким коэффициентом перекрытия по емкости, высоким коэффициентом нелинейности и меньшей зависимостью сопротивления утечки от светового потока по сравнению с фотоварикапами на основе емкости *p-n* перехода. Максимальная спектральная чувствительность таких фотоварикапов находится в инфракрасной области спектра. Поэтому для реактивного оптрона необходимы источники инфракрасного излучения. При проектировании оптронов необходимо стремиться к максимальной передаче мощности светового потока от источника к приемнику излучения путем согласования показателя преломления среды между источником и приемником.

В настоящее время при выборе основных компонентов оптоэлектронного модулятора наиболее перспективными фотоварикапами для создания оптопар являются кремниевые МОП-структуры. Характеристики спектральной чувствительности кремниевых фотоварикапов хорошо согласуются со спектральными характеристиками излучения источников света на основе GaAs в широком диапазоне изменений электрических параметров.

Целью настоящей работы является представление результатов исследований динамических характеристик управляемого оптронного устройства с МОП-фотоварикапом в качестве реактивного элемента, работающего в линейном режиме преобразования входных медленно изменяющихся сигналов в высокоомных цепях.

2. Экспериментальная часть

Разработка планарных МОП-фотоварикапов позволяет реализовать на их основе управляемые оптронные устройства. Оптрон, состоящий из коммерчески доступного светодиода на основе GaAs и изготовленного нами фотоварикапа с МОП-структурой на основе Si с полупрозрачным контактом, представляет собой четырехконтактное устройство, в котором светодиод образует входную цепь, а фотоварикап – выходную цепь. Основные характеристики четырехконтактного устройства включают входные, передаточные и выходные характеристики. Дополнительный интерес представляют частотные и температурные характеристики оптрона.

Передаточная характеристика реактивного оптрона может быть определена как зависимость емкости фотоварикапов от входного тока. Емкость фотоварикапа зависит не только от светового потока, но и от приложенного к нему напряжения

смещения (bias voltage) U_{b}. Поэтому для реактивного оптрона следует рассматривать семейство передаточных характеристик, соответствующих различным напряжениям U_{b} на фотоварикапе. По мере увеличения напряжения наклон графика увеличивается. При входном токе светодиода ~10 мА фотоварикап насыщается. В исследуемом оптроне оптический контакт осуществлялся через воздух. Если пространство эмиттер–приемник заполнено веществом с показателем преломления n, близким к оптимальному ($n \approx 2.6$–2.8), значение тока насыщения уменьшится примерно вдвое. Семейство передаточных характеристик в ненасыщенных областях можно аппроксимировать прямыми линиями:

$$C = C_0 - nU_b + (k_0 + mU_b)I_{\text{in}}, \quad (1)$$

где $n = (\Delta C/\Delta U)_{I_{\text{in}}=0}$, $k_0 = (\Delta C/\Delta I_{\text{in}})U_b = 0$, $m = \Delta k/\Delta U$, $C_0 = C[U_{\text{b}} = 0;\ I_{\text{in}} = 0]$.

Когда фотоварикап работает в режиме высокого постоянного и низкого переменного напряжения, выходной характеристикой является зависимость емкости от постоянного напряжения на фотоварикапе при фиксированном входном токе, поэтому рассматривается семейство выходных характеристик. Выходные характеристики можно аппроксимировать прямыми линиями, как видно из (1), если в качестве параметра взять входной ток I_{in}:

$$C = C_0 + k_0 I_{\text{in}} - (n - mI_{in})U_b. \quad (2)$$

Температурный коэффициент емкости оптрона T_{CO} при $I_{\text{in}} \neq 0$ имеет меньшее значение по сравнению с температурным коэффициентом емкости T_{CP} фотоварикапа, поскольку температурный коэффициент светоизлучателя отрицательный, а фотоварикапа положительный, в результате чего происходит некоторая компенсация T_{CO}.

Были выбраны образцы кремния *p*-типа с различным удельным сопротивлением ρ = (10^2—10^4 Ом см). Поверхность образцов травили в полировальном травильном аппарате, после чего наносили тонкий слой (~1000 Å) SiO_2. На диэлектрический слой SiO_2 наносили полупрозрачный металлический электрод [10, 11]. При изготовлении фотоварикапа особое внимание уделялось обеспечению начального поверхностного потенциала кремния в области сильных зон изгиба, вызывающих истощение. При этом характеристика C–V МОП-структуры имела максимальную крутизну. Модуляцию емкости фотоварикапа осуществляли с помощью светодиода из GaAs [1, 10–13].

Было проведено сравнение работы двух схем трансимпедансного преобразователя электрометрического усилителя. В первом случае с МОП-фотоварикапным модулятором на измерительном сопротивлении R_{LS}, кроме медленно изменяющегося входного напряжения U_{b} при освещении синусоидально модулированным светом МОП-фотоварикапа из-за изменения её емкости, создаётся высокочастотное напряжение $U_{\sim}$. Во втором случае, с входным повторителем напряжения на операционном усилителе с МОП-транзисторами, на сопротивлении R_{LS} и на выходе операционного усилителя (повторителя напряжения) A_1 создаётся то же самое напряжение. Входные параметры электрометрического усилителя в этих случаях определяются входными параметрами фотоварикапного модулятора или входного повторителя напряжения.

Постоянный и медленно изменяющийся переменный ток сигнала сенсора от переключателя S проходит через высокоомное сопротивление R_{LS} и создает входное напряжение U_{in}, которое управляет емкостью фотоварикапа. Оно подается на

МОП-фотоварикап в первом случае или на вход операционного усилителя A_1 во втором случае. Сопротивление калибровки $R_C \sim 10^9$–10^{12} Ом имитирует внутреннее сопротивление сенсора.

Для входного повторителя был выбран сдвоенный операционный усилитель (LMC6492) с каскадами A_1, A_2 и минимальным током утечки затвора ~30 фА при напряжении питания 5 В, что при снижении напряжения питания привело к уменьшению тока утечки примерно на порядок. Первый каскад A_1 схемы выполнен в виде повторителя напряжения для согласования с высокоимпедансным источником в виде сенсора (рис.1). Второй усилитель A_2 в операционном усилителе используется для регулировки полосы пропускания усиления. Модулирующий генератор, с частотой 20 кГц управляющий светодиодом, на рисунке не показан. При освещении фотоварикапа этим синусоидально модулированным светом его емкость изменяется, и на измерительном сопротивлении нагрузки R_{LV} реализуется переменное напряжение от МОП-фотоварикапа пропорциональное медленному входному сигналу U_b, которое затем усиливается в A_2. После этого происходит демодуляция сигнала и запись. Весь электрометрический усилитель охвачен обратной связью. Использование полупроводниковых фотоварикапов в качестве динамических конденсаторов имеет свои особенности, поскольку в этом случае проблема развязки цепей модулирующего напряжения и преобразованного сигнала решается просто [6].

Для измерения уровня шума в качестве источника опорного тока использовался фототок ФЭУ-140 в диодном режиме (шум первого динода). На фотокатод подавалось отрицательное напряжение, а второй и последующие диноды были закорочены с анодом и подключены к входу электрометрического усилителя.

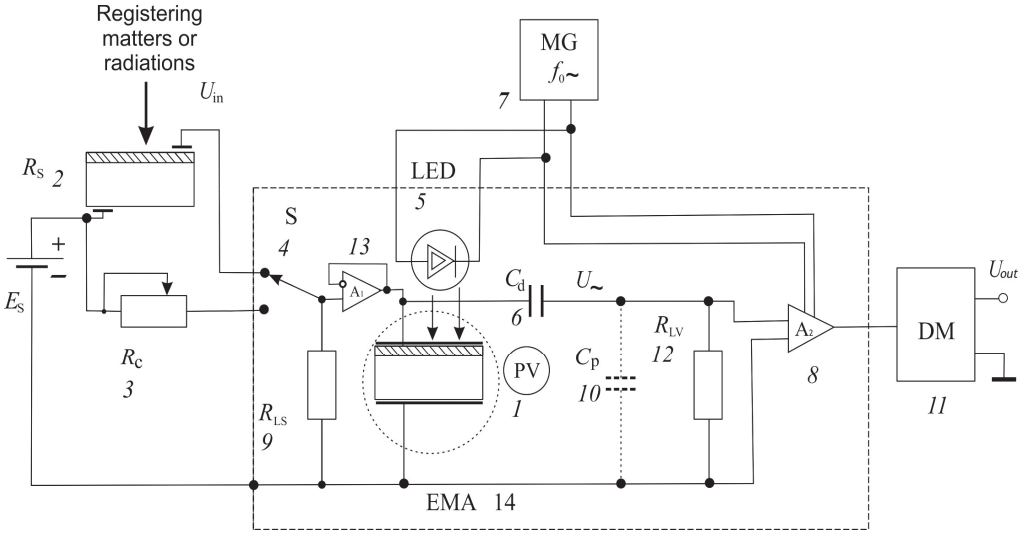


Рис.1. Блок-схема электрометрического усилителя сигнала с высокоомного сенсора: (*1*) МОП-фотоварикапный модулятор, (*2*) сенсор, (*3*) калибровочный резистор, (*4*) переключатель, (*5*) светодиод, (*6*) развязывающий конденсатор, (*7*) модулирующий генератор, (*8*) узкополосный усилитель, (*9*) сопротивление нагрузки сенсора, (*10*) паразитная емкость, (*11*) демодулятор, (*12*) сопротивление нагрузки фотоварикапа, (*13*) повторитель входного напряжения. (14) электрометрический усилитель.

Среди исследованных фотоумножителей фотокатод ФЭУ-140 показал самый низкий уровень шума. Расчетное значение среднеквадратичного значения шумового тока измерительного резистора электрометрического усилителя, согласно формуле Найквиста, $i_{R_{LS}}$

$$\sqrt{i_{R_{\mathrm{LS}}}^2} = \sqrt{(4\kappa T / R_{\mathrm{LS}}) \times \Delta f_{\mathrm{eff}}} = 2.1 \times 10^{-16}\ \mathrm{A}, \quad (3)$$

близко к измеренному значению. Закорачивание измерительного резистора снизило уровень шума на порядок. Измеренный среднеквадратичный уровень шума в диапазоне частот 0–0.1 Гц составил ~3×10^{-16} А, что близко к расчетному значению. Значение шума, определяемое спектральной плотностью тока утечки операционного усилителя A_1, оценивается примерно в ~0.2×10^{-16} А. Входное постоянное напряжение электрометрического усилителя пропорционально измеренному входному току I_{in} ($U_{\mathrm{in}} = R_{\mathrm{LS}}I_{\mathrm{in}}$; R_{LS} — сопротивление высокоомного измерительного нагрузочного резистора сенсора).

Входные электрические характеристики электрометрического усилителя с повторителем напряжения на операционном усилителе A_1 и без него были схожими. Входное сопротивление таких фотоемкостей по постоянному току определяется сопротивлением диэлектрического слоя, поэтому его можно сделать большим. Это обеспечивает высокий коэффициент добротности и достаточно низкий уровень шума. Входное сопротивление по переменному току определяется частотой входного сигнала, емкостью варикапа, разделительного конденсатора и сопротивлением нагрузки. Рассмотренные в [5, 14] модуляторы являются резисторами, управляемыми тем или иным способом, и генерируют тепловые, дробовые и мерцательные шумы. В МОП-фотоварикапных емкостных модуляторах дробовые шумы практически отсутствуют, а тепловые и мерцательные шумы весьма малы.

3. Результаты исследований и их обсуждение

Рассмотрим структуру МОП-фотоварикапа с полупроводником *p*-типа. Предположим, что к полупрозрачному электроду приложено постоянное положительное напряжение U_1 и что глубина приповерхностной области пространственного заряда в темноте равна d_{scr}. Если фотоварикап не освещен, то через него проходит небольшой темновой ток I_d. В этом случае напряжение на фотоварикапе равно

$$U_1 = E_{\mathrm{S}} - I_d R_S, \quad (4)$$

где E_{S} и R_{S} — напряжение питания и сопротивление сенсора. Если фотоварикап освещен, то фототок I_{ph} добавляется к току утечки. В этом случае напряжение на фотоварикапе U_2 равно:

$$U_2 = E_{\mathrm{S}} - \left(I_d + I_{\mathrm{ph}}\right)R_{\mathrm{S}}. \quad (5)$$

Таким образом, когда фотоварикап освещается, напряжение на нем изменяется на величину

$$U_1 - U_2 = I_{\mathrm{ph}}R_{\mathrm{S}}. \quad (6)$$

В этом случае емкость МОП-структуры также изменяется от значения, соответствующего напряжению U_1, до значения, соответствующего U_2 [6].

Освещение структуры МОП-фотоварикапа вызывает появление неравновесных электронов и дырок. Они генерируются в области пространственного заряда, а также в квазинейтральном объеме. Неравновесные носители, возникающие при освещении в приповерхностном слое, разделяются полем области пространственного заряда. Неосновные носители вытягиваются на поверхность и участвуют в формировании канала проводимости или заполнении поверхностных электронных состояний. При этом электрическое поле, создаваемое внешним источником, экранируется. Основные носители заряда выводятся полем в квазинейтральный объем [14–16].

Процесс перераспределения заряда продолжается с установлением стационарного состояния. Это соответствует равенству потоков генерации и рекомбинации. Глубина области приповерхностного пространственного заряда уменьшается до значения d_{ph}, что сопровождается увеличением емкости МОП-конденсатора. Это ситуация сохраняется до тех пор, пока уровень Ферми у границы $Si–SiO_2$ не совпадает с серединой запрещенной зоны. При дальнейшем увеличении смещения начинается приток электронов из объема полупроводника; имеет место инверсия типа проводимости, то есть накопление в этой области неосновных носителей. В режиме инверсионного канала значение емкости практически не зависит от температуры.

В общем случае характеристики МОП-фотоварикапа являются функциями напряжения, приложенного к затвору, освещености, скоростей поверхностной рекомбинации и фактора поверхностного прилипания [7, 15]. Коэффициент перекрытия по ёмкости фотоварикапа (модуляция емкости фотоварикапа) $K_C = \Delta C_{\max}/C_0$, определяющий эффективность МОП-конденсатора как управляемой емкости зависит от предельной емкости оксида и конструкции. При слабом освещении фотоварикап описывается коэффициентом светочувствительности K_{ph}. Он связан с коэффициентом нелинейности $K_{\text{n}} = (1/C)\ (\partial C/\partial U)$ соотношением $K_{\text{ph}} = K_{\text{n}}(\partial U/\partial F)$. В модуляторе электрометрического усилителя варикап используется, как управляемый реактивный элемент в цепи переменного тока. На изменение емкости варикапа затрачивается значительно меньшая энергия, переносимая проходящим через него переменным током, чем на активном сопротивлении. При синусоидальном воздействии светодиодного освещения на МОП-фотоварикап его емкость равна

$$C = C_0 + \Delta C_{\max}\sin\omega t. \tag{7}$$

Фотоемкостный модулятор в зависимости от значения постоянной времени цепи $R_{LS}C$ может работать в режиме заданного напряжения U_{c} или заданного заряда Q. В первом случае, то есть, когда $\omega R_{LS}C << 1$, мы получим $U_{\text{c}} \approx U_{\text{b}}$, и

$$Q \approx (C_o + \Delta C_{\max}\sin\omega t)\ U_b, \tag{8}$$

или

$$I = dQ/dt = U_b\omega\Delta C_{\max}\cos\omega t. \tag{9}$$

В этом случае выходное значение емкостного модулятора будет представлять собой электрический ток, величина которого пропорциональна входному постоянному напряжению смещения U_{b}. Во втором случае, когда $\omega R_{LS}C \gg 1$, при достаточно высокой частоте модуляции (f_0 = 25 кГц), емкость динамического

конденсатора-фотоварикапа подчиняется синусоидальному закону, так что за один период заряд в цепи не успевает измениться, т. е.

$$Q \approx C_0 U_\mathrm{b} = \mathrm{const}.$$

Затем

$$\begin{aligned} U_c = Q/C = C_0\,(U_\mathrm{b}/(C_0 + \Delta C_\mathrm{max}\sin\omega t)) \\ = U_\mathrm{b}(1 - (\Delta\, C_\mathrm{max}/C_0)\,\sin\omega t) = U_\mathrm{b} - U_\sim, \end{aligned} \tag{10}$$

при условии, что

$$K_C = \Delta C_\mathrm{max}/C_0 \ll 1.$$

Выходное значение полезного сигнала представляет собой переменную составляющую напряжения U_c, которая регистрируется после развязывающего конденсатора C_d:

$$U_\sim = U_\mathrm{b}(\Delta C_\mathrm{max}/C_0)\sin\omega t. \tag{11}$$

Были получены экспериментальные зависимости напряжения полезного сигнала $U_\sim$ на выходе модулятора от входного постоянного напряжения смещения U_b. Они представлены на рис.2. Рассмотрим коэффициент оптоэлектронного трансимпедансного преобразования напряжения модулятора K_T, который определяет отношение максимальной амплитуды напряжения модулированного сигнала $U_\sim$ на R_LV к значению постоянного напряжения смещения U_b, приложенного к фотоварикапу (т. е. выходному сигналу сенсора). Если $K_C \ll 1$, то

$$K_\mathrm{T} \approx K_C = \Delta C_\mathrm{max}/C_0. \tag{12}$$

Отсюда следует, что необходимо увеличить коэффициент модуляции емкости (светом) $K_C = \Delta C_\mathrm{max}/C_0$ и уменьшить C_0. В МОП-фотоварикапе значение максимальной емкости C ограничено емкостью диэлектрика. Минимальная емкость C определяется последовательным соединением емкостей диэлектрика C_0 и области пространственного заряда C_SCR. В общем случае емкость поверхностных ловушек также может быть учтена [16, 17]. Для повышения эффективности фотоварикапа необходимо использовать материал с

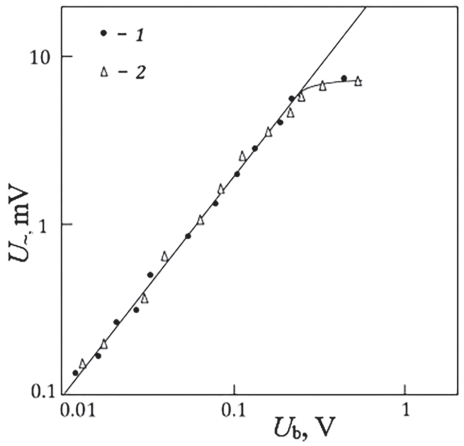


Рис.2. Экспериментальные зависимости напряжения полезного сигнала $U_\sim$ от постоянного с медленно изменяющимся напряжением смещения U_b для двух МОП-фотоварикапов при разных толщинах окисного слоя (*1* – 800 и *2* – 1000 Å).

высоким сопротивлением и минимально возможной толщиной диэлектрика, учитывая при этом требование к минимальности тока утечки. Если к алюминиевому затвору идеального МОП-фотоварикапа с подложкой p-типа ($N_A = 10^{16}$ см$^{-3}$) приложить положительное напряжение, то основные носители дырки удалятся от границы Si–SiO_2, а максимальная ширина области пространственного заряда оценивается как ~0.3 мкм [14]. При «истощающем» изгибе зон емкость области пространственного заряда значительно меньше емкости диэлектрика. При дальнейшем увеличении положительного напряжения у границы раздела Si–SiO_2 начинают накапливаться электроны — неосновные носители в подложке и начинает формироваться инверсный слой. При образовании инверсного слоя большая часть падения напряжения будет приходиться на окисный слой и ширина обедненного слоя перестанет увеличиваться. При напряжениях U_b, соответствующих образованию инверсного слоя, ход зависимости емкости фотоварикапа от напряжения затвора $C(U_b)$ различен для электронного и дырочного кремния. Это связано с разным временем установления термодинамического равновесия в этих материалах. При слабом квазистационарном истощении коэффициент перекрытия светом фотоёмкости K_C (или дифференциальной фотоёмкости) фотоварикапа является функцией скорости поверхностной рекомбинации (задающей уровень инжекции вместе с объемным временем жизни) и фактора поверхностного прилипания. При этом прилипание неосновных носителей заряда приводит к увеличению коэффициента перекрытия светом фотоёмкости K_C, перераспределению заряда при освещении и линейно зависит от интенсивности освещения.

В работе [15] проведен расчет фотоемкостного эффекта, основанный на импедансном методе. Были установлены две основные причины увеличения ёмкости при освещении: уменьшение равновесной ширины обедненного слоя из-за эффективного спрямления зон; уменьшение постоянной времени образования инверсионного слоя. Характерно насыщение дифференциального фотоёмкостного эффекта в области инверсионных изгибов зон (~0.3 В) и сильная зависимость при других меньших значениях поверхностного потенциала [14]. На время установления τ_{est} при прохождении полезного сигнала $U_{\sim}$ влияют два параметра входной электрической цепи: нагрузочное сопротивление R_{LS} и входная емкость C. В случае, когда на входе исследуемого электрометрического усилителя находится повторитель напряжения на операционным усилителе A_1, как и в случае без него, их входная емкость обычно находится в диапазоне 5—50 пФ. При нагрузочных сопротивлениях сенсора R_{LS} ~100 ГОм время срабатывания достигает 0.5–5 с. В исследованных образцах МОП-фотоварикапа наблюдались явления медленного дрейфа, достигавшие 10% амплитуды полезного сигнала $U_{\sim}$ в течение времени релаксации ~10 с. Значение коэффициента оптоэлектронного трансимпедансного преобразования K_T определяется характеристиками МОП-фотоварикапного динамического конденсатора C_0 и $\Delta C/C_0$, и его полупроводниковыми особенностями фотоемкости. Для увеличения коэффициента преобразования K_T необходимо получить максимально возможную глубину модуляции при минимальной начальной емкости. Например, неоправданное увеличение может быть нежелательным, поскольку инерция измерения трансимпедансного преобразователя возрастет. С другой стороны, при разработке конкретных фотоварикапов нет необходимости уменьшить размер электродов, поскольку можно

уменьшить их, увеличивая C_0 и сохраняя постоянным $\Delta C/C_0$. R_{LS} и R_{LV} также можно уменьшить. Значения K_T в большинстве образцов находились в диапазоне $(3—8)\times10^{-3}$.

Полупроводниковые динамические конденсаторы на основе МОП-структур чувствительны к общей плотности поверхностных ловушек, поскольку накопление заряда на них приводит к уменьшению напряжения, приложенного к динамическому конденсатору. С другой стороны, необходимо стремиться к получению максимальной диэлектрической емкости для увеличения глубины модуляции эффективной емкости системы. Для достижения значительных величин коэффициента модуляции емкости K_C и крутизны вольт–емкостной характеристики в МОП-фотоварикапах необходимо дополнительно использовать диэлектрические материалы с высокими значениями диэлектрической проницаемости.

4. Заключение

Предложен новый электрометрический усилитель на основе фотоемкостного МОП-динамического конденсатора. Получены зависимости выходного напряжения полезного сигнала $U_{\sim}$ от измеряемого входного напряжения U_b на МОП-фотоварикапе. Выходной сигнал усилителя пропорционален изменению дифференциальной фотоёмкости барьера МОП-фотоварикапа. Эта фотоёмкость в свою очередь пропорциональна приложенному к варикапу напряжению до значения 0.3 В. Отмеченная пропорциональность сохраняется до тех пор, пока уровень Ферми у границы $Si–SiO_2$ не совпадает с серединой запрещенной зоны. При дальнейшем увеличении смещения барьера начинается приток электронов из объема полупроводника, имеет место инверсия типа проводимости, то есть накопление в этой области неосновных носителей. Вследствие этого в режиме инверсионного канала дифференциальная фотоёмкость стремится к нулю, а выходной сигнал $U_{\sim}$ переходит в насыщение. Оптически модулированная МОП-емкость обеспечивает надежную регистрацию чрезвычайно малых постоянных токов и напряжений без использования электромеханических динамических конденсаторов, которые недостаточно надежны и долговечны. Время установления сигнала определяется как постоянной времени сенсора, так и медленными процессами релаксации заряда в структуре МОП-фотоварикапа. Коэффициент трансимпедансного преобразования определяется динамическими емкостными характеристиками МОП-фотоварикапа и его фотоемкостными полупроводниковыми свойствами, как следует из вышеизложенного. МОП-фотоварикапы могут использоваться для регистрации малых постоянных токов от высокоомных сенсоров. Поэтому применение обычных узкополосных или широкополосных усилителей, имеющих относительно низкое входное сопротивление, с МОП-фотоварикапом для мониторинга медленно изменяющихся сигналов в высокоомных цепях предпочтительнее, чем с использованием электромеханических динамических конденсаторов или с фотоварикапом на основе *p*-*n*-переходов.

Показано, что исследуемое устройство обладает определёнными достоинствами, позволяющими успешно использовать его в различных цепях с высокоомными сенсорами. Описанный электрометрический усилитель, разработанный для различных высокоомных сенсоров, может быть использован для регистрации интенсивности медленно изменяющихся во времени различных излучений, пучков заряженных частиц, концентрации газов, работы с *ph*-метрами и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. **J. Fraden**. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
2. **N. Tsoulfanidis, S. Landsberger**. Measurement and Detection of Radiation. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2025.
3. **G.F. Knoll**. Radiation Detection and Measurement. Wiley & Sons, New York, 2024.
4. **A.S.Morris, R. Langari**. Measurement and Instrumentation: Theory and Applications. Academic Press, Elsevier, San Diego, 2012.
5. **A.M. Ilyukovich**. Equipment for Electrometry. Energiya Publishing House, Moscow, 1976.
6. **A. Konczakowska, J. Cichosz, A. Szewczyk, B. Stawarz**. Optoelectronics Review, **15**, 149 (2007).
7. **S.M. Sze, M.K. Lee**. MOS Capacitor and MOSFET. Semiconductor Devices: Physics and Technology, John Wiley & Sons, New York, 2012.
8. **F.F.Y. Wang**. Introduction to Solid State Electronics. North-Holland Publishing Company, Amsterdam–New York–Oxford, 1989.
9. **O. Malik, F.J. De la Hidalga, P.E. Meza.** Optoelectronic applications of MOS capacitors fabricated on high resistivity silicon. Proc. 5th Int. Conf. on Sensing Technology, Palmerston North, New Zealand, IEEE, 185—189, 2011.
10. **M.E. Goodge**. Semiconductor Device Technology. Howard W. Sams & Co., Indianapolis, USA, 1983.
11. **R.S. Muller, T.I. Kamins, M. Chen**. Device Electronics for Integrated Circuits. John Wiley & Sons, New York, 2003.
12. **M. Grundmann**. The Physics of Semiconductors: an Introduction Including Nanophysics and Applications. Springer, Switzerland, Cham, 2021.
13. Inorganic Flexible Optoelectronics: Materials and Applications. Z. Ma, D. Liu (Eds.). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Germany, Weinheim, 2019.
14. **V.G. Litovchenko**. Fundamentals of the Physics of Metal–Dielectric–Semiconductor Microelectronic Systems. Naukova Dumka, Kyiv, 1978.
15. **A.B. Sachenko, V.A. Zuev, V.G. Litovchenko, P. Peykov.** Phys. Stat. Sol. (a), **2**, 345 (1974).
16. **B. Jie, C. Sah**. J. Semiconductors, **32**, 121001 (2011).
17. **S.M. Sze, Y. Li, K.K. Ng**. Physics of Semiconductor Devices. Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2021.

ԲԱՐՁՐ ԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ՍԵՆՍՈՐՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ ՏՐԱՆՍԻՄՊԵԴԱՆՍԱՅԻՆ ՓՈԽԱԿԵՐՊԻՉ՝ ՄՕԿ-ՖՈՏՈՎԱՐԻԿԱՊԻ ՄԻՋՈՑՈՎ

Բ.Օ. ՍԵՄԵՐՋՅԱՆ, Դ.Ա. ՔԱՆԱՆՈՎ, Մ.Ս. ԱԼԵՔՍԱՆՅԱՆ

Ներկայումս ակտիվորեն մշակվում են բազմաբաղադրիչ սենսորներ, որոնք զգայուն են տարբեր տեսակի ճառագայթման, մասնիկների հոսքերի և գազերի կոնցենտրացիաների նկատմամբ և ունեն բարձր դիմադրություն: Ռեզիստիվ սենսորներից ցածր հոսանքի ազդանշանները գրանցելու համար առաջարկվում է մասնագիտացված ինտերֆեյս՝ էլեկտրամետրիկ ուժեղացուցիչ: Այս ինտերֆեյսն օգտագործում է մետաղ-օքսիդ-կիսահաղորդիչ (ՄՕԿ) կառուցվածք (օպտրոնի դինամիկ կօնդենսատոր), որը գործում է որպես մոդուլացնող սարք: Այս ուսումնասիրությունը

վերլուծում է նոր դինամիկ կոնդենսատորի հիմնական բնութագրերը՝ օգտագործելով մակերեսին տեղադրված ՄՕԿ-ֆոտովարիկապ որպես բարձր դիմադրություն ունեցող ռեզիստիվ սենսորներից ազդանշանները հայտնաբերելու ընթացքում մոդուլացնող տարր: Մակերեսին տեղադրված ՄՕԿ- ֆոտովարիկապները պատրաստվել են բարձր օհմականությամբ օժտված p-տիպի սիլիցիումային տակդիրների վրա՝ բարակ մեկուսիչ SiO_2 շերտով և կիսաթափանցիկ մետաղական էլեկտրոդով: Տրանսիմպեդանսային փոխակերպման ընթացքում ունակության մոդուլյացիան իրականացվել է ֆոտովարիկապի օպտրոնի լուսարձակող դիոդով լուսավորելու միջոցով, ինչը հանգեցնում է բեռի դիմադրության վրա փոփոխական լարման, որը հետագայում ուժեղացվել և գրանցվել է: Արդյունքները ցույց են տալիս, որ ՄՕԿ- ֆոտովարիկապները, մուտքային լարման կրկնիչով կամ առանց դրանց, կարող են արդյունավետորեն օգտագործվել բարձր իմպեդանսային սենսորներից ցածր հաստատուն հոսանքները և լարումները գրանցելու համար: Այս մոտեցումը թույլ է տալիս այս էլեկտրամետրիկ ուժեղացուցիչը օգտագործել դանդաղ փոփոխվող առժեքների, օրինակ, գազերի կոնցենտրացիաների կամ տարբեր ճառագայթումների և մասնիկների փնջերի ինտեսիվությունների գրանցման համար:

TRANSIMPEDANCE CONVERTER FOR HIGH-RESISTANCE SENSORS USING MOS-PHOTOVARICAP

B.O. SEMERJYAN, D.A. KANANOV, M.S. ALEKSANYAN

Multielement sensors sensitive to various types of radiation, particle fluxes, and gas concentrations with high resistance are currently being actively developed. To record low current signals from resistive sensors, a specialized interface — an electrometric amplifier — is proposed. This interface utilizes a metal–oxide–semiconductor (MOS) structure, which acts as a dynamic capacitor in an optocoupler as a modulating device. This study analyzes the key characteristics of a new dynamic capacitor using a surface-mounted MOS photovaricap as a modulating element for detecting signals from high-resistance sensors. The surface-mounted MOS photovaricaps were fabricated on high-resistance *p*-type silicon substrates with a thin insulating SiO_2 layer and a translucent metal electrode. Capacitance modulation during transimpedance conversion was achieved by illuminating the photovaricap optocoupler with a light-emitting diode, resulting in an alternating voltage across a load resistor, which was subsequently amplified and recorded. The results show that MOS-photovaricaps can be effectively used to record low DC currents and voltages from high-impedance sensors. This approach allows this electrometric amplifier to be used for, for example, recording slowly changing value, for example, gas concentrations, several species of radiation, particle beams et cetera.