

УДК 621.382
doi:10.21685/2307-5538-2021-1-3

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОЛЕВОГО МДП-ФОТОТРАНЗИСТОРА (СЕНСОРНОГО ЭЛЕМЕНТА) ИНФРАКРАСНОГО ДАТЧИКА

А. С. Китаев¹, А. Н. Головяшкин²

^{1,2} Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия
¹ ar7style436@gmail.com, ² angpenza@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время для МДП-фототранзисторов отсутствует подробная методика расчета и проектирования за исключением подробного описания структуры и принципа действия. Данные приборы имеют большой потенциальный рынок сбыта как в гражданских, так и военных сферах. Целью работы является разработка методики проектирования сенсорного элемента инфракрасного датчика на базе полевого МДП-фототранзистора. *Материалы и методы.* Объектом исследования выступает МДП-фототранзистор. Предметом исследования является методика расчета и проектирования МДП-фототранзистора, выполняющего роль инфракрасного датчика. *Результаты.* Рассмотрены преимущества и недостатки МДП-фототранзистора в качестве фотоприемника. В рамках работы создана математическая модель оценки оптических свойств МДП-фототранзистора. Выведена прямая функциональная зависимость тока стока от падающего потока излучения, а также выполнен расчет основных характеристик устройства. Осуществлено моделирование процесса освещения структуры потоком излучения заданной частоты. Графически отражены изменения некоторых оптических параметров прибора. Итогом проведения работ стало создание рабочей математической модели для оценки оптических свойств МДП-фототранзистора с различной структурой. Разработана подробная методика расчета и проектирования МДП-фототранзистора, выполняющего роль ИК-датчика.

Ключевые слова: оптоэлектроника, фотоприемник, поглощение излучения, фототранзистор, многослойная структура, математическая модель, методика проектирования

Для цитирования: Китаев А. С., Головяшкин А. Н. Разработка методики проектирования полевого МДП-фототранзистора (сенсорного элемента) инфракрасного датчика // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 25–34. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-3

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DESIGNING A FIELD-EFFECT MDP-PHOTOTRANSISTOR (SENSOR ELEMENT) OF AN INFARED SENSOR

A.S. Kitaev¹, A.N. Golovyashkin²

^{1,2} Penza State University, Penza, Russia
¹ ar7style436@gmail.com, ² angpenza@gmail.com

Abstract. *Abstract.* Lack of detailed methods of calculation and design of the device under development. Availability of information only about the general structure and principle of operation. Extensive application in optoelectronics due to pulse and frequency characteristics. Lack of domestic analogues of photodetectors based on the MDP-structure. A large potential market, both in the civil and military spheres. The aim of the work is to develop a technique for designing a sensor element of an infrared sensor based on a field-effect MDP- phototransistor. *Materials and methods.* The object of the study is a MDP-phototransistor. The subject of the study is the method of calculation and design of the MDP-phototransistor, which performs the role of an infrared sensor. *Results.* Advantages and disadvantages of a MDP-phototransistor as a photodetector are considered. As part of the work, a mathematical model for evaluating the optical properties of a MDP-phototransistor was created. A direct functional dependence of the drain current on the incident radiation flux is derived, and the main characteristics of the device are calculated. Modeling of the process of illumination of the structure by a radiation flux of a given frequency is carried out. Changes in some optical parameters of the device are shown graphically. The result of this work was the creation of a working mathematical model for evaluating the

optical properties of a phototransistor with different structures. A detailed method for calculating and designing a MDP-phototransistor that acts as an infrared sensor has been developed.

Keywords: optoelectronics, photodetector, absorption of radiation, the phototransistor, multilayer structure, mathematical model, design methodology

For citation: Kitaev A.S., Golovyashkin A.N. Development of a method for designing a field-effect MDP-phototransistor (sensor element) of an infrared sensor *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2021;1:25–34. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-3

Введение

МДП-фототранзистор – полевой транзистор с изолированным затвором, поглощающий излучение в подзатворной области. Поглощение ведет к изменению проводимости канала. Появляющийся процесс фотогенерации изменяет ток стока, пороговое напряжение, а также крутизну передаточной характеристики [1, 2].

МДП-фототранзистор имеет особенность, заключающуюся в том, что материал электрода затвора должен быть прозрачным или полупрозрачным, т.е. иметь максимально возможный коэффициент пропускания, чтобы эффективно использовать падающий световой поток. По принципу действия МДП-фототранзистор является аналогом фоторезистора, который имеет высокий коэффициент внутреннего усиления [3, 4].

Среди достоинств данного элемента стоит отметить: технологичность, очень высокую плотность фотоэлементов, более низкий уровень собственных шумов (по сравнению с биполярными фототранзисторами), а также совмещение функций фотоприемника и усилителя в одном устройстве [5].

К недостаткам же можно отнести следующее: более низкая чувствительность по сравнению с биполярными фототранзисторами, необходимость нанесения полупрозрачных покрытий для формирования электродов (возможны потери на отражение). К конструкции прибора и его технологии изготовления предъявляются повышенные требования, так как коэффициент прозрачности диэлектрика будет зависеть именно от технологического процесса [6].

Именно из-за отмеченных недостатков структуры на данный момент активно используются устройства на базе биполярных фототранзисторов. основополагающим фактором в вопросе предпочтения именно приборов на основе биполярных фототранзисторов выступает сложность нанесения тонкого полупрозрачного покрытия электрода затвора в МДП-фототранзисторе, более сложный технологический процесс и, как итог, лишние экономические затраты при производстве. Этот недостаток может быть устранен, если в будущем в качестве материала электрода затвора применить некий сильнолегированный полупрозрачный полупроводник [7].

Формирование исходных данных для проектирования

Выполним оценку свойств МДП-фототранзистора, выполняющего роль ИК-датчика. Соответственно, рабочий диапазон длин волн составляет порядка 0,8–1,5 мкм.

В качестве материала подложки использован кремний *p*-типа, потому что канал проводимости *n*-типа более эффективен, так как подвижность электронов выше, чем дырок. Спектральная характеристика поглощения кремния удовлетворяет заданному рабочему диапазону длин волн и обеспечивает максимум поглощения в интересующей зоне.

Рабочую область затвора целесообразно изготовить квадратной формы для эффективной работы при различной ориентации источника излучения относительно фотоэлемента. Слишком большая площадь подзатворной области приведет к протеканию больших токов и перегрузки устройства, а слишком маленькая – к малой ширине пропускания потока излучения. Необходимо учитывать этот факт при выборе оптимальной длины и ширины канала. С учетом всего вышесказанного выбран оптимальный размер канала, составляющий 75×75 мкм [6, 7].

В качестве пары материалов электрод затвора – диэлектрик решено использовать In_2O_3 – Na_3AlF_6 , поскольку пленки имеют общее окно прозрачности в рабочем диапазоне длин волн, сохраняя при этом высокий коэффициент пропускания, низкие коэффициенты поглощения, отражения, преломления и суммарно низкие потери излучения. Параметры возможных материалов приведены в табл. 1 и 2 соответственно [8].

Таблица 1

Диэлектрические материалы и их основные свойства

Наименование материала (обозначение)				
Na ₃ AlF ₆ (криолит)	MgF ₂ (фторид магния)	ZnS (сульфид цинка)	CeO ₂ (оксид церия)	Al ₂ O ₃ (окс. алюминия)
Область прозрачности $\lambda_1 - \lambda_2$, мкм				
0,2–14	0,11–10	0,38–25	0,46–2	0,2–11
Показатель преломления n в интервале $\lambda_1 - \lambda_2$				
1,37–1,32	1,4–1,32	2,35–2,2	2,52–1,92	1,65–1,57
Показатель поглощения α (на длине волны $\lambda=1,06$ мкм), мкм ⁻¹				
0,2–2	0,25–2	0,4–5	0,4–2	0,5–1,6
Коэффициент пропускания T на длине волны $\lambda=1,06$ мкм				
0,8–0,12	0,77–0,12	0,65–0,005	0,65–0,12	0,59–0,18
Относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ				
5,1	6	7,1	9	8,5
Пробивное напряжение электрического поля, $E_{\text{проб}}$, В/см				
10 ⁹	8·10 ⁶	2·10 ⁷	10 ⁷	10 ⁶

Таблица 2

Перечень материалов для изготовления электрода затвора

Наименование материала (обозначение)		
In ₂ O ₃ (оксид индия)	ZnO (оксид цинка)	SnO ₂ (оксид олова)
Область прозрачности $\lambda_1 - \lambda_2$, мкм		
0,3–7	0,3–5,5	0,4–2,5
Показатель преломления n в интервале $\lambda_1 - \lambda_2$		
1,83–1,79	2,06–2,01	2–1,96
Коэффициент поглощения α (на длине волны $\lambda=1,06$ мкм), мкм ⁻¹		
0,2–0,85	0,25–0,9	0,3–0,82
Коэффициент пропускания T на длине волны $\lambda=1,06$ мкм		
0,8–0,15	0,75–0,1	0,7–0,18
Ширина запрещенной зоны, E_g , эВ		
3,75	3,35	3,6
Проводимость, σ , (Ом·см) ⁻¹		
10 000	8000	5000
Подвижность электронов, μ , см ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹		
35	20	15
Работа выхода, $A_{\text{эл}}$, эВ		
5,1	4,2	4,8

На этом выбор конфигурации составных частей устройства и материалов для его изготовления завершён. Все необходимые начальные данные систематизированы и готовы к дальнейшей обработке. Исходные параметры проектируемой структуры представлены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные

Наименование, обозначение, единица измерения	Численное значение
Концентрация примесей в подложке, N , см ⁻³	10 ¹³
Толщина диэлектрика, d , нм	50
Длина канала, l , мкм	75
Ширина канала, b , мкм	75
Глубина залегания областей истока и стока, x , мкм	1,5
Концентрация примесей областей истока и стока, $N_{\text{ис}}$, см ⁻³	15·10 ¹⁸
Температура, T , К	300

Параметры полученной базовой структуры представлены в табл. 4. Расчеты представленных параметров выполнены по методике расчета базовой структуры МДП-фототранзистора, разработанной и апробированной на базе кафедры «Нано- и микроэлектронике» Пензенского государственного университета.

Таблица 4

Параметры базовой структуры

Наименование, обозначение, единица измерения	Численное значение
Пороговое напряжение затвор–исток, $U_{\text{зи.пор}}$, В	0,546
Максимальное напряжение затвор–исток, $U_{\text{зи.макс}}$, В	25
Напряжение смыкания сток–исток, $U_{\text{си.см}}$, В	31
Напряжение пробоя сток–подложка, $U_{\text{проб.сп}}$, кВ	9,1
Начальный ток стока, $I_{\text{нач.т.ст}}$, мА	–8,43

Математическая модель структуры под воздействием излучения

Вывод функциональной зависимости тока стока от потока падающего излучения. Зададимся диапазоном значений потока излучения $\Phi_0 = 10^{14} \dots 10^{20} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Тогда скорость генерации электронов g можно определить следующим образом:

$$g = \alpha \beta \Phi_0, \quad (1)$$

где α – коэффициент поглощения кремния, составляющий 0,7; β – квантовый выход, равный 0,8.

Начальная поверхностная концентрация электронов (неосновных носителей заряда) выражается через закон действующих масс:

$$n_{s_0} = n_0 = \frac{n_i^2}{p_0}. \quad (2)$$

При подстановке исходных данных получаем, что $n_{s_0} = 2,103 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$.

Для однородно легированной подложки полная поверхностная концентрация электронов определяется простой суммой:

$$n_s = n_{s_0} + \Delta n_\Phi, \quad (3)$$

где Δn_Φ – неравновесная концентрация носителей заряда, возникающая в результате фотогенерации:

$$\Delta n_\Phi = g \tau_0. \quad (4)$$

Так как $n_s = n_{s_0} + \Delta n_\Phi = n_{s_0} \exp(y_s)$, то отсюда следует выражение для безразмерного поверхностного потенциала:

$$y_s = \ln \left(\frac{n_s}{n_{s_0}} \right), \quad (5)$$

который связан с обычным потенциалом ϕ через тепловой потенциал ($\phi = y \frac{kT}{q}$).

Полное значение поверхностного потенциала определяется также простой алгебраической суммой:

$$y_s = y_s^{\text{н}} + \Delta y_s, \quad (6)$$

где $y_s^{\text{н}}$ – начальный поверхностный потенциал; Δy_s – неравновесный поверхностный потенциал, возникающий в результате фотогенерации неосновных носителей заряда.

При подаче порогового напряжения на затвор фототранзистора начальный изгиб зон энергетической диаграммы полупроводника должен соответствовать началу режима сильной инверсии $y_s^H = 2y_{inv}$, где y_{inv} – потенциал начала инверсии. Тогда

$$y_s^{полн} = y_s^H + \ln\left(\frac{n_s}{n_{s_0}}\right). \quad (7)$$

Изменяющийся поток излучения приводит к изменению полного поверхностного потенциала. Это в свою очередь эквивалентно изменению напряжения затвор–исток:

$$U_{зи} = U_{зи}^H + \Delta U_{зи}, \quad (8)$$

где $U_{зи}^H$ – начальное значение напряжения на затворе; $\Delta U_{зи}$ – изменение напряжения.

Для данной структуры $U_{зи}^H = U_{зи.пор} = 0,546$ В. Из выражения (8) следует

$$U_{зи}^{полн} = U_{зи}^H - \phi_K - \frac{Q_{sc}}{C_d} + \frac{kT}{q} y_s, \quad (9)$$

где ϕ_K – контактная разность потенциалов металл – полупроводник; C_d – удельная емкость диэлектрика; Q_{sc} – поверхностная плотность заряда на границе диэлектрик – полупроводник.

В результате мы получили функцию зависимости напряжения затвора от изменения поверхностного потенциала.

Далее приступим к расчету зависимости тока стока МДП-фототранзистора от падающего излучения. Для расчета выбрана модель 1-го уровня, в которой зарядом поверхностных состояний пренебрегают. Главное допущение этой модели заключается в отсутствии подвижных носителей заряда при напряжениях на затворе меньше порогового.

Взяв во внимание все вышесказанное, используем известное выражение для напряжения насыщения между стоком и истоком:

$$U_{си.нас} = U_{зи} - U_{зи.пор}, \quad (10)$$

крутизны передаточной характеристики:

$$S = \mu_{n_0} C_d \frac{b}{l} (U_{зи} - U_{зи.пор}) \quad (11)$$

и тока стока:

$$I_c = S U_{зи}. \quad (12)$$

Выполняем преобразование выражения (12):

$$\begin{aligned} I_c = S U_{зи} &= \mu_{n_0} C_d \frac{b}{l} (U_{зи} - U_{зи.пор}) U_{зи} = \\ &= \mu_{n_0} C_d \frac{b}{l} \left(U_{зи}^H - \phi_K - \frac{Q_{sc}}{C_d} + \frac{kT}{q} 2y_s - U_{зи.пор} \right) \left(U_{зи}^H - \phi_K - \frac{Q_{sc}}{C_d} + \frac{kT}{q} y_s \right), \end{aligned}$$

где

$$y_s = y_s^H + \ln\left(\frac{n_s}{n_{s_0}}\right) = y_s^H + \ln\left(\frac{n_{s_0} + \Delta n_\Phi}{n_{s_0}}\right) = y_s^H + \ln\left(\frac{n_{s_0} + g\tau}{n_{s_0}}\right) = y_s^H + \ln\left(\frac{n_{s_0} + \alpha\beta\Phi_0\tau}{n_{s_0}}\right).$$

Итогом проведенных операций стало получение прямой функциональной зависимости тока стока от величины потока падающего излучения. На рис. 1 представлена полученная статическая характеристика спроектированного МДП-фототранзистора.

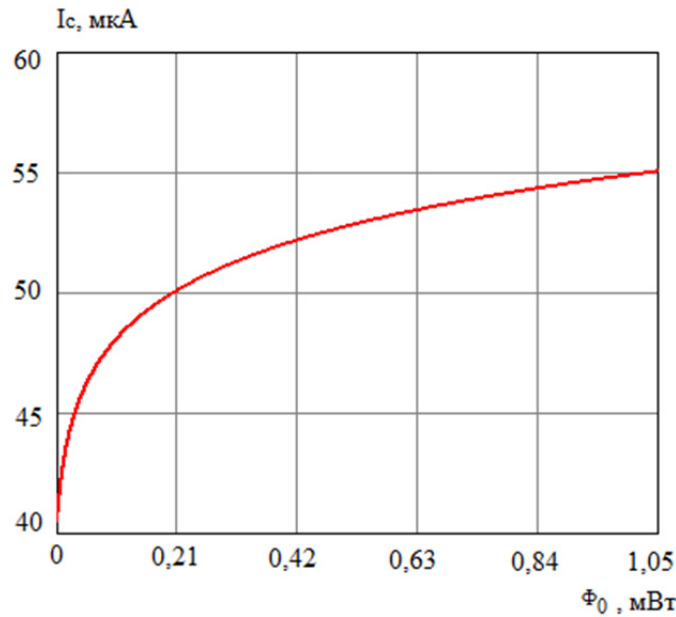


Рис. 1. Зависимость тока стока МДП-фототранзистора от потока

Полученные результаты сведены в табл. 5.

Таблица 5

Численное отражение функциональной зависимости тока стока от потока излучения

Поток излучения, мВт	Ток стока, мкА
0,006	42,12
0,014	43,35
0,047	45,99
0,151	49,14
0,248	50,59
0,346	51,59
0,457	52,44
0,613	53,35
0,738	53,93
0,902	54,56
1,034	54,99

Рассчитаем основные параметры спроектированной структуры. На основе данных, полученных из базового расчета, можно судить о рабочем диапазоне напряжений прибора, а именно: рабочее напряжение затвор–исток ($U_{p,зи}$) составляет 0,6–25 В, а сток–исток ($U_{p,си}$) в свою очередь – 0–31 В. Область спектральной чувствительности устройства (λ) составляет порядка 0,3–2 мкм. Темновой ток фототранзистора (I_T) определяем при напряжении затвора, равном 0,6 В. Его значение составляет 1 мкА.

Ток стока при том же значении $U_{зи}$ и потока излучения в 6,3 мкВт составляет 42 мкА, тогда фототок (I_ϕ) определяется как разность тока стока с темновым и равен 41 мкА.

За значение токовой интегральной чувствительности устройства принимают отношение

$$S_{\text{инт}} = \frac{I_\phi}{\Phi_V}, \quad (13)$$

где Φ_V – поток излучения, выраженный в люменах.

Производим расчет выражения (13) при потоке излучения в 6,3 мкВт и, соответственно, фототоке 41 мкА. Для перевода потока излучения в люмены используем равенство

$$\Phi_V = 683\Phi_0 V(\lambda), \quad (14)$$

где Φ_0 – поток излучения, выраженный в Вт; $V(\lambda)$ – значение относительной спектральной световой эффективности для дневного зрения, соответствующее той же длине волны λ .

Для примера была выбрана длина волны $\lambda = 1,06$ мкм. Тогда $\Phi_V = 4,3$ мВ и $S_{\text{инт}} = 9,53$ мА/лм.

Порог чувствительности прибора ($\Phi_{\text{пор}}$) находится при условии $I_c = 2I_T$. По результатам вычислений его значение составляет 1,6 мкВт.

За коэффициент усиления фототока МДП-фототранзистора принимают отношение $K_{\text{у.ф.}} = \frac{I_{\text{ф.}}}{I_T}$. В режиме фиксации излучения, пока выходная характеристика не вошла в насыщение, из-за низкого значения темнового тока коэффициент усиления может достигать значений в несколько сотен. В режиме модуляции излучения $K_{\text{у.ф.}}$ имеет значения порядка 50.

Все полученные результаты сводим в табл. 6.

Таблица 6

Основные параметры МДП-фототранзистора

Наименование, обозначение, единица измерения	Значение
Рабочее напряжение затвор–исток, $U_{\text{р.зи}}$, В	0,6–25
Рабочее напряжение сток–исток, $U_{\text{р.си}}$, В	0–31
Область спектральной чувствительности, λ , мкм	0,3–2
Темновой ток, I_T , мкА	1
Фототок, $I_{\text{ф.}}$, мкА	41
Токовая интегральная чувствительность, $S_{\text{инт}}$, мА/лм	9,53
Порог чувствительности, $\Phi_{\text{пор}}$, мкВт	1,6
Коэффициент усиления фототока в режиме фиксации излучения $K_{\text{у.ф.}}$	До 1000
Коэффициент усиления фототока в режиме модуляции $K_{\text{у.ф.}}$	~ 50

На основе данных из табл. 5 и 6, а также с помощью формул (13) и (14) построим функциональную зависимость токовой интегральной чувствительности от потока излучения. Полученный результат представлен на рис. 2.

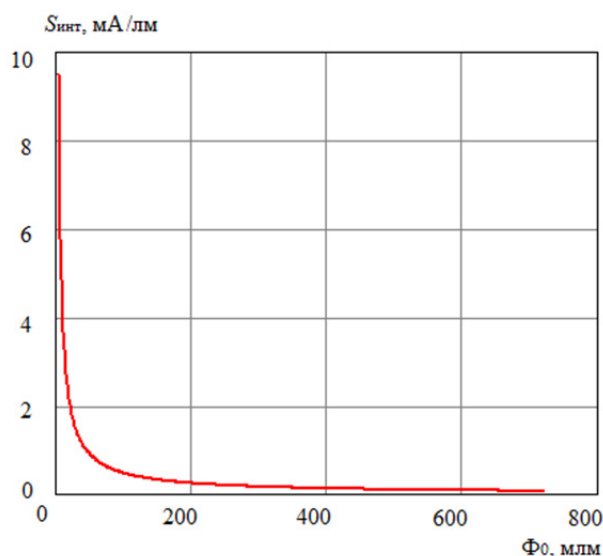


Рис. 2. Зависимость токовой интегральной чувствительности МДП-фототранзистора от потока излучения

Итоговые результаты сведены в табл. 7.

Таблица 7

Численное отражение функциональной зависимости токовой интегральной чувствительности от потока излучения

Поток излучения, мВт	Токовая интегральная чувствительность, мА/лм
4,33	9,507
9,81	4,319
32	1,390
103	0,467
169	0,293
236	0,214
312	0,165
419	0,125
504	0,105
616	0,087
706	0,076

На этом расчет основных параметров и характеристик МДП-фототранзистора можно считать успешно завершенным. В ходе составления математической модели устройства были построены необходимые характеристики и найдены численные значения основных параметров структуры.

Заключение

При проектировании МДП-фототранзистора необходимо учитывать не только электрические свойства материалов, но и оптические. Оптимальный выбор многослойной системы материалов электрод затвора – диэлектрик – полупроводник будет гарантировать надежную и стабильную работу устройства в эксплуатационных условиях.

Алгоритм проектирования выглядит следующим образом:

1. Определение конкретной области применения элемента с предполагаемым рабочим диапазоном длин волн.
2. Выбор материала полупроводниковой подложки. Материал должен обеспечивать максимальный коэффициент поглощения в рабочем диапазоне длин волн для обеспечения интенсивного процесса фотогенерации носителей заряда.
3. Анализ возможных конструкций прибора, поиск оптимального варианта конфигурации затвора.
4. Построение двухслойной системы электрод затвора – диэлектрик. Данная структура должна иметь общее окно прозрачности и обеспечивать максимальный коэффициент пропускания в рабочем диапазоне длин волн, а также сохранять низкие значения коэффициентов поглощения и отражения. Для этого необходимо наличие минимальных и близких по значению коэффициентов преломления, что в конечном счете позволит избежать потерь излучения. Диэлектрик обязан обладать оптимальными значениями пробивного напряжения электрического поля и относительной диэлектрической проницаемостью для обеспечения стабильной работы устройства в эксплуатационных условиях, чтобы не произошел пробой структуры со стороны электрода затвора.
5. Анализ и выбор оптимальных параметров полученной структуры (концентрация примеси в подложке, концентрация примеси в областях стока и истока, длина и ширина проводящего канала, толщина диэлектрика, температурные условия, глубина залегания областей истока и стока) с целью выполнения расчета базовой структуры устройства без учета влияния потока излучения.
6. Расчет базовой структуры МДП-фототранзистора:
 - а) вычисление электрических параметров ($U_{\text{зи.пор}}$, $U_{\text{зи.макс}}$, $U_{\text{си.см}}$, $U_{\text{проб.сп}}$, $I_{\text{нач.т.ст}}$);
 - б) расчет статических характеристик (семейство выходных ВАХ, семейство передаточных характеристик, семейство зависимостей крутизны передаточной характеристики, зависи-

мость сопротивления канала от напряжения между затвором и истоком, семейство зависимостей активной составляющей малосигнальной проводимости, частотные характеристики).

7. Расчет структуры и определение параметров МДП-фототранзистора с учетом потока излучения:

а) составление математической модели влияния потока излучения на статические характеристики устройства;

б) определение и расчет параметров МДП-фототранзистора (диапазон рабочих напряжений, область спектральной чувствительности, темновой ток, фототок, токовая интегральная чувствительность, порог чувствительности прибора, коэффициент усиления фототока);

в) систематизация и обработка полученных результатов, составление итоговых таблиц.

Основные выводы и результаты

В рамках проделанной работы разработан МДП-фототранзистор, выполняющий роль ИК-датчика. Составлена подробная методика расчета его основных параметров и характеристик, представлены рекомендации и перечень основных требований при проектировании структуры элемента. На основе анализа научной литературы определена оптимальная конструкция прибора с целью создания фотоэлемента. Составлен перечень основных материалов для проектирования структуры устройства.

На основании заявленных требований осуществлен выбор конкретных материалов для формирования многослойной системы электрод затвора – диэлектрик – полупроводник, удовлетворяющей оптическим и электрическим критериям фотоустройства. После этого была составлена табл. 3, включающая перечень исходных данных для расчета базовой структуры МДП-фототранзистора. Стоит отметить, что все расчеты произведены для комнатной температуры в 300 К.

На основании полученных результатов разработана математическая модель МДП-фототранзистора с учетом влияния потока излучения. Произведен подробный расчет, анализ характеристик и параметров структуры с использованием соответствующих выражений. Составлена рабочая методика расчета и проектирования рассматриваемого устройства. Все полученные результаты систематизированы и сведены в табл. 5–7. Создан алгоритм и разработана программа расчета основных параметров и статических характеристик полупроводникового устройства в виде МДП-фототранзистора.

Список литературы

1. Ермуратский П., Лычкина Г. Электротехника и электроника. М. : ДМК, 2015. 416 с.
2. Кузнецов А. В., Палагута К. А. Аналоговая и цифровая электроника. М. : МГИУ, 2010. 264 с.
3. Немцов М. В. Электротехника и электроника. М. : Высш. шк., 2007. 560 с.
4. Иванов В. И., Аксенов А. И., Юшин А. М. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы : справочник. М. : Энергоатомиздат, 1989. 448 с.
5. Овсюк В. Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда : монография. М. : Наука, 1984. 256 с.
6. Борисенко В. Е. Нанoeлектроника. М. : Бином. Лаборатория знаний, 2009. 223 с.
7. Галкин В. И. Промышленная электроника и микроэлектроника. М. : Высш. шк., 2006. 350 с.
8. Игнатов А. Н. Оптоэлектронные приборы и устройства. М. : Эко-Трендз, 2006. 272 с.

References

1. Ermuratskiy P., Lychkina G. *Elektrotekhnika i elektronika = Electrical and Electronics Engineering*. Moscow: DMK, 2015:416. (In Russ.)
2. Kuznetsov A.V., Palaguta K.A. *Analogovaya i tsifrovaya elektronika = Analog and digital electronics*. Moscow: MGIU, 2010:264. (In Russ.)
3. Nemtsov M.V. *Elektrotekhnika i elektronika = Electrical and Electronics Engineering*. Moscow: Vyssh. shk., 2007:560. (In Russ.)
4. Ivanov V.I., Aksenov A.I., Yushin A.M. *Poluprovodnikovye optoelektronnyye pribory: spravochnik = Semiconductor optoelectronic devices: reference*. Moscow: Energoatomizdat, 1989:448. (In Russ.)
5. Ovsyuk V.N. *Elektronnyye protsessy v poluprovodnikakh s oblastyami prostranstvennogo zaryada: monografiya = Electronic processes in semiconductors with spatial charge domains: monograph*. Moscow: Nauka, 1984:256. (In Russ.)

6. Borisenko V.E. *Nanoelektronika* = Nanoelectronics. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2009:223. (In Russ.)
7. Galkin V.I. *Promyshlennaya elektronika i mikroelektronika* = Industrial electronics and microelectronics. Moscow: Vyssh. shk., 2006:350. (In Russ.)
8. Ignatov A. N. *Optoelektronnye pribory i ustroystva* = Optoelectronic devices and devices. Moscow: Eko-Trendz, 2006:272. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Сергеевич Китаев

магистрант,

Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ar7style436@gmail.com

Aleksandr S. Kitaev

Master degree student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Николаевич Головяшкин

кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры нано- и микроэлектроники,

Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: angpenza@gmail.com

Aleksey N. Golovyashkin

Candidate of technical sciences, associate professor,

associate professor of sub-department

of nano- and microelectronics,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)