

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С УПРАВЛЯЮЩИМ $p$ - $n$ -ПЕРЕХОДОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ВКЛЮЧЕНИЯ

О.А. Абдулхаев, Ф.А. Гиясова, Д.М. Ёдгорова, Б.М. Каманов, А.В. Каримов

*Физико-технический институт НПО "Физика-Солнца" АН РУз (Ташкент)*

Узбекистан

Поступила в редакцию 26.03.20122

Проведены исследования функциональных характеристик полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом при различных режимах и схемах включения. Экспериментально установлено, что максимальные значения токов стока при соединении двух транзисторов от интенсивности излучения изменяются по квадратичному закону, а фоточувствительность становится больше по сравнению с дискретной структурой. При этом максимальные значения токов стока соответствующие световым токам дискретных транзисторов от прямосмещающего напряжения изменяются по квадратичному закону и являются продолжением темновой передаточной характеристики, что делает возможным их использование в качестве фотоприемников в электронных схемах. В последовательно соединенных полевых транзисторах модулируемый переход, как и в двухбарьерных структурах, управляет параметрами второго перехода за счет перераспределения напряжения приложенного от внешнего источника питания. **Ключевые слова:** функциональные характеристики, полевой транзистор, режим включения, передаточные характеристики, световые характеристики.

Проведено дослідження функціональних характеристик польового транзистора з керуючим  $p$ - $n$ -переходом при різних режимах і схемах включення. Експериментально встановлено, що максимальні значення струмів стоку при сполучі двох транзисторів від інтенсивності випромінювання змінюються за квадратичним законом, а фоточутливість стає більшою в порівнянні, з дискретною структурою. При цьому максимальні значення струмів стоку відповідним світловим струмам дискретних транзисторів від прямозміщеної напруги змінюються за квадратичним законом і є продовженням темної передатної характеристики, що уможливило їхнє використання як фотоприймачів у електронних схемах. У послідовно з'єднаних польових транзисторах моделюючий перехід, як і у двохбар'єрних структурах, управляє параметрами другого переходу за рахунок перерозподілу напруги прикладеного від зовнішнього джерела живлення.

**Ключові слова:** функціональні характеристики, польовий транзистор, режим включення, передатні характеристики, світлові характеристики.

The functional characteristics of junction field-effect transistor were researched at different bias polarities and schemes of inclusion. It was established experimentally that the maximum value of drain current when two transistors were connected varies in a quadratic law with the radiation intensity, and photosensitivity becomes more than in a discrete structure. In this case the maximum values of drain current corresponding to the light currents of discrete transistors by forward voltage vary in a quadratic law and they are a continuation of the transfer characteristics in dark, which makes possible their use as photodetectors in electronic circuits. In the series-connected field-effect transistors modulated junction, as in the two-barrier structures, controls the parameters of the second junction due to redistribution of the voltage applied from an external power source.

**Keywords:** functional characteristics, field-effect transistor, transfer characteristics, light characteristics.

В последнее время широкое применение во входных каскадах микро и оптоэлектронных устройств находят полевые транзисторы. Их применение в различных устройствах определяется высоким входным сопротивлением и возможностью широкого управ-

ления рабочей точкой. Несмотря на то, что первые исследования фототранзисторов начинались с биполярных структур [1], на основе полевых транзисторов получены значительные успехи. Так, в работе [2] впервые были получены названные полевым фототри-

дом структуры на основе сульфида кадмия, а затем в работе [3] была показана возможность использования полевого транзистора с барьером Шоттки на основе арсенида галлия как быстродействующего фотоприемника. Полевые транзисторы как фотоприемники обладают внутренним усилением, хотя фототок создается на запираемом управляющем *p-n*-переходе. Созданный фототок, изменяя толщину слоя объемного заряда, модулирует толщину канала, приводя к большему изменению тока протекающего по каналу. В режиме отсечки канала *n*-канальный транзистор можно представить в виде двух обратно включенных диодов *n-p-n*, через который течет обратный ток в эквиваленте, представляющем собой резистор. При подсветке образованной *n-p-n*-структуры (дифференциальное и динамическое) сопротивление эквивалентного резистора будет уменьшаться в соответствии с интенсивностью излучения.

Аналогично можно представить двух(трех) барьерную фотодиодную *p-n-m*-структуру с эффектом усиления первичного фототока [6]. В них световое излучение также приводит к уменьшению дифференциального и динамического сопротивления структуры.

Аналогами двухбарьерного фотодиода являются:

- полевой транзистор в режиме запираения;
- два полевых транзистора с соединенными через сопротивление контактами истока и затвора, в котором вывод стока первого транзистора соединен с выводом затвора второго транзистора (эквивалент трехбарьерной структуры, то есть, исключена инжекция носителей в базовые области [6]);
- два полевых транзистора с соединенными через сопротивление контактами истока и затвора, в котором вывод стока первого транзистора соединен с выводом стока второго транзистора (эквивалент инжекционно-полевого фотодиода [7]).

Здесь следует отметить, что путем соединения обычных дискретных фотодиодов невозможно получить аналоги двух(трех)-барьерных структур, а с помощью полевых транзисторов можно смодулировать двухбарьерные диодные структуры.

Сведения о первых образцах фоточувствительного полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом на основе арсенида галлия были приведены в работе [4]. В дальнейших исследованиях было установлено, что для обеспечения высокой фоточувствительности необходимо выбирать параметры канала так чтобы напряжение отсечки было близко к величине контактной разности потенциалов *p-n*-перехода затвора [5]. Как известно предприимчивые исследователи в своих разработках используют биполярные транзисторы с удаленным колпачком в качестве фототранзисторов. Относительно полевых транзисторов тоже можно отметить, что производимые кремниевые полевые транзисторы с удаленным колпачком и соответствующим тонким каналом будут обладать чувствительностью, не уступающей биполярным транзисторам, табл. 1. Так, в биполярных фототранзисторах, как показано в табл. 1, темновые токи являются очень большими и наблюдается (инерционность) эффект накопления зарядов, что также ограничивает возможность их применения для приема слабых оптических сигналов. Поэтому они применяются в качестве аналоговых и ключевых приемников излучения, так как для передачи цифровых сигналов требуются высокочастотные транзисторы.

Вместе с тем систематическое совершенствование оптических волокон и оптических усилителей требует разработки улучшенных излучателей и фотоприемников, пригодных также для использования в системах передачи и приема информационных сигналов. В связи с этим возрос интерес к малошумящим фото-

Таблица 1  
 Параметры некоторых германиевых и кремниевых фототранзисторов [6]

Фото-транзистор	Размеры элемента, мм <sup>2</sup>	Темновой ток, мкА, не более	Рабочее напряжение, В	Максимальная спектральная чувствительность, мкм	Интегральная чувствительность, мкА/лк
ФТ-1К	2,8	3	5	0,8 ÷ 0,9	0,4
ФТ-2Г	1,0	500	12 ÷ 24	1,5 ÷ 1,6	2,0
ФТ-3	3,0	60	5 ÷ 10	1,5 ÷ 1,55	1,0
ФТГ-5	3,0	50	5 ÷ 10	1,5 ÷ 1,55	1,0
КТФ109А	2,0	–	5	0,83	0,25 А/Вт

приемным структурам, с малыми темновыми токами, каковыми являются полевые транзисторы.

В настоящей работе приводятся результаты исследования фотоэлектрических характеристик полевого транзистора с управляющим p-n-переходом на примере кремниевого транзистора аналога КП 303 при различных режимах включения. В частности, проведены исследования световых стоковых характеристик дискретного полевого транзистора, а также при их последовательном и параллельном соединении.

### СВЕТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО И ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Исследуемые полевые транзисторы представляют собой кремниевые полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом и каналом n-типа проводимости. Стоковые характеристики имеют типичный вид, рис. 1. Ток стока насыщается при напряжении 2 В. С увеличением запирающего напряжения ток стока уменьшается. Напряжение отсечки порядка 1 вольта, а максимальный ток стока составляет  $1,85 \div 2$  мА. Передаточные характеристики в темноте описываются квадратичной зависимостью [7]. То есть, в координатах корень из темнового тока стока от запирающего напряжения дает прямую линию. Максимальная крутизна вольтамперной характеристики составляет  $\Delta I_{СИ} / \Delta U_{ЗИ} = 3,2$  мА/В. Контактная разность потенциалов управляющего p-n-перехода определенная из прямой

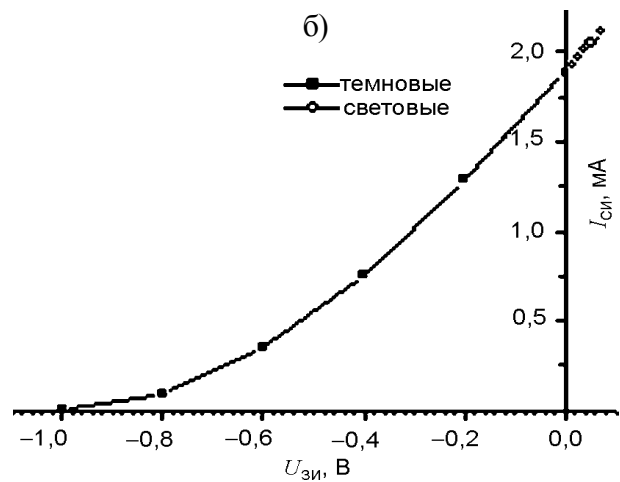
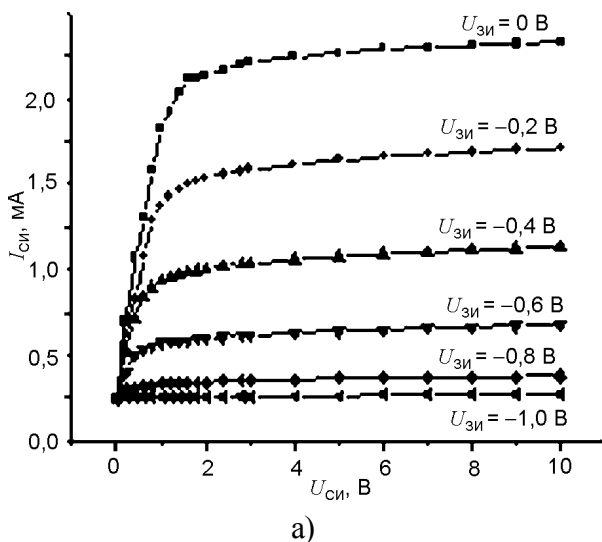


Рис. 1. Стоковые (а) и передаточные (б) характеристики кремниевого полевого транзистора ЗИН4-1 в темноте и при освещении.

вольтамперной характеристики перехода затвора равна 0,64 В, то есть отвечает критерию фоточувствительного полевого транзистора. Соответственно, как показано на рис. 2 при подсветке канальной области интегральным излучением от вольфрамовой лампы с максимумом при  $\lambda = 860$  мкм появляется фототок. При нулевом смещении на затворе и рабочем

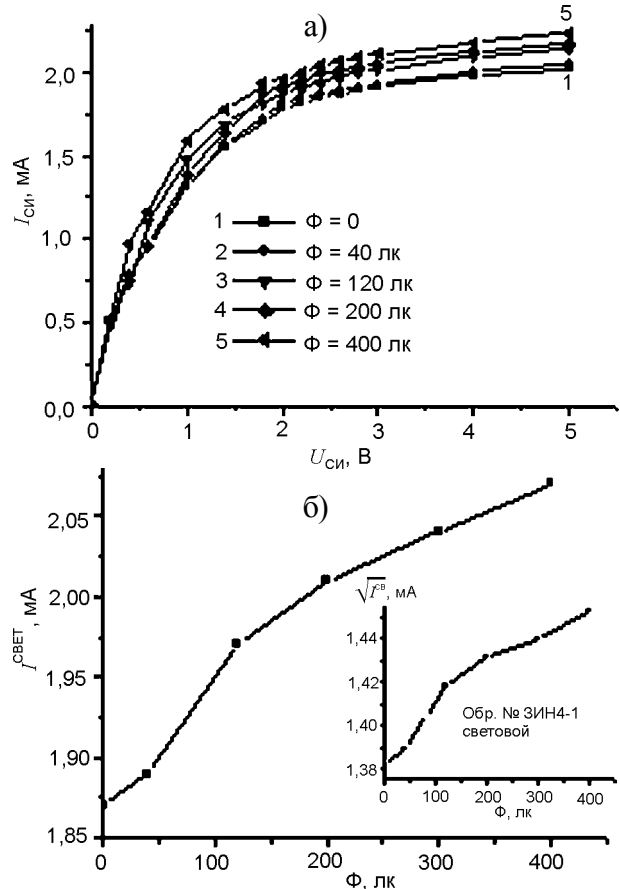


Рис. 2. Световые характеристики при нулевом смещении на затворе и зависимость максимального светового тока от интенсивности освещения № ЗИН2-2.

напряжении  $U_{СИ} = 3,0$  В фоточувствительность (отношение приращения тока стока от освещения к интенсивности излучения) имея максимум при малой освещенности уменьшается от 0,0005 мА/лк до 0,00015 мА/лк при  $\Phi = 400$  лк (табл. 2). То есть данный полевой транзистор является эффективным для приема слабых оптических сигналов.

Таблица 2  
Данные токовой фоточувствительности от интенсивности излучения при

$$U_{ЗИ} = 0, U_{СИ} = 3,0 \text{ В}$$

$\Phi$ , лк	40	80	120	200	400
$S$ , мА/лк	0,0005	0,0005	0,00034	0,0002	0,00015

Несмотря на то, что темновые передаточные характеристики подчиняются квадратичному закону, зависимости светового тока от интенсивности освещения дискретного транзистора в координатах  $\sqrt{I^{СВ}} \sim f(\Phi)$  имеют нелинейный характер, рис. 2б. Характеризующая распределение примесей в канале вольт-емкостная характеристика перехода затвора, исследуемого транзистора не монотонна и разбивается на характерные участки, обусловленные неравномерным распределением примесей по толщине канала, рис. 3.

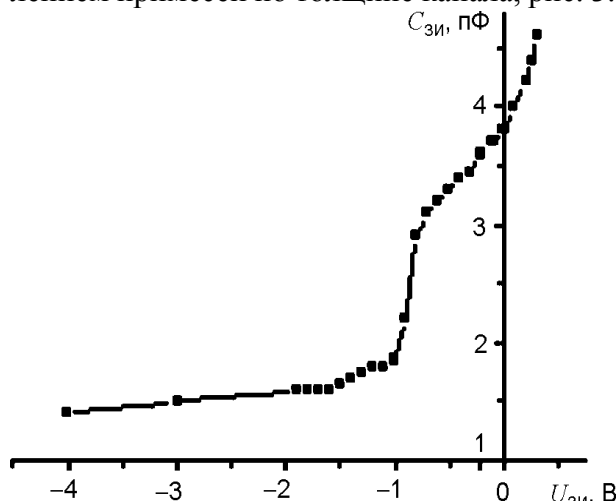


Рис. 3. Зависимость емкости перехода затвор-исток от напряжения.

В принципе от запирающего напряжения сопротивление канала полевого транзистора увеличивается, а при световом возбуждении уменьшается. При этом запирающее напряжение уменьшает толщину канала, а освеще-

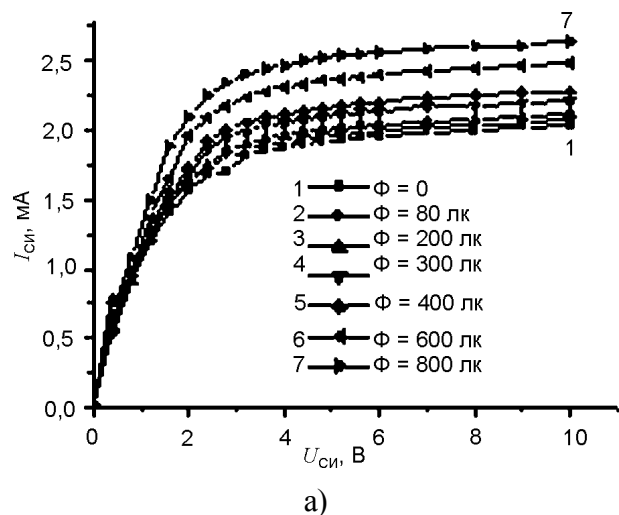
ние уменьшает величину запирающего напряжения, приводя к увеличению толщины проводящей части канала, то есть теоретически токи стока от напряжения должны изменяться по одной закономерности. Действительно при идентификации интенсивности излучения с прямо смещающим напряжением были получены соответствующие величины токов стока, определяемые квадратичной зависимостью (табл. 3).

Таблица 3  
Данные светового тока стока при освещении и идентифицированном прямом напряжении на затворе

$I_{СИ. СВЕТ}$ , мА	$\Phi$ , лк	$U_{ЗИ. ПРЯМ.}$ , В
1,91	0	0
1,93	40	0,015
1,97	80	0,025
2,01	120	0,036
2,05	200	0,05
2,11	400	0,07

При построении передаточной характеристики с использованием данных соответствующих световым максимальным токам в режиме прямого смещения световая составляющая становится продолжением темновой составляющей, рис. 1б.

При последовательном соединении двух транзисторов, в которых максимальные токи и напряжения отсечки являются близкими, допустимые рабочие напряжения увеличиваются, а при параллельном соединении увеличиваются как темновые, так и световые токи (рис. 4).



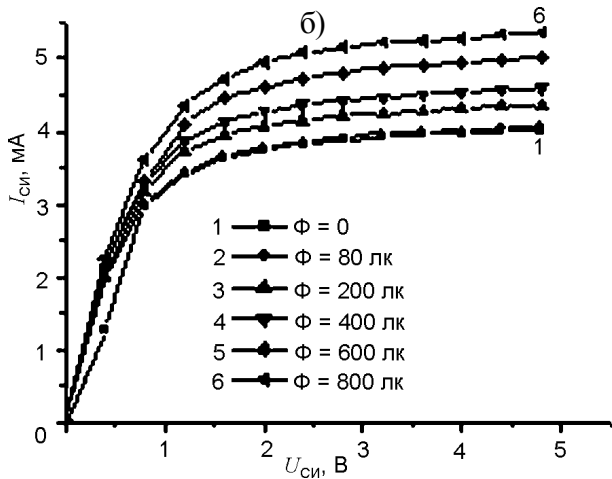


Рис. 4. Стоковые характеристики последовательно (ЗИН2-2 + ЗИН4-1) (а) и (б) параллельно соединенных транзисторов ЗИН4-4 = ЗИН4-1.

Зависимости их световых токов от интенсивности освещения подчиняются одному и тому же квадратичному закону (рис. 5).

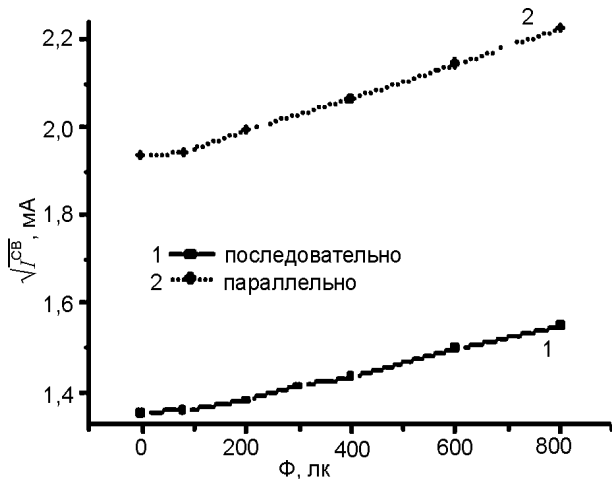


Рис. 5. Зависимости световых токов от интенсивности освещения для последовательно и параллельно соединенных полевых транзисторов.

Такое поведение световых характеристик при последовательном и параллельном соединении можно объяснить стабилизацией генерационных процессов и рабочего режима. При этом немаловажную роль играет тот факт, что в транзисторе с большим током стока за счет выделяемого тепла уменьшается подвижность носителей заряда в канале, приводя к снижению тока стока, а у более холодного транзистора ток стока увеличивается.

Как показано на рис. 6 в предлагаемом последовательном соединении двух транзисторов выводы истока через сопротивление соединены с выводом затвора, и затвор первого транзистора соединен к выводу истока.

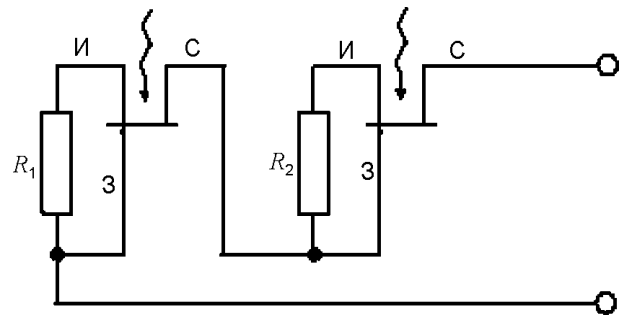


Рис. 6. Последовательно соединенные полевые транзисторы-двухполюсники.

Относительно рабочего напряжения, управляющие p-n-переходы, находятся в запирающем режиме. В результате каждый транзистор превращается в двухполюсник – диод и ток одного транзистора становится равным току второго транзистора, как и в двухбарьерных диодных структурах [8]. Модулируемый переход управляет параметрами второго перехода за счет перераспределения напряжения приложенного от внешнего источника питания. Так как максимальные токи стока у обоих транзисторов имеют одинаковые значения, семейство темновых стоковых характеристик в области насыщения остается без изменений, но увеличивается напряжение насыщения и изменяется механизм насыщения [9, 10]. В частности, от рабочего напряжения осуществляется одновременное сжатие канала со стороны истока и стока, что приводит к увеличению выходного динамического сопротивления и коэффициента усиления [11]:

$$K_H = \frac{(SR_i + 1)R_H}{(SR_{i+1})R_{источ} + R_i + R_H},$$

где  $R_{источ}$  – внутреннее сопротивление генератора входного сигнала;  $R_i$  – динамическое сопротивление полевого транзистора;  $R_i = dU_{си}/dI_{си}$ ,  $U_{зи} = const$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последовательно соединенные полевые транзисторы можно рассматривать как аналоги многобарьерных структур. Соответственно изменение физических процессов в одном переходе затвора приводит к изменению физических процессов в другом переходе затвора, повышая эффективность модуляции активного канала. Экспериментально установлено, что максимальные значения токов

стока при соединении двух транзисторов от интенсивности излучения изменяются по квадратичному закону. При этом максимальные значения токов стока соответствующие световым токам дискретных транзисторов от прямо смещающего напряжения также изменяются по квадратичному закону и являются продолжением темновой передаточной характеристики, что делает возможным их использование в качестве фотоприемников в электронных схемах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Shokley W. – Patent USA No. 2 569 347/25.09.1951.
2. Bockemuehl R.R. Cadmium Sulfide Field Effect Phototransistor//Proc. IRE. – 1960. – Vol. 48, No. 5. – P. 975-882.
3. Gammel J.C. and Ballantyne J.M. The OPFET: A new high speed optical detector//IEEE Int. Electron Device Meeting Dig. (Washington). – 1978. – P. 120-123.
4. Karimov A.V. The three-barrier photo diode Karimov's. – USSR Patent, No. 1676399. 08.05.1991.
5. Инжекционно-полевой фотодиод. – Патент РУз № IAP03974/Ёдгорова Д.М., Каримов А.В., Ашрапов Ф.М., Эргашев Ж.А., Якубов А.А. – 2009. – № 7.
6. Азимов С.А., Карагеоргий-Алкалаев П.М., Каримов А.В., Мирзабаев М. Особенности фоточувствительности арсенидгаллиевых структур типа полевого транзистора//Известия АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук. – 1979. – № 2. – С. 44-48.
7. Фоточувствительный полевой транзистор. – Патент РУз № IAP 03832/Ёдгорова Д.М., Каримов А.В., Юлдашев Ш.Ш., Мирджалилова М.А. – 2008. – № 12.
8. Каримов А.В., Ёдгорова Д.М. Некоторые особенности получения фототока в одно- и многобарьерных фотодиодных структурах//ФТП. – 2010. – Т. 44, № 5. – С. 674-679.
9. Abdulhaev O., Yodgorova D., Karimov A., Kamonov B.M., Kahorov A.A., Kalandarov J.J. The photovoltaic characteristics in parallel and consistently connected field transistors//11<sup>th</sup> Intern. Young Scientists Conf. Optics and High Tech. Mater. Sci. SPO-2010, (Kyiv). – 2010. – P. 194-195.
10. Ёдгорова Д.М. Механизм насыщения тока стока полевого транзистора//Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2006. – № 5(65). – С. 58-61.
11. Полевые транзисторы. Физика, технология и применение/Пер. с англ. под ред. А. Майорова. – М.: Советское радио, 1971.

#### LITERATURA

1. Shokley W. – Patent USA No. 2 569 347/25.09.1951.
2. Bockemuehl R.R. Cadmium Sulfide Field Effect Phototransistor//Proc. IRE.– 1960.– Vol. 48, No. 5. – P. 975-882.
3. Gammel J.C. and Ballantyne J.M. The OPFET: A new high speed optical detector//IEEE Int. Electron Device Meeting Dig. (Washington). – 1978. – P. 120-123.
4. Karimov A.V. The three-barrier photo diode Karimov's. – USSR Patent, No. 1676399. 08.05.1991.
5. Inzhektionno-polevoj fotodiod. – Patent RUz № IAP03974/Edgorova D.M., Karimov A.V., Ashrapov F.M., Ergashev Zh.A., Yakubov A.A. – 2009. – № 7.
6. Azimov S.A., Karageorgij-Alkalaev P.M., Karimov A.V., Mirzabaev M. Osobennosti fotchuvstvitelnosti arsenidgallievых структур типа полевого транзистора//Izvestiya AN UzSSR. Ser. fiz.-mat. nauk. – 1979. – № 2. – S. 44-48.
7. Fotchuvstvitel'nyj polevoj tranzistor. – Patent RUz № IAP 03832/Edgorova D.M., Karimov A.V., Yuldashev Sh.Sh., Mirdzhalilova M.A. – 2008. – № 12.
8. Karimov A.V., Edgorova D.M. Nekotorye osobennosti polucheniya fototoka v odno- i mnogobar'ernых fotodiodnyh strukturah//FTP. – 2010. – Т. 44, № 5. – S. 674-679.
9. Abdulhaev O., Yodgorova D., Karimov A., Kamonov B.M., Kahorov A.A., Kalandarov J.J. The photovoltaic characteristics in parallel and consistently connected field transistors//11<sup>th</sup> Intern. Young Scientists Conf. Optics and High Tech. Mater. Sci. SPO-2010, (Kyiv). – 2010. – P. 194-195.
10. Edgorova D.M. Mehanizm nasyscheniya toka stoka polevogo tranzistora//Tehnologiya i konstruirovanie v elektronnoj apparature. – 2006. – № 5(65). – S. 58-61.
11. Polevye tranzistory. Fizika, tehnologiya i primeneniye/Per. s angl. pod red. A. Majorova. – М.: Sovetskoe radio, 1971.