

К. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА

Узбекистан, г. Ташкент, НПО «Физика—Солнце»  
E-mail: yodgorova@uzsci.net

Дата поступления в редакцию  
29.08 2006 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН  
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

## МЕХАНИЗМ УПРАВЛЕНИЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ПОЛЕВОГО ФОТОТРАНЗИСТОРА

*Указаны пути выбора оптимальных рабочих напряжений, при которых полевой фототранзистор с управляющим p–n-переходом будет обеспечивать высокую фоточувствительность.*

На основе полевых фототранзисторов создаются не только традиционные оптроны с оптическими волокнами, но и специальные приборы с открытым оптическим каналом. В их конструкции между излучателем и фотоприемником имеется воздушный зазор, помещая в который те или иные объекты, можно управлять световым потоком и тем самым фиксировать наличие (или отсутствие) предметов, состояние их поверхности, скорость перемещения или поворота и т. п. Полевой фототранзистор с управляющим p–n-переходом отличается стабильностью параметров при внешних воздействиях радиационного и теплового облучения. Возможность выбора параметров и материала управляющего перехода затвора позволяет расширить его функции и обеспечить фоточувствительность в заданном спектральном диапазоне [1, 2].

Среди разнообразных конструкций полевых фототранзисторов как модельная представляет интерес структура с плоскостным затвором и с открытым длинным каналом (50 мкм), т. е. с отношением длины канала к толщине больше 10. Как показали исследования фотоэлектрических характеристик, такой полевой фототранзистор имеет типичную вольт-амперную характеристику в схеме с общим истоком и может возбуждаться световым сигналом через открытый канал [3]. Известно, что полевой фототранзистор в принципе основан на модуляции тока основных носителей. Модуляция тока осуществляется изменением толщины проводящей части канала путем расширения или сужения обедненной области p–n-перехода затвора входным сигналом. В транзисторном режиме включения полевого фототранзистора участвует канал с изменяющимся динамическим сопротивлением перехода "сток—исток" [4, с. 40—45].

В целом функциональные возможности полевого фототранзистора определяются ключевыми параметрами. Среди них основными являются динамическое сопротивление стока и обратные токи переходов "затвор—исток", "сток—затвор". Чем выше значения динамического сопротивления стока и меньше обратные токи, тем больше фоточувствительность полево-

го фототранзистора. Вместе с тем крутизна передаточной характеристики полевого фототранзистора определяется законом перекрытия канала объемным зарядом p–n-перехода затвора, а именно, зависит от профиля распределения примесей по толщине канала. В случае легирования теллуром концентрация носителей растет по толщине, а при легировании оловом уменьшается, повышая эффективность перекрытия канала.

До настоящего времени выяснение механизмов фоточувствительности и поведения спектральных характеристик полевых фототранзисторов от рабочей точки, а также установление взаимосвязи изменения толщины слоев объемного заряда с динамическим сопротивлением канала, остаются актуальными.

В настоящей работе рассмотрены некоторые особенности спектральной чувствительности и динамического сопротивления канала арсенидгаллиевого полевого фототранзистора с p–n-переходом.

С этой целью нами были изготовлены полевые фототранзисторы с гомопереходом на основе арсенида галлия [5]. В качестве канала был выбран n-тип арсенида галлия с концентрацией носителей  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , легированный оловом. Затворная область pGaAs имела концентрацию  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Контактные площади стока и истока размерами  $700 \times 750 \text{ мкм}$  формировались напылением олова. Напылением никеля к затворной области получен омический контакт.

Исследования проводились по типовой схеме с общим истоком (см. рис. 1). Из исследований спек-

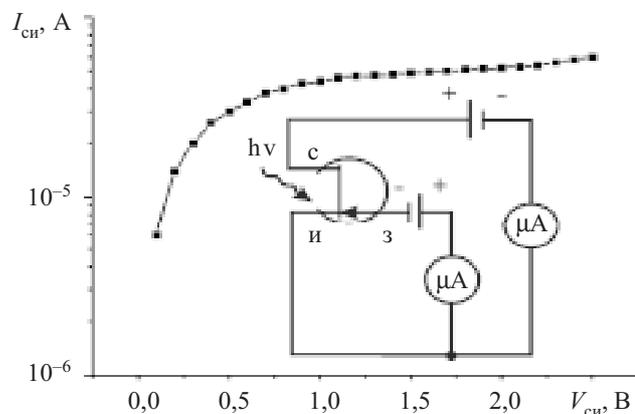


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика полевого фототранзистора в схеме с общим истоком ( $V_{зи} = -0,8 \text{ В}$ ). Вставка: электрическая схема включения полевого фототранзистора

тральных характеристик полевого фототранзистора следует, что динамическое сопротивление канала играет определяющую роль в процессах внутреннего усиления входного сигнала. Основной вклад в глубину модуляции динамического сопротивления канала вносит характер распределения примесей, по толщине изменяя протяженность участка насыщения тока стока.

Исследуемый полевой фототранзистор имеет типичную вольт-амперную характеристику. На начальном участке ток, протекающий по каналу при заданном напряжении на затворе, увеличивается линейно, а затем по мере сужения проводящей части канала насыщается (рис. 1). На участке насыщения область максимальных значений сопротивления канала является протяженной и создает "полочку" — в отличие от полевых транзисторов, канал которых легирован теллуром [3].

Для напряжений стока 1,2—1,9 В, соответствующих максимальным значениям сопротивления канала, любое изменение запирающего напряжения от добавочного переменного сигнала или светового излучения приведет к модуляции толщины канала и к соответствующему изменению тока стока. Именно на участках насыщения с постоянной крутизной роста тока можно получить наибольшее усиление оптического сигнала как по току, так и по напряжению, определяемому выходным сопротивлением и фоточувствительностью  $p-n$ -перехода затвора в данном спектральном диапазоне. В частности, коэффициент усиления по току определяется следующим выражением:

$$K_{\text{тран}} = SR_{\text{вых}} = (\Delta I_{\text{си}} / \Delta I_{\text{зи}}) R_{\text{вых}},$$

где  $S$  — крутизна передаточной характеристики;  
 $R_{\text{вых}}$  — выходное сопротивление [6, с. 70—71] —

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{дин}} R_{\text{н}}}{R_{\text{дин}} + R_{\text{н}}};$$

$R_{\text{дин}}$  — динамическое сопротивление канала;

$R_{\text{н}}$  — сопротивление нагрузки;

$\Delta I_{\text{си}}$  — приращение тока стока;

$\Delta I_{\text{зи}}$  — приращение тока затвора.

$$\text{Динамическое сопротивление канала } R_{\text{дин}} = \frac{\partial V_{\text{си}}}{\partial I_{\text{си}}}$$

зависит как от напряжения затвора, так и от величины напряжения стока (рис. 2).

Динамическое сопротивление канала от запирающего напряжения изменяется (увеличивается) по одному и тому же закону (кривые 1 и 2). Это обусловлено тем, что прирост толщины слоя  $\Delta W$  объемного заряда от запираемого напряжения имеет одну и ту же величину, т. е. для каждого заданного значения  $\Delta V$  имеем один и тот же прирост  $\Delta W$ . Слой объемного заряда по всей длине канала изменяется синхронно, параллельно плоскости  $p-n$ -перехода.

При приложении напряжения между стоком и истоком толщина слоя объемного заряда расширяется только у стоковой части, сужая толщину непокрытого участка, а у истоковой части слой объемного заряда остается неизменным. В результате зависимость объемного заряда от напряжения стока будет нелинейной, ее ход отражается в динамическом сопротивлении канала. На начальном участке на заданный прирост напряжения имеем меньшее изменение

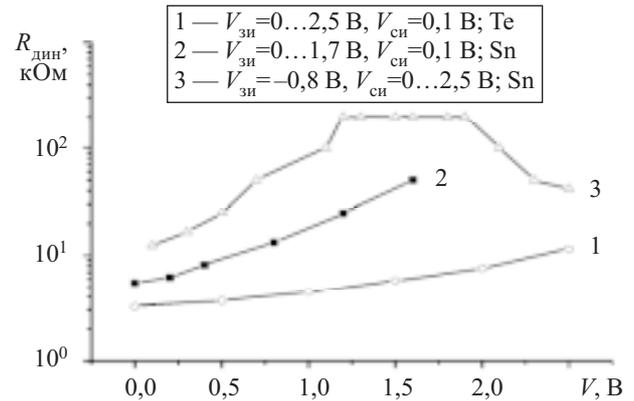


Рис. 2. Зависимости динамического сопротивления канала от напряжения

слоя объемного заряда, далее величина прироста  $\Delta W$  увеличивается до достижения максимального значения сопротивления. На этом участке полочки имеем одни и те же величины  $\Delta V$  и  $\Delta W$ , затем прирост толщины слоя объемного заряда идет на убыль. В результате имеем уменьшение динамического сопротивления канала.

Протяженность полочки динамического сопротивления канала зависит от протяженности участка насыщения тока стока. Если на стоковой вольт-амперной характеристике переходный участок от положительного к отрицательному сопротивлению короткий, то будем иметь пик в зависимости динамического сопротивления от толщины слоя объемного заряда. Если же переходный участок будет длинным, то величина динамического сопротивления будет больше, и, соответственно, будем иметь высокую фоточувствительность и внутреннее усиление полезного сигнала.

На рис. 2 кривая 1 представляет канал, легированный теллуром, а кривая 2 — легированный оловом. Для заданного напряжения сопротивление канала выше у транзистора, легированного оловом, что свидетельствует об эффективном перекрытии канала. Закон изменения динамического сопротивления канала (и соответственно слоя объемного заряда) от запирающего напряжения для каждого транзистора во всем диапазоне напряжений остается неизменным.

Переходя к зависимости динамического сопротивления  $R_{\text{дин}}$  от напряжения стока при фиксированном напряжении на затворе, заметим, что ее нелинейный ход обусловлен динамикой последующего немонотонного изменения слоя обеднения с изменением напряжения стока. Если с ростом запирающего напряжения динамическое сопротивление  $R_{\text{дин}}$  растет до определенного значения, то дальнейшее его изменение будет продолжением, т. е. проекция начального участка кривой 3 до пересечения с кривой 2 будет давать величину напряжения, приложенного к переходу "затвор—исток". В дальнейшем динамическое сопротивление канала, легированного оловом, возрастает до достижения максимального значения, занимая более протяженный участок — полочку от 1,2 до 1,9 В, а затем уменьшается, принимая отрицательный знак. С увеличением запирающего напряжения протяженный

участок с высоким динамическим сопротивлением смещается в область меньших напряжений сток-исток на величину порядка запирающего напряжения.

Здесь следует отметить, что в образовании полочки в зависимости динамического сопротивления от рабочей точки основную роль играет свойство канала, т. к. в транзисторах, легированных теллуром, высокое сопротивление канала (100 кОм) достигается в точке при определенном значении напряжения на стоке (2,5 В) [3]. В нашем же случае наибольшее усиление входного сигнала достигается именно при напряжениях на стоке в интервале 1,2—1,9 В. Если до участка максимального значения 200 кОм динамического сопротивления  $R_{дин}$  крутизна роста тока стока последовательно уменьшается, то в данном интервале крутизна его роста приобретает неизменные значения, а в дальнейшем (2,1—2,5 В) наблюдается его увеличение, т. е. уменьшение динамического сопротивления канала.

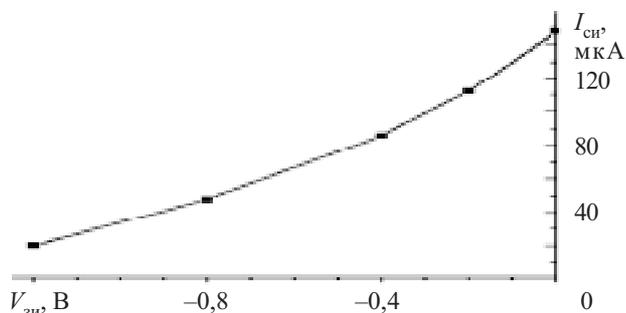


Рис. 3. Сток-затворные характеристики полевого фототранзистора

Характерным для рассматриваемого режима является то, что приращение тока стока между стоком и истоком определяется крутизной передаточной характеристики  $S$  (рис. 3), которая имеет максимальное значение при малых напряжениях смещения на затворе:

$$S = \left. \frac{\Delta I_{си}}{\Delta V_{зи}} \right|_{V_{зи} = \text{const}} = \frac{148 - 112}{0,2} = \frac{36}{0,2} = 180 \text{ мкА/В.}$$

Наблюдаемые выше зависимости токовых характеристик и сопротивления канала можно объяснить электронными процессами, протекающими одновременно в  $p-n$ -переходе и в канале полевого фототранзистора (рис. 4). Так, приложенное к  $p-n$ -переходу обратное напряжение приводит к движению электронов и дырок от  $p-n$ -перехода в противоположных направлениях и создает дефицит свободных носителей заряда. В результате их концентрация у границ будет стремиться к нулю, а неосновные носители заряда из  $p$ - и  $n$ -областей начнут диффундировать к границе  $p-n$ -перехода, компенсируя убыль заряда и создавая электрический ток. При малых значениях обратного напряжения через  $p-n$ -переход, кроме этого тока, движутся основные носители заряда, вызывая противоположно направленный ток. Результирующий ток  $p-n$ -перехода при приложении обратного напряжения равен

$$I_{обр} = I_p + I_n = I_s (e^{qV/kT} - 1),$$

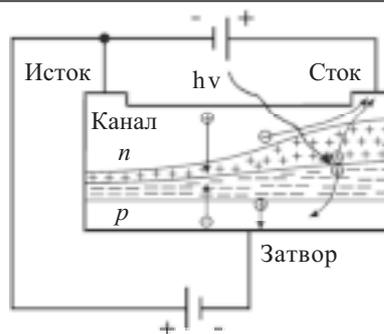


Рис. 4. Схематическое изображение полевого фототранзистора с управляющим  $p-n$ -переходом

где  $I_p$ ,  $I_n$ ,  $I_s$  — ток дырочный, электронный и ток насыщения, соответственно.

А по мере увеличения электрического поля с ростом напряжения стока изменяется концентрация носителей заряда за счет изменения скорости рекомбинации носителей заряда, в частности, положительными ионами захватываются электроны. При этом скорость захвата электрона падает с ростом электрического поля, и концентрация электронов проводимости растет, приводя к уменьшению динамического сопротивления канала.

При освещении канала полевого фототранзистора в области объемного заряда  $p-n$ -перехода будут генерироваться электронно-дырочные пары, которые, разделяясь полем, добавляются к темновым токам, представляя световой ток  $I_{зи}^{свет} = I_{обр} + I_{зи}^{фото}$ . По мере увеличения напряжения стока расширение слоя объемного заряда приведет к увеличению количества фотогенерируемых носителей, причем на участке максимальных значений динамического сопротивления толщина слоя объемного заряда увеличивается пропорционально напряженности электрического поля, а в последующем в области высокой скорости рекомбинации слой объемного заряда перестает расширяться, приводя к уменьшению фототока. На выходной характеристике будем иметь приток тока стока (обозначаемый как фототок) за счет модуляции толщины проводящей части канала фототоком затвора

$$I_{си}^{фото} = I_{си}^{свет} - I_{си}^{тем}.$$

Данный механизм подтверждается спектральными характеристиками полевого фототранзистора (рис. 5).

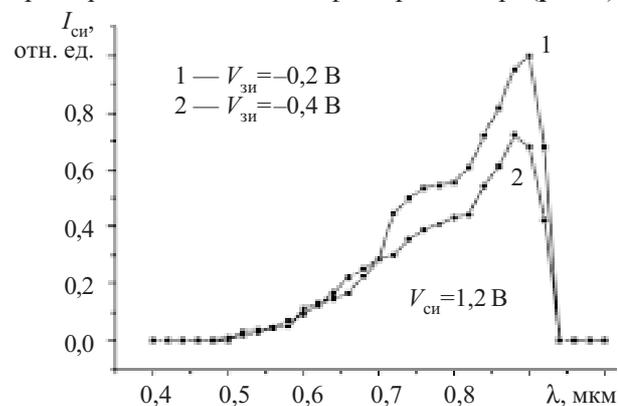


Рис. 5. Спектральная характеристика полевого фототранзистора в схеме с общим истоком

Как видно из рисунка, спектральный диапазон полевого фототранзистора, определяемый чувствительностью  $p-n$ -перехода, охватывает диапазон от 0,55 мкм (с подъемом при 0,7 мкм) до 0,94 мкм с максимумом в области собственного поглощения 0,88 мкм. Следует отметить, что данный спектральный диапазон является перспективным для волоконно-оптических систем первого поколения и оптоэлектронных устройств различного назначения.

Выбор рабочего напряжения 1,2 В обусловлен высоким динамическим сопротивлением канала, где достигаются высокие значения фоточувствительности. Фоточувствительность при заданном напряжении на стоке (1,2 В) с увеличением запирающего напряжения от -0,2 до -0,4 В уменьшается, что обусловлено уменьшением крутизны передаточной характеристики (от 180 до 130 мкА/В, табл. 1).

Таблица 1  
Фототок и крутизна передаточной характеристики полевого фототранзистора при различных запирающих напряжениях

$V_{зи}, В$	0	0,2	0,4	0,8	1,2
$I_{зи}^{\phi}, мкА$	11,5	12,6	13,2	14	14,5
$\Delta I_{си} / \Delta I_{зи}, мкА/В$	180	130	95	70	35

Так как коэффициент усиления представляет собой  $K_i^{\phi} = I_{си}^{\phi} / I_{зи}^{\phi}$ , то фототок будет определяться как

$$I_{си}^{\phi} = I_{зи}^{\phi} (\Delta I_{си} / \Delta I_{зи}) R_{вых}$$

Для оценки фототока стока можно воспользоваться данными спектрального фототока  $p-n$ -перехода в собственной области поглощения и крутизны передаточной характеристики, приведенной в табл. 1. Можно заметить, что наибольший фототок будет иметь место при нулевом смещении на затворе, когда глубина модуляции толщины канала будет максимальной. Известно, что процессы модуляции при напряжениях, меньших напряжения отсечки, определяются процессами на переходе "сток—затвор", а при больших — напряжениями  $V_{зи}$  и  $V_{си}$ , что легко проверить на основе изучения зависимости фотоэлектрических характеристик от напряженности электрического поля перехода "сток—затвор".

При обычном режиме работы полевого фототранзистора ( $V_{си} \neq 0$ ) прилагается к переходу "сток—ис-

ток" напряжение приведет к неравномерному изменению сечения проводящей части канала по длине за счет падения напряжения вдоль канала. Его толщина не остается постоянной вследствие существования, кроме электрического поля вдоль канала  $E_L$ , составляющей поля, перпендикулярного оси канала,  $E_x$ . В результате разность потенциалов затвор-канал становится функцией — как по толщине  $X$ , так и по длине  $L$  канала.

В области напряжений, меньших напряжения отсечки канала, целесообразно воспользоваться напряжением между стоком и затвором [7, с. 45—54]. В соответствии со схемой включения полевого фототранзистора напряжение, приложенное к переходу "исток—затвор", суммируется с напряжением, приложенным к переходу "сток—исток", и автоматически оказывается приложенным к переходу "сток—затвор" [8, с. 71—75]. При этом перекрытие канала будет происходить при одном и том же потенциале  $V_{сз}^{пер}$ , а напряжение на переходе "сток—исток", необходимое для перекрытия, будет уменьшаться на величину приложенного напряжения затвор-исток ( $V_{сз}^{пер} - V_{зи}$ ). В данном случае определяющими становятся толщина слоя объемного заряда на переходе "сток—затвор" и напряженность электрического поля.

Соответствующие значения напряжений, толщины слоя объемного заряда и напряженности электрического поля для исследуемого полевого фототранзистора приведены в табл. 2. Здесь  $V_{сз}^*$  — напряжение, падающее на переходе "сток—затвор", состоит из суммы напряжений, падающих на переходе "затвор—исток"  $V_{зи}$  и переходе "сток—исток"  $V_{си}$  ( $V^* = V_{зи} + V_{си}$ ), а соответствующее электрическое поле  $E$  определяется из выражения  $E = (V_D + V^*) / W_{сз}$ , где  $V_D$  — диффузионный потенциал  $p-n$ -перехода затвора —

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{кан} N_{зат}}{n_i^2}$$

Его величина для данных концентраций канала и затвора равна 1,03 В.

Толщину слоя объемного заряда  $W_{сз}$  можно определить из экспериментальной зависимости вольт-емкостной характеристики

$$W_{сз} = \epsilon \epsilon_0 s / C,$$

Таблица 2  
Динамическое сопротивление канала, толщина слоя объемного заряда и напряженность электрического поля при различных напряжениях затвора

$V_{зи} = -0,2 В$							
$V_{си}, В$	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,4
$V_{сз}^*, В$	1,53	1,83	2,13	2,43	2,73	3,03	3,63
$W, см$	$2,59 \cdot 10^{-5}$	$2,837 \cdot 10^{-5}$	$3,06 \cdot 10^{-5}$	$3,26 \cdot 10^{-5}$	$3,47 \cdot 10^{-5}$	$3,65 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$
$E, В/см$	58968,4	64491,01	69576,64	74315,05	78768,94	82984,12	90829,51
$V_{зи} = -0,4 В$							
$V_{си}, В$	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,4
$V_{сз}^*, В$	1,73	2,03	2,33	2,63	2,93	3,23	3,83
$W, см$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$3,77 \cdot 10^{-5}$	$3,94 \cdot 10^{-5}$
$E, В/см$	62704,2	67923,7	72769,8	77312,8	81603,2	85679,1	93298,1

где  $\epsilon, \epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума и полупроводника, соответственно;  
 $s$  — площадь перехода "сток—затвор";  
 $C$  — емкость затвора,

или расчетным путем с помощью формулы [9, с. 327]

$$W_{сз} = \left[ \frac{2\epsilon\epsilon_0}{q} \left( \frac{N_{кан} + N_{зат}}{N_{кан}N_{зат}} \right) (V_D + V^*) \right]^{1/2},$$

где  $N_{кан}, N_{зат}$  — концентрация носителей в канале и в затворе, соответственно.

Используя данные табл. 2 можно анализировать зависимости спектральной фоточувствительности от напряженности электрического поля при различных запирающих напряжениях.

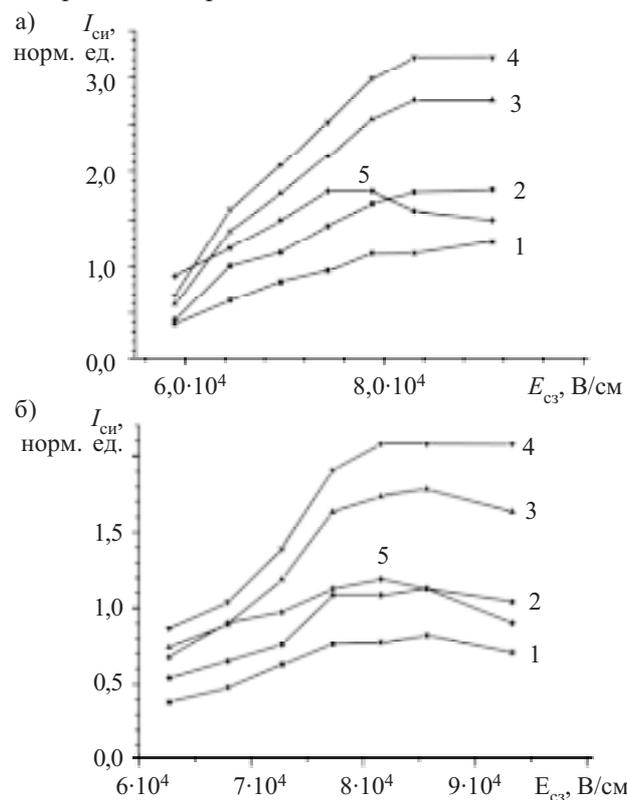


Рис. 6. Полевая зависимость спектральной фоточувствительности при различных длинах волн:  
 $a$  —  $V_{зи} = -0,2$  В;  $b$  —  $V_{зи} = -0,4$  В; 1 —  $\lambda = 0,7$  мкм; 2 —  $0,78$  мкм; 3 —  $0,86$  мкм; 4 —  $0,88$  мкм; 5 —  $\lambda = 0,92$  мкм

По отношению к напряжению сток-затвор и динамическому сопротивлению канала напряженность электрического поля и толщина слоя объемного заряда являются равнозначными. Из рис. 6, а видно, что, действительно, при заданном запирающем напряжении ( $-0,2$  В) увеличение напряженности поля от  $6 \cdot 10^4$  до  $8 \cdot 10^4$  В/см ( $V_{си} = 0,3 \dots 1,5$  В) приводит к увеличению фототока, которое достигает высоких значений именно в области больших величин динамического сопротивления канала. При дальнейшем увеличении напряженности электрического поля фоточувствительность остается неизменной. При заданных спектральных диапазонах по мере приближения к области собственного поглощения ( $\lambda$  от  $0,7$  до  $0,88$  мкм) фоточувствительность увеличивается, а в области

$\lambda = 0,92$  мкм наблюдается ее значительное уменьшение.

Кроме того, как и следовало ожидать, дальнейшее увеличение запирающего напряжения до  $-0,4$  В приводит к меньшим значениям фоточувствительности во всем диапазоне электрических полей (рис. 6, б) по сравнению с запирающим напряжением  $-0,2$  В. В окрестности полей  $(8 \dots 8,5) \cdot 10^4$  В/см создается область с высокой фоточувствительностью, связанной с высоким динамическим сопротивлением канала. Увеличение фоточувствительности с приближением области собственного поглощения обусловлено возрастанием количества фотонов, поглощаемых в слое объемного заряда перехода "затвор—канал". При этом по мере увеличения напряжения сток-исток расширение слоя объемного заряда в направлении истока способствует дополнительному увеличению количества генерированных носителей, причем в области напряжений, больших  $1,3$  В, фоточувствительность уменьшается за счет увеличения темнового тока. Обнаруженное уменьшение фоточувствительности в зависимости от электрического поля стока при  $\lambda = 0,92$  мкм обусловлено существенным уменьшением коэффициента поглощения фотонов.

\*\*\*

Таким образом, в полевом фототранзисторе с каналом, легированным оловом, участок с высоким динамическим сопротивлением является протяженным, в отличие от транзистора, легированного теллуром, что связано с особенностями процессов запираения канала в каждом случае. Выяснены механизмы фоточувствительности и установлена прямая зависимость процессов внутреннего усиления фототока от крутизны передаточной характеристики и выходного динамического сопротивления.

Результаты могут быть использованы при конструировании оптоэлектронных схем на основе полевых фототранзисторов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Данилин В., Жукова Т., Кузнецов Ю. и др. Транзистор на GaN пока самый «крепкий орешек» // Электроника: НТБ.— 2006.— № 1.— С. 1—10.
2. Техника оптической связи. Фотоприемники / Под ред. У Тсанга.— М.: Мир, 1988.
3. 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.
4. Милехин А. Г. Радиотехнические схемы на полевых транзисторах.— М.: Энергия, 1967.
5. Каримов А. В. Фоточувствительные арсенидгаллиевые полевые транзисторы с  $p-n$  переходом // Электронная техника. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника.— 1987.— № 2.— С. 111—113.
6. Каримов А. В., Ёдгорова Д. М. Физические явления в арсенидгаллиевых структурах с микрослойным квазиизопериодическим переходом.— Ташкент: Фан, 2005.
7. Кобболд Р. Теория и применение полевых транзисторов.— Л.: Энергия, 1975.
8. Каримов А. В. Многофункциональные арсенидгаллиевые тонкопереходные структуры.— Ташкент: ФАН, 1992.
9. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1.— М.: Мир, 1984.