УДК 538.971

## ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФФУЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Р.К. ОВСЕПЯН<sup>1,2\*</sup>, Н.Р. АГАМАЛЯН<sup>1,2</sup>, Е.А. КАФАДАРЯН<sup>1,2</sup>, А.А. АРАКЕЛЯН<sup>1,2</sup>, Г.Г. МНАЦАКАНЯН<sup>1,2</sup>, С.И. ПЕТРОСЯН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Российско–Армянский университет, Ереван, Армения <sup>2</sup>Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

\*e-mail: ruben.ovsepyan@mail.ru

(Поступила в редакцию 22 апреля 2019 г.)

На основе разработанной авторами технологии локального диффузного легирования определенных участков плёнки ZnO донорной (Ga) и акцепторной (Li) примесями создан оптически прозрачный полевой транзистор с каналом *n*типа. В качестве изолятора затвора использовались плёнки MgF<sub>2</sub>. Исследовались полевой эффект и темновые электрические характеристики полученных структур. Разработаны полевые фототранзисторы на основе этих структур. Исследовались фотоэлектрические характеристики полученных полевых фототранзисторов и предложен механизм фотоэлектрического усиления в них.

#### 1. Введение

Плёнки оксида цинка (ZnO), относящиеся к широкозонным полупроводникам ( $E_g = 3.3 \text{ уB}$ ) и обладающие множеством интересных свойств, находят широкое применение в полупроводниковой электронике [1,2]. Важным достоинством плёнок ZnO является возможность управления электрическими свойствами введением донорной или акцепторной примеси. Примесь Ga в плёнках ZnO действует как донор, увеличивая проводимость без ухудшения оптической прозрачности, в то время как примесь Li увеличивает их удельное сопротивление [3, 4], т. е. действует как акцептор. Плёнки ZnO:Ga могут использоваться одновременно как верхний прозрачный электрод и антиотражающее покрытие в *p-i-n* структурах высокочувствительных фотоприемников УФ диапазона, поскольку в зависимости от уровня легирования их удельное сопротивление и ширина запрещённой зоны могут достигать  $\sim 10^{-4}$  Ом см и 3.8 эВ, соответственно. Оптическая прозрачность составляет более 85% в видимой области спектра. Диэлектрические плёнки ZnO:Li могут быть использованы как буферный слой, который осуществляет две функции: *i*-слоя для приемников УФ обеспечивающего повышение фотовольтаического излучения и слоя,

напряжения солнечных элементов. Эти плёнки, как проводящие, так и диэлектрические, полностью поглощают УФ излучение.

Широкое применение диффузного легирования обусловлено возможностью создания легированных областей различной толщины с хорошо контролируемыми электрофизическими параметрами. Такое легирование для полупроводников типа  $A^{II}B^{VI}$ , в частности для плёнок ZnO исследовано недостаточно. Полевые транзисторы и другие нелинейные элементы на основе плёнок ZnO получены введением акцепторной или донорной примеси в плёнку в процессе её роста [2,5].

Целью настоящей работы является получение оптически прозрачного полевого транзистора с каналом *n*-типа на основе разработанной технологии локального диффузного легирования [6] определённых участков плёнки ZnO донорной (Ga) и акцепторной (Li) примесями, а также исследование электрофизических и фотоэлектрических характеристик полученных транзисторов. Проведен сравнительный анализ электрических параметров прозрачных транзисторов, полученных диффузным легированием, с данными транзисторов, полученных легированием в процессе роста плёнки.

#### 2. Эксперимент

При создании полевого транзистора на основе плёнок оксида цинка использовалась методика электронно-лучевого вакуумного напыления. В качестве подложки использовались пластины из монокристаллического сапфира с ориентацией [001] и размером  $20 \times 30 \text{ мм}^2$ . Плёнки были изготовлены в одинаковых условиях: энергия электронов ~6 кэВ, температура подложки поддерживалась при  $250\pm1^{\circ}$ С и скорость роста составляла 1.45 нм/с [4]. Рентгеноструктурный анализ (излучение CuK $\alpha$ ) показал, что наиболее интенсивные пики наблюдаются, когда угол  $2\theta = 34.26^{\circ}$ , что соответствует ориентации кристаллографической плоскости (002) параллельной поверхности плёнки и оси *C*, перпендикулярной поверхности подложки. Обычно этот метод получения плёнок приводит к дефициту кислорода, поэтому требуется дополнительный отжиг плёнок на воздухе для насыщения кислородом. Такой отжиг вызывает уменьшение кислородных вакансий и, как следствие, уменьшение донорных центров [7, 8]. Мишени для напыления изготовляли методом твердофазного синтеза.

Для создания прозрачного полевого транзистора с каналом *n*-типа применялось диффузное легирование плёнок ZnO донорной Ga и акцепторной Li примесями. В качестве основы для искомой структуры полевого транзистора используются нелегированные плёнки ZnO толщиной 400 нм. Для легирования донорной примесью на нее наносится плёнка ZnO:Ga толщиной 100 нм с содержанием 6.6 мас% Ga в мишени. Далее полученная структура проходила этап термодиффузии при температуре 700°С на воздухе. Таким образом, создавались высокопроводящие участки плёнки, которые служили затвором, стоком и исто-ком [9,10].

В качестве канала полевого транзистора использовались пленки ZnO:Li. Для легирования акцепторной примесью на плёнки ZnO толщиной 400 нм наносились плёнки ZnO:Li толщиной 200 нм с содержанием 8 мас% Li в мишени. Далее полученная структура проходила этап термодиффузии при температуре 700°С на воздухе. В процессе термодиффузии ионов Li имеет место диффузия кислорода из воздуха, что приводит к уменьшению кислородных вакансий. Известно, что изменение концентрации кислорода в плёнках ZnO приводит к изменению величины темновой проводимости. Для управления темновой проводимостью были получены плёнки с топологически изменяющейся концентрацией кислорода. Электрические характеристики плёнок ZnO:Li, используемых в качестве канала полевого транзистора, при различных режимах отжига приведены в табл.1.

Режим отжига	Толщина <i>d</i> , нм	Темновая проводимость $\sigma_{dark}$ , (Ом см) $^{-1}$	Полевая подвижность µ <sub>FE</sub> , см <sup>2</sup> /Вс	Концентрация носителей <i>N</i> , см <sup>-3</sup>
as-dep	550	$1.6  imes 10^{-3}$	0.6	$6.9  imes 10^{14}$
700°С / 10 мин	550	$7.7  imes 10^{-3}$	2.7	$2.5  imes 10^{15}$
700°С / 20 мин	500	$1 \times 10^{-3}$	8.9	$2.5  imes 10^{15}$
700°С / 60 мин	500	0.02	0.36	$8.7  imes 10^{15}$

Табл.1. Электрические характеристики плёнок ZnO:Li, используемых в качестве канала полевого транзистора, при различных режимах отжига

В качестве изолятора затвора использовались плёнки MgF<sub>2</sub>, полученные методом термического вакуумного напыления. Плёнка MgF<sub>2</sub> препятствовала диффузии кислорода из пленки ZnO:Li. На участках плёнки, покрытой MgF<sub>2</sub>, не наблюдалось изменение концентрации кислорода [9, 11].

Измерения фото- и темновой проводимости осуществлялись на структуре полевого транзистора без электрода-затвора с различным отношением ширины W к длине L канала: W/L = 1:1 для фотоэлектрических измерений и W/L = 1:10 для темновых измерений. Измерения фотопроводимости и времени релаксации фотопроводимости проводились при постоянном напряжении смещения модулированным (частота модуляции 177 Гц) УФ излучением с помощью синхроннофазового усилителя. В качестве источника излучения использовался светодиод L-7113UV (hv = 3.14 эВ), интенсивность которого на поверхности плёнки составляла 5.2 мВт/см<sup>2</sup>. Спектральную зависимость фотопроводимости в диапазоне 4.6–2.5 эВ (270–500 нм) изучали дифракционным монохроматором МДР-4 с применением немодулированного излучения галогенной лампы (100 Вт). Сбор данных и управление экспериментом осуществлялись с помощью DAQ-системы фирмы «National Instruments».

Измерение концентрации Ga в плёнке проводилось методом энерго-дисперсионного микроанализа на электронном микроскопе Vega с приставкой Energy350 фирмы «OXFORD-INCA». Как показали измерения, после проведения диффузии получены топологические участки плёнки с концентрацией примеси галлия до 2.2 мас%. Холловская подвижность измерялась методом Ван-дер-Пау при напряженности магнитного поля 1 Тл, на установке H-5000 Hall Effect Controller фирмы «MMR Technologies».

#### 3. Результаты и их обсуждение

Методом рентгеноструктурного анализа определялся параметр c элементарной ячейки оксида цинка до и после диффузии примесей в плёнку. Как известно [8], параметр c зависит от типа введённой примеси в процессе роста плёнки. Для плёнок ZnO и диффузно-легированных ZnO:Ga и ZnO:Li параметры c (0.5194, 0.5188 и 0.5177 нм, соответственно) имеют незначительную разницу.

Для получения транзисторов использовалась технология диффузного введения легирующих примесей из твердотельных плёночных диффузантов. Для нанесения топологического рисунка при напылении диффузантов использовались маски-трафареты. На подложке сапфира были изготовлены 5–6 одинаковых по структуре планарных полевых транзисторов с размерами 5×5 мм<sup>2</sup> и 1×1 мм<sup>2</sup>. В качестве затвора использовалась диффузно-легированная плёнка ZnO:Ga с удельной проводимостью 20 (Ом см)<sup>-1</sup>. В качестве канала использовалась диффузно-легированная плёнка ZnO:Li. Далее наносилась плёнка MgF<sub>2</sub>, выполняющая роль изолятора-затвора, с толщиной 300 нм, диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 5.8-6$  и удельной проводимостью  $(1-2)\times10^{-12}$  (Ом см)<sup>-1</sup>. Затем диффузным введением примеси Ga в плёнку ZnO были получены омические переходы, канал стока и истока типа *n-n*<sup>+</sup>. Эффективная ёмкость полученного перехода затвор–сток с использованием в качестве изолятора MgF<sub>2</sub> составляла 60– 100 нФ/см<sup>2</sup>.

Необходимо отметить, что описанная структура фототранзистора прозрачна в видимой области ( $T \sim 85\%$ ). УФ часть излучения от ~3 до ~3.8 эВ практически не поглощается в слое затвора и полностью поглощается в канале, т. е. неравновесные носители заряда, участвующие в фотопроводимости, создаются только в слое канала фототранзистора. На рис.1а приведена зависимость изменения проводимости  $\Delta \sigma_s$  канала полевого транзистора от плотности поверхностного заряда Q при различных режимах диффузии акцепторной примеси Li в плёнку ZnO. Эти данные были использованы для расчета эффективной полевой подвижности  $\mu_{FE}$  из отношения  $\mu_{FE} = \Delta \sigma_s / \Delta Q$  (рис.1b). В результате диффузии примеси Li в плёнку ZnO получены каналы полевых транзисторов с подвижностью, зависящей от плотности поверхностного заряда (рис.1b). В плёнках, полученных легированием в процессе роста, эффективная полевая подвижность не зависит от плотности поверхностного заряда [5]. Помимо диффузии Li в плёнку ZnO диффундирует кислород, что приводит к увеличению акцепторных центров и уменьшению кислородных вакансий (донорных центров), вследствие чего уменьшается проводимость и увеличивается полевая и холловская подвижность в плёнках ZnO:Li [11].

Максимальная величина эффективной полевой подвижности наблюдается при отжиге 700°C/60 мин, дальнейшее увеличение продолжительности отжига плёнок ZnO:Li приводит к изменению типа проводимости с электронного на дырочный и резкому уменьшению величины эффективной полевой подвижности.



Рис.1. (а) Зависимость изменения проводимости  $\Delta \sigma_s$  от изменения плотности поверхностного заряда Q в плёнке ZnO – основы для диффузного введения примеси (I) и диффузно-легированных плёнках ZnO:Li при температуре 700°С и различных длительностях термодиффузии: 10 (2), 20 (3) и 60 мин (4). (b) Зависимость эффективной полевой подвижности  $\mu_{\text{FE}}$  от плотности поверхностного заряда Q для плёнки ZnO:Li в случае кривой 4 на рис.1а.

Исследования электрических характеристик полевого транзистора проведены при следующих предположениях: во-первых, токи через переходы исток– подзатворный диэлектрик–сток, минуя канал транзистора, равны нулю; во-вторых, подвижность электронов постоянна по глубине и длине канала и не зависит от напряжения исток–сток  $U_{DS}$ ; в-третьих, канал плавный, т.е. в области канала нормальная составляющая электрического поля  $E_Z$  существенно больше тангенциальной составляющей  $E_Y$ .

Исследованы следующие малосигнальные параметры: крутизна характеристики S, внутреннее сопротивление  $R_{\rm in}$  и коэффициент усиления  $\beta$ . Крутизна характеристики  $S = dI_{\rm D}/dU_{\rm GS}$  определяется изменением тока стока при единичном увеличении напряжения на затворе при постоянном напряжении на стоке  $U_{\rm DS}$ . Внутреннее сопротивление  $R_{\rm in}$ , определяемое как  $R_{\rm in} = dU_{\rm DS}/dI_{\rm D}$ , характеризует изменение напряжения в выходной цепи, необходимое для единичного увеличения тока стока при неизменном напряжении на затворе  $U_{\rm GS}$ . Коэффициент усиления  $\beta$  определяется как  $\beta = dU_{\rm DS}/dU_{\rm GS}$  и характеризуется изменением напряжения и постоянном напряжения и постоянном напряжения и постоянном напряжения в выходной цепи при единичном изменении напряжения и постоянном напряжения в выходной цепи при единичном изменении напряжения и постоянном напряжения в выходной цепи при единичном изменении напряжения и постоянном  $I_{\rm D}$ .

На рис.2 представлены зависимости тока стока  $I_D$  от напряжения стока  $U_{DS}$  при различных напряжениях затвор-сток и зависимости тока стока  $I_D$  от



Рис.2. Электрические характеристики полевого транзистора с отношением ширины W к длине L канала W/L = 1:10: (а) – зависимость тока стока  $I_D$  от напряжения исток–стока  $U_{DS}$  при различных напряжениях затвор–сток  $U_{GS}$  (I - 10, 2 - 20, 3 - 30 и 4 - 40 B); (b) – зависимость тока стока  $I_D$  и ( $I_D$ )<sup>1/2</sup> от напряжения затвора  $U_{GS}$  при  $U_{DS} = 35$  B.

напряжения затвора  $U_{GS}$ . Были получены следующие величины: S = (55 мкA/10 B)= 5.5 мкA/B,  $U_{DS} = 40$  B, внутреннее сопротивление  $R_{in} = 0.19 \times 10^6$  OM, отношение тока стока в закрытом состоянии к открытому больше  $10^7$  и сопротивление канала ~1.5 × 10<sup>6</sup> OM. На полевых транзисторах с каналом *n*-типа, изготовленных на основе плёнок ZnO:Li с максимальной величиной полевой подвижности  $\mu_{FE} =$ 36 см<sup>2</sup>/Bc при плотности поверхностного заряда *Q* на плёнке до 3–3.5 мкКл/см<sup>2</sup>, коэффициент усиления β составляет 100.

Пороговое напряжение Uth определялось из выражения

$$I_{\rm D} = \frac{1}{2} \mu_{\rm H} C_{\rm i} \frac{W}{L} (U_{\rm GS} - U_{\rm th})^2 \tag{1}$$

при условии  $U_{\rm DS} > U_{\rm GS} - U_{\rm th}$  аппроксимацией зависимости  $(I_{\rm D})^{1/2}$  прямой линией до ее пересечения с осью абсцисс (рис.2b). Здесь  $\mu_{\rm H}$  – холловская подвижность и  $C_{\rm i}$  – удельная ёмкость затвора, обусловленная диэлектриком MgF<sub>2</sub>. В результате получено пороговое напряжение  $U_{\rm th}$  = 4.9 В.

Темновые малосигнальные параметры полевых транзисторов, полученных диффузным легированием, имеют некоторые преимущества по сравнению с аналогичными транзисторами, полученными легированием в процессе роста, а именно: повышение крутизны характеристики *S* и понижение порогового напряжения до  $U_{\rm th}$  = 4.9 B [5].

Для изучения влияния УФ излучения на свойства полевого транзистора были получены полевые фототранзисторы с каналом *n*-типа, изготовленные на основе плёнок ZnO:Li с отношением ширины *W* к длине *L* канала *W/L* = 1:1. Толщина канала равнялась h = 300 нм, а сопротивление канала составляло (4–6) ×  $10^{10}$  Ом. Комплекс исследований темновых характеристик был также проведен для созданного полевого фототранзистора с каналом *n*-типа. Из зависимости тока стока  $I_D$  от напряжения затвора  $U_{GS}$  при напряжении сток–исток  $U_{DS} = 100$  В экстраполяцией начального участка зависимости ( $I_D$ )<sup>1/2</sup> прямой получена величина порогового напряжения  $U_{th} = 6.2$  В. Исследуемые полевые фототранзисторы работали вплоть до напряженности 1.0 MB/см электростатического поля изолятора затвора, утечки затвора при этом составили  $J_{GS} = (2.0–3.5) \times 10^6$  А/см<sup>2</sup>.

На рис.3 представлена зависимость тока стока от времени для синусоидально-модулированного УФ излучения при различных напряжениях  $U_{GS}$  исток– затвор и величине напряжения сток–исток  $U_{DS} = 100$  В. Величина фототока  $I_D$  зависит от напряжения исток–затвор и с увеличением этого напряжения возрастает.

Коэффициент фотоэлектрического усиления *G* по постоянному току при воздействии на фотоприёмник излучения с плотностью мощности *P* определялся как отношение количества электронов, протекающих по стоку, к количеству падающих на приёмник фотонов, т. е. по формуле [12]



Рис.3. Кинетика фототока полевого фототранзистора  $I_{\rm D}$  для модулированного УФ излучения при напряжениях сток-исток  $U_{\rm DS} = 100$  В и при различных напряжениях исток-затвор  $U_{\rm GS}$ : (a) – 0, (b) – 10, (c) – 40 и (d) – 60 В.

$$G = \frac{I_{\rm D}/e}{P/hv} \,. \tag{2}$$

Фотоэлектрическая составляющая тока стока  $I_D$  для расчета коэффициента фотоэлектрического усиления G определялась из данных, представленных на рис.3.

На рис.4а представлена зависимость коэффициента фотоэлектрического усиления G от плотности мощности падающего излучения P для полевого фототранзистора с размерами 5×5 мм<sup>2</sup>. На кривых фотоэлектрического усиления наблюдается максимум  $G \approx 100$  при P = 9.2 мВт/см<sup>2</sup>. Зависимость коэффициента фотоэлектрического усиления от напряжения затвора  $U_{\rm GS}$  в полулогарифмическом масштабе представлена на рис.4b. Коэффициент фотоэлектрического усиления для полевого фототранзистора возрастает от напряжения затвора и достигает величины ~120 при напряжениях затвора 50 В.

Увеличение фотоэлектрического усиления G от напряжения затвора  $U_{\rm GS}$ и плотности мощности P (рис.4) можно объяснить различной скоростью дрейфа дырок и электронов, образующихся под воздействием света, в электрическом поле под затвором. В исследуемых плёнках ZnO:Li холловская подвижность дырок  $\mu_p = 2.8 \text{ см}^2/\text{B}$  с намного меньше, чем подвижность электронов  $\mu_n =$ 50.8 см<sup>2</sup>/B с, поэтому генерируемые светом электроны быстрее выносятся полем, так что в области сильного поля остаются только дырки. Для обеспечения



Рис.4. Зависимость коэффициента фотоэлектрического усиления G полевого фототранзистора от (а) плотности мощности излучения P при напряжениях исток–затвор  $U_{\rm GS} = 40$  В и (b) напряжения затвора  $U_{\rm GS}$  при плотности мощности P = 9.2 мВт/см<sup>2</sup>.

компенсации заряда из истока инжектируются электроны, вследствие чего увеличивается ток сток–исток. Усиленный ток течет до тех пор, пока дрейфующие дырки не покинут область сильного поля. Коэффициент фотоэлектрического усиления пропорционален изменению концентрации фотоэлектронов, т. е.  $G \sim \Delta n$ . В свою очередь,  $\Delta n$  пропорционально времени жизни фотовозбужденных дырок  $\tau_p$  и обратно пропорционально времени пребывания фотоэлектронов в области сильного поля  $\tau_n$ . Тогда выражение (2) для коэффициента фотоэлектрического усиления приобретает вид

$$G = \eta_{\text{photo}} \left( \tau_p / \tau_n \right), \tag{3}$$

где η<sub>photo</sub> – эффективный квантовый выход. Время пребывания электрона в области сильного поля обратно пропорционально напряженности электрического поля *E* на переходе затвор–диэлектрик

$$\tau_n = d / \mu_n E , \qquad (4)$$

где *d* – толщина канала. Время жизни фотовозбужденных носителей (электронов или дырок) не зависит от напряженности на переходе затвор–диэлектрик.

Оценим глубину проникновения электрического поля на переходе затвор-диэлектрик в исследуемых фототранзисторах. В полученных структурах в качестве канала использовались компенсированные полупроводники с низкой проводимостью и малой подвижностью носителей заряда. Дебаевскую длину экранирования можно оценить из выражения  $L_{\rm D} = \sqrt{D_n} \tau_{\rm M}$ , где  $D_n = 1.3 \text{ см}^2/\text{с} -$ коэффициент диффузии электронов и  $\tau_{\rm M} = 3.9 \times 10^{-11} \text{ c} -$ время максвелловской релаксации. Тогда величина  $L_{\rm D} = 6.8 \times 10^{-6} \text{ см}$ , тогда как средняя толщина канала  $\sim 0.3 \times 10^{-4} \text{ см}$ . Следовательно, можно говорить о сильном электрическом поле в области перехода затвор–диэлектрик фототранзистора, а это означает, что наибольший вклад в коэффициент фотоэлектрического усиления *G* вносят фотоэлектроны, которые генерируются в этой области.

Для измерения временных характеристик исследуемый фототранзистор освещался УФ излучением с дискретной амплитудной модуляцией в виде меандра. Кривые нарастания  $I_{\rm D}^{\rm photo}$  и спада  $I_{\rm D}^{\rm dark}$  фототока аппроксимировали соответственно выражениями

$$\begin{split} I_{\rm D}^{\rm photo} &= A_{\rm l} [1 - \exp(-t/\tau_{\rm rise})] \,, \\ I_{\rm D}^{\rm dark} &= A_2 \exp(-t/\tau_{\rm decay}) \,, \end{split}$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – константы. На основе этих формул были определены времена нарастания  $\tau_{rise}$  и спада  $\tau_{decay}$ . Временные характеристики фототранзистора  $\tau_{rise}$  и  $\tau_{decay}$ зависят от напряжения затвора  $U_{GS}$ , и с повышением  $U_{GS}$  от 0 до 50 В происходит уменьшение времени нарастания  $\tau_{rise}$  от 90 до 9 мкс и спада  $\tau_{decay}$  от 75 до 5 мкс. Это изменение можно объяснить наличием двух временных компонент (медленной и быстрой) релаксации фотопроводимости, которые наблюдались в [9]. Медленная компонента нарастания и спада обусловлена ловушками в объёме полупроводника, а быстрая – поверхностными состояниями. При напряжениях затвора 40–50 В включается механизм, связанный с поверхностными



Рис.5. Спектральная зависимость фототока  $I_D$  для модулированного УФ излучения при  $U_{DS} = 150$  В и различных напряжениях исток-затвор  $U_{GS}$ : I - 5, 2 - 10, 3 - 20 и 4 - 30 В.

состояниями, что приводит к резкому уменьшению времени нарастания и спада фотопроводимости. Поверхностные состояния играют роль ловушек и центров рекомбинации для фотоэлектронов.

На рис.5 представлена спектральная зависимость тока стока  $I_D$  от энергии фотона  $h\nu$  для модулированного излучения с частотой 177 Гц при различных напряжениях исток–затвор  $U_{GS}$  (измерения проведены при  $U_{DS} = 150$  В). Величина фототока с увеличением напряжения  $U_{GS}$  возрастает, а форма спектральной зависимости незначительно изменяется. Возрастает чувствительность в спектральном диапазоне 2.5–3 эВ. Полученные спектральные зависимости тока стока  $I_D$  от энергии фотона полевых транзисторов, полученных диффузным легированием, повторяют форму зависимости аналогичных транзисторов, полученных легированием в процессе роста [5].

#### 4. Заключение

Разработаны оптически прозрачные полевые транзисторы с каналом *n*типа на основе оксидных плёнок ZnO:Li с малой проводимостью. Плёнки ZnO:Ga с высокой проводимостью использовались в качестве затвора, стока и истока, плёнки MgF<sub>2</sub> применялись в качестве изолятора затвора. Проведены измерения темновых электрических характеристик полученных полевых транзисторов. Прозрачные полевые транзисторы не меняют основных характеристик при освещении светом видимого диапазона, поэтому они могут быть использованы при создании управляющих элементов прозрачной электроники, работающих при дневном освещении.

Разработаны высокочувствительные приёмники УФ излучения на основе предлагаемых структур. Исследованы их фотоэлектрические характеристики под воздействием УФ излучения. Полученные полевые фототранзисторы с каналом *n*-типа обладают высокой чувствительностью и большим коэффициентом фотоэлектрического усиления. Предложен механизм фотоэлектрического усиления в полученных тонкоплёночных полевых транзисторах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РАУ за счет средств субсидий Министерства Образования и Науки Российской Федерации.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. J.F. Wager, D.A. Keszler, R.E. Presley. Transparent Electronics. Springer, 2008.
- Ü. Özgür, Ya.I. Alivov, C.Liu, A. Teke, M.A. Reshchikov, S. Doğan, V. Avrutin, S.J. Cho, H. Morkoçd. J. Appl. Phys., 98, 041301 (2005).
- N.R. Aghamalyan, E.A. Kafadaryan, R.K. Hovsepyan, S.I. Petrosyan. Semicond. Sci. Technol., 20, 80 (2005).
- Н.Р. Агамалян, Р.К. Овсепян, С.И. Петросян. Изв. НАН Армении, Физика, 43, 274 (2008).

- Р.К. Овсепян, Н.Р. Агамалян, С.И. Петросян. Изв. НАН Армении, Физика, 45, 407 (2010).
- 6. Р.К. Овсепян, Н.Р. Агамалян, Е.А. Кафадарян, Г.Г. Мнацаканян, А.А. Аракелян, С.И. Петросян. Изв. НАН Армении, Физика, 53, 477 (2018).
- 7. S.A. Studenikin, N. Golego, M. Cocivera. J. Appl. Phys., 87, 2413 (2000).
- N.R. Aghamalyan, E.A. Kafadaryan, R.K. Hovsepyan. Effect of Lithium and Gallium Impurities on Opto-Electrical Properties of ZnO Films. Chapter 4 in: Trends in Semiconductor Science, New York, Nova Science Publishers, 81–110, 2005.
- 9. J.F. Wager, R.L. Hoffman. US Patent, N US 7,339,187 B2, Transistor Structures (2008).
- 10. T.H. Chiang, J.F. Wager. IEEE Transactions in Electron Devices, 65, 223 (2018).
- H.Q. Chianga, J.F. Wager, R.L. Hoffman, D.A. Keszler. Appl. Phys. Lett., 86, 013503 (2005).
- Y. Ning, Z. Zhang, F. Teng, X. Fang. Novel Transparent and Self-Powered UV Photodetector Based on Crossed ZnO Nanofiber Array Homojunction. Wiley Online Library, 2018.

#### ጉሀՇՏԱՅԻՆ ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐ ՅԻՆԿԻ ՕՔՍԻԴԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ԴԻՖՈՒԶ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՄԲ

#### Ռ.Կ. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ, Ն.Ռ. ԱՂԱՄԱԼՅԱՆ, Ե.Ա. ԿԱՖԱԴԱՐՅԱՆ, Ա.Ա. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ, Հ.Գ. ՄՆԱՑԱԿԱՆՅԱՆ, Ս.Ի. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ZnO թաղանթի որոշակի տեղամասերի՝ դոնորային (Ga) և ակցեպտորային (Li) իսառնուկներով լոկալ դիֆուզ լեգիրման մշակված տեխնոլոգիայի հիման վրա ստեղծված է *ո*-տիպի կանալով թափանցիկ դաշտային տրանզիստոր։ Որպես փականակի մեկուսիչ օգտագործվել է MgF<sub>2</sub>-ի թաղանթ։ Հետազոտվել են ստացված կառուցվածքների մթնային էլեկտրական բնութագրերը և դաշտային էֆեկտը։ Այդ կառուցվածքների հիման վրա մշակված են դաշտային ֆոտոտրանզիստորներ։ Հետազոտվել են ստացված դաշտային ֆոտոտրանզիստորների ֆոտոէլեկտրական բնութագրերը, և առաջարկվել է նրանցում ֆոտոէլեկտրական ուժեղացման մեխանիզմը։

### FIELD-EFFECT TRANSISTOR BASED ON ZINC OXIDE USING DIFFUSION TECHNOLOGY

# R.K. HOVSEPYAN, N.R. AGHAMALYAN, Y.A. KAFADARYAN, A.A. ARAKELYAN, H.G. MNATCAKANYAN, S.I. PETROSYAN

Based on the developed technology of local diffusion doping of certain parts of the ZnO film of donor (Ga) and acceptor (Li) impurities, a transparent field effect transistor with *n*-type channel was manufactured. MgF<sub>2</sub> films were used as a gate insulator. The field effect and dark electrical characteristics of the structures were investigated. Field phototransistors based on these structures have been developed. The photoelectric characteristics of the field phototransistors were investigated, and the mechanism of photoelectric amplification was proposed.