

УДК 535.215

ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ZnO:Li

Р.К. ОВСЕПЯН, Н.Р. АГАМАЛЯН, С.И. ПЕТРОСЯН

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак

(Поступила в редакцию 18 марта 2010 г.)

Получены полевые транзисторы с *n*- и *p*-типами канала на основе оксидных пленок ZnO:Li и фторидной пленки MgF₂ в качестве изолятора затвора. Исследован полевой эффект, а также влияние УФ излучения на полевой эффект в тонких пленках ZnO:Li. Изучены фотоэлектрические характеристики полученных тонкопленочных полевых транзисторов. Предложен механизм фотоэлектрического усиления в полученных тонкопленочных полевых транзисторах.

1. Введение

Пленки ZnO относятся к широкозонным полупроводникам с электронным типом проводимости и обладают множеством интересных свойств. Важным достоинством этих пленок является возможность управления их свойствами, типом и величиной проводимости введением донорной или акцепторной примеси [1-3]. Примесь Ga в пленках ZnO действует как донор, увеличивая проводимость, в то время как акцепторная примесь Li уменьшает проводимость [4] или меняет тип проводимости с электронного на дырочный. Кислородные вакансии в пленках ZnO также действуют как доноры. Исследованию полевого эффекта в тонких пленках ZnO посвящено множество работ [5-10], однако отсутствуют данные по исследованию фотоэлектрических свойств компенсированных полупроводников ZnO:Li, используемых в полевых транзисторах в качестве канала. Тонкопленочные прозрачные полевые транзисторы перспективны для использования в прозрачных дисплеях.

Целью настоящей работы было исследование фотоэлектрических характеристик полевого эффекта в пленках ZnO:Li с дырочной или электронной проводимостью для создания детекторов УФ излучения на основе полевых транзисторов с каналом *n*-типа и прозрачных полевых транзисторов с каналами *n*- или *p*-типа. Предложен механизм фотоэлектрического усиления в этих тонкопленочных полевых транзисторах.

2. Эксперимент

Легированные пленки ZnO для исследования полевого эффекта были получены методом электронно-лучевого напыления в вакууме [3] с использованием сапфировых подложек с ориентацией (001). Мишени для

напыления изготовлялись методом твердофазного синтеза с добавлением в ZnO примеси Li₂O или Ga₂O₃. Все образцы были изготовлены в одинаковых условиях: энергия электронов была ~6 кэВ, температура подложки поддерживалась при 250±1 °С и скорость роста составляла 1.45 нм /с. В качестве изолятора затвора использовались пленки MgF₂, полученные методом термического вакуумного напыления.

Измерения фото- и темновой проводимости осуществлялись на планарной структуре полевого транзистора 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 модулированным оптическим излучением при постоянном напряжении смещения. В качестве источника УФ излучения использовались излучение светодиода L-7113UV ($h\nu = 3.14$ эВ), интенсивность которого на поверхности пленки составляла 5.2 мВт/см². При измерении спектральной зависимости фотопроводимости использовалось немодулированное монохроматическое излучение в спектральном диапазоне 4.6–2.5 эВ (270–500 нм) от галогенной лампы (100 Вт) и дифракционный монохроматор МДР-4. Регистрация фототока осуществлялась с помощью синхронно-фазового усилителя фирмы «UNIPAN» на частоте модуляции светового излучения 177 Гц. Сбор данных и управление экспериментом осуществлялись с помощью системы DAQ-board фирмы National Instruments. Холловская подвижность измерялась методом Ван-дер-Пау при напряженности магнитного поля 1–2 Т. Кристаллическое качество и ориентация пленок оценивались методом рентгеновской дифракции (XRD) с помощью дифрактометра ДРОН-3 с использованием излучения CuK α ($\lambda = 0.1542$ нм).

3. Результаты и их обсуждение

Из данных рентгеноструктурного анализа следует, что полученные пленки ZnO:Li и ZnO:Ga имели преимущественную ориентацию вдоль оси (0002), перпендикулярную плоскости подложки. Пленки MgF₂ имели аморфную структуру.

На рис.1 показана схема создаваемого тонкопленочного полевого транзистора. Для получения транзистора при напылении использовались маски-трафареты. На единой подложке сапфира были изготовлены четыре одинаковых по структуре планарных полевых транзистора с размерами 5×5 мм² и 2×2 мм². Первоначально пленка ZnO:Li, наносимая в качестве канала полевого транзистора, после напыления отжигались на воздухе, в результате чего ее проводимость уменьшалась (см. табл.1). Увеличение температуры и длительности отжига до 600 °С/30 мин приводило к изменению типа проводимости с электронного на дырочный. Далее наносилась пленка MgF₂, выполняющая роль изолятора-затвора с толщиной 300 нм, диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4.8$ и удельной проводимостью 1×10^{-11} (Ом см)⁻¹. Затем наносились пленки ZnO:Ga, используемые в качестве электродов затвора стока

и истока, с высокой удельной проводимостью 20 (Ом см)^{-1} . Сверху наносились электроды из металлического алюминия. Эффективная емкость полученного перехода затвор–сток составляла $60\text{--}100 \text{ нФ/см}^2$.

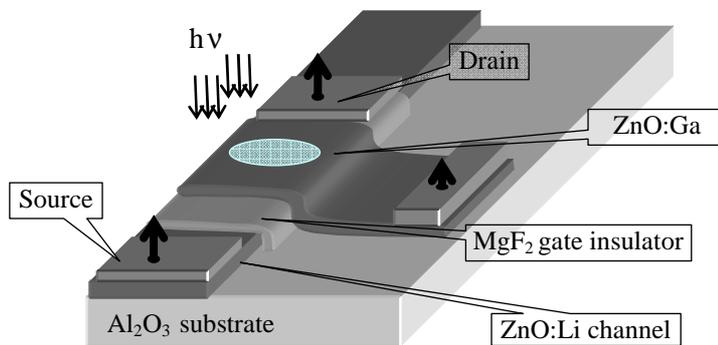


Рис.1. Схема тонкопленочного полевого транзистора, созданного на основе пленок ZnO.

На рис.2 приведена зависимость изменения проводимости $\Delta\sigma_s$ канала полевого транзистора от плотности поверхностного заряда Q при различных режимах отжига на воздухе пленок ZnO:Li. Эффективная полевая подвижность μ_{FE} определялась из отношения $\mu_{FE} = \Delta\sigma_s / Q$. Результаты представлены в табл.1. Измерения показали, что отжиг на воздухе вплоть до $500^\circ\text{C}/10 \text{ мин}$, приводит к уменьшению кислородных вакансий, т.е. донорных центров, вследствие чего уменьшается проводимость и увеличивается полевая и холловская подвижность в пленках ZnO:Li. Дальнейший отжиг пленок ZnO:Li приводит к изменению типа проводимости с электронного на дырочный. Необходимо отметить, что пленки с дырочной проводимостью обладают меньшей полевой подвижностью, чем пленки с электронной проводимостью. В пленках ZnO:Li, подвергнутых отжигу на воздухе и обладающих темновой проводимостью $\sim 10^{-3}\text{--}10^{-4} \text{ (Ом см)}^{-1}$, транспорт носителей осуществляется прыжковым механизмом [11,12]. Наиболее высокой полевой подвижностью (табл.1) обладали такие же пленки.

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

	Отжиг $T, ^\circ\text{C}$ τ , мин	Толщина канала d , нм	Проводимость пленки σ_{dark} , $(\text{Ом см})^{-1}$	Полевая подвижность μ_{FE} , $\text{см}^2/\text{Вс}$	Холловская подвижность μ , $\text{см}^2/\text{Вс}$	Концентрация носителей N , см^{-3}	Тип
1	as- dep.	300	1.6×10^{-3}	2.7	14.2	6.9×10^{14}	n
2	300/10	330	7.7×10^{-3}	9.8	18.6	2.5×10^{15}	n
3	500/10	280	0.02	15	50.8	2.5×10^{15}	n
4	500/30	300	1×10^{-3}	0.6	0.7	8.7×10^{15}	p

5	600/10	320	0.01	1.2	2.2	3.1×10^{16}	<i>p</i>
6	600/30	320	0.06	1.3	2.6	8.7×10^{17}	<i>p</i>

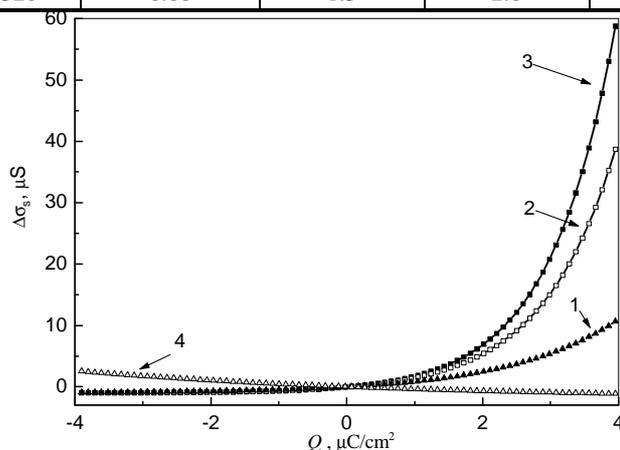


Рис.2. Зависимость изменения проводимости $\Delta\sigma_s$ канала полевого транзистора от плотности поверхностного заряда Q при различных режимах отжига пленок ZnO:Li на воздухе. Кривые 1–3 – *n*-ZnO:Li и кривая 4 – *p*-ZnO:Li. Режимы отжига: 1 – as-dep.; 2 – 300° C /10 мин; 3 – 500° C /10 мин и 4 – 500° C /30 мин.

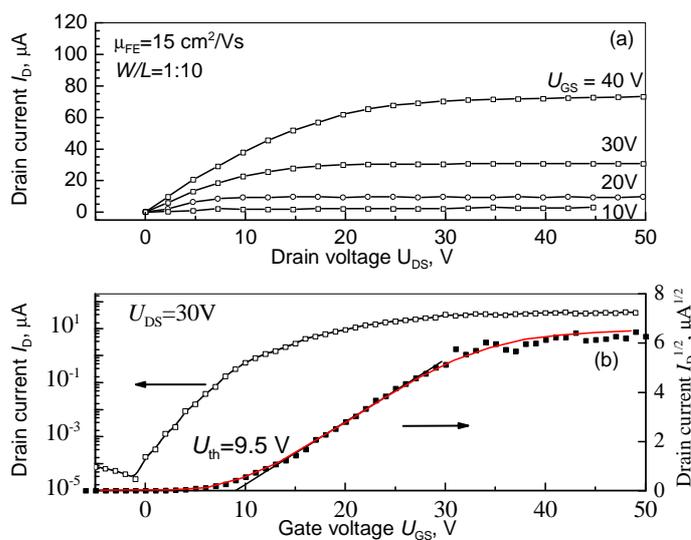


Рис.3. Электрические характеристики тонкоплёночного полевого транзистора: (а) зависимость тока стока I_D от напряжения стока U_{DS} при различных напряжениях затвор–сток; (б) зависимость тока стока I_D и $(I_D)^{1/2}$ от напряжения затвора U_{GS} .

На рис.3 представлены зависимости тока стока I_D от напряжения стока U_{DS} при различных напряжениях затвор–сток и зависимости тока стока I_D от

напряжения затвора U_{GS} . На полевых транзисторах с n -типом канала, изготовленных на основе пленок ZnO:Li с максимальной величиной полевой подвижности $\mu_{FE} = 15 \text{ см}^2/\text{Вс}$, были получены наилучшие характеристики: пороговое напряжение $U_{th} = 9.5 \text{ В}$, отношение тока стока в закрытом состоянии к открытому более чем 10^7 и сопротивление канала $\sim 1.5 \times 10^8 \text{ Ом}$. Пороговое напряжение $U_{th} = 9.5 \text{ В}$ определялось из выражения

$$I_D = (1/2)\mu_n C_i (W/L)(U_{GS} - U_{th})^2 \quad (1)$$

при условии $U_{DS} > U_{GS} - U_{th}$, аппроксимацией зависимости $(I_D)^{1/2}$ прямой линией до ее пересечения с осью абсцисс (рис.3б). Здесь C_i – удельная емкость затвора, обусловленная его изолятором, μ_n – холловская подвижность носителей заряда в пленках ZnO:Li.

Для изучения влияния УФ излучения на свойства полевого транзистора были получены полевые фототранзисторы с каналом n -типа, изготовленные на основе пленок ZnO:Li, с отношением ширины канала к длине канала $W/L = 1:1$ и максимальной величиной полевой подвижности $\mu_{FE} = 15 \text{ см}^2/\text{Вс}$. Толщина канала равнялась $h = 3 \text{ нм}$ и сопротивление канала составляло $\sim 6 \times 10^{10} \text{ Ом}$. Из зависимости $(I_D)^{1/2}$ от напряжения затвора U_{GS} (при напряжении сток–исток $U_{DS} = 100 \text{ В}$), как и в случае обычного полевого транзистора (рис.3б), из экстраполяции начального участка зависимости $(I_D)^{1/2}$ прямой до пересечения с осью абсцисс, была определена величина порогового напряжения фототранзистора $U_{th} = 8 \text{ В}$. Полученные полевые фототранзисторы работали вплоть до напряженности электростатического поля изолятора затвора 1.0 МВ/см , диэлектрические утечки затвора при этом составили $J_{GL} = 3.0 \times 10^6 \text{ А/см}^2$.

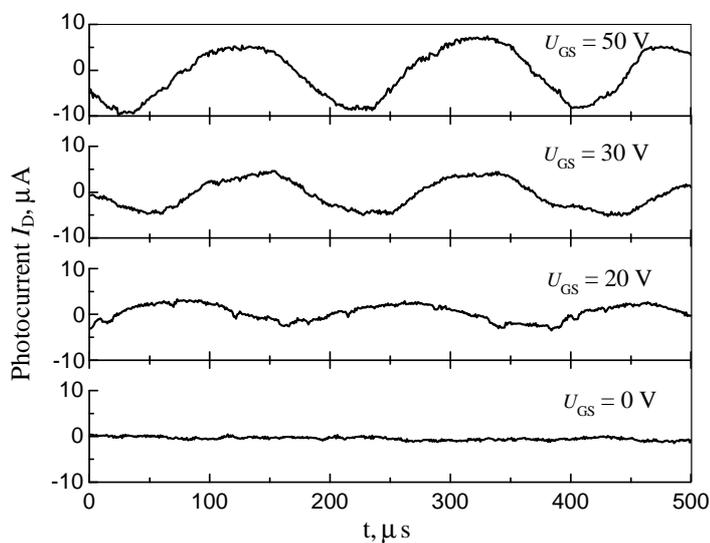


Рис.4. Кинетика фототока I_D для модулированного УФ излучения при различных напряжениях исток – затвор U_{GS} при $W/L = 1:1$ и $U_{DS} = 100 \text{ В}$.

На рис.4 представлена зависимость тока стока от времени для синусоидально модулированного УФ излучения при различных напряжениях исток–затвор U_{GS} при 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 определялся при воздействии на фотоприемник излучения с плотностью мощности W . Коэффициент фотоэлектрического усиления определялся как отношение количества электронов, протекающих по стоку, к количеству падающих на приемник фотонов, т.е. по формуле [9]

$$G = (I_D/e)/(W/h\nu).$$

Фотоэлектрическая составляющая тока стока I_D для расчета коэффициента фотоэлектрического усиления определялась из данных, представленных на рис.4. На рис.5а представлена зависимость коэффициента фотоэлектрического усиления от плотности мощности падающего излучения для полевого фототранзистора размерами 5×5 мм². На кривых усиления различимы две области: до 2 мВт/см², где величина G является практически постоянной, и больше 2 мВт/см², где величина G возрастает и достигает величины ~ 120 при интенсивности 10 мВт/см². Зависимость коэффициента фотоэлектрического усиления от напряжения затвора U_{GS} в полулогарифмическом масштабе представлена на рис.5б. Коэффициент фотоэлектрического усиления для полевого фототранзистора возрастает от напряжения затвора и достигает величины ~ 120 при напряжениях затвора 50 В, что соответствует напряженности поля в области изолятора затвора 200 кВ/см.

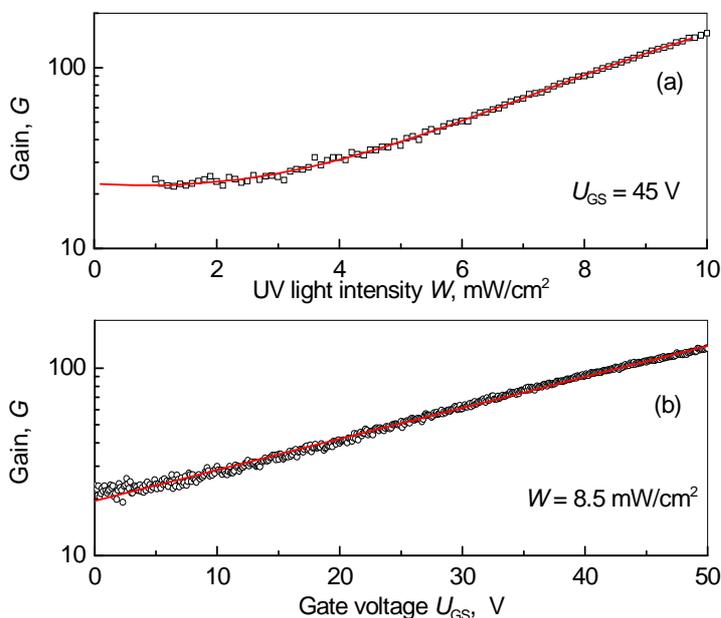


Рис.5. Зависимость коэффициента фотоэлектрического усиления G полевого фототранзистора от плотности мощности W падающего излучения (a) и напряжения затвора U_{GS} (b).

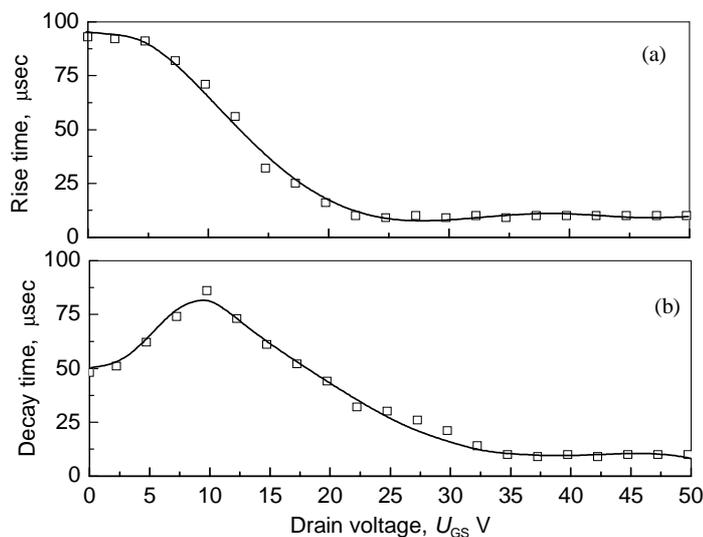


Рис.6. Зависимость времени нарастания τ_{rise} (a) и спада τ_{decay} (b) фотопроводимости от напряжения U_{GS} затвора фототранзистора.

Повышение фотоэлектрического усиления G от напряжения затвора U_{GS} и плотности мощности W (рис.5) можно объяснить различной скоростью дрейфа дырок и электронов, образующихся под воздействием света, в электрическом поле под затвором. В исследуемых пленках ZnO:Li холловская подвижность дырок намного меньше, чем подвижность электронов: $\mu_p / \mu_n = 2.2 / 18.6$ (см. табл.1). Поэтому генерируемые светом электроны быстро выносятся полем, так что в области сильного поля остаются только дырки. Для обеспечения зарядовой компенсации 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 Δn пропорционально времени жизни фотовозбужденных дырок τ_p и обратно пропорционально времени пребывания фотоэлектронов в зоне сильного поля τ_n . Тогда выражение для коэффициента фотоэлектрического усиления приобретает вид $G = \eta_{ph} (\tau_p / \tau_n)$, где η_{ph} – эффективный квантовый выход. Время пребывания электрона в области сильного поля обратно пропорционально напряженности электрического поля E на переходе изолятор затвора – канал $\tau_n = d / \mu_n E$, где d – толщина канала. Время жизни фотовозбужденных носителей (электронов или дырок) не зависит от напряженности на переходе изолятор затвора – канал.

Оценим глубину проникновения электрического поля на переходе изолятор затвора – канал в этих транзисторах. В исследуемых структурах в качестве канала использовались компенсированные полупроводники с низкой проводимостью и малой подвижностью носителей заряда. Дебаевскую длину экранирования можно оценить из выражения $L_D = \sqrt{D_n \tau_d}$, где D_n – коэффициент диффузии электронов и τ_d – время максвелловской релаксации, которые в нашем случае равны, соответственно, $0.47 \text{ см}^2/\text{с}$ и $3.9 \times 10^{-11} \text{ с}$. Тогда величина

$L_D = 4.2 \times 10^{-6} \text{ см}$, в то время как средняя толщина канала $\sim 0.3 \times 10^{-4} \text{ см}$. Следовательно, можно говорить о сильном электрическом поле в области перехода изолятор затвора–канал транзистора, а это означает, что наибольший вклад в коэффициент фотоэлектрического усиления дают фотоэлектроны, которые генерируются в этой области.

Включение и выключение УФ излучения приводит к изменению фототока. При этом нарастание тока аппроксимируется зависимостью $I_D^{photo} = A_1 [1 - \exp(-t/\tau_{rise})]$ и спад выражением $I_D^{dark} = A_2 \exp(-t/\tau_{decay})$, где A_1 и A_2 – константы. На рис.6 представлены зависимости времени нарастания и спада фотопроводимости от напряжения затвора фототранзистора U_{GS} . Видно, что с повышением напряжения на затворе происходит уменьшение времени нарастания и спада. Это изменение можно объяснить наличием двух временных компонент – медленной и быстрой. Медленная компонента нарастания и спада обусловлена ловушками в объеме полупроводника, а быстрая – поверхностными состояниями. При напряжениях затвора 30–50 В включается механизм, связанный с поверхностными состояниями, что приводит к резкому уменьшению времени нарастания и спада фотопроводимости. Поверхностные состояния играют роль ловушек и центров рекомбинации для фотоэлектронов. Медленная и быстрая компоненты при нарастании и при спаде фотопроводимости наблюдались в пленках ZnO:Li [16,17]. Вначале происходит быстрое изменение фототока $\sim 10^{-4}$

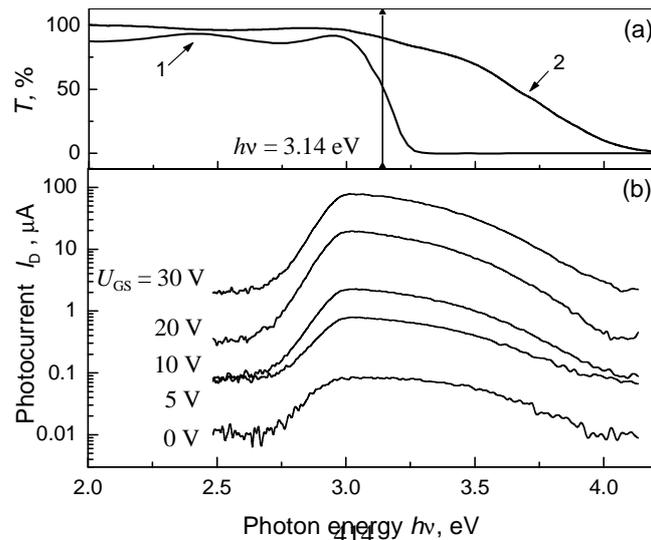


Рис.7. Спектральные зависимости (а) пропускания T пленок ZnO:Li (канал) (кривая 1) и ZnO:Ga (затвор) (кривая 2) и (б) фототока I_D для немодулированного излучения при различных напряжениях исток – затвор U_{GS} при $U_{DS} = 200$ В. Указанная на рисунке (а) энергия фотона $h\nu = 3.14$ эВ использована при фотоэлектрических измерениях.

сек, при нарастании или спаде, в дальнейшем кинетика нарастания или спада продолжается с характерным временем 10^{-1} –1 сек.

На рис.7а приведены спектры пропускания T низкопроводящей ZnO:Li и высокопроводящей ZnO:Ga пленок, используемых в качестве, соответственно, канала и затвора полевого транзистора. Необходимо отметить, что эта структура прозрачна в видимой области и пропускание в этой области составляет ~90%. УФ часть излучения практически не поглощается в слое затвора и полностью поглощается в канале, т.е. неравновесные носители заряда создаются только в слое канала полевого транзистора. Сдвиг края поглощения для пленок ZnO:Ga (сдвиг Бурштейна–Мосса) обусловлен увеличением концентрации носителей в зоне проводимости. На рис.7б представлена спектральная зависимость тока стока от энергии фотона, возбуждающего фотопроводимость для модулированного излучения с частотой $f = 177$ Гц при различных напряжениях исток–затвор U_{GS} (измерения проведены при $U_{DS} = 100$ В). Величина фототока с увеличением напряжения затвор–исток возрастает, не изменяя формы спектральной зависимости.

4. Заключение

Получены прозрачные полевые транзисторы с каналами n - и p -типа на основе оксидных пленок ZnO:Li. Пленки ZnO:Li с малой проводимостью использовались в качестве канала, высокопроводящие пленки ZnO:Ga использовались в качестве электродов затвора стока и истока, фторидные пленки MgF_2 использовались в качестве изолятора затвора. Полевые транзисторы прозрачны в видимом диапазоне света и не меняют основных характеристик при освещении светом видимого диапазона. Полевые транзисторы могут быть использованы при создании управляющих элементов прозрачной электроники, работающей при дневном освещении. Исследовано влияние УФ излучения на полевой эффект в тонких пленках ZnO:Li. Измерены фотоэлектрические характеристики полевых транзисторов. Полученные полевые фототранзисторы с каналом n -типа обладают высоким коэффициентом фотоэлектрического усиления. Предложен механизм фотоэлектрического усиления в полученных тонкопленочных полевых транзисторах.

Работа выполнена в рамках Государственного тематического финансирования Республики Армения и при финансовой поддержке фонда AN-SEF EN–2177.

ЛИТЕРАТУРА

1. **N.R.Aghamalyan, E.A.Kafadaryan, R.K.Hovsepyan, S.I.Petrosyan.** *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, 80 (2005).
2. **T.Yamamoto, H.Katayama-Yoshida.** *J. Cryst. Growth*, **214/215**, 552 (2000).
3. **T.Yamamoto, H.Katayama-Yoshida.** *Mater. Res. Soc. Proc.*, **623**, 223 (2000).
4. **Н.Р.Агамалян, Р.К.Овсепян.** *Изв. НАН Армении, Физика*, **43**, 274 (2008).
5. **P.F.Carcia, R.S.McLean, M.H.Reilly, I.Malajovich, K.G.Sharp.** *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **H7.2.1**, 769 (2003).
6. **E.Fortunato, T.P.Barquinha, A.Pimentel, A.Gonc, L.Pereira, R.Martins.** *Thin Solid Films*, **487**, 205 (2005).
7. **B.J.Norris, J.Anderson, J.F.Wager, D.A.Keszler.** *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **L105**, 36 (2003).
8. **K.Wang, Y.Vygranenko, A.Nathan.** *J. Appl. Phys.*, **101**, 114508 (2007).
9. **N.R.Aghamalyan, R.K.Hovsepyan, A.R.Poghosyan, V.G.Lazaryan,** *Proc. SPIE*, **5560**, 235 (2004).
10. **Y.J.Cho, J.H.Shin, S.M.Bobade, Y-B.Kim.** *Thin Solid Films*, **517**, 1415 (2009).
11. **N.R.Aghamalyan, R.K.Hovsepyan, A.R.Poghosyan, B. von Roedern, E.S.Vardanyan.** *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **9**, 1418 (2007).
12. **Н.Р.Агамалян, Р.К.Овсепян, С.И.Петросян.** *Изв. НАН Армении, Физика*, **44**, 44 (2009).
13. **E.Monroy, F.Omnes, F.Calle.** *Semicond. Sci. Technol.*, **18**, R33 (2003).
14. **H.S.Bae, M.H.Yoon, J.K.Kim.** *App. Phys. Lett.*, **83**, 5313 (2003).
15. **P.Gorm, M.Lehnhardt, T.Riedi, W.Kowalsky.** *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 193504 (2007).
16. **N.R.Aghamalyan, E.A.Kafadaryan, R.K.Hovsepyan.** Effect of lithium and gallium impurities on opto-electrical properties of ZnO films. "Trends in Semiconductor Research". New York, Nova Science Publishers, 2005, pp.81-110.
17. **S.A.Studenikin, N.Golego, M.Cocivera.** *J. Appl. Phys.*, **87**, 2413 (2000).

ZnO:Li ԹԱՂԱՆԹԻՑ ԴԱՇՏԱՅԻՆ ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐ

Ռ.Կ. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ, Ն.Ռ. ԱՂԱՄԱԼՅԱՆ, Ս.Ի. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Պատրաստված են *n*- և *p*-տիպի ուղղետարով դաշտային տրանզիստորներ ZnO:Li օքսիդային թաղանթի հիմքով՝ օգտագործելով MgF₂ ֆտորիդային թաղանթը որպես փականի մեկուսիչ: Ուսումնասիրված է ZnO:Li-ի բարակ շերտի դաշտային էֆեկտը, ինչպես նաև ուլտրամանուշակագույն ճառագայթման ազդեցությունը այդ էֆեկտի վրա: Հետազոտված են ստացված բարակաշերտ դաշտային տրանզիստորների լուսաէլեկտրական բնութագրերը: Արաջարկված է ստացված թաղանթներում լուսաէլեկտրական ուժեղացման մեխանիզմը:

FIELD-EFFECT TRANSISTOR BASED ON ZnO:Li FILMS

R.K. HOVSEPYAN, N.R. AGHAMALYAN, S.I. PETROSYAN

Field-effect transistors with *n*- and *p*-types of the channel on the base of ZnO:Li oxide films and MgF₂ fluoride film as a gate insulator were obtained. The field effect as well as the UV radiation influence on the field effect in ZnO:Li thin films were investigated. Photoelectric characteristics of the obtained thin film field-effect transistors were studied. The mechanism of photoelectric amplification in the obtained thin-film field transistors is proposed.