

Э.Е. ЭЛБАКЯН

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ЛЕГИРОВАННЫХ Ga И Li ПЛЕНОК ZnO

Проведены исследования электрических и фотоэлектрических характеристик прозрачных пленок ZnO. Показана возможность управления проводимостью введением примеси. Отношение проводимости пленок, легированных донорной и акцепторной примесями, достигает значений 10^9 . Показано, что при легировании Li, обеспечивающем значительное уменьшение темновой проводимости без изменения типа проводимости, можно достичь существенного увеличения отношения фотопроводимости к темновой. Это явление может быть использовано при разработке твердотельных фотодетекторов УФ диапазона.

Ключевые слова: фотопроводимость пленок ZnO, легированные пленки, прозрачная электроника.

Легированные литием пленки ZnO получены методом электронно-лучевого вакуумного напыления на подложках из сапфира [1,2]. Для напыления синтезировались мишени с заданной концентрацией примесей: Li (0,5; 0,6; 0,8 и 5 ат %) и Ga (0,7 и 2 ат %). Примесь Li создавала акцепторные центры и соответственно уменьшала проводимость, а примесь Ga создавала донорные центры и соответственно повышала проводимость. Метод вакуумного электронно-лучевого напыления приводит к получению пленок с дефицитом кислорода, поэтому они подвергались послеростовому отжигу на воздухе для насыщения их кислородом. Это способствует уменьшению кислородных вакансий и, как следствие, уменьшению донорных центров. В результате были получены пленки оксида цинка, содержащие как донорные, так и акцепторные центры.

Проводимость ZnO:Li и ZnO:Ga пленок измерялась на постоянном и переменном токах. Проводимость на постоянном токе контролировалась для решения задачи о возможности применения пленок ZnO:Ga в качестве проводящих электродов в устройствах. Данные о проводимости важны и для изучения структуры дефектов в пленках.

В таблице приведены данные проводимости пленок с примесями Li и Ga. Видно, что лучшая проводимость у пленок с примесью Ga (2%), причем, что очень важно для практического применения, пленки с примесью Ga сохраняют высокую проводимость и после отжига [3]. Пленки, полученные электронно-лучевым методом, обладают дефицитом кислорода. Комплекс "кислородная вакансия-смещенный атом цинка" является донорным центром. Ионы Ga^{2+} также являются донорными центрами, поэтому в пленках ZnO:Ga наблюдается только электронная проводимость с двумя типами донорных центров. В пленках, легированных Li, одновременно существуют два типа центра: акцепторный центр, обусловленный

ионами Li, и донорный центр, обусловленный кислородными вакансиями и смещенными атомами цинка.

Таблица

Характеристики пленок ZnO

N	Примесь, ат%	Отжиг пленки				Толщина, нм	Проводимость (Ом^{-1}), на частотах	
		отож. неотож.	T°C	мин.	среда		0 Гц	1000 Гц
1	Ga, 2	неотож.	—	—	—	345	$2.9 \cdot 10^3$	$0.8 \cdot 10^3$
3	Ga, 2	отож.	350	60	возд.	350	$0.77 \cdot 10^3$	$0.6 \cdot 10^3$
5	Li, 5	неотож.	—	—	—	150	1.5	
6	Li, 0,5	отож.	350	300	возд.	210	$6.8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
8	Li, 0,6	отож.	350	60	возд.	630	$0.8 \cdot 10^{-6}$	
9	Li, 0,8	отож.	350	60	возд.	550	$0.5 \cdot 10^{-6}$	

Пленки с минимальной проводимостью - это компенсированные полупроводники. Увеличение концентрации Li выше некоторого порогового значения ведет к увеличению проводимости за счет изменения типа проводимости от электронного к дырочному. Лучшие диэлектрические свойства с минимальной проводимостью наблюдаются у пленок ZnO с примесью лития 0,5...0,8 ат % и отожженных на воздухе. Использование пленок с примесями Ga и Li для создания сэндвича или планарных структур из проводящего и непроводящего слоев позволяет достичь отношения проводимостей $\sigma_{\text{ZnO:Ga}}/\sigma_{\text{ZnO:Li}} \approx 10^9$, что важно при создании элементов прозрачной электроники.

Измерены спектры пропускания и фотопроводимости с целью определения области прозрачности пленок ZnO с высокой и низкой удельной проводимостью и влияния оптического излучения на проводимость пленок и характеристик оптических переходов, формирующих длинноволновый край фундаментального поглощения. На рис.1 представлены зависимости пропускания T от длины волны λ для пленок ZnO, легированных Li и Ga. Как видно, все пленки прозрачны в видимом диапазоне и имеют высокое пропускание. Сравнивая спектры пропускания, можно сказать, что введение Ga (2 ат%) в качестве легирующей примеси сдвигает край поглощения в УФ область, этот сдвиг обусловлен эффектом Бурштейна-Мосса, т.е. отсутствием поглощения света в полупроводнике в УФ области из-за увеличения концентрации электронов в зоне проводимости.

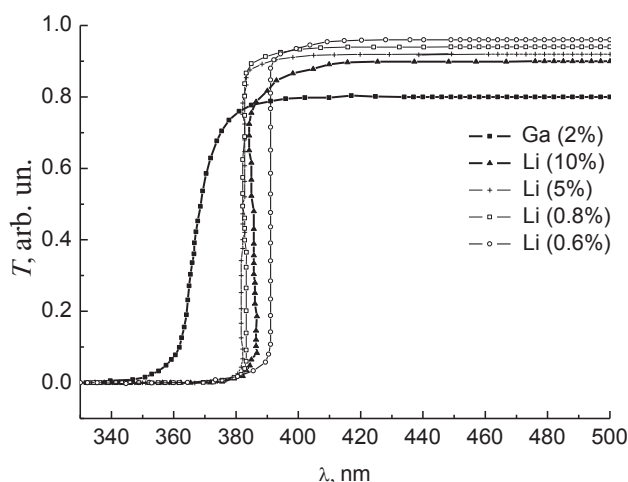


Рис. 1. Зависимость пропускания T от длины волны для пленок ZnO , легированных Li и Ga

На рис.2а приведена электрическая схема измерения кинетики тока фотопроводимости, а на рис.2б - структурная схема измерения фотопроводимости. Образец для измерения представляет собой планарную структуру $\text{Al}/\text{ZnO}:\text{Li}/\text{Al}$ или $\text{Al}/\text{ZnO}:\text{Ga}/\text{Al}$ на подложке из сапфира. Размеры освещенного объема пленки $V = ldw$, где длина $l = 20$ мм - расстояние между омическими электродами, совпадающее с направлением приложенного электрического поля; $d \approx 20$ мм - ширина освещенного участка пленки ZnO и $w \approx 0.1 \dots 1$ мкм - толщина этой пленки.

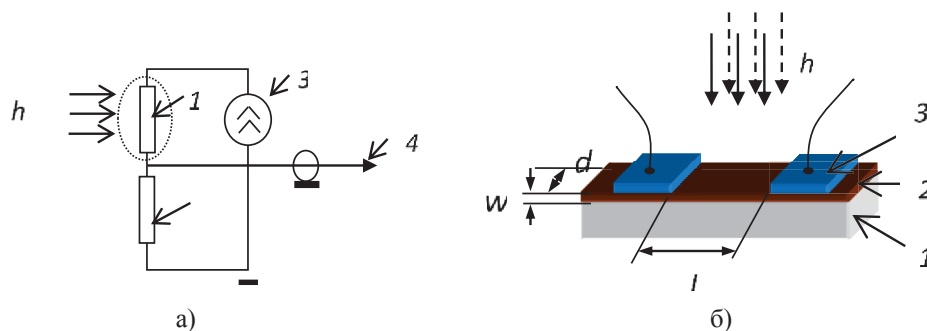


Рис. 2. а) Электрическая схема измерения кинетики тока фотопроводимости: 1 – гетероструктура, 2 - эталонный резистор, 3 - генератор напряжения, 4 - выход на регистрацию; б) схема освещения фоторезистора на основе пленки ZnO : 1 - подложка из сапфира, 2 - пленка ZnO , 3 - омические электроды (Al)

Ток, проходящий через гетероструктуру 1, измерялся по падению напряжения на эталонном резисторе 2, включенном в схему последовательно с гетероструктурой фоторезистора (рис. 2а). Напряжение смещения, приложенное к образцу, равно $U_0 = 50$ В. Измерения на эталонном резисторе проводились с

помощью электронной платы National Instruments (NI). Управление платой NI и передача данных центральному процессору компьютера осуществлялись с помощью пакета программ LabVIEW 7.0. Источником света служила лампа накаливания 8 Вт с цветовой температурой 6000 К и фильтром УФ-1, спектральный диапазон при этом составлял 360...410 нм.

На рис.3 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) планарной структуры Al/ZnO:Li/Al с освещением (1) и без освещения (2). Как видно из рисунка, ВАХ для темновой и фотопроводимости имеют линейную зависимость, что обусловлено омическим характером перехода ZnO:Li/Al.

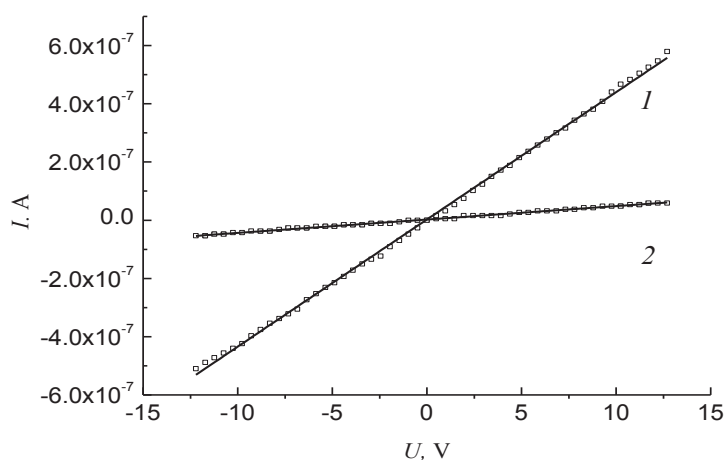


Рис. 3. ВАХ пленки ZnO:Li: 1 - с освещением, 2 - без освещения

На рис.4 приведены спектральные зависимости тока фотопроводимости J_{ph} и пропускания T для пленки ZnO:Li (0,8 ат %). Видно, что спектр фотопроводимости имеет пик на ~ 370 нм (3,34 эВ), обусловленный возбуждением электронов из валентной зоны в зону проводимости, который ненамного превышает ширину запрещенной зоны пленки ZnO:Li (0,8 ат %) $E_g \sim 3.30$ эВ. Согласно спектральным исследованиям, примесь Li в пленках оксида цинка не создаёт дополнительных уровней в запрещенной зоне. При отсутствии примесного уровня в полупроводнике кривая спектрального распределения фотопроводимости имеет лишь один максимум. Длинноволновый спад фототока обусловлен уменьшением поглощения пленки. Наблюдается не только длинноволновый ($h\omega < E_g$), но и коротковолновый спад фотопроводимости ($h\omega > E_g$). Коротковолновый спад объясняется тем, что при энергиях кванта света, намного превышающих ширину запрещенной зоны $h\omega \gg E_g$, поглощение света велико, и весь свет поглощается в тонкой приповерхностной области полупроводника. В этой области время жизни и подвижность носителей из-за локализованных поверхностных (таммовских) состояний ниже, чем в объеме, соответственно меньше и величина фототока [4].

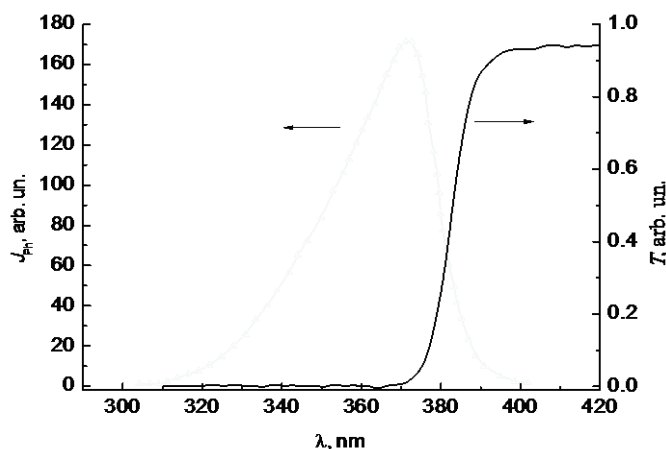


Рис. 4. Спектральная зависимость фототока J_{ph} и пропускания T пленки ZnO:Li

Были проведены также измерения фотопроводимости пленок ZnO:Ga (2 ат %) с использованием планарной структуры Al/ZnO:Ga/Al и измерителя RCL E7-8. Проведенные эксперименты показали, что с точностью до 0,001 от темновой проводимости σ_{dark} при освещении светом с интенсивностью 1 Вт см^{-2} изменения фотопроводимости не наблюдалось.

Показано, что примесное управление проводимостью пленок эффективно как на постоянном токе, так и на частоте 1000 Гц . Отношение проводимостей $\sigma_{\text{ZnO:Ga}}/\sigma_{\text{ZnO:Li}}$ пленок, легированных акцепторной и донорной примесями, достигает значений 10^9 . Показано, что при легировании Li, обеспечивающем значительное уменьшение темновой проводимости, можно достичь существенного увеличения отношения фотопроводимости к темновой. Пленки, легированные донорной примесью Ga, при воздействии излучения с интенсивностью 1 Вт см^{-2} не изменяют электрических характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Influence of thermal annealing on optical and electrical properties of ZnO films prepared by electron beam evaporation / **N.R. Aghamalyan, R.K. Hovsepyan, A.F. Zerrouk, et al** // Semicon. Sci. Technol. - 2003. - 18. - P.525.
2. **Агамалян Н.Р., Овсепян Р.К., Петросян С.И.** Полевой транзистор на основе пленок ZnO:Li // Изв. НАН Армении. Физика. - 2010. - 45. - P.407.
3. **Агамалян Н.Р., Овсепян Р.К.** Фотопроводимость в планарных структурах металл-полупроводник-металл с пленками ZnO:Ga и ZnO:Li // Изв. НАН Армении. Физика. - 2008. - 43. - P.143.
4. **Дэвисон С., Левин Дж.** Поверхностные (таммовские) состояния. - М.: Мир, 1973. - 232 с.

Է.Ե. ԷԼԲԱԿՅԱՆ

**Li-ՈՎ ԵՎ Ga-ՈՎ ԼԵԳԻՐՎԱԾ ZnO ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ
ՖՈՏՈՆԱՂՈՐԴԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Իրականացվել են թափանցիկ ZnO թաղանթների էլեկտրական և ֆոտոէլեկտրական հատկությունների հետազոտություններ: Ցույց է տրվել, որ խառնուրդներ լեգիրելով՝ կարելի է ղեկավարել հաղորդականությունը: Լեգիրված դոնորային կամ ակցեպտորային խառնուրդներով թաղանթների հաղորդականությունների հարաբերության արժեքները հասնում են մինչև 10^9 : Ցույց է տրվել, որ լեգիրված Li-ի խառնուրդով թաղանթների հաղորդականությունը էապես նվազում է՝ առանց հաղորդականության տեսակի փոփոխության, և կարելի է հասնել ֆոտոհաղորդականության և հաղորդականության հարաբերությունների զգալի աճի: Այս արդյունքները կարող են օգտագործվել ուլտրամանուշակագույն տիրույթի պինդամրմնային ֆոտոդետեկտորներ պատրաստելու համար:

Առանցքային բառեր. ZnO թաղանթների ֆոտոհաղորդականությունը, լեգիրված թաղանթներ, թափանցիկ էլեկտրոնիկա:

E.Y. ELBAKYAN

PHOTOCONDUCTIVITY OF Ga AND Li DOPED ZnO FILMS

The electric and photoelectric characteristics of transparent ZnO films have been studied. The possibility of controlling the conductivity by introduction of impurities has been presented. The ratio of conductivity of the films doped with donor and acceptor impurities reaches the value of 10^9 . It is shown that at doping Li, providing a significant reduction in the dark conductivity without changing the conductivity type, it is possible to achieve a significant increase in the ratio of photoconductivity to the dark conductivity. This phenomenon can be used for the development of solid-state photodetectors of UV range.

Keywords: photoconductivity ZnO films, doped films, transparent electronics.