

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НАНОГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O ПОСЛЕ ПРОТОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Эльмуратова Д.Б.¹, Таубалдиев А.А.²

¹Эльмуратова Дилноза Бахтиеровна - доктор философии по физико-математическим наукам, доцент;

²Таубалдиев Азамат Аскарлович - студент,

кафедра теплоэнергетики и АЭС,

Ташкентский государственный технический университет,

г. Ташкент, Республика Узбекистан

Аннотация: на сегодняшний день одной из проблем в области оптоэлектроники является создание высокоэффективных биполярных широкозонных наногетеропереходов для достижения яркого и стабильного свечения при низком приложенном напряжении и комнатной температуре. В статье изучается зависимость фотоэлектрических и электролюминесцентных характеристик наногетеропереходов ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O до и после протонного облучения.

Ключевые слова: наногетеропереход, полупроводниковая структура, фотопроводимость, электролюминесценция, приложенное напряжение, протонное облучение.

В настоящее время в мире исследование физических механизмов повышения эффективности преобразования электроэнергии в излучение видимого диапазона в полупроводниковых наноструктурах является одной из наиболее важных задач в области полупроводниковой — оптоэлектроники. Широкозонные низкоразмерные полупроводники с р-п-гетеропереходом, обладающие электролюминесценцией при 300 К, своей компактностью и экономичностью заменяют лампы люминесцентные и накаливания. С этой точки зрения актуальной становится задача получения высокоэффективных светоизлучающих низковольтных биполярных широкозонных наногетеропереходов, в частности ZnO/ZnSe.

Полупроводниковые гетеропереходы в наноструктурах-квантовых приборах, применяемые сегодня в мире в качестве оптоэлектронных материалов с перестраиваемой шириной зоны, имеют необычный транспорт электронов и оптические эффекты [1, 8]. Высокая собственная излучательная эффективность голубых/зеленых светоизлучающих диодов (р-п-инжекция), разрабатываемых на базе ZnSe и ZnTe обусловлена преимуществами конфигурации наногетероструктур в виде квантовой ямы и тем, что они являются прямозонными полупроводниками. Отмечается сильная зависимость их оптоэлектронных характеристик от размеров наночастиц. Решение проблемы создания прямозонной ненапряженной наногетеропары для достижения яркого и стабильного свечения (имитирующего солнечный свет) при низком приложенном напряжении и комнатной температуре непосредственно связано с исследованием наиболее эффективных центров излучательной и каналов безызлучательной рекомбинации.

Целью проведения исследований является изучение зависимости фотоэлектрических и электролюминесцентных характеристик наногетеропереходов ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O до и после протонного облучения.

Предварительные расчёты показали, что протонное облучение НГП ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O образует глубокий уровень, которые влияют на форму фото-ВАХ и светоизлучающих структур.

Метод исследования. Фото-ВАХ измерялись двух контактным методом на стандартных приборах в темноте и при освещении лампой накаливания (сплошным спектром излучения). Ячейка освещалась стандартным источником белого света при токе накала 0.5 А, яркость лампы накаливания измерялась люксметром Guarda FX-101 LUX METER, и составляла 2280 Люмен. Измерительная ячейка исключала попадание света, так как ZnSe фоточувствителен. Сначала измерения были выполнены в состоянии полного затемнения образца при 300 К. Изучались зависимости темнового и фото-тока от приложенного внешнего напряжения, обеих полярностей которое менялось в диапазоне 0÷300 В с погрешностью ± 0.3%, в зависимости от сопротивления образца (особенно для высокоомных образцов). Фотоэлектрические (ФЭ) характеристики-измерялись по сопротивлению образцов при фиксированном напряжении в темноте (R_T) и при освещении (R_C) лампой накаливания. Фотопроводимость (ФП) ($\sigma_{ФП}$) определялась из соотношения:

$$\sigma_{ФП} = \frac{R_T - R_C}{R_T \cdot R_C}$$

Спектры ЭЛ и ВЯЗ измерялись на спектральном приборе-монохроматоре SPM-2 с ФЭУ-100, в интервале длин волн 200÷900 нм при 300 К. Постоянное напряжение в широком диапазоне (1~100 В) прикладывалось от блока питания Б-50 в прямом и обратном направлении для выявления гистерезиса в ВЯХ ЭЛ. Пороговое напряжение определялось по началу появления ЭЛ (свечение визуально наблюдалось, начиная с 60 В), затем подбиралось рабочее напряжение по устойчивости ЭЛ.

Облучение: Часть образцов из каждой серии облучалась протонами с энергией 18 МэВ (ток пучка $3 \cdot 10^{-7}$ А, площадь ~ 0.5 см², поток $2 \cdot 10^{12}$ см⁻² с⁻¹) в вакууме (10^{-6} мм Hg) флюенсом $5 \cdot 10^{14}$ см⁻². Поскольку глубина проникновения протонов этой энергии в ZnSe составляет ~ 1.3 мм, а образцы имели толщину ~ 1 мм, протоны не поглощались в кристалле, и нагрев был < 370 К. При таких условиях эксперимента ожидалось образование пар Френкеля в объеме. На боковые грани образцов наносили омические индиевые контакты.

Результаты измерений:

Фотопроводимость: Было измерено сопротивление в темноте R_T и при освещении лампой накаливания R_C НГП ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O до и после протонного облучения. В таблице приведены расчетные данные темновое удельное сопротивление ρ_T и световое удельное сопротивление ρ_C , а также соответствующие значения поляризации (+R/-R) и фотопроводимости (ФП) $\sigma_{ФП}$ для НГП ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O до и после протонного облучения.

Таблица 1. ρ_T и ρ_C , (+R/-R) и $\sigma_{ФП}$ ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O

Образец		ρ_T , Ом·см	+R/R	ρ_C , Ом·см	+R/-R	$\sigma_{ФП}$, Ом ⁻¹
Необлученный Se/Zn=0.85		$+6.9 \cdot 10^8$ $-2.7 \cdot 10^9$	0.25	$+1.4 \cdot 10^8$ $-7.1 \cdot 10^8$	0.2	$+0.6 \cdot 10^{-9}$ $-0.1 \cdot 10^{-9}$
18 МэВ протоны	$5 \cdot 10^{14}$ см ⁻²	$+6.2 \cdot 10^6$ $-74 \cdot 10^6$	0.08	$+2.9 \cdot 10^6$ $-2.5 \cdot 10^6$	0.1	$+0.2 \cdot 10^{-7}$ $-0.3 \cdot 10^{-8}$

Исходный НГП ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O имел высокие значения $\rho_T = 6.9 \cdot 10^8$ Ом·см, низкие значения $\sigma_{ФП} = 0.6 \cdot 10^{-9}$ Ом⁻¹ и высокую поляризацию на свету и в темноте, где протонное облучение привело к снижению ρ_T более в 2 порядка до $6.2 \cdot 10^6$ Ом·см независимо от полярности, а также к уменьшению поляризации, с ростом $\sigma_{ФП}$ до 2 порядка т.е. $0.2 \cdot 10^{-7}$ Ом⁻¹. Из литературных данных известно, что монокристаллы ZnSe n-типа имели $\rho \sim 10^7 - 10^{10}$ Ом·см [2, 61], полученные нами результаты по ρ для высокоомного НГП ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O совпадают с этими значениями.

Фото-вольт амперные характеристики: Далее приведены результаты исследований ВАХ в темноте и при освещении НГП ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O сплошным спектром излучения лампы накаливания, измеренные при 300 К, до и после протонного облучения.

Из рис. 1. видно, что НГП приобрели ППС с запирающим барьером до $U = 58$ В, за счет образования глубоких, стабильных, электрически активных центров, с высокими значениями ρ . Наклоны ВАХ, характерные для ППС, выше напряжения отсечки определяют столкновительные ионизационные процессы по закону $I = KU^\beta$. Также, показано, что на свету запирающий барьер ВАХ снизился независимо от полярности до $U = 40$ В (рис. 1 кр.2).

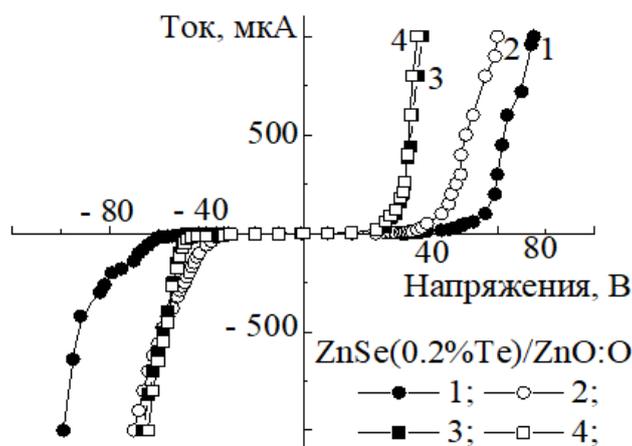


Рис. 1. Фото – ВАХ НГП ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O в темноте (темные кружки) и на свету (светлые кружки) (1, 2) - до и после облучения протонами флюенсом $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² - (3, 4)

Протонное облучение, привело к снижению запирающего барьера фото-ВАХ до $U = 35$ В и росту $\sigma_{ФП}$. На свету запирающий барьер Фото-ВАХ незначительно снизился независимо от полярности, а $\sigma_{ФП}$ выросла на порядок, за счет образования пар Френкеля.

Протонное облучение 18 МэВ не повлияло на форму ППС, но снизился запирающей барьера фото-ВАХ до $U = 35$ В, соответственно значение удельной сопротивление более на два порядка.

На рис. 2 и 3. представлены ВЯЗ и спектры ЭЛ наногетеропереходов (НГП) ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O до (1) и после протонного облучения (2) при полном цикле полярности напряжений.

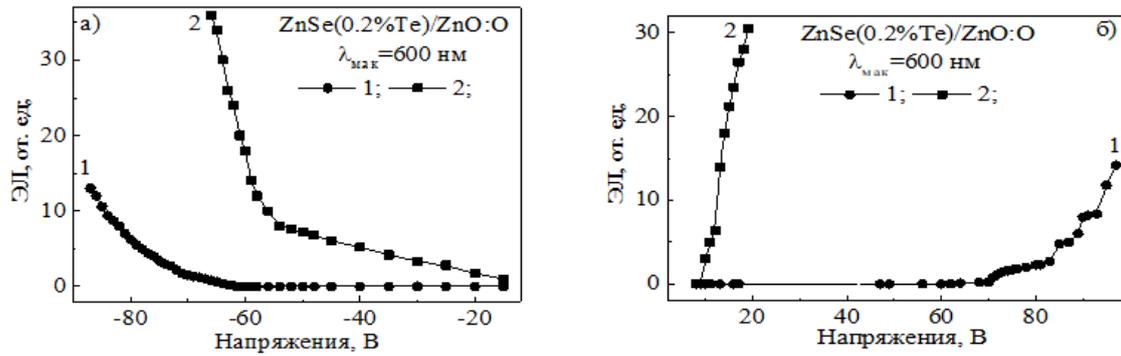


Рис. 2. ВЯЗ ЭЛ НГП ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O до (1) и после облучение протонами флюенсом (2) - $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, (а): при обратной и (б): прямой полярности указанных напряжений

На графиках ВЯЗ указаны пороговые значения напряжений, как видно при наложении $U > \pm 60 \text{ В}$ появляется ЭЛ, при этом образцы сильно нагревались, что приводило к деградации электродов, где в зависимости от полярности интенсивность ЭЛ ($I_{\text{ЭЛ}}$) достигла 13 при ($U = -87 \text{ В}$) и $I_{\text{ЭЛ}} = 14$ при ($U = 97 \text{ В}$) (рис. 2, кр.1). Из [3, 29] известно, что в кристаллах ZnSe(Te):O формируется более высоко подвижные излучательные центры Zn_i и устойчивые ассоциаты $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Te}_{\text{Se}}\text{Zn}_i$. В целом спектр излучения НГП ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O зависит от величины и знака возбуждающего напряжения. ВЯЗ ЭЛ и гистерезис полярности приложенного напряжения, в обеих полярностях носят степенной характер, а пороговое напряжение для возбуждения ЭЛ с той же интенсивностью, когда она начинает резко увеличиваться, зависело от полярности. Гистерезис проявляется при высоких напряжениях и свидетельствует о несимметричности потенциальных барьеров. Спектр содержит широкую полосу с $\lambda_{\text{макс}} = 600 \text{ нм}$, которая очевидно не элементарная, поскольку при вариации величины и полярности возбуждающего напряжения можно различить наложение трех разных полос с максимумами около 560, 600 и 700 нм как показано на рис. 2 (кр.2). Также видно, что протонное облучение НГП ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O рис. 2 (кр.2), привело к снижению возбуждающего напряжения ЭЛ при $\lambda_{\text{макс}} = 600 \text{ нм}$ до $U > \pm 10 \text{ В}$ в 6 раза, в зависимости от полярности $I_{\text{ЭЛ}} = 36$ при ($U = -66 \text{ В}$) и $I_{\text{ЭЛ}} = 31$ при ($U = 19 \text{ В}$), за счет образования пар Френкеля.

На Рис. 3 представлены спектры ЭЛ для НГП ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O до и после протонного облучения.

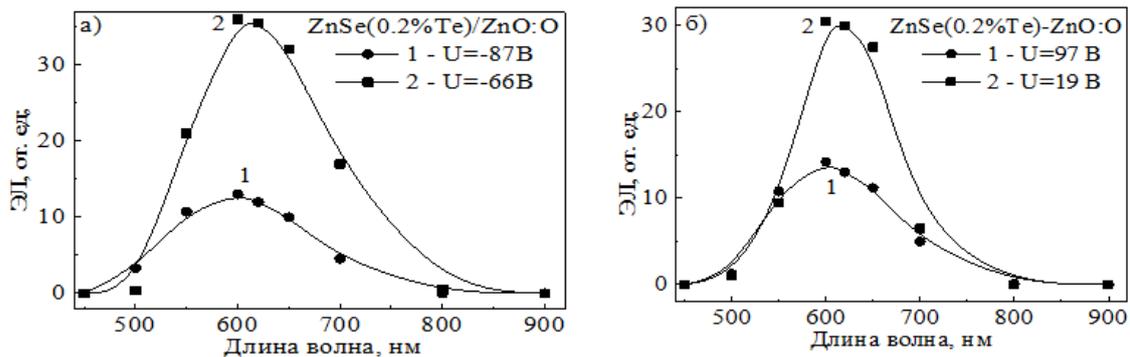


Рис. 3. Спектры ЭЛ НГП ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O, до (1) и после облучение протонами флюенсом (2) $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, при обратной (а) и прямой (б) полярности указанных напряжений

Видно, что облучение не повлияло существенным образом на спектр, но привело к росту интенсивности ЭЛ примерно более на 3 порядка величины зависимо от полярности, также видно, что при вариации величины и полярности возбуждающего напряжения можно различить наложение трех разных полос с максимумами около 560, 600 и 700 нм.

Вывод. Наногетеропереходы ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O с удельным сопротивлением $\rho = 6.9 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ имели полупроводниковую структуру. Влияние протонного облучения флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ привело к снижению ρ на два порядка независимо от полярности, соответственно снизился запирающий барьер полупроводниковой структуры. Широкополосная электролюминесценция с максимумом при 600 нм возбуждается в этих наногетеропереходах при напряжениях выше 60 В. Положение максимума полосы электролюминесценции не зависит от величины напряжения и облучения, она связана с рекомбинацией носителей заряда на центрах междоузельного цинка по механизму возбуждения предпробойного типа.

Протонное облучения наногетеропереходов ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O приводит к усилению электролюминесценции более на три раза при обеих полярностях приложенного напряжения.

Список литературы

1. Rahman Faiz. Opt. Eng. 58 (1), 010901 (2019), doi: 10.1117/1.OE.58.1.010901.
2. Рыжиков В.Д. и др. Способ получения полупроводникового материала n-типа на основе ZnSe// Патент. Украина, 2011. С. 1-6.
3. Вакулинко О.В. и др. ФТП, 1997. Т. 31. № 10. С. 1211-1215.
4. Nie B. *at all.* Nanotechnology. UK, 2013. 24, 095603. P. 1-8.