

**PHOTOELECTRIC RESPONSE OF ITO FILMS
UNDER UV IRRADIATION**

Yuri Sergeevich Zhidik^{1, 2a}, *Sergei Maksimovich Verkhallantsev*¹,
*Dmitry Olegovich Renner*¹

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin pr, 634050 Tomsk, Russia

² V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Academician Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

^a Zhidikyur@mail.ru

ABSTRACT

This article presents the results of a study of photoinduced processes occurring in thin indium tin oxide (ITO) films irradiated with ultraviolet (UV) radiation. For the study, ITO films were deposited on glass substrates using reactive magnetron sputtering under different process conditions, which allowed them to achieve distinctly different initial concentrations of oxygen vacancies and, consequently, conduction electrons. Monitoring the resistance of the prepared ITO samples upon UV irradiation revealed a decrease caused by the generation of additional charge carriers due to the breakdown of chemical bonds with gas atoms adsorbed on the film surface. Polycrystalline ITO films with a low initial charge carrier concentration exhibit the greatest sensitivity to UV irradiation. Furthermore, it is shown that the generation of additional charge carriers in ITO is also due to the thermal ionization of tin impurity atoms. Furthermore, when Al/ITO/Al thin-film structures were irradiated with UV radiation, an increase in the potential difference was recorded on the metal contact pads. The conducted studies of the photoelectric response of ITO films exposed to UV radiation demonstrate the potential for their use as a sensitive layer in a UV detector.

KEYWORDS

Indium tin-doped oxide; ITO; electrical properties of ITO; photoelectric response of ITO; UV exposure.

**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ПЛЕНОК ИТО
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Юрий Сергеевич Жидик^{1, 2a}, *Сергей Максимович Верхаланцев*¹,
*Дмитрий Олегович Реннер*¹

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050 Томск, пр. Ленина, 40

² Институт оптики и атмосферы им. В.К. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055 Томск, пл. Академика Зуева 1

^a Zhidikyur@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты исследований фотоиндуцированных процессов, происходящих в тонких пленках оксида индия-олова (ITO) при их облучении излучением ультрафиолетового диапазона длин волн (УФ излучением). Для исследования пленки ITO осаждались на стеклянные подложки методом реактивного магнетронного распыления в разных технологических режимах, что позволило обеспечить в них заведомо разные начальные концентрации кислородных вакансий и, соответственно, электронов проводимости. Контроль изменения сопротивления подготовленных образцов ITO при облучении УФ излучением показал его уменьшение, вызванное генерацией дополнительных носителей заряда за счет разрушения химических связей с адсорбированными на поверхности пленок атомами газов. Наибольшую чувствительность к облучению УФ излучением имеют поликристаллические пленки ITO с низкой начальной концентрацией носителей зарядов. Помимо этого, показано, что генерация дополнительных носителей заряда в ITO также обусловлена тепловой ионизацией примесных атомов олова. Кроме того, при облучении УФ излучением тонкопленочных структур Al/ITO/Al на металлических контактных площадках был зарегистрирован рост разницы потенциалов. Проведенные исследования фотоэлектрического отклика пленок ITO при воздействии УФ излучения показывают возможность их использования в качестве чувствительного слоя детектора УФ диапазона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Оксид индий-олова; ITO; электрические свойства ITO; фотоэлектрический отклик ITO; УФ экспозиция.

Введение

Пленки оксида индия-олова (Indium Tin Oxide, ITO) на протяжении десятилетий остаются одними из самых востребованных материалов в современной оптоэлектронике благодаря уникальному сочетанию высокой оптической прозрачности в видимом диапазоне длин волн и хорошей электропроводности. Традиционно ITO чаще всего рассматривается как прозрачный электрод для солнечных элементов, жидкокристаллических дисплеев и сенсорных панелей [1, 2]. Однако в последние годы фокус исследовательского интереса сместился в сторону изучения активных функциональных свойств этого материала, в частности его чувствительности к внешним воздействиям [1, 3–5].

Особое значение имеет взаимодействие пленок ITO с ультрафиолетовым (УФ) излучением. Будучи вырожденным широкозон-

ным полупроводником n-типа проводимости, ITO проявляет выраженный фотоэлектрический отклик при облучении фотонами, энергия которых превышает ширину его запрещенной зоны [3, 4]. Это открывает перспективы для создания безфильтровых УФ-детекторов, газовых сенсоров с оптической активацией и устройств памяти [5].

Несмотря на широкое применение материала, динамика фотоэлектрических процессов в ITO при УФ экспозиции остается предметом дискуссий, так как она сильно зависит от стехиометрии, метода осаждения и морфологии поверхности пленок. В данной работе исследуется фотоэлектрический отклик тонких пленок ITO, осажденных методом реактивного магнетронного распыления в разных технологических режимах, с целью выявления ключевых факторов, определяющих механизмы фотоиндуцированных в ITO процессов под действием УФ излучения.

1. Методики подготовки экспериментальных образцов и проведения исследований

Для исследования влияния УФ излучения на электрические характеристики пленки ИТО толщиной 70 нм осаждались методом реактивного магнетронного распыления мишени In/Sn (90%/10%) в смеси газов Ar (поток напуска в рабочую камеру 2 л/ч) и O₂ (поток напуска в рабочую камеру 0,65 л/ч). В работе [6] было показано, что такое соотношение рабочих газов в совокупности с температурой подложки и режимом отжига обеспечивает наименьшее удельное сопротивление пленок ИТО. Сразу же после осаждения один из образцов пленок ИТО был подвержен высокотемпературному отжигу в вакууме при температуре 450 °С в течении 20 минут. Такой отжиг пленок ИТО приводит к формированию их поликристаллической структуры [7]. Кроме того, учитывая, что наличие электронов проводимости в ИТО обусловлено дефектами в виде донорных кислородных вакансий, высокотемпературный отжиг пленок ИТО в вакууме сразу после их осаждения способствует увеличению концентрации кислородных вакансий и, следовательно, снижению электрического сопротивления почти на порядок [8–10].

Особенности технологических режимов осаждения пленок ИТО и их измерен-

ное удельное поверхностное сопротивление приведены в табл. 1. В качестве подложек использовалось предметное стекло с размерами 25 мм × 75 мм. Для обеспечения электрического контакта к ИТО по краям подложек осаждалась термическим испарением пленка алюминия толщиной 100 нм таким образом, что в центре оставался квадратный незапыленный участок ИТО с размерами 25 мм × 25 мм.

Подготовленные образцы помещались в затемненный короб с установленной внутри него ХеСl-эксилампой барьерного разряда таким образом, что интенсивность УФ-излучения при облучении образца составляла 25 мВт/см² (рис. 1, а). Спектр излучения используемой ХеСl-эксилампы приведен на рис. 1, б. Контроль сопротивления образцов пленок ИТО и возникающей разности потенциалов на контактных площадках подготовленных образцов проводился с использованием цифрового мультиметра KEITHLEY DMM6500.

Методика проводимых исследований заключалась в контроле изменения электрического сопротивления и возникающей на контактных площадках исследуемых образцов разницы потенциалов при их облучении УФ излучением в течении 10 минут, а также при последующей релаксации пленок в течении этого-же времени без воздействия УФ излучения.

Таблица 1. Параметры исследуемых образцов пленок ИТО

Table 1. Parameters of the studied ITO film samples

№ образца / Sample number	Температура подложки / Substrate temperature, °С	Режим отжига ИТО / ITO annealing mode	Удельное поверхностное сопротивление / Specific surface resistance, Ohm·□
1	25	Без отжига / without annealing	570
2	300	Без отжига / without annealing	112
3	300	Отжиг в вакууме при 450 °С в течении 20 минут / Annealing in vacuum at 450 °С for 20 minutes	22

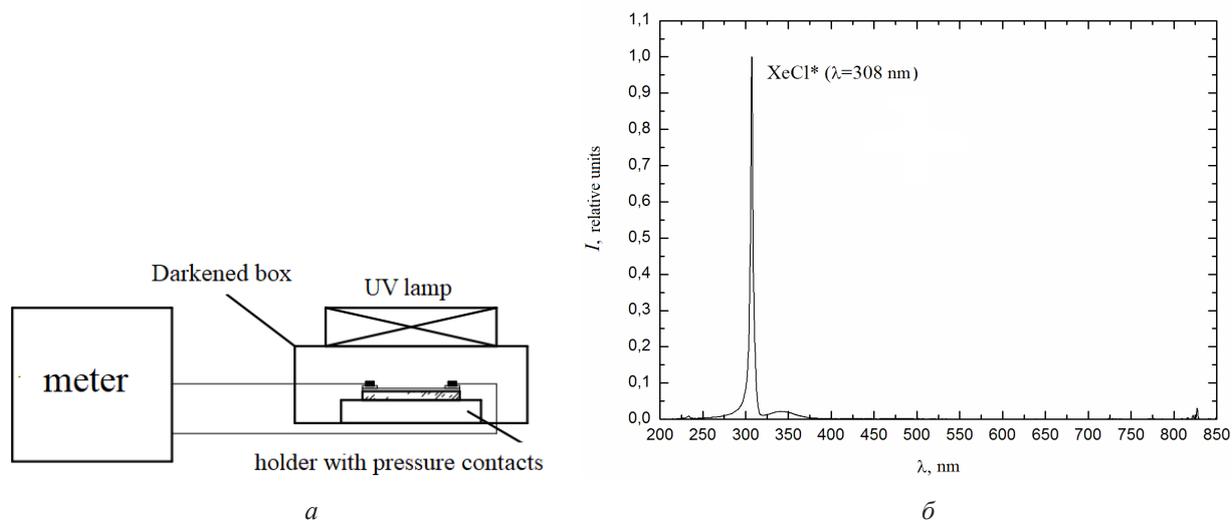


Рис. 1. Схема измерительной установки (а) и спектр излучения XeCl-эксилампы (б)

Fig. 1. Diagram of the measuring setup (a) and the emission spectrum of the XeCl excilamp (b)

2. Экспериментальные исследования изменения сопротивления ИТО и возникновение разности потенциалов при УФ экспозиции

При облучении УФ излучением для всех образцов пленок ИТО наблюдался резкий спад сопротивления (рис. 2). Для наглядности и сравнительного анализа крутизны изменения сопротивления образцов полученные результаты были нормированы на начальные значения сопротивлений.

Результаты исследований показали, что при воздействии УФ излучения сопротивление образцов пленок ИТО, не подверженных высокотемпературному отжигу (образцы №1 и №2), начинает резко уменьшаться. После того как воздействие УФ излучения на образцы пленок ИТО прекращается, их сопротивление возвращается к первоначальному значению. Такое экспоненциальное снижение сопротивления пленок ИТО при облучении УФ излучением и его восстановление после облучения, вероятно, обусловлено разрушением химической связи In – O, освобождением атома кислорода и его миграцией к поверхности пленки, где происходит десорбция. При этом резкое снижение сопротивления образцов в первые 30 секунд облучения указывает на прохождение процессов в приповерхностном слое пленок до глубины по-

глощения УФ излучения. После выключения УФ излучения процесс десорбции кислорода прекращается, а количество хемосорбированных атомов кислорода увеличивается [11, 12]. В результате протекания указанных процессов образование дополнительных электронов проводимости в образцах пленок ИТО №1 и №2 дает существенный вклад в снижение их удельного сопротивления.

При облучении УФ излучением образца ИТО №3 изменение его сопротивления происходит иначе по сравнению с не подвергнутыми высокотемпературному отжигу образцами пленок ИТО №1 и №2. Это связано с тем, что начальная концентрация электронов проводимости в образце №3 почти на порядок больше по сравнению с образцом №2, а также с тем, что после высокотемпературного отжига он обладает металлическим типом электропроводности. При облучении образца №3 УФ излучением в начальный момент времени его сопротивление незначительно снижается из-за появления дополнительных носителей заряда, но далее сопротивление начинает увеличиваться, что вызвано увеличением температуры образца поликристаллической пленки ИТО №3, имеющего положительный ТКС. Подтверждение этому предположению будет приведено нами ниже.

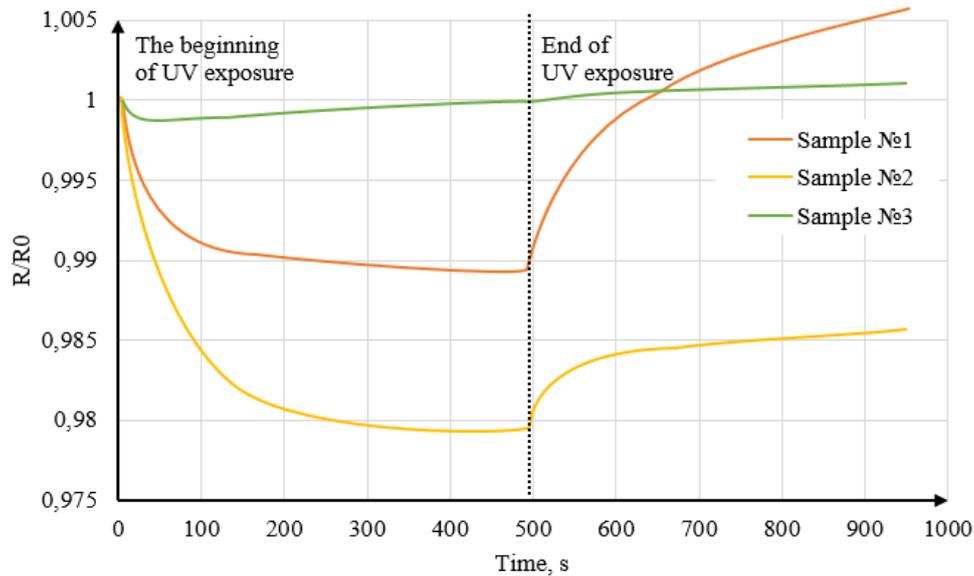


Рис. 2. Графики изменения сопротивления образцов пленок ИТО при УФ экспозиции

Fig. 2. Graphs of resistance changes in ITO film samples under UV exposure

Указанные десорбционные процессы, происходящие в пленках ИТО при облучении УФ излучением, фиксируются и на Фурье-спектрах отражения ИК излучения от исследуемых образцов [13]. ИК отражение по сравнению с пропусканием несет больше информации о состоянии в приповерхностной области, поэтому больше отвечает зада-

че проводимых исследований [14]. На рис. 3 приведен измеренный на ИК спектрометре Фурье Infracum FT-801 с приставкой на отражение Фурье-спектр отражения от образца пленки ИТО №2, имеющий максимальных отклик к облучению УФ излучением, до и после облучения.

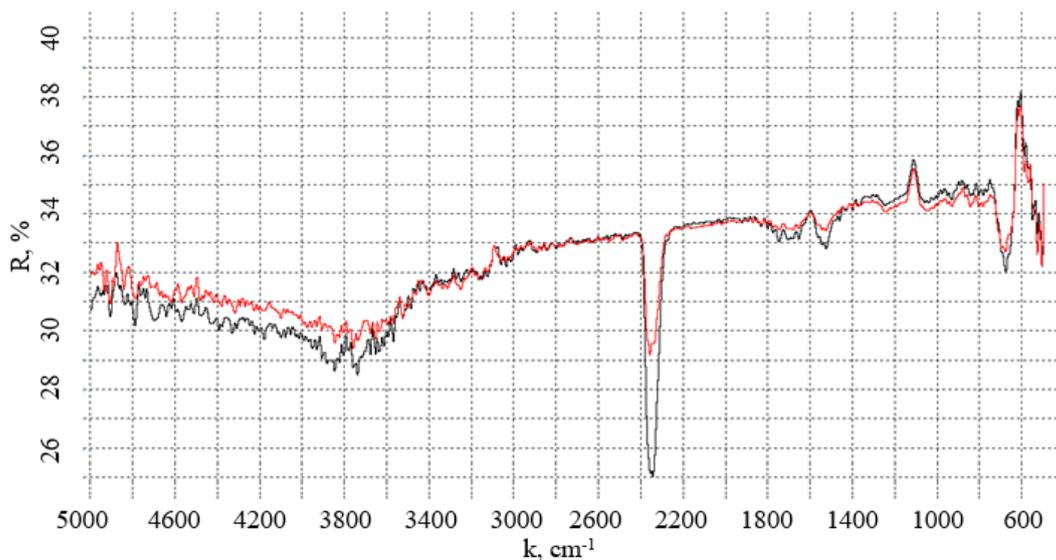


Рис. 3. ИК Фурье-спектр отражения от образца пленки ИТО №3 (красная линия – до облучения УФ излучением, черная линия – после облучения УФ излучением)

Fig. 3. IR Fourier reflectance spectrum of ITO film sample No. 3 (red line – before UV irradiation, black line – after UV irradiation)

Фурье-спектры отражения ИК излучения от пленок ИТО имеют явно регистрируемую полосу поглощения около 2350 см^{-1} . Полоса поглощения на 2350 см^{-1} в первую очередь соответствует антисимметричным валентным колебаниям молекулы углекислого газа (CO_2) [14]. Снижение интенсивности данной полосы поглощения при облучении пленок ИТО УФ излучением указывает на усиление десорбции молекул CO_2 , а значит и на увеличение разорванных химических связей $\text{In} - \text{O}$. Кроме того, на спектре наблюдается снижение интенсивности полосы поглощения на 1700 см^{-1} , соответствующей валентным колебаниям карбонильной группы ($\text{C}=\text{O}$) [14, 15].

Полосы поглощения небольшой интенсивности, ответственные за гидроксильную группу в спектрах ИК отражения (3615 см^{-1} соответствует капиллярной воде, 3725 см^{-1} соответствует хемосорбирован-

ным молекулам воды), также свидетельствуют о наличии этих групп, локализованных на катионах индия [14, 16]. При облучении пленок ИТО УФ излучением интенсивность этих полос снижается, что может быть вызвано испарением гидроксильных групп.

Первоначальное наличие описанных карбонильной и гидроксильной групп на поверхности образцов пленок ИТО по всей видимости вызвано адсорбционными процессами углекислого газа и молекул воды из воздуха, так как поверхность ИТО химически активна и обладает высокой поверхностной энергией.

Изменение концентрации электронов проводимости в пленках ИТО при облучении УФ излучением, а также их возбуждение и дрейф приводят к появлению разности потенциалов на электродах исследуемых образцов (рис. 4).

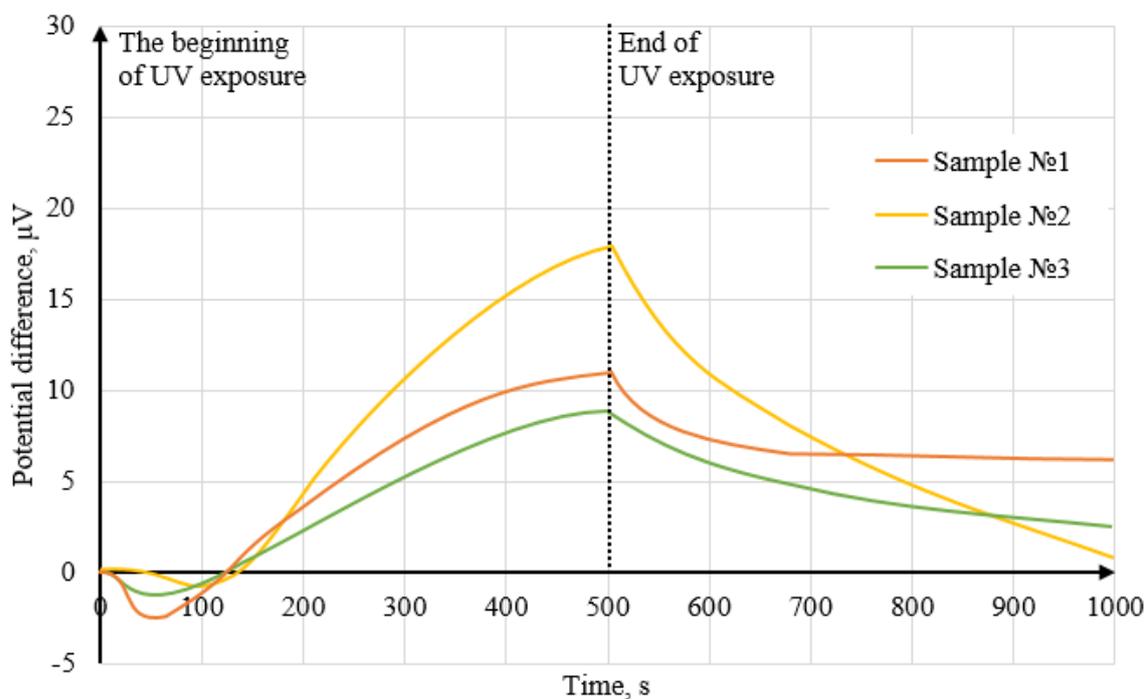


Рис. 4. Изменение возникающей на электродах образца №2 разности потенциалов при облучении УФ излучением

Fig. 4. Change in the potential difference occurring at the electrodes of sample No. 2 when irradiated with UV radiation

Полученные результаты показали, что у всех образцов возникающая разность потенциалов на контактных площадках увеличивается при облучении УФ излучением. Причем в начале облучения наблюдается рост разности потенциалов обратной полярности. Смена знака возникающей разности потенциалов на контактах образца, по всей видимости, обусловлена наличием двух механизмов возникновения ЭДС.

Одной из возможных причин появления разницы потенциалов в симметричных структурах Al/ITO/Al может являться нагрев образцов при УФ засветке ХеС1-эксилампой барьерного разряда. Проведенные нами ранее исследования показали, что подверженные высокотемпературному отжигу поликристаллические пленки ИТО (образец №3) имеют положительный ТКС, соответствующий металлическому типу проводимости. В то время как аморфные пленки ИТО, не подвергнутые отжигу (образцы №1 и №2),

имеют полупроводниковый тип электропроводности с отрицательным ТКС [17]. Эти заключения согласуются и с другими работами [18, 19].

С целью проверки подобного предположения была исследована зависимость температуры и возникающей на обкладках разницы потенциалов образца пленки ИТО №2, имеющего наибольшую чувствительность к УФ излучению, от времени облучения при прямом облучении УФ пленок ИТО и при отсутствии облучения УФ (между образцом и источником УФ излучения был помещен светонепроницаемый экран), но при работающем источнике УФ излучения. Для этого приведенная на рис. 1, а экспериментальная установка была дополнена термопарой для измерения температуры образца и светонепроницаемым экраном, препятствующим облучению образца УФ излучением. Результаты проведенных измерений приведены на рис. 5.

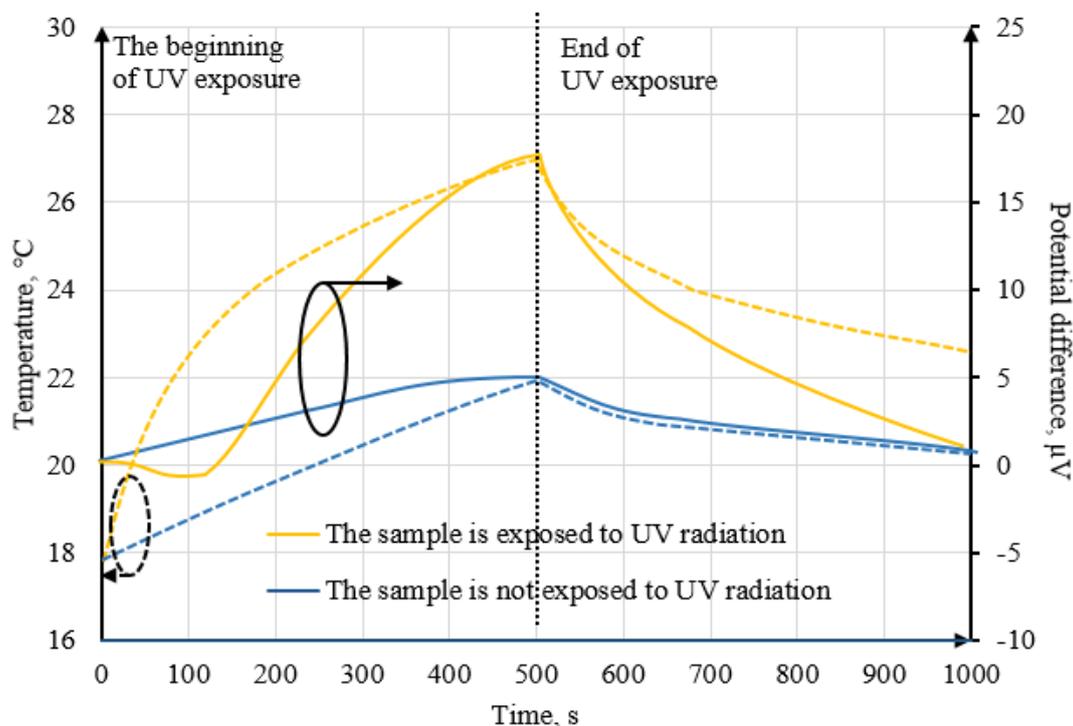


Рис. 5. Зависимость температуры образца №2 и возникающей на его контактах разности потенциалов от времени облучения УФ излучением

Fig. 5. Dependence of the temperature of sample No. 2 and the potential difference occurring at its contacts on the UV exposure time

Анализ полученных результатов показывает, что, действительно, при облучении образца пленки ИТО УФ излучением его температура увеличивается на 9 °С. Причем скорость роста температуры повторяет скорость роста разности потенциалов на контактных площадках. При закрытии экспериментального образца светонепрозрачным экраном скорость роста температуры значительно снизилась, а нагрев образца произошел на 4 °С. Такая взаимосвязь температуры образца и возникающей на его контактах разности потенциалов подтверждает существенный вклад температурной составляющей. Однако, следует заметить, что скорость роста разности потенциалов и ее максимально достигнутое значение в случае облучения ИТО УФ излучением значительно больше, чем только при повышении температуры. Кроме того, при закрытии экспериментального образца светонепрозрачным экраном на графике изменения разности потенциалов пропадает начальный участок, на котором происходит смена знака возникающей ЭДС. Это указывает на отсутствие генерации дополнительных носителей заряда в ИТО за счет образования кислородных вакансий, проявляющейся при облучении ИТО УФ излучением и показанной в предыдущих случаях. В данном случае происходит только тепловая генерация носителей заряда, характерная для полупроводникового механизма электропроводности ИТО [17].

Таким образом, можно выделить следующие основные процессы, происходящие в пленках ИТО при облучении УФ излучением. Во-первых, происходит генерация носителей заряда за счет десорбции адсорбированных атомов с поверхности ИТО и образования кислородных вакансий. Кроме этого, генерация носителей заряда происходит за счет активации примесных атомов олова. Во-вторых, происходит разделение сгенерированных носителей зарядов за счет градиента температуры и неравномерности освещен-

ности ИТО в середине образцов и на участках, закрытых алюминиевыми контактными площадками, по принципу эффекта Дембера [20, 21].

Выводы

Исследование изменения электрических характеристик пленок ИТО при их УФ экспозиции позволило установить основные происходящие механизмы, приводящие к их фотоэлектрическому отклику. Прежде всего при облучении ИТО УФ излучением за счет разрушения химических связей с атомами газов на поверхности пленок и в приповерхностном слое происходит генерация носителей зарядов. Исследование изменения сопротивления пленок ИТО, осажденных в разных технологических режимах, показало, что максимальную чувствительность к облучению УФ излучением имеют поликристаллические пленки ИТО с низким содержанием кислородных вакансий (образец №2). Помимо этого, показано, что генерация дополнительных носителей заряда в ИТО также обусловлена тепловой ионизацией примесных атомов олова. Кроме того, при УФ экспозиции тонкопленочных структур Al/ИТО/Al на металлических контактных площадках зарегистрирован рост разницы потенциалов, связанный с разделением сгенерированных носителей зарядов за счет градиента температуры и неравномерности освещенности ИТО в середине образцов и на участках, закрытых алюминиевыми контактными площадками. Проведенные исследования фотоэлектрического отклика пленок ИТО при воздействии УФ излучения показывают возможность использовать пленки ИТО в качестве чувствительного слоя детектора УФ излучения.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004.

The research was carried out with financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the FEWM 2024-0004 project.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Toikka A., Llin M., Kamanina N. Perspective coatings based on structured conducting ITO thin films for general optoelectronic applications // *Coatings*. 14(2), 178 (2024). DOI: 10.3390/coatings14020178.
- Nakamura G., Murakami H., Komoto M., Tatami N., Oya T. Transparent conductive films with low resistivity and high optical property on plastic substrates for projected capacitive touch sensors // *Proceedings of the Annual Technical Conference, Society of Vacuum Coaters*. 55, 692–696 (2012).
- Meshkovskiy I.K., Plyastsov S.A. Photoelectric and photomagnetic response of indium tin oxide films // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 15(6), 969–975 (2015). (In Russian) [Мешковский И.К., Плясцов С.А. Фотоэлектрический и фотомагнитный отклик пленок оксида индия-олова // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 15(6), 969–975 (2015)]. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-969-975.
- Tambasov I.A., Myagkov V.G., Ivanenko A.A., Vukova L.E., Ezikova E.V., Maksimov I.V., Ivanov V.V. Effect of light irradiation and temperature on the electrical and optical properties of In_2O_3 films produced by autowave oxidation // *Semiconductors*. 48(2), 207–211 (2014). (In Russian) [Тамбасов И.А., Мягков В.Г., Иваненко А.А., Быкова Л.Е., Ежикова Е.В., Максимов И.А., Иванов В.В. Влияние фотооблучения и температуры на электрические и оптические свойства пленок In_2O_3 , полученных автоволновым окислением // *Физика и техника полупроводников*. 48(2), 220–224 (2014)]. DOI: 10.1134/S1063782614020286.
- Gondal M.A., Durrani S.M.A., Khawaja E.E. Laser pulse detector based on Sn-doped indium oxide films // *The European Physical Journal – Applied Physics*. 8(1), 37–42 (1999). DOI: 10.1051/epjap:1999227.
- Zhidik Y., Ivanova A., Smirnov S., Zhuk K., Yunusov I., Troyan P. Nanoscale ITO films for plasmon resonance-based optical sensors // *Coatings*. 12(12), 1868 (2022). DOI: 10.3390/coatings12121868.
- Zhidik Y.S., Troyan P.E., Kozik V.V., Kozyukhin S.A., Zabolotskaya A.V., Kuznetsova S.A. Investigation of Electrophysical Properties of ITO Films // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Fizika*. 63(7), 1139–1143 (2020). (In Russian) [Жидик Ю.С., Троян П.Е., Козик В.В., Козюхин С.А., Заболоцкая А.В., Кузнецова С.А. Исследование электрофизических свойств пленок ITO // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 63(7), 1139–1143 (2020)].
- Chatratin I., Sabino F.P., Reunchan P., Limpijumnon S., Varley J.B., Van de Walle C.G., Janotti A. Role of point defects in the electrical and optical properties of In_2O_3 // *Physical Review Materials*. 3, 074604 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.3.074604.
- McCluskey M.D., Jokela S.J. Defects in ZnO // *Journal of Applied Physics*. 106, 071101 (2009). DOI: 10.1063/1.3216464.
- Janotti A., Van de Walle C.G. Oxygen vacancies in ZnO // *Applied Physics Letters*. 87(12), 122102 (2005). DOI: 10.1063/1.2053360Y.
- Shapira Y., Kronik L. Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications. *Handbook of Surfaces and Interfaces of Materials*. Vol. 2. San Diego: Academic Press, 2001. P. 1–101.
- Gupta R.K., Ghosh K., Kahol P.K. High sensitivity UV photodetector based on ITO thin films // *Journal of Alloys and Compounds*. 476(1–2), 50–52 (2009). DOI: 10.1016/j.jallcom.2008.09.024.
- Krylov P.N., Zakirova R.M., Fedotova I.V., Akashkina R.G., Shirobokov E.P. ИК спектры нанокристаллических ITO пленок, полученных реактивным VCh магнетронным напылением с ионно-лучевой обработкой // *Химическая физика и мезоскопия*. 2, 235–240 (2014). (In Russian) [Крылов П.Н., Закирова Р.М., Федотова И.В., Акашкина Р.Г., Ширококов Е.П. ИК спектры нанокристаллических ITO пленок, полученных реактивным VCh магнетронным напылением с ионно-лучевой обработкой // *Химическая физика и мезоскопия*. 2014. 2, 235–240 (2014)].
- Nosenko T.N., Sitnikova V.E., Strelnikova I.E., Fokina M.I. Practical course on vibrational spectroscopy: textbook. St. Petersburg: ITMO University, 2021. 173 p. (In Russian) [Носенко Т.Н., Ситникова В.Е., Стрельникова И.Е., Фокина М.И. Практикум по колебательной спектроскопии: учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2021. 173 с.].
- Vasiliev A.V., Grinenko E.V., Shchukin A.O., Fedulina T.G. Infrared spectroscopy of organic and natural compounds: textbook. St. Petersburg: SPbGLTA, 2007. 54p. (In Russian) [Васильев А.В., Гриненко Е.В., Щукин А.О., Федулина Т.Г. Инфракрасная спектроскопия органических и природных соединений: учебное пособие. СПб.: СПбГЛТА, 2007. 54 с.].
- Tsaryuk V.I., Frantesson A.V. Infrared spectroscopy of water contained in cellulose // *Polymer Science U.S.S.R.* 33(2), 334–341 (1991). (In Russian) [Царюк В.И., Францессон А.В. Инфракрасная спектроскопия воды, содержащейся в целлюлозе // *Высокомолекулярные соединения*. 33(2), 334–341, (1991)].

17. Sakharov Yu.V., Troyan P.E., Zhidik Yu.S. Investigation of the mechanisms of electrical conductivity of tin-doped indium oxide films // Proceedings of TUSUR University. 3, 85–88 (2015). (In Russian) [Сахаров Ю.В., Троян П.Е., Жидик Ю.С. Исследование механизмов электропроводности пленок оксида индия, легированного оловом // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 3, 85–88 (2015)].
18. Liu W., Cheng S. Photoelectric properties of ITO thin films deposited by DC magnetron sputtering // Journal of Semiconductors. 32(1), 013002 (2011). DOI: 10.1088/1674-4926/32/1/013002.
19. Askari H., Fallah H., Askari M., Mohmmadieyh M.C. Electrical and optical properties of ITO thin films prepared by DC magnetron sputtering for low-emitting coatings // arXiv, 1409, 5293 (2014).
20. Ismail R.A., Abdulrazzaq O.A., Ali A.M. Photovoltaic properties of ITO/p-Si heterojunction prepared by pulsed laser deposition // International Journal of Modern Physics B. 34(32), 2050321 (2020). DOI: 10.1142/S021797922050321X.
21. Gurevich Yu.G., Meriuts A.V. Dember effect: Problems and solutions // Physics Letters A. 377(39), 2673–2675 (2013). DOI: 10.1016/j.physleta.2013.08.003.