

Зададим кривую Γ_3 в параметрическом виде:

$$x = f(t), y = \varphi(t), 0 \leq t \leq T \quad (36),$$

$f'(t), \varphi'(t)$ соответственно производные функций $f(t)$ и $\varphi(t)$.

Тогда функции $u(x_0, y_0), v(x_0, y_0)$ из (28), (34) будут вычисляться по следующим формулам

$$u(x_0, y_0) = \frac{1}{\pi} \int_0^T \left(\frac{f(t) - x_0}{\sqrt{(f(t) - x_0)^2 + (\varphi(t) - y_0)^2}} + af'(t) \operatorname{arctg} \frac{\varphi(t) - y_0}{f(t) - x_0} \right) dt, \quad (37)$$

$$v(x_0, y_0) = \frac{1}{\pi} \int_0^T \left(\frac{\varphi(t) - y_0}{\sqrt{(f(t) - x_0)^2 + (\varphi(t) - y_0)^2}} + \frac{a}{2} f'(t) \ln((f(t) - x_0)^2 + (\varphi(t) - y_0)^2) \right) dt.$$

Для получения этих соотношений использованы решения (34) и (35) соответственно.

Теперь вычисляем значение выражения

$$u^2 + v^2 \quad (38)$$

в точке (x_0, y_0) . Те точки, в которых (38) больше или равно единице, принадлежат пластической области, а те в которых выражение (38) меньше нуля – упругой.

На основе формул (34), (35) созданы программы, которые позволяют с любой точностью строить пластические и упругие области в скручиваемом стержне.

Решение тестовых задач показало хорошее совпадение с известными решениями.

Библиографические ссылки

1. Аннин Б. Д., Черепанов Г. П. Упруго-пластическая задача. Новосибирск : Наука.
2. Киряков П. П., Сенашов С. И., Яхно А. Н. Приложение симметрий и законов сохранения к решению дифференциальных уравнений. Новосибирск : Изд-во СО РАН.
3. Senashov S. I., Yachno A. N. Conservation Laws, Hodograph Transformation and Boundary Value Problems of Plane Plasticity. SIGMA 8 (2012), 071, 16 p.
4. Сенашов С. И. Законы сохранения в задаче о продольной плоской волне нагрузки в упругопластическом стержне // Вестник СибГАУ. 2011. № 3 (36). С. 82–85.

References

1. Annin B. D., Cherepanov G. P. *Uprugo-plasticheskaya zadacha* (Elastic-plastic problem). Novosibirsk, Nauka.
2. Kiryakov P. P., Senashov S. I., Yachno A. N. *Prilozhenie simmetriy i zakonov sohraneniya k resheniyu differentsialnykh uravneniy* (The application of symmetries and conservation laws for the solution of differential equations). Novosibirsk, Izd-vo SO RAN.
3. Senashov S. I., Yachno A. N. Conservation Laws, Hodograph Transformation and Boundary Value Problems of Plane Plasticity. SIGMA 8 (2012), 071, 16 p.
4. Senashov S. I. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 3 (36), p. 82–85.

© Сенашов С. И., Черепанова О. Н., Кондрин А. В., 2013

УДК 538.9

ВЛИЯНИЕ ФОТОННОЙ ОБРАБОТКИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОВОДИМОСТЬ In_2O_3 ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ АВТОВОЛНОВЫМ ОКИСЛЕНИЕМ*

И. А. Тамбасов¹, И. В. Немцев^{2,4}, Д. С. Савранский³, А. А. Мацынин¹, Е. В. Ежикова⁴

¹Институт физики им. Л. В. Киренского, Сибирское отделение Российской академии наук
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок 50, строение 38. E-mail: tambasov_igor@mail.ru

²Красноярский научный центр, Сибирское отделение Российской академии наук
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок 50

³Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

⁴Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

Пленки оксида индия были синтезированы автоволновой реакцией окисления на покровном стекле, кварце и монокристалле MgO . Толщина пленки измерялась с помощью режима «cross-section» сканирующего электронного микроскопа и составляла ~300 нм. Оптическая ширина запрещенной зоны оксида индия была ~3.5 эВ. Исследования сопротивления In_2O_3 пленки от температуры в теневых условиях показали, что при нагревании до 100 °С сопротивление увеличивается на ~10 %. Показано, что при фотооблучении происходит резкое уменьшение электрического сопротивления пленок, максимальное изменение которого соста-

вило 52 % при комнатной температуре. Определены две скорости релаксации сопротивления пленок после прекращения облучения 15 Ом/сек первые 30 сек и 7 Ом/сек в остальное время. Сделано предположение, что фотовосстановление является доминирующим механизмом, ответственным за изменения проводимости пленок.

Ключевые слова: тонкие пленки, оксид индия, автоволновое окисление, ультрафиолетовое облучение

THE IMPACT OF THE PHOTON PROCESSING AND TEMPERATURE ON THE CONDUCTIVITY OF In_2O_3 FILMS PRODUCED WITH AUTOWAVE OXIDATION

I. A. Tambasov¹, I. V. Nemtsev^{2,4}, D. S. Savranskiy³, A. A. Matsynin¹, E. V. Ezhikova⁴

¹ Kirenskiy Institute of Physics of the SB RAS
50, building 38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: tambasov_igor@mail.ru

² Krasnoyarsk Scientific Center of the SB RAS
50 Akademgorodok Krasnoyarsk, 660036, Russia.

³ Siberian Federal University
79 Svobodnyy prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia.

⁴ Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia

Indium oxide films were synthesized by auto-wave oxidation reaction on the cover glass, quartz and single crystal MgO. The film thickness was measured with a mode «cross-section» scanning electron microscope and was ~ 300 nm. Optical band gap of indium oxide was ~3.5 eV. The study of In_2O_3 film resistance versus temperature in the dark conditions showed that when heated to 100 °C the resistance increases by about 10 %. It is shown that the films electric resistance decreases sharply under photo radiation and the maximum change was 52 % at room temperature. The two film resistance relaxation rates after irradiation have been determined to be 15 Ohm/s the first 30 seconds and 7 Ohm/s for the rest, respectively. On the basis of the above stated the authors suggest that the photo reduction is the dominant mechanism responsible for the changes in conductivity of In_2O_3 films.

Keywords: thin films, indium oxide, auto-wave oxidation, ultraviolet irradiation

In_2O_3 является прямым широкозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны ~ 3.7 эВ [1]. Благодаря своим свойствам пропускать видимый свет и проводить электрический ток, оксид индия находит широкое применение в различных приложениях и устройствах. Тонкие пленки In_2O_3 используются в газовой сенсорике, тонкопленочных прозрачных транзисторах, плоских дисплеях, электрохромных устройствах, солнечных элементах и т. д. [2]. Легированные оловом In_2O_3 пленки используются в конструкционных материалах космических аппаратов для снижения уровня радиационной электризации [3].

В настоящее время развиваются низкотемпературные и простые методы получения In_2O_3 пленок [4; 5]. Среди этих методов предлагается способ получения металлооксидных пленок в режиме горения, который проходит при температурах ниже 200 °C [4].

В ряде работ было показано влияния ультрафиолетового (УФ) облучения на сопротивление пленок оксида индия [6]. В результате УФ облучения происходит резкое уменьшение сопротивления пленок оксида индия. После прекращения облучения, происходит медленное восстановление сопротивления. Количественное изменение сопротивления пленок In_2O_3 при облучении УФ светом сильно зависит от структуры и морфологии самой пленки [6; 7].

Представляют интерес для космического материаловедения исследования влияния температуры и фотооблучения на сопротивления In_2O_3 пленок, полученных различными методами.

В данной работе представлены результаты исследования комплексного воздействия температуры и фотонной обработки (спектральный диапазон 0.2–0.7 мкм) на сопротивления пленок оксида индия, полученных автоволновым окислением [5]. Представлены исследования релаксации электрического сопротивления.

Образцы и методика эксперимента. Пленки оксида индия получены реакцией автоволнового окисления, которая исследовалась нами ранее [5]. В качестве подложек были использованы покровное стекло, кварц и монокристалл MgO, которые предварительно химически очищались. Толщина пленки измерялась с помощью режима «cross-section» сканирующего электронного микроскопа Hitachi S5500.

Спектрофотометр Shimadzu UV-3600 был использован для определения оптической запрещенной зоны пленок оксида индия. Для этой цели мы изготовили пленку оксида на кварцевой подложке. Кварцевая подложка использовалась для того, чтобы избежать дополнительного поглощения в УФ диапазоне. Оптическую ширину запрещенной зоны определяли аналогичным образом, как описано в работе [8].

*Работа выполнена частично при финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (госконтракт № 14.513.11.0023), а также Министерства образования и науки Российской Федерации (договор № 02.G25.31.0043).

В качестве источника света использовалась ртутная газоразрядная лампа сверхвысокого давления (Nikon mercury super high pressure lamp 100 w). Спектральное распределение излучения и мощность лампы измерялись спектрометром фирмы Ocean Optics HR 4000 и измерителем мощности Coherent FieldMax2-to, соответственно.

Измерение сопротивления образцов проводилось стандартным четырехзондовым методом. Термостат фирмы Spescas был использован при измерении сопротивления пленки оксида индия в диапазоне температур 25–100 °С и для поддержания заданной температуры во время облучения светом.

Экспериментальные результаты и обсуждение.

На рис. 1 показано поперечное сечение пленки оксида индия на подложке MgO. Из рис. 1 видно, что толщина пленки составляет ~ 300 нм. Для пленок оксида индия, полученных автоволновым окислением, оптическая ширина запрещенной зоны была ~ 3.5 эВ (см. рис. 2).

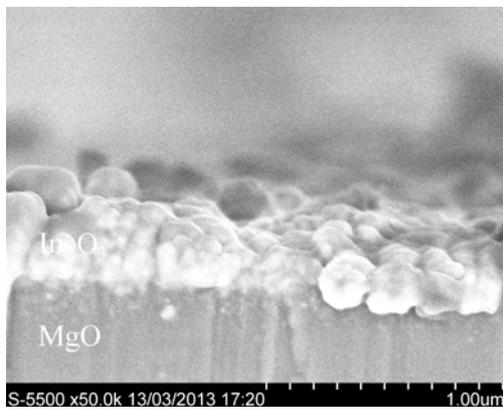


Рис. 1. Изображение поперечного сечения пленки оксида индия, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа

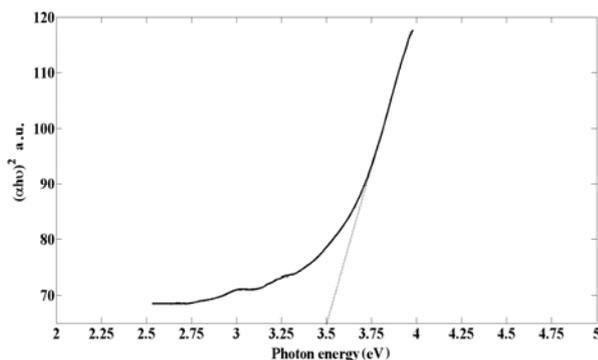


Рис. 2. Зависимость квадрата коэффициента поглощения от энергии падающего фотона для пленки оксида индия

На рис. 3 представлено спектральное распределение излучения ртутной газоразрядной лампы. Спектр излучения имеет типичные пики для паров ртути. Мощность излучения лампы составляла ~ 0.223 Ватт/см² в месте расположения образца. Из рисунка 4 видно, что сопротивление R пленки незначительно меняется (~ 10 %) от температуры в диапазоне 25–100°С, где

R_0 – сопротивление пленки оксида индия, измеренного при комнатной температуре в отсутствие освещения.

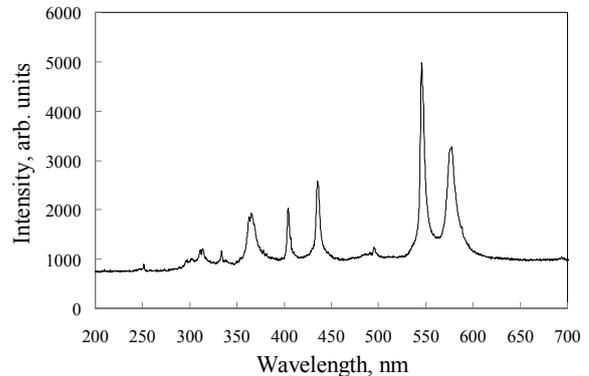


Рис. 3. Спектр ртутной газоразрядной лампы сверхвысокого давления, используемой для облучения пленок оксида индия

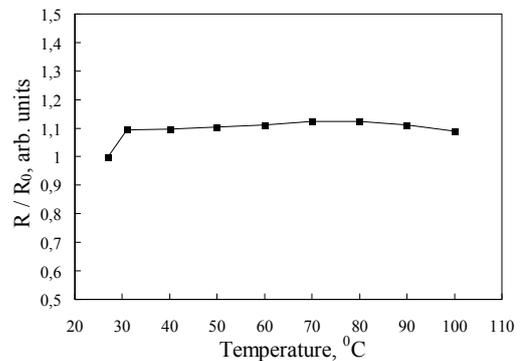


Рис. 4. Температурная зависимость электрического сопротивления пленки оксида индия в отсутствие освещения

Зависимость сопротивления пленки оксида индия от времени облучения светом и релаксация сопротивления при выключении лампы представлена на рис. 5. При включении лампы происходит резкое уменьшение сопротивления пленки на 52 %, предположительно, из-за генерации свободных носителей заряда и/или увеличения подвижности электронов за счет десорбции ионов кислорода с межзеренных границ [9].

После прекращения облучения наблюдалось релаксация сопротивления пленки оксида индия со скоростью 15 Ом/сек первые 30 секунд и 7 Ом/сек в последующее время.

В настоящее время существует несколько представлений о влиянии света на электрические свойства оксида индия [9]: генерация электронно – дырочных пар, десорбция кислородных адсорбатов, фотовосстановление (в английских источниках «photoreduction»). Ширина запрещенной зоны пленок оксида индия, в зависимости от способа приготовления, может иметь значение от 3.5 эВ (355 нм) до 4 эВ (310 нм) [10], что сопоставимо с полученной нами величиной равной

3.5 эВ. Поэтому, для перехода электрона с валентной зоны в зону проводимости, необходимо облучать пленки оксида индия светом с длиной волны ≤ 355 нм. В спектре ртутной газоразрядной лампы (см. рис. 3) длины волн ≤ 355 нм имеют малую интенсивность на уровне фона. Однако, большое количество поверхностных дефектов и межзеренных границ приводят к модификации зонной структуры оксида индия. Следовательно, переход электрона возможен и при энергиях света меньших, чем энергия запрещенной зоны [9; 11]. В результате данного перехода может образоваться электронно-дырочная пара. Однако при включении лампы мы не наблюдали резкого скачка в увеличение сопротивления пленки.

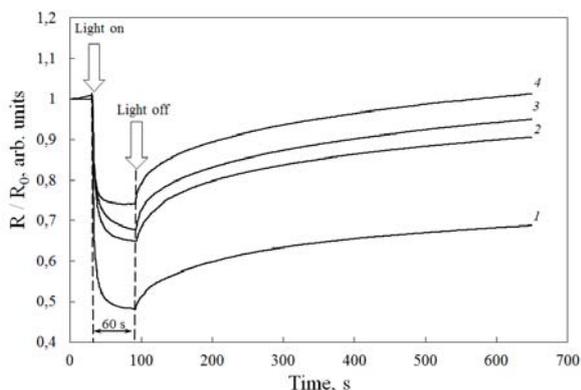


Рис. 5. Изменение сопротивления пленки оксида индия во время фотооблучения при температуре подложки, °C: 1 – 25; 2 – 40; 3 – 80; 4 – 100

Десорбция кислородных адсорбатов с поверхности пленки проводящих прозрачных оксидов во время облучения светом может увеличить подвижность носителей заряда и, следовательно, повысить проводимость пленки [12]. Данное влияние света на проводимость пленки оксида индия в нашем случае возможно, но оно не является доминирующим.

Механизм фотовосстановления заключается в том, что фотообразованная дырка рекомбинирует со связанным электроном в связи In – O. Это вызывает разрушение химической In – O связи, освобождение атома кислорода и его миграцию к поверхности пленки, где два атома кислорода образуют молекулу O₂, и происходит ее десорбция с поверхности. В конечном итоге в кристаллической структуре появляются дополнительные кислородные вакансии, которые являются источниками электрической проводимости в пленках оксида индия [13]. Поэтому мы предполагаем, что в наших исследованиях фотовосстановление является доминирующим механизмом влияния света на проводимость пленок оксида индия. Полученные результаты в данной работе могут быть использованы в технологиях изготовления тонкопленочных покрытий для обеспечения надежного функционирования космических аппаратов в условиях воздействия факторов космического пространства.

Пленки оксида индия были синтезированы автоволновой реакцией окисления. Оптическая ширина запрещенной зоны составляла ~ 3.5 эВ. Электрическое сопротивление пленок In₂O₃ слабо менялось ($\sim 10\%$) в диапазоне температур 25–100 °C.

Показано, что при облучении светом происходит резкое уменьшение электрического сопротивления (на 52 %) пленок оксида индия. При увеличении температуры во время облучения происходит уменьшение изменения сопротивления. После прекращения облучения пленки происходит релаксация сопротивления с двумя скоростями ~ 15 Ом/сек первые 30 секунд и ~ 7 Ом/сек в последующее время. Температура не влияла на скорости релаксации сопротивления.

Подтверждается предположение о генерации дополнительных носителей заряда за счет механизма фотовосстановления.

Результаты исследования эффекта фотооблучения могут быть использованы в технологиях изготовления тонкопленочных покрытий для обеспечения надежного функционирования космических аппаратов.

References

- Walsh A., Da Silva J. L. F., Wei S. H., Korber C., Klein A., Piper L. F. J., DeMasi A., Smith K. E., Panaccione G., Torelli P., Payne D. J., Bourlange A., Egdell R. G. *Physical Review Letters*. 2008, vol. 100, no. 16, pp. 167402.
- Granqvist C. G. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007, vol. 91, no. 17, pp. 1529–1598.
- Ciofalo M. R., Brady M. E., Panetta C. J., Meshishnek M. J. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2011, vol. 48, no. 6, pp. 931–941.
- Kim M. G., Kanatzidis M. G., Facchetti A., Marks T. J. *Nature Materials*. 2011, vol. 10, no. 5, pp. 382–388.
- Tambasov I. A., Myagkov V. G., Ivanenko A. A., Nemtsev I. V., Bykova L. E., Bondarenko G. N., Mihlin J. L., Maksimov I. A., Ivanov V. V., Balashov S. V., Karpenko D. S. *Semiconductors*. 2013, vol. 47, no. 4, pp. 569–573.
- Kiriakidis G., Moschovis K., Kortidis I., Binas V. *Vacuum*. 2012, vol. 86, no. 5, pp. 495–506.
- Olivier J., Servet B., Vergnolle M., Mosca M., Garry G. *Synthetic Metals*. 2001, vol. 122, no. 1, pp. 87–89.
- Kuznetsov V. L., O'Neil D. H., Pepper M., Edwards P. P. *Journal of Applied Physics*. 2011, vol. 110, no. 3, pp. 033702.
- Wagner T., Kohl C. D., Morandi S., Malagu C., Donato N., Latino M., Neri G., Tiemann M. *Chemistry-a European Journal*. 2012, vol. 18, no. 26, pp. 8216–8223.
- Han S. Y., Herman G. S., Chang C. H. *Journal of the American Chemical Society*. 2011, vol. 133, no. 14, pp. 5166–5169.
- Wagner T., Hennemann J., Kohl C. D., Tiemann M. *Thin Solid Films*. 2011, vol. 520, no. 3, pp. 918–921.
- Muraoka Y., Takubo N., Hiroi Z. *Journal of Applied Physics*. 2009, vol. 105, no. 10, pp. 103702.
- King P. D. C., Veal T. D. *Journal of Physics-Condensed Matter*. 2011, vol. 23, no. 33, pp. 334214.