

Filters // J. of Microelectromechanical Systems. 2014. Vol. 23, iss. 3. P.727–739.

12. Positive-To-Zero Continuously Tunable Inter-Resonator Coupling Structure for Applications in Filter Array Systems / B. Koh, B. Lee, S. Nam, J. Lee // 2015 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp., Phoenix, 17–22 May 2015. Piscataway: IEEE, 2015. P. 1–4.

13. A Two-Pole Lumped-Element Programmable Filter with MEMS Pseudodigital Capacitor Banks / C. Palego, A. Pothier, A. Crunteanu, M. Chatras, P. Blondy, C. Champaux, P. Tristant, A. Catherinot // IEEE Trans. on microwave theory tech. 2008. Vol. MTT-56, iss. 3. P. 729–735.

14. Zeng K., Psychogiou D., Peroulis D. A VHF Tunable Lumped Element Filter with Mixed Electric-Magnetic Couplings // Proc. of 2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Tech. Conf (WAMICON 2015), Cocoa Beach, 13–15 April 2015. Piscataway: IEEE, 2015. P. 1–4.

15. Kholodnyak D., Turgaliev V. Baskakova A. A. Method to Design Lumped-Element Tunable Bandpass Filters with Constant Absolute Bandwidth // Proc. of 44th Eur. Microwave Conf., Roma, 6–9 Oct. 2014. Nijkerk: EuMA, 2014. P. 335–338.

16. Баскакова А. Э., Тургалиев В. М., Холодник Д. В. Перестраиваемые полосно-пропускающие фильтры с постоянной шириной полосы пропускания на элементах с сосредоточенными параметрами // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2015. Вып. 4. С. 36–43.

17. Matthaei G. L., Young L., Jones E. M. T. Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structure. Dedham, MA: Artech House. 1980. 439 p.

18. Hong J.-S., Lancaster Hong M. J. Microstrip Filters for RF-Microwave Applications. New York: John Wiley & Sons, 2001. 457 p.

A. E. Baskakova, V. M. Turgaliev, D. V. Kholodnyak
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

A Tunable Lumped-Element Bandpass Filter with Independent Continuous Tuning of Center Frequency and Bandwidth

An approach to design tunable bandpass filters on coupled series LC-tanks with variable capacitors is proposed. Such filters are shown able to provide an independent continuous tuning of center frequency and bandwidth. Design, simulated and measured characteristics of a three-pole varactor-tuned bandpass filter are presented.

Bandpass filters, lumped elements, tunability

Статья поступила в редакцию 6 июня 2016 г.

УДК 621.785.369

В. П. Афанасьев, Н. В. Мухин, Д. Н. Редька, И. А. Шарипова
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Влияние лазерного отжига на структуру, оптические и электрические свойства тонких пленок оксида цинка¹

Представлены результаты исследования влияния лазерного отжига пленок оксида цинка на их оптические и электрические характеристики. Отработаны технологические режимы модификации слоев для использования в производстве тонкопленочных солнечных модулей.

Оксид цинка, лазерный отжиг, фотовольтаика, лазерная микрообработка, технология

Пленки оксида цинка (ZnO) имеют высокий коэффициент пропускания в оптическом диапазоне, обладают высокой химической стойкостью к облучению, нетоксичны и относительно дешевы, что делает их привлекательными для применения в фотовольтаике в качестве прозрачных электродов для осуществления токосъема [1], [2]. Оксид цинка является альтернативой дорогостоящим прозрачным

электродам на основе оксида индий-олово (ITO). Оксид цинка обладает *n*-типом проводимости за счет большого числа собственных дефектов типа межузельного цинка или вакансий кислорода [3].

За счет развитой морфологии поверхности пленки ZnO имеют высокий коэффициент диффузного рассеяния света. При прохождении через слой ZnO квант солнечного излучения изменяет

¹ Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 14-12-00327).

свою траекторию, т. е. происходит рассеивание излучения в латеральную плоскость, приводящее к увеличению оптического пути фотонов в фотоактивной структуре и способствующее более эффективному преобразованию солнечной энергии в электрическую за счет увеличения концентрации неравновесных носителей заряда. Степень рассеивания H (Haze-фактор, в процентах) определяет долю рассеянного излучения T_{diff} по отношению к излучению T_{full} , прошедшему через слой прозрачного проводящего оксида (ППО):

$$H(\lambda) = \frac{T_{\text{diff}}(\lambda)}{T_{\text{full}}(\lambda)} 100.$$

Главные требования, предъявляемые к прозрачным электродам, – высокая оптическая прозрачность $T \geq 93\%$ в диапазоне 400...1100 нм, поверхностное сопротивление $R_s < 10$ Ом и хорошая рассеивающая способность (на длине волны 600 нм $H \approx 25\%$).

В последнее время активно ведутся работы в направлении улучшения оптических и электрических свойств пленок оксида цинка как за счет варьирования режимов осаждения пленок, так и последующей постростовой обработки, например с использованием лазерного отжига [4].

Целью настоящей статьи являлось изучение влияния лазерного отжига на электрические и оптические свойства пленок оксида цинка ZnO, полученных методом плазмохимического осаждения при пониженном давлении (low-pressure chemical vapor deposition – LPCVD) [1].

Образцы представляли собой пленку оксида цинка, нанесенную на стеклянную подложку, используемую для изготовления солнечных модулей. Для проведения лазерного отжига стеклянная подложка разрезалась на 12 образцов, на которых средняя толщина пленки лежала в пределах 1700 ± 20 нм. С помощью спектрофотометра, эллипсометра и мультиметра предварительно определялись параметры пленок (табл. 1).

При воздействии на пленку ZnO импульса лазерного излучения с длиной волны 355 нм его поглощение происходит в тонком приповерхностном слое толщиной $\sim 10^{-4} \dots 10^{-5}$ см. При этом в слое происходит плавление с последующим отвердеванием и фазовым переходом в аморфное состояние. Эти превращения приводят к аморфизации слоев ZnO, образованию и изменению их кристаллической структуры.

Лазерный отжиг объясняется действием теплового механизма, в соответствии с которым

Таблица 1

№ образца	d , нм	H , %	R_s , Ом	T , %
1	1690.1	29.2	11.7	78.2
2	1688.6	29.6	11.6	78.1
3	1701.1	29.7	11.6	77.9
4	1683.8	27.2	13.8	78.4
5	1705.7	30.2	11.2	77.8
6	1709.7	24.1	15.5	79.4
7	1719.6	28.1	13.3	78.2
8	1719.4	30.1	11.8	78.0
9	1689.0	28.0	13.8	78.7
10	1698.9	27.5	15.9	78.5
11	1714.0	29.4	13.5	78.1
12	1705.4	33.0	17.4	77.1

энергия лазерного излучения, поглощаемая непосредственно электронной подсистемой, практически мгновенно посредством поэтапной электрон-электронной, электрон-фононной и фонон-фононной релаксации передается в решетку и нагревает ее от начальной температуры T_0 до значения температуры отжига $T_{\text{отж}}(t)$, изменяющегося во времени. При импульсном лазерном отжиге (длительность импульса $\tau_{\text{и}} \approx 30$ нс) тепло успевает распространиться в глубь образца на расстояние, не превышающее области поглощения.

Благодаря возникающим в процессе лазерной обработки большим градиентам температуры реализуются большие скорости движения фронтов расплава и рекристаллизации, так что отжигающий цикл занимает 100 нс. Цикл расплав–отвердевание полностью удаляет протяженные дефекты (дислокации и кластеры точечных дефектов), но оставляет после себя довольно высокую концентрацию точечных дефектов, что связано с его высокой скоростью при импульсной лазерной обработке [5]–[7].

Метод лазерного отжига позволяет не только изменить электрические свойства, но при определенных параметрах лазерного отжига (мощность лазера, частота воздействия импульса) улучшить светорассеяние.

Эксперимент по лазерному отжигу пленок оксида цинка ZnO проводился на установке LSS1200. Первый этап исследования заключался в проведении лазерного отжига с целью нахождения диапазона плотности мощности, в котором происходит изменение параметров пленок, улучшающее их свойства.

Область воздействия лазерного излучения представляла собой прямоугольник размерами 50×15 мм. Отжиг ZnO выполнялся на длине волны падающего излучения $\lambda = 355$ нм. Диаметр лазерного пятна составлял 30 мкм, частота следования импульсов 60 кГц, длительность импульса 30 нс, скорость перемещения лазерной головки 72 м/мин. Было установлено, что лучшие результаты достигаются при отжиге пленок ZnO лазер-

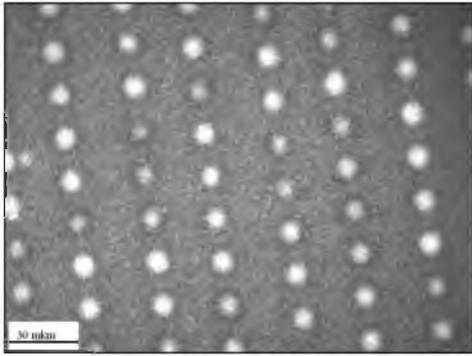


Рис. 1

Таблица 2

№ образца	P , мВт/см ²	d , нм	H , %	R_s , Ом	T , %
1	60	1685.5	29.0	11.3	78.1
2	70	1683.7	29.4	11.1	78.1
3	85	1696.0	29.7	11.0	77.9
4	100	1678.1	27.2	12.8	78.5
5	130	1697.8	30.2	10.4	77.6
6	140	1699.5	24.1	14.1	79.1
7	160	1707.2	28.2	12.2	78.3
8	180	1706.2	30.6	10.9	77.6
9	200	1686.1	30.5	13.5	77.3
10	230	1877.5	32.8	22.2	73.9
11	250	1701.5	37.3	31.1	73.8
12	260	3500.0	2.8	140.6	89.1

ным излучением с плотностью мощности P , находящейся в пределах 160...260 мВт/см². При воздействии лазерного излучения с плотностью мощности меньше 160 мВт/см² практически никаких изменений в пленках не наблюдалось, а при значениях плотности мощности выше 260 мВт/см² в пленке образовывались участки со значительными областями проплавления и растрескивания, что является негативным фактором при производстве тонкопленочных солнечных модулей. Также необходимо отметить, что вследствие теплопроводности пленки и подложки, а также распределения энергии в пучке лазерного излучения по закону Гаусса поверхность пленок отжигается неравномерно, что отображено на рис. 1, где представлено полученное с по-

мощью оптического микроскопа Nikon Eclipse LV100 изображение поверхности отожженного образца, облучавшегося при $P = 200$ мВт/см² с расстоянием между точками порядка 30 мкм.

После лазерного отжига обработанные участки исследовались повторно. Результаты исследования представлены в табл. 2, из которой следует:

– при $P = 160$ мВт/см² поверхностное сопротивление уменьшается на 7 %;

– при значении $P = 200$ мВт/см² Назе-фактор увеличивается на 2.5 %, а коэффициент отражения от поверхности пленок T уменьшается примерно на 1 %.

Зависимости свойств пленок от мощности лазерного излучения представлены на рис. 2: $a - H(P)$, $b - R_s(P)$; кривые 1 – до отжига, кривые 2 – после отжига.

Исследование микрорельефа образцов проведено на атомно-силовом микроскопе Ntegra Therna (NT-MDT); результаты представлены на рис. 3. Выявлено, что с ростом мощности падающего на образец излучения шероховатость поверхности повышается и это приводит к увеличению Назе-фактора (табл. 2, образцы 7–11). При дальнейшем увеличении мощности размеры неоднородностей уменьшаются (табл. 2, образец 12), а коэффициент рассеивания излучения снижается.

Для исследования влияния изменения электрических и оптических свойств пленок ZnO на выходные характеристики солнечного модуля на основе экспериментальных образцов были изготовлены минимодули с размерами 40 × 50 мм. Также были изготовлены минимодули без проведения лазерного отжига для сравнения их выходных параметров с параметрами минимодулей с обработанным фронтальным слоем ППО. Средние значения выходных параметров каждого из образцов представлены в табл. 3, где W – мощность лазерного излучения, P – плотность потока мощности лазера; U_{oc} – напряжение холостого

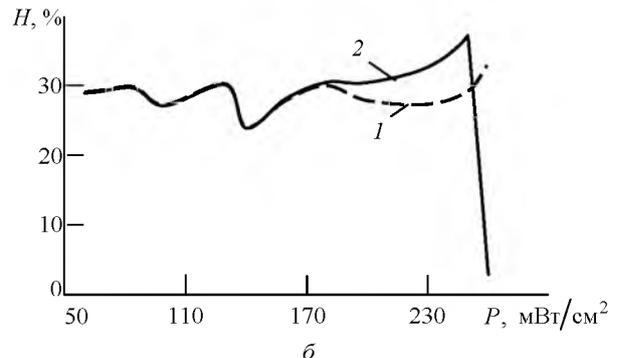
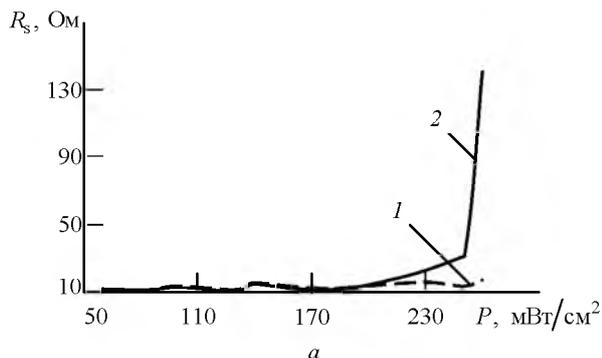


Рис. 2

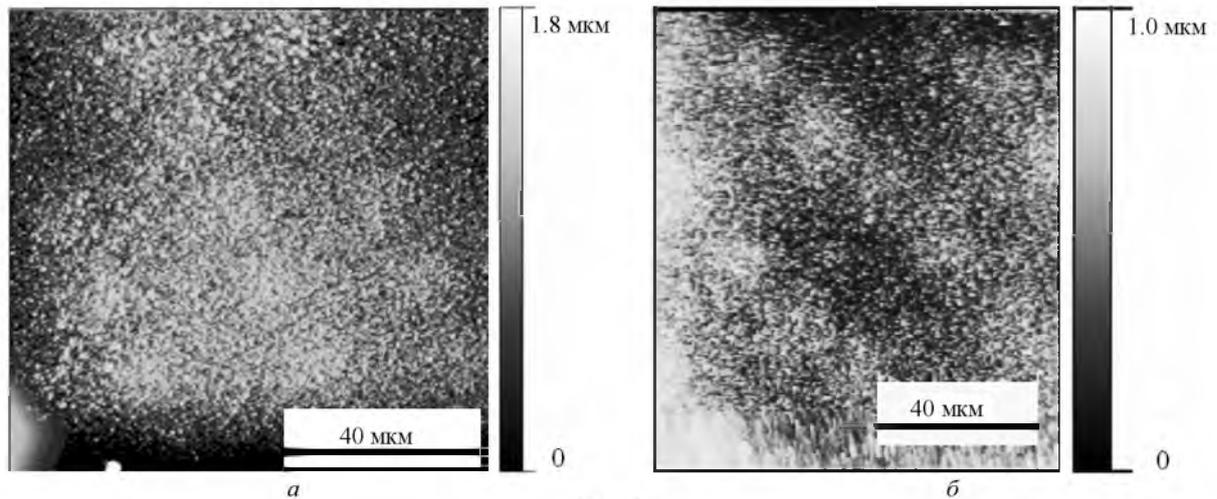


Рис. 3

Таблица 3

Номер образца	W , мВт	P , Вт/см ²	U_{oc} , В	I_{sc} , мА	J_{sc} , мА/см ²	FF , %	E_{ta} , %	R_p , кОм	U_{mpp} , В	I_{mpp} , мА	P_{mpp} , мВт
2	0.88	0.125	1.27	9.94	9.94	72.04	9.12	7.58	1.02	8.98	9.13
8	0.131	0.185	1.27	9.55	9.55	72.51	8.8	185.88	1.01	8.69	8.81
9	0.139	0.197	1.25	9.81	9.81	70.87	8.69	12.67	0.99	8.8	8.69
0	0.00	0	1.29	10.02	10.02	72	9.31	8.96	1.03	9.03	9.31

хода; I_{sc} – ток короткого замыкания; J_{sc} – плотность тока короткого замыкания; FF – фактор; E_{ta} – эффективность; U_{mpp} , I_{mpp} – напряжение и ток солнечного элемента в точке максимальной мощности соответственно; P_{mpp} – максимальная мощность солнечного элемента.

Несмотря на то, что в результате исследования влияния лазерного отжига на параметры пленок оксида цинка ZnO обнаружены положительные изменения электрических и оптических свойств, влияния этих параметров на выходные

характеристики солнечных модулей не обнаружено. Это может быть вызвано тем, что отжиг пленок происходил достаточно неравномерно по площади вследствие распределения мощности в пучке по закону Гаусса (рис. 1).

Дальнейшие исследования будут направлены на осуществление лазерного отжига ZnO излучением с более равномерным распределением интенсивности по поперечному сечению пучка, а также на выявление возможных структурных изменений материала при отжиге не только на поверхности, но и в его объеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В. П., Теруков Е. И., Шерченков А. А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2011. 168 с.
2. Fan Yang. Large Area a-Si/ μ c-Si Thin Film Solar Cells // Solar Sells – Thin-Film Technologies. Rijeka: InTech, 2011. С. 335–358.
3. Zang S. B., Wei S.-H., Zunger A. Intrinsic n -type versus p -type Doping Asymmetry and the Defect Physics of ZnO // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 63, iss. 7. 075205.
4. Photoinduced Formation of Zinc Nanoparticles by UV Laser Irradiation Of ZnO / E. H. Khan, S. C. Langford, J. T. Dickinson, L. A. Boatner, W. P. Hess // Langmuir. 2009. Vol. 25, iss. 4. P. 1930–1933.
5. Двуреченский А. В., Качурин Г. А., Нидаев Е. В., Смирнов Л. С. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1982. 208 с.
6. Laser and Electron-Beam Interactions with Solids / ed. by B. R. Appleton, G. K. Celler. N. Y.: Elsevier, 1982. 404 p.
7. Narayan J., Brown W. L., Lemons R. A. Laser-Solid Interactions and Transient Thermal Processing of Materials // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1983. Vol. 13. P. 375–379.

V. P. Afanasjev, N. V. Mukhin, D. N. Redka, I. A. Sharipova
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Influence of Laser Annealing on the Structure, Electrical and Optical Properties of Zinc Oxide Thin Films

Paper presents experimental results of research of influence of laser annealing on the optical and electrical properties ZnO films. Developed technological regimes of modifications of layers in the production of thin film solar modules.

Zinc oxide, laser annealing, photovoltaics, laser treatment, technology

Статья поступила в редакцию 21 марта 2016 г.