

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКОПЛЁНОЧНОЙ СТРУКТУРЫ Si-SiO<sub>2</sub>-ZnO МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОПТОАКУСТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2017 г. Л. В. Григорьев<sup>\*</sup>, канд. физ.-мат. наук; М. А. Мазуров<sup>\*</sup>, магистрант;  
О. В. Шакин<sup>\*\*</sup>, доктор техн. наук; В. Г. Нефедов<sup>\*\*</sup>, канд. техн. наук;  
А. В. Михайлов<sup>\*\*\*</sup>, канд. техн. наук

<sup>\*</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург

<sup>\*\*</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург

<sup>\*\*\*</sup> АО “ГОИ им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: grigoryev@oi.ifmo.ru

Представлены результаты исследования методом импульсной лазерной оптоакустической спектроскопии оптических и пьезоэлектрических свойств микроструктуры Si-SiO<sub>2</sub>-ZnO. С помощью оптоакустического зондирования вычислена скорость акустической волны, распространяющейся в слое оксида цинка, которая составила  $3,01 \times 10^3$  м/с, и определен коэффициент поглощения акустической волны, равный 3,45 дБ/см. Модифицированным методом Диксона определена величина акустооптической постоянной  $M_2$  для плёнки ZnO, которая составила  $8,78 \times 10^{-18}$  с<sup>3</sup>/г.

**Ключевые слова:** оксид цинка, оптоакустическое зондирование, импульсная лазерная оптоакустическая спектроскопия.

Коды OCIS: 250.0250, 300.0300, 310.0310, 160.0160.

Поступила в редакцию 26.06.2016.

### Введение

Создание современной элементной базы микрофотоники требует совместного исследования акустических и оптических процессов в микроструктурах функциональной оптоэлектроники [1–3]. Актуальность исследования взаимодействия акустического и оптического полей в тонкоплёночных структурах Si-SiO<sub>2</sub>-ZnO обусловлена возможностью создания на их основе акустооптических ячеек с полностью оптическим управлением – формированием акустического поля в планарном светозвукопроводе с помощью оптоакустической антенны. Такие планарные акустооптические ячейки могут быть использованы в качестве интегрально-оптических модуляторов, дефлекторов, а также сенсоров для радиометров видимого и ИК диапазонов [2, 4, 5].

В работе представлены результаты исследования возможности оптоакустического формирования ультразвуковых полей достаточной интенсивности для наблюдения акустооптического эффекта в планарной тонкоплёночной структуре.

Проведено измерение акустических характеристик светозвукопровода на ZnO с помощью метода лазерной оптоакустической спектроскопии.

### Изготовление образцов

Тонкоплёночные структуры Si-SiO<sub>2</sub>-ZnO создавались на основе монокристаллического кремния КДБ-10 ориентации (111) с выращенным на поверхности кремния термическим оксидом толщиной 0,5 мкм. Слой диоксида кремния выращивался в атмосфере влажного кислорода при температуре 980 °С. Толщина слоя диоксида кремния определялась интерферометрическим методом и находилась в диапазоне 490–500 нм по поверхности пластины. Далее на поверхность из диоксида кремния методом ионно-плазменного напыления наносили полосы из ZnO [5]. Предварительно поверхность из диоксида кремния подвергалась ионной бомбардировке для очистки от следов загрязнений и для повышения адгезии наносимой плёнки из оксида цинка. Мишенью при ионно-плазменном формировании слоя оксида цинка была

пластина из Zn высокой степени очистки. Напыление происходило в кислородно-аргоновой плазме на постоянном токе магнетрона. В результате ионно-плазменного напыления на поверхности диоксида кремния был сформирован слой из оксида цинка толщиной 1,0 мкм. Рентгеноструктурные исследования проводились на высокоразрешающем дифрактометре ДРОН-3М с излучением  $\text{CuK}_\alpha = 1,542 \text{ \AA}$ . На дифрактограммах максимальный уровень наблюдается у узкого пика отражения (0002), что указывает на гексагональную структуру плёнок ZnO и на её преимущественную ориентацию в направлении перпендикулярном (001). Размеры кристаллитов ZnO по данным рентгеноструктурного анализа не превышали 13 нм [5].

### Методика измерений и экспериментальные результаты

Для проверки возможности оптического формирования акустических полей в светозвукпроводе планарной акустооптической ячейки был использован метод импульсной лазерной оптоакустической спектроскопии [6–9]. Для формирования в исследуемой структуре акустических волн была применена оптоакустическая антенна [7].

Рассмотрим случай, когда лазерный источник акустических волн имеет одномерную конфигурацию, т.е. падающее на поглощающую поверхность лазерное излучение имеет вид полоски, вытянутой вдоль оси Y, а акустическая волна распространяется вдоль оси X (рис. 1). Пусть поглощающая среда однородна и имеет коэффициент оптического поглощения  $\alpha$ . Интенсивность света в падающем лазерном излучении описывается функцией  $I(t) = I_0 f(t)$ . В этой

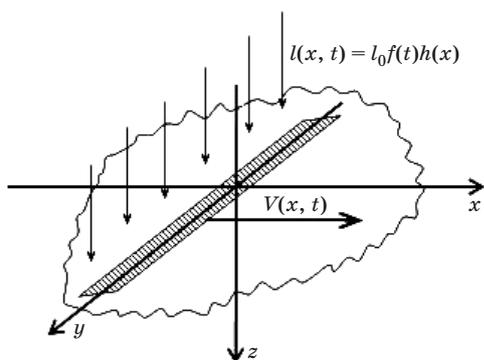


Рис. 1. Схема возбуждения ПАВ оптоакустическим методом.

связи, термооптическое возбуждение акустической волны описывается уравнениями [7]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = - \left[ \frac{\alpha_0 c_0^2 \beta}{\rho c_p} \right] I_0 \exp(-\alpha x) f(t), \quad (1)$$

$$v = \text{grad} \varphi,$$

где  $\varphi$  – скалярный потенциал поля скоростей,  $\beta$  – температурный коэффициент расширения среды,  $v$  – колебательная скорость частиц среды,  $c_0$  – скорость звука в среде,  $c_p$  – удельная теплоёмкость при постоянном давлении,  $\rho$  – плотность среды,  $\alpha$  – эффективный коэффициент оптического поглощения.

Для решения уравнения (1) удобно использовать спектральный метод, предложенный в работе [7]. Экспериментально исследуемой величиной является колебательная скорость либо давление, которые в плоской акустической волне связаны соотношением

$$\frac{v(t)}{c_0} = \frac{p(t)}{\rho c_0^2}. \quad (2)$$

Для решения поставленной задачи достаточно найти спектральную зависимость либо скорости, либо давления.

Акустические колебания в исследуемой структуре возбуждались оптоакустической антенной с помощью коротких лазерных импульсов длительностью  $\tau_L$  при соблюдении условия  $\alpha c_0 \tau_L \ll 1$ . При возбуждении акустического сигнала с помощью короткого лазерного импульса во всей области генерируемых акустических частот спектр интенсивности света можно считать величиной постоянной [7]

$$I_0 f(\omega) = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt = E_0. \quad (3)$$

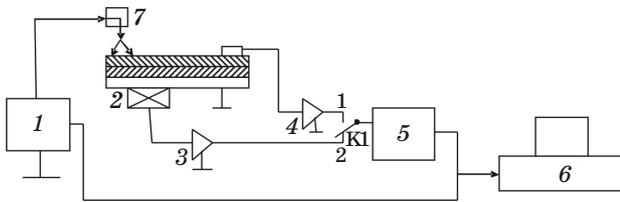
Профиль давления в возбуждаемой акустической волне с учётом перехода  $\tau = t - x/c_0$  описывается следующей формулой [7]:

$$p(\tau) = \frac{\alpha c_0^2 \beta E_0}{2c_p} \exp(\alpha c_0 \tau), \quad \tau \leq 0; \quad (4)$$

$$p(\tau) = \frac{\alpha c_0 \beta E_0}{2\rho_0 c_p} \exp(-\alpha c_0 \tau), \quad \tau > 0, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – эффективный коэффициент оптического поглощения,  $c_0$  – скорость звука,  $E_0$  – плотность энергии лазерного излучения.

Схема установки импульсной лазерной оптоакустической спектроскопии приведена на рис. 2. Для возбуждения акустического сигнала (созда-



**Рис. 2.** Структурная схема установки импульсной лазерной оптоакустической спектроскопии. 1 – Nd:YAG импульсный лазер, 2 – контрольный УЗ приёмник из ниобата лития, 3 и 4 – сверхширокополосные усилители, 5 – цифровой осциллограф Keysight DSO4104A со схемой коммутации сигнала, 6 – управляющая ПЭВМ, 7 – оптический затвор.

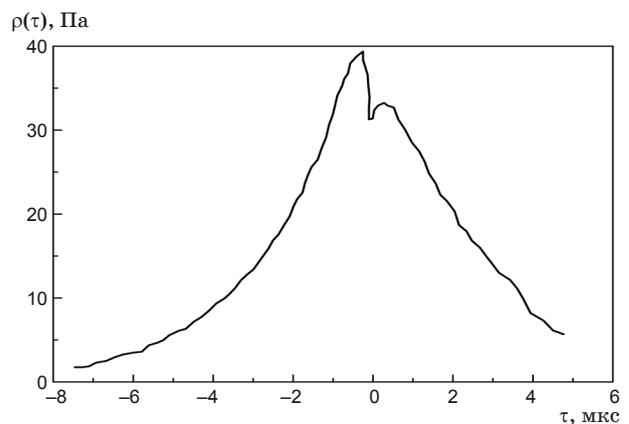
ния в структуре оптоакустической антенны) использовался Nd:YAG лазер на длине волны основной моды излучения, равной 1,064 мкм. Длительность импульса лазерного излучения составляла 10 нс, т.е. был реализовано возбуждение акустических колебаний в структуре с помощью коротких лазерных импульсов. Энергия в импульсе не превышала 30 мДж. Плотность энергии лазерного излучения  $E_0$  в импульсе составила 1,4 мДж/см<sup>2</sup>, радиус пучка равен 1,5 мм, поперечное распределение интенсивности лазерного излучения в пучке соответствовало Гауссову. С помощью оптической системы, содержащей расширитель пучка и цилиндрическую линзу, лазерное излучение фокусировалось на поверхность ZnO в виде световой полоски, длиной не более 3 мм и шириной не более 1,5 мм. Длина световой полосы была практически равна ширине полосы из оксида цинка, сформированной в структуре Si-SiO<sub>2</sub>-ZnO. Регистрирующий УЗ сигнал электрод из Al был помещён на верхней (относительно Si) стороне ZnO на расстоянии 25 мм от места падения лазерного излучения. Расчёт пикового давления, создаваемого оптоакустической антенной, по методике, приведённой в [7, 9, 10] позволил оценить верхнюю границу акустического давления, которая составила 39,7 Па.

Так как ZnO является пьезополупроводниковым материалом, то регистрация распространяющихся по ZnO акустических волн осуществлялась с помощью системы планарных электродов из алюминия, напылённых на поверхность из оксида цинка. Контрольный датчик для приёма ультразвукового сигнала, распространяющегося в слое ZnO, был реализован на пластине из LiNiO<sub>3</sub>. Сигнал с контрольного датчика и сигнал с планарного электрода усиливались сверхширокополосными аperiodическими усилителями, по-

лоса пропускания которых составляла 300 МГц. Регистрация УЗ сигнала проводилась с помощью цифрового осциллографа Keysight DSO4104A.

При регистрации временной зависимости давления  $p(\tau)$  момент времени  $\tau = 0$  соответствует приходу фронта ультразвукового сигнала, возбуждённого импульсом лазерного излучения, на акустический приёмник [7]. Фиксация момента времени  $\tau = 0$  на графике  $p(\tau)$  позволяет преобразовать временную зависимость переднего фронта акустического сигнала в пространственную зависимость акустического сигнала  $p(x)$ , где  $x = -c_0\tau$  [6, 7]. Зависимость  $p(x)$  является, по сути, распределением интенсивности падающего светового импульса в объёме структуры Si-SiO<sub>2</sub>-ZnO [7–9, 11]. Погрешность измерения эффективного коэффициента поглощения света  $\alpha$  напрямую зависит от экспериментальной погрешности в измерении временной зависимости давления на фронте акустического зондирующего сигнала. При использовании в эксперименте 12-битного АЦП, применяемого для оцифровки зондирующего акустического сигнала, суммарная погрешность измерения  $p(\tau)$  не превышала 3% от максимальной величины сигнала.

Экспериментальная проверка возможности использования оптоакустического метода для формирования акустических полей проводилась на тонкоплёночной структуре Si-SiO<sub>2</sub>-ZnO. Были проведены исследования акустических свойств: измерена скорость распространения акустических волн в ZnO, определён коэффициент акустического поглощения  $\Gamma$  в тонкой плёнке оксида цинка. На рис. 3 приведена временная зависимость давления  $p(\tau)$  акустического сигнала, сформированного лазерной оптоакустической антенной. Локальный минимум



**Рис. 3.** Временная зависимость давления  $p(\tau)$  оптоакустического сигнала в структуре Si-SiO<sub>2</sub>-ZnO.

на временной зависимости соответствует моменту прихода акустического зондирующего сигнала на УЗ приёмник. С помощью экспоненциальной аппроксимации фронта акустической волны, используя метод, приведённый в работах [7–9, 11, 12], была оценена величина  $\alpha_0$ .

Акустические свойства слоя ZnO исследовались методом непосредственной регистрации ультразвукового сигнала, что позволило измерить скорость распространения акустических волн, которая составила  $3,01 \times 10^3$  м/с, что совпадает с полученным из величины  $\alpha_0$  значением. Сравнивая полученное значение скорости акустических волн с литературными данными для поликристаллических плёнок ZnO [13], в которых скорость была равна  $2,64 \times 10^3$  м/с, видно, что различие не превышает 13%. Полученное в эксперименте завышенное значение скорости распространения акустических волн по сравнению с литературными данными может быть объяснено более совершенной структурой исследуемых тонких плёнок оксида цинка.

Коэффициент акустического поглощения в слое оксида цинка рассчитывалась по общепринятой методике [13] по формуле

$$\Gamma = 20 \lg \frac{I_1}{I_2}, \quad (5)$$

где  $I_1$  – интенсивность акустической волны на излучающем преобразователе,  $I_2$  – интенсивность акустической волны на приёмном преобразователе.

Коэффициент акустического поглощения в слое оксида цинка составил 3,45 дБ/см, что хорошо согласуется с литературными данными [13].

\* \* \* \* \*

Акустооптические свойства тонкой плёнки оксида цинка измерялись модифицированным методом Диксона [7, 10]. В качестве эталонного материала использовался слой из диоксида кремния. Величина акустооптической постоянной  $M_2$  для плёнки ZnO составила  $8,78 \times 10^{-18}$  с<sup>3</sup>/г.

## Выводы

Оптоакустическая антенна, сформированная лазерным излучением в структуре Si-SiO<sub>2</sub>-ZnO, позволяет формировать акустические поля, достаточные по интенсивности, чтобы наблюдать акустооптический эффект в тонкоплёночной структуре. Метод прямой регистрации акустического сигнала от оптоакустического источника позволил установить скорость акустической волны, которая составила  $3,01 \times 10^3$  м/с. Коэффициент акустического поглощения в слое ZnO равен 3,45 дБ/см. Модифицированный метод Диксона позволил рассчитать величину акустооптической постоянной  $M_2$  для плёнки ZnO, которая составила  $8,78 \times 10^{-18}$  с<sup>3</sup>/г.

В этой связи, тонкоплёночная структура Si-SiO<sub>2</sub>-ZnO, содержащая слой оксида цинка, созданного методом реактивного ионно-плазменного напыления, и обладающая приведёнными выше оптическими и пьезоэлектрическими свойствами, может быть использована для создания акустооптических устройств в интегрально-оптическом исполнении без использования дополнительного слоя из халькогенидного стекла.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 16-07- 00237.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Волошинов В.Б., Никитин П.А., Трушин А.С., Магдич Л.Н. Акустооптическая ячейка на кристалле парателлурита с поверхностным возбуждением объемных акустических волн // Письма ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 16. С. 22–28.
2. Авдошин Е.С. Световодный ИК радиометр с поляризационной модуляцией излучения в планарном волноводе // Автометрия. 1991. № 1. С. 42–46.
3. Srikanth V., Clarke D.R. On optical band gap of zinc oxide // Journal of Appl. Phys. 1998. V. 83. P. 5447–5451.
4. Gumus C., Ozkendid O.M., Kovak H., Ufuktepe Y. Structural and optical properties of zinc oxide thin films // J. Optoelectronics and adv. materials. 2006. V. 8. #1. P. 299–3003.
5. Григорьев Л.В., Нефедов В.Г., Шакин О.В., Михайлов А.В., Елисеев Е.Н. Исследование структурных и оптических свойств тонких поликристаллических плёнок оксида цинка, полученных ионно-плазменным методом // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 5. С. 66–70.

6. *Карабутов А.А., Матросов М.П., Подымова Н.Б., Пыж В.А.* Импульсная акустическая спектроскопия с лазерным источником звука // *Акустический журнал*. 1991. Т. 37. Вып. 3. С. 311–322.
7. *Гусев В.Э., Карабутов А.А.* Лазерная оптоакустика. М.: Наука. Физматлит, 1991. 304 с.
8. *Карабутов А.А., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б., Скипетров С.Е.* Измерение оптических характеристик рассеивающих сред лазерным оптико-акустическим методом // *Квантовая электроника*. 1999. Т. 29. № 3. С. 215–220.
9. *Бурмистрова Л.В., Руденко О.В., Черепецкая Е.Б.* Метод передаточных функций в задачах термооптического возбуждения звука // *Акустический журнал*. 1978. Т. 28. Вып. 5. С. 655–663.
10. *Гусев О.Б., Клудзин В.В.* Акустооптические измерения. Л.: Издательство ЛГУ, 1987. 148 с.
11. *Karabutov A.A., Podymova N.B., Letokhov V.S.* Time-resolved laser optoacoustic tomography of inhomogeneous media // *App. Phys. B*. 1996. V. 63. P. 545–563.
12. *Арсенин В.Я., Тихонов А.Н.* Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1991. 230 с.
13. *Морозов А.И., Проклов В.В., Станковский Б.А., Гингис А.Н.* Пьезополупроводниковые преобразователи. М.: Энергия, 1973. 159 с.