

Импульсная проводимость в Ag–Pd-резисторах, индуцированная импульсами лазера

© В.А. Александров,¹ В.В. Бесогонов,² Д.Г. Калюжный^{1,2}

¹ Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, 426067 Ижевск, Россия

² Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, 426069 Ижевск, Россия

e-mail: ava@udman.ru, vbesog@mail.ru, dikdik@mail.ru.

Поступило в Редакцию 28 августа 2021 г.

В окончательной редакции 1 февраля 2022 г.

Принято к публикации 2 февраля 2022 г.

Экспериментально изучена импульсная ЭДС в резистивных толстопленочных Ag–Pd-элементах при облучении их поверхности пучком лазерного излучения. Получены зависимости импульсной ЭДС от координаты воздействия луча лазера на поверхность пленки. Показано, что подача постоянного смещающего напряжения на толстопленочный резистивный элемент позволяет существенно увеличить амплитуду однополярных импульсов ЭДС, индуцированных импульсами лазера. Установлено, что амплитуда и частота сигналов ЭДС зависят соответственно от мощности и частоты импульсов лазерного излучения. Показано, что по значению импульсной ЭДС можно контролировать параметры падающего на поверхность мощного лазерного излучения в реальном масштабе времени. Разработана конструкция приемника для регистрации параметров лазерного излучения на основе Ag–Pd-чувствительного элемента. Проведена оценка чувствительности устройства для измерения мощности и частоты следования импульсов.

Ключевые слова: измерение параметров лазеров, толстопленочный резистор, термо-ЭДС.

DOI: 10.21883/JTF.2022.05.52379.246-21

Введение

Компактные элементы, чувствительные к лазерному излучению и одновременно обладающие высокой лучевой стойкостью, остаются востребованными в связи с широким использованием мощных промышленных и исследовательских лазерных установок. Толстопленочные резистивные датчики, созданные на основе соединений серебра и палладия, позволяют осуществлять регистрацию отдельных импульсов лазерного излучения. Такие пленочные структуры образуются в результате спекания и вжигания в керамическую подложку исходных составов в виде нанопорошков с размером частиц менее 100 nm [1]. В состав пасты входят компоненты в следующем соотношении (в весовых %): Ag₂O — 19.7, Pd — 25.3, остальное стекло. После термообработки в составе стеклянной матрицы содержатся Ag, Pd и соединение PdO, обладающее полупроводниковыми свойствами. Кроме этого, в качестве исходного материала для получения резистивных пленочных структур могут использоваться оксиды олова, цинка, рутения и др. [2,3–6].

Исследования термо-ЭДС в Ag–Pd-резисторах при воздействии импульсами CO₂-лазера подтвердили полупроводниковые свойства поверхности резистивной пленки [7–9]. Концентрация носителей заряда в PdO-полупроводнике с увеличением температуры растет, поэтому в исследуемых образцах может обнаруживаться дополнительная проводимость, обусловленная термоге-

нерацией носителей на поверхности резистивной пленки при импульсном лазерном воздействии. В настоящей работе проведены исследования импульсной проводимости в Ag–Pd-резисторах при воздействии импульсами лазера на поверхность резисторов. Нами было отмечено, что при этом регистрируются постоянная и переменная составляющие сигнала ЭДС. Величина сигнала ЭДС пропорциональна энергетическим характеристикам падающего излучения. Однако сигнал при этом составлял десятки-сотни микровольт. В настоящей работе осуществлен один из способов увеличения сигнала ЭДС — одновременная подача электрического смещения на электроды, расположенные по краям резистивной пленки. Целью настоящей работы явилось исследование возможности использования сигнала ЭДС для регистрации мощности лазерного пучка, падающего на поверхность резистивной пленки.

1. Методы

Экспериментальные исследования импульсной ЭДС в Ag–Pd-пленочных резисторах проводились с использованием нормально падающего пучка лазерного излучения CO₂-лазера мощностью 12 W на длине волны 10.6 μm, работающего в импульсном режиме с частотой следования импульсов 1 KHz и длительностью импульса 100 μs. Диаметр пятна лазерного пучка на поверхности резистора составлял 1 mm. Изменение положения точки

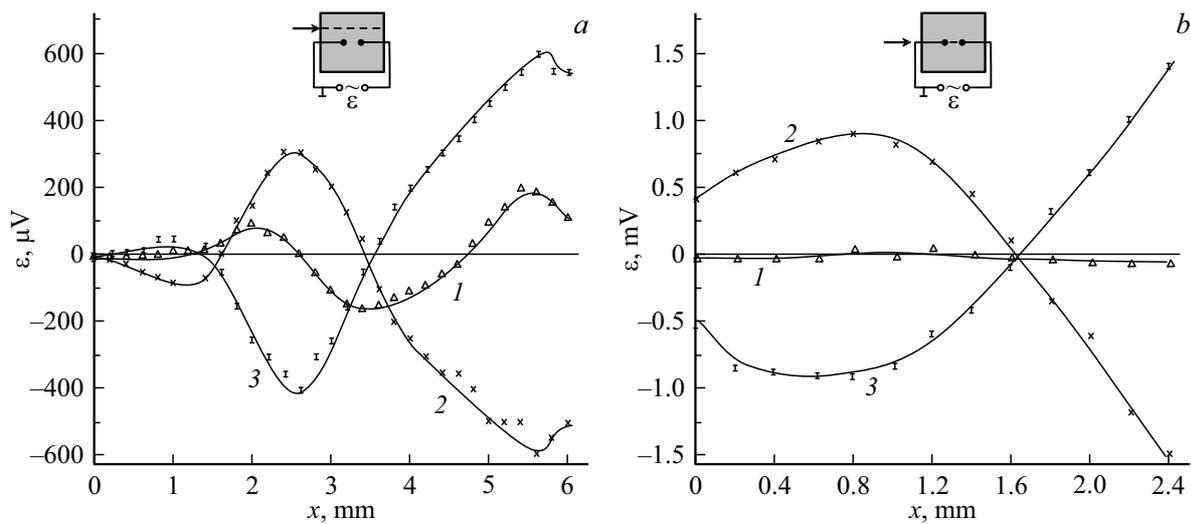


Рис. 1. Зависимости амплитуды импульсов ЭДС в Ag–Pd-резисторе от координаты точки воздействия лазерного пучка при измерении двумя зондовыми электродами: *a* — при облучении параллельно линии между зондовыми электродами; *b* — при облучении по линии между зондовыми электродами (*1* — без смещения, *2* — смещение +3 В, *3* — смещение –3 В).

воздействия лазера на поверхности пленки осуществлялось двухкоординатной механической системой с шагом 0.2 mm по каждой из координат.

В качестве фоточувствительного элемента использовались Ag–Pd-резистивные пленки с удельным поверхностным сопротивлением от 10 до 1000 Ω/sq. В экспериментах с образцами резистивной пленки размером 6 × 6 mm и сопротивлением 60 Ω на толстопленочные электроды на краях резистора подавалось электрическое смещение в виде постоянного напряжения. Сигнал ЭДС при воздействии импульсами лазера снимался с зондовых электродов, подведенных к поверхности резистивной пленки [10]. Расстояние между точками касания зондовыми электродами поверхности резистивной пленки образца составляло 2.4 mm. При напряжении электрического смещения в 3 V падение напряжения между зондовыми электродами составляло 1 V.

Образцы с резистивной пленкой размером 2 × 2 mm имели сопротивление 325 Ω. Электрическое напряжение на этот образец подавалось через дополнительный резистор с сопротивлением 544 Ω так, чтобы смещение на пленочном образце составляло 0.5 и 1 V.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 1 и 2, *a* приведены зависимости ЭДС от точки воздействия импульсов лазера на поверхность резистора с сопротивлением 60 Ω при сканировании вдоль различных линий относительно зондовых электродов. Схемы перемещения лазерного пучка по поверхности пленки представлены на выносках на каждом из рисунков. Постоянное напряжение разной полярности было приложено к пленочным электродам, размещенным на правом и левом краях резистивной пленки (на рисунках не показаны).

На рис. 2, *b* приведены результаты экспериментов с образцом пленки размером 2 × 2 mm. На всех рисунках также показаны зависимости импульсной термо-ЭДС от точки воздействия пучка лазера, т. е. ЭДС, полученной без подачи смещения на образец. Полученные результаты показывают, что подача постоянного смещающего напряжения на толстопленочный резистор позволяет увеличить амплитуду однополярных импульсов ЭДС, индуцированных импульсами лазера на поверхности резистивной пленки.

Зависимость амплитуды ЭДС от координаты точки воздействия лазерного пучка также отличается от зависимости импульсной термо-ЭДС. Так, в одной и той же точке пленки, значение ЭДС (точка с координатой 1 mm на кривой *1* рис. 2, *b*), возникающей на электродах без подачи электрического смещения, может принимать нулевое значение, а при наличии напряжения смещения — максимальное значение (точки с координатой 1 mm на кривых *4, 5* рис. 2, *b*). Таким образом, результаты экспериментов указывают на возникновение дополнительной проводимости в Ag–Pd-резисторах при облучении их поверхности импульсами лазера за счет перемещения носителей заряда из области воздействия лазерного пучка в прилегающую необлученную область. Последнее обусловлено увеличением концентрации носителей заряда на поверхности резисторов в области теплового воздействия импульсов лазера. Так как композитный материал резисторов содержит частицы металлов Ag, Pd и оксида палладия PdO, являющегося полупроводником *p*-типа, при локальном нагреве лазером происходит генерация как электронов, так и дырок. Увеличение импульсной ЭДС в резисторах при наличии электрического смещения и воздействии импульсами лазера может быть связано с генерацией одновременно двух типов носителей, которые дают вклад в общий ток.

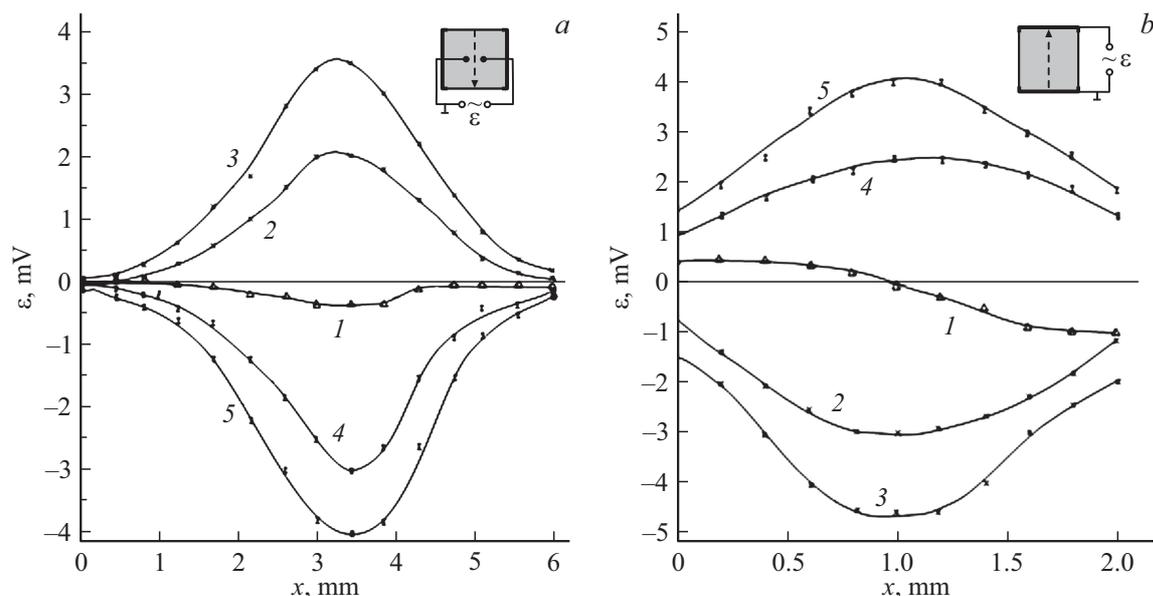


Рис. 2. Зависимости амплитуды импульсов ЭДС в Ag–Pd-резисторе от координаты точки воздействия лазерного пучка: *a* — резистор с пленкой 6×6 mm (*1* — без смещения, *2* — смещение +1.5 V, *3* — смещение +3 V, *4* — смещение –1.5 V, *5* — смещение –3 V); *b* — резистор с пленкой 2×2 mm (*1* — без смещения, *2* — смещение +0.5 V, *3* — смещение +1 V, *4* — смещение –0.5 V, *5* — смещение –1 V).

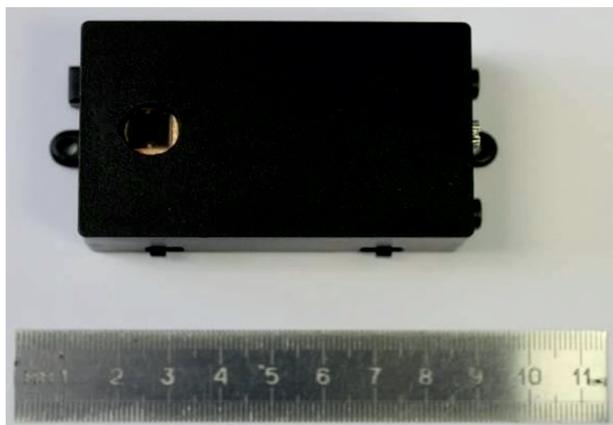


Рис. 3. Измеритель мощности и частоты лазерных импульсов с толстопленочным датчиком.

Носители заряда ускоряются электрическим полем смещения и создают импульсный ток. Этот ток наводит ЭДС на участке поверхности резистора и регистрируется с помощью электродов, подведенных к этому участку поверхности. Форма импульсов ЭДС, возникающей за счет тока носителей, возбужденных лазерным импульсом, не отличается от формы импульсов термо-ЭДС.

Пороговое значение плотности мощности, при превышении которого происходит разрушение материала, было рассчитано для каждого из компонентов готовой пленки: Ag, Pd и PdO. Под разрушением материала подразумевалось необратимое изменение структуры серебро-палладиевой пленки. Из анализа полученных

значений наименьшей стойкостью обладает оксид палладия. Таким образом, теоретически рассчитанное пороговое значение плотности мощности для длины волны излучения $10 \mu\text{m}$ составляет $6.6 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$. Пороговая мощность разрушения пленки в этом случае 66 W при частоте следования импульсов 1 KHz.

Заключение

В результате проведенных экспериментов по исследованию термо-ЭДС и фотопроводимости в Ag–Pd-пленках с использованием мощной установки с CO₂-лазером показана возможность использования Ag–Pd-толстопленочных резисторов в качестве датчиков для контроля параметров мощного импульсного излучения технологических лазеров.

Экспериментально доказано, что при воздействии лазерным излучением на серебро-палладиевые пленки в них возникает поверхностная термо-ЭДС. Полученные частота и амплитуда сигналов ЭДС дают возможность определить частоту и мощность импульсов лазерного излучения.

На основе этих исследований разработано устройство для измерения мощности и частоты лазерных импульсов [11], внешний вид которого показан на рис. 3.

Измеритель содержит приемник лазерного излучения на основе толстопленочного Ag–Pd-резистивного чувствительного элемента, усилитель и автономный источник питания. Чувствительность измерителя с датчиком размерами рабочей поверхности 6×6 mm составила $10^{-6} \text{ V}\cdot\text{m}^2/\text{MW}$.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-48-180005 р_а.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.Г. Недорезов. *Технология керметных резистивных структур и компоненты на их основе* (Пенза, ПГУ, 2005)
- [2] В.Г. Недорезов, С.В. Подшибякин, Н.К. Юрков. Известия вуз, Поволжский регион. Технические науки, **4** (16), 33 (2010).
- [3] Y.C. Shin, J. Song, K.M. Kim, B.J. Choi, S. Choi, H.J. Lee, G.H. Kim, T. Eom, C.S. Hwang. Appl. Phys. Lett., **92** (16), 162904 (2008). DOI:10.1063/1.2912531
- [4] J. Xu, Y. Shun, Q. Pan, J. Qin. Sensors and Actuators B: Chemical, **66** (1), 161 (2000).
- [5] S.F. Bamsaoud, S.B. Rane, R.N. Karekar, R.C. Aiyer. Sensors and Actuators B: Chemica, **153** (2), 382 (2011). DOI: 10.1016/j.snb.2010.11.003
- [6] S.F. Bamsaoud, S.B. Rane, R.N. Karekar, R.C. Aiyer. Mater. Chem. Phys., **133** (2–3), 681 (2012). DOI: 10.1016/j.matchemphys.2012.01.052
- [7] V.A. Alexandrov, V.V. Besogonov. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, **560**, (2019). DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012099
- [8] А.И. Ансельм. Введение в теорию полупроводников (Наука, М., 1978)
- [9] Д.Г. Калюжный, В.А. Александров, В.В. Бесогонов. Прикладная физика, **3**, 81 (2016).
- [10] I.V. Vodnar', V.Yu. Rud', Yu.V. Rud'. J. Appl. Spectroscopy, **73** (4), 567 (2006).
- [11] В.А. Александров, Д.Г. Калюжный, В.В. Бесогонов. Патент РФ на изобретение № 2636256, 33 (2017).