

ков на образцах подвергали воздействию непрерывного лазерного излучения на установке ЛГН-702 «Кардамон» (Россия) (таблица 2) [3].

Таблица 1 – Химический состав сплава ПГ-СР4

Наименование вещества	Процентное содержание, %
<i>Основные</i>	
Углерод	0,6 – 1,0
Хром	15,0 – 18,0
Кремний	3,0 – 4,5
Бор	2,8 – 3,8
Железо	не более 5,0
<i>Вспомогательные</i>	
Сера	0,04
Фосфор	0,04

Таблица 2 – Основные технические характеристики лазера модели ЛГН-702

Наименование параметра	Численное значение
Активная среда	СО ₂ (с продольной прокачкой)
Рабочая длина волны	10,6 мкм
Мощность излучения	800±5 Вт
Скорость перемещения лазерного луча	20, 15, 10 и 5 мм/с
Мода генерации	К ₀ =0,08
Угловая расходимость	3 мрад

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований

№ образца	Состав смеси порошков, масс.%		Магнитная индукция в зоне обработки, Тл	Ra, мкм	Пористость, %	Величина износа, мкм
	Fe-Va	ПГ-СР4				
1	40	60	0,8	35	10	9,5
2	50	50	1,0	25	5	5,5
3	60	40	1,4	20	4	5,0
4	70	30	1,8	26	6	5,5
5	80	20	2,0	40	12	7,5

Режимы обработки: скорость перемещения лазерного луча – 200 мм/мин, диаметр лазерного луча – 2,5 мм и коэффициент перекрытия дорожек лазерной обработки – 0,8 обеспечивали про-

плавление слоя смеси порошков на упрочняемых образцах.

Обработанную лучом лазера поверхность образцов I-го типа оценивали по параметру шероховатости Ra на профилографе–профилометре модели 252, а затем шлифовали и полировали, чтобы оценить пористость покрытия с помощью микроскопа МИМ-8М в поляризованном свете. Обработанную лучом лазера поверхность образцов II-го типа после шлифования проверяли на износостойкость на машине торцового трения. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 3.

Испытания образцов на износостойкость проводили на следующих режимах: давление P = 1,24 МПа, скорость скольжения V = 2 м/с, время испытаний – 3 часа, среда – масло индустриальное 20. Контртело – трубки из твердого сплава ВК-8.

Предложенный способ получения износостойких покрытий на металлических изделиях обеспечивает значительное снижение шероховатости и пористости формируемых покрытий при сохранении высокого уровня износостойкости упрочненного слоя изделий.

Выход за пределы предложенного состава смеси порошков и магнитной индукции в зоне обработки приводит к возрастанию шероховатости и пористости покрытия, а также увеличивает износ образцов.

Литература

1. Кардополова М.А., Спиридонов Н.В., Станкевич О.Н. Влияние режимов лазерной обработки на микроструктуру // *Машиностроение: Республ. Межвед. сб. – Вып. 10. – Мн. : Выш. школа, 1985. – С. 120.*
2. P. Roupová, O. Schneeweiss. Preparation and analysis of Fe-Zr, Fe-Ti, and Fe-V composites for hydrogen storage. *Materials Structure*, vol. 18, № 3. – 2011. – P.218–219.
3. Алейников В.С., Беляев В.П. и др. Лазерная установка «Кардамон» // *Электронная промышленность, 1981. – № 5–6. – С. 39–51.*

УДК 535.339; 621.317

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА И НИТРИДА КРЕМНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОЛИТ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК Романов И.А., Комаров Ф.Ф., Власукова Л.А., Пархоменко И.Н.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

На протяжении многих лет ученых привлекает идея создания светоизлучающего диода совместимого с технологией производства кремниевых интегральных схем. Наиболее перспективными материалами активных сред разрабатываемых светоизлучающих структур на основе кремния являются оксид (SiO_x), нитрид (SiN_x) и

оксинитрид (SiO_xN_y) кремния. Спектроскопия электролюминесценции (ЭЛ) является ключевой методикой, позволяющей определить пригодность разрабатываемых структур для создания на их основе приборов кремниевой оптоэлектроники. Метод ЭЛ обладает высокой чувствительностью к наличию дефектов и примесей и позволя-

ет получать не только информацию о составе, строении и структурных особенностях диэлектрических слоев, но и оценивать влияние дефектов и примесей на процессы переноса носителей заряда под действием электрического поля [1].

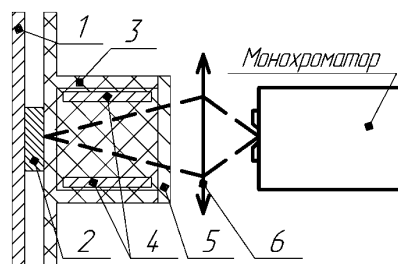
Для исследования ЭЛ, электрофизических параметров и фотопроводимости диэлектрических слоев, сформированных на кремниевых подложках, необходимо создавать диодные структуры, обеспечивающие максимальный квантовый выход. Наиболее простым и распространенным методом создания тестовых структур является формирование прозрачных проводящих контактов на поверхности диэлектрических слоев. Электрофизические и светоизлучающие свойства создаваемых тестовых структур во многом определяются их топологией, материалом и типоразмерами контактов. Наиболее распространенными материалами для формирования прозрачных и полупрозрачных электродов являются легированный поликристаллический кремний, оксид индия-олова, тонкие пленки металлов (Al, Au), жидкий электролит (водный раствор Na_2SO_4 , KNO_3) [1]. Применение электролита в качестве прозрачного контакта к диэлектрическому слою имеет ряд особенностей, позволяющих значительно расширить возможности метода ЭЛ, повысить его точность и информативность. Среди основных преимуществ системы электролит-диэлектрик-полупроводник (ЭДП) при исследовании ЭЛ структур SiN_x/Si , SiO_x/Si и $\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{Si}$ можно выделить следующие:

- Возможность создания в диэлектрическом слое более сильных электрических полей по сравнению с системой МДП;
- Возможность измерения спектрального распределения ЭЛ при послойном стравливании диэлектрического слоя, что позволяет получить распределение излучающих центров по глубине диэлектрического слоя;
- Высокая спектральная прозрачность электролита;
- Простота нанесения и удаления полевого электрода.

Для реализации метода ЭЛ в системе ЭДП на кафедре физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета создана установка, позволяющая регистрировать спектры электролюминесценции в диапазоне 250–1000 нм.

В состав установки входит: электрохимическая ячейка, источник питания Б5-50, стабилизаторы тока и напряжения, многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) В-380, монохроматор МДР-23, фотоэлектронный умножитель ФЭУ-100, охлаждаемая кремниевая ПЗС линейка, регистрирующая система «Spectralink» с компьютером.

На рисунке 1 представлена оптическая схема разработанной экспериментальной установки.



1 – анод, 2 – образец, 3 – электрохимическая ячейка, 4 – катоды, 5 – кварцевое стекло, 6 – кварцевая линза
Рисунок 1 – Оптическая схема экспериментальной установки для регистрации спектров электролюминесценции в системе ЭДП, вид сверху

Электрохимическая ячейка представляет собой ёмкость, изготовленную из PLA пластика методом трехмерной печати. Внутренний объем ячейки – 4 см³. Катоды изготовлены из химически инертного сплава. Исследуемый образец помещается между анодом и отверстием в электрохимической ячейке, которое обеспечивает электрический контакт образца с электролитом и служит для вывода излучения.

На рисунке 2 представлена структурная электрическая схема установки для возбуждения ЭЛ в системе ЭДП.

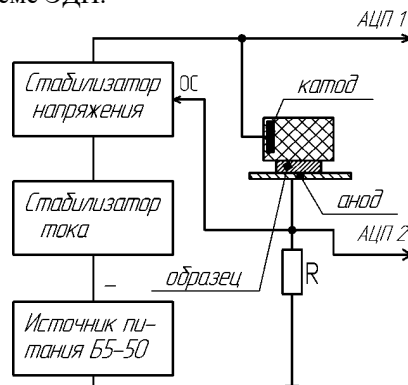


Рисунок 2 – Структурная электрическая схема установки для возбуждения электролюминесценции в системе ЭДП

В представленной установке реализована возможность проведения измерений при постоянном токе в диапазоне 1 мкА..20 мА с шагом 1 мкА или постоянном напряжении в диапазоне 1..300 В с шагом 0,5 В на исследуемом образце. Входящий в состав установки многоканальный АЦП позволяет осуществлять контроль напряжения и тока, а так же записывать временные зависимости тока, напряжения и заряда протекающего через образец в процессе регистрации спектра. Сопоставление полученных временных зависимостей напряжения и тока со спектрами ЭЛ позволяет определить влияние степени заполнения электронных и дырочных ловушек на спектральный состав и интенсивность полос ЭЛ, определить наиболее эффективный режим воз-

буждения ЭЛ, оценить величину напряжения пробоя исследуемого образца.

Установка была апробирована на структурах Si/SiO₂, Si/SiO₂/Si₃N₄, Si/SiO₂/SiN_x/SiO₂. На рисунке 3 представлены спектры ЭЛ образцов Si/SiO₂/SiN_{0,9}/SiO₂, зарегистрированные при различных плотностях протекающего тока. Диэлектрические слои оксида и нитрида кремния сформированы методом химического осаждения из газовой фазы на кремниевой пластине p-типа. Общая толщина диэлектрических слоев составляет 140 нм. Спектры ЭЛ зарегистрированы при анодной поляризации кремниевой подложки.

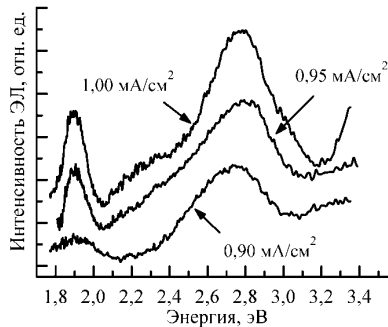


Рисунок 3 – Спектры электролюминесценции образца p-Si/SiO₂/SiN_{0,9}/SiO₂

Спектры ЭЛ характеризуется полосами с энергиями в красной (1,9 эВ), зеленой (2,3 эВ) и синей (2,7 эВ) области, причем последняя полоса имеет наибольшую интенсивность. Полоса

в красной области спектра ЭЛ связана с наличием в слоях SiO₂ силанольных групп (Si-OH). ЭЛ в зеленой области объясняется внутрицентровыми переходами в атомах трехкоординированного кремния в слоях SiO₂. Интенсивная полоса ЭЛ с максимумом при 2,7 эВ характерна для излучательной релаксации силиленовых центров [2]. Наличие этих центров присуще слоям оксинитрида кремния, что позволило сделать заключение о формировании таких слоев на границах оксида и нитрида кремния. Установлено, что интенсивность свечения этой полосы обладает наибольшей устойчивостью к воздействию сильных электрических полей после протекания через образец заряда 1-3 Кл/см².

Таким образом, реализованный метод электролюминесценции позволяет изучить состав, структурные особенности, определить концентрацию центров люминесценции, исследовать деградацию диэлектрических слоев в результате воздействия сильного электрического поля.

Литература

1. Барабан, А.П. Электроника слоев SiO₂ на кремнии / А.П. Барабан, В.В. Булавинов, П.П. Коноров. – Л.: Изд. ЛГУ, 1988. – 304 с.
2. Baraban, A.P. Electroluminescence of Si-SiO₂-Si₃N₄ structures / A.P. Baraban [et al.] // Technical Physics Letters. – 2002. – Vol. 28, № 12. – P. 978–980.

UDC 621

ANISOTROPY OF THERMO-OPTICAL COEFFICIENTS OF ALEXANDRITE LASER CRYSTAL

P. Loiko¹, S. Ghanbari², V. Matrosov³, K. Yumashev⁴, A. Major²

¹ ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

² Department of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Canada

³ Solix Ltd., Minsk, Belarus

⁴ Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Alexandrite (Cr³⁺:BeAl₂O₄) is a well-known crystal for tunable lasers relying on vibronic coupling [1–3]. Alexandrite provides intense emission between 0.7 and 0.85 μm with a maximum at around 0.75 μm [4, 5]. The corresponding stimulated-emission cross-section is relatively small, $\sigma_{SE} = 0.7 \times 10^{-20}$ cm², which is compensated by a relatively long lifetime of the upper laser level $\tau \sim 260$ μs at room temperature. Thus, the $(\sigma_{SE}\tau)$ product is large and the efficient and low-threshold continuous-wave laser operation of alexandrite is possible [6]. The Cr³⁺ ions in orthorhombic BeAl₂O₄ exhibit strong polarization-anisotropy of the spectroscopic properties (the high-gain light polarization is $E \parallel b$) [4, 5] and linearly polarized laser output is easily achievable.

The Alexandrite lasers have relevant applications in medicine (dermatology), space LIDAR technologies, spectroscopy [7] and can replace Ti:Sapphire lasers in nonlinear microscopy.

Alexandrite exhibits a combination of attractive thermal and mechanical properties, namely very high thermal conductivity $\kappa \sim 23$ W/(mK), weak and almost isotropic thermal expansion $\alpha \sim 7 \times 10^{-6}$ K⁻¹, and high optical damage threshold [3, 8]. However, thermo-optical properties of alexandrite have not been studied in detail to date.

In the present report, we aimed to measure the thermo-optic coefficients (TOCs, dn/dT) and to characterize thermal variation of the optical path length of alexandrite with respect to light polarization.

Alexandrite is orthorhombic (sp. gr. *Pnma*) and thus optically biaxial [9]. Its optical properties are characterized in the frame of the optical indicatrix. The optical indicatrix axes are mutually orthogonal and they coincide with the crystallographic axes **a**, **b**, **c**. The corresponding principal refractive indices are n_a , n_b and n_c (for polarizations $E \parallel a$, $E \parallel b$ and $E \parallel c$, respectively) with $n_c < n_a < n_b$. Similarly to the