

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 629.37

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ
ЛЮМИНОФОРОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

© 2024 г. С. М. Зуев^{а, *}, Д. О. Варламов^б

^аМИРЭА – Российский технологический университет

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78

^бМосковский политехнический университет

Россия, 432700, Москва, ул. Б. Семёновская, 38

*e-mail: sergei_zuev@mail.ru

Поступила в редакцию 26.06.2023 г.

После доработки 05.10.2023 г.

Принята к публикации 16.10.2023 г.

Представлено устройство для исследования спектров излучения люминофоров для лазерных осветительных систем при влиянии на них лазерного излучения с $\lambda = 405\text{--}450$ нм с разными значениями мощности и тока. Подробно описана схема драйвера устройства и его компонентной базы. При использовании лазерного устройства были получены значения светового потока в зависимости от различных значений тока и электрической мощности. Использование тепловизора позволяло регистрировать тепловые поля, образующиеся при данного рода воздействии. По результатам работы был сделан вывод о том, что полученная конструкция лазерного устройства с регулируемой силой тока и электрической мощностью позволяет осуществлять различные прикладные научные исследования, связанные с изучением воздействия лазерного излучения на вещество.

DOI: 10.31857/S0032816224020148 EDN: QSFUYS

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение в части развития научных исследований в области светотехники получили лазерные осветительные устройства. Действительно, экспериментальные исследования разных научных групп показали, что хорошим вариантом для достижения яркого белого света является замена светящихся диодов (СИД) лазерными диодами (ЛД), причем световой поток у таких лазерных систем выше, чем у светодиодов при высокой плотности тока [1]. В связи с этим системы освещения на основе лазера считаются наиболее перспективным направлением в области развития твердотельного освещения. Рассмотрим их преимущества и недостатки более подробно. К преимуществам относятся высокая яркость, компактность, направленное излучение и очень маленькое время достижения рабочего режима (лазерное излучение легко захватывается и фокусируется) [2].

Однако получение белого света непосредственно от отдельных красных, зеленых и синих лазерных излучателей затруднительно из-за проблемы “зеленого зазора” и дискретной системы обратной связи с несколькими излучателями. К счастью, этот вопрос можно решить с помощью одноцветного излучателя в сочетании с соответствующим люминофором. Люминесцентные преобразователи ближнего УФ- или синего света с длиной волны $\lambda = 380\text{--}450$ нм были разработаны для генерации белого света с высокой яркостью, характеризуются отсутствием спекл-шума, а также имеют низкую стоимость.

Поскольку плотность мощности у лазерных диодов на несколько порядков выше, чем у светодиодов, люминофоры, используемые в лазерном освещении (далее называемые лазерные люминофоры), возбуждаются гораздо более высокой плотностью фотонов, сопровождаемой большими тепловыми нагрузками [3]. Серьезное насыщение люминесценции часто происходит

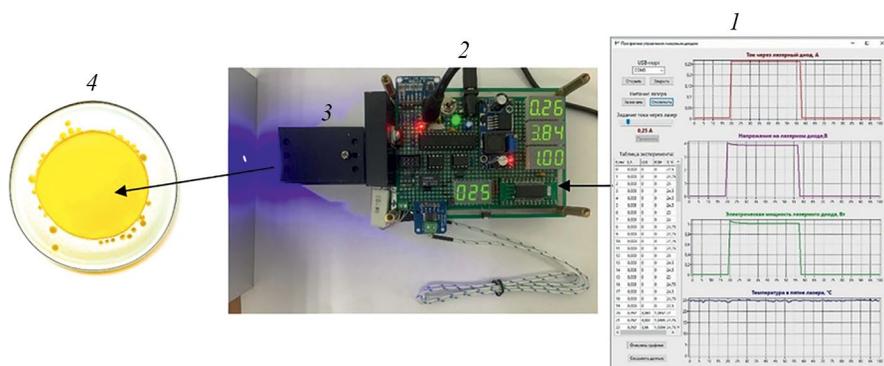


Рис. 1. Блок-схема устройства, позволяющего анализировать физико-химические параметры лазерных люминофорных систем при влиянии на них лазерного излучения с $\lambda = 405\text{--}450$ нм с разными значениями мощности и тока: 1 – общий вид приложения для управления электрическими параметрами лазерного диода; 2 – драйвер, управляющий характеристиками лазерного диода; 3 – лазерный диод с $\lambda = 405\text{--}450$ нм; 4 – система люминофор – стеклянная подложка.

из-за теплового и/или оптического насыщения, которое становится наиболее важным ограничивающим фактором в части развития технологии лазерного освещения. Кроме того, требуется сильное светорассеяние для повышения эффективности вывода света и его однородности с учетом сфокусированного излучения от лазерного источника. Это не относится к белым светодиодам, так как сильное рассеяние приведет к потерям при выводе света [4]. Следовательно, необходимо тщательно выбирать и перерабатывать термически стойкие и высокоэффективные преобразователи люминофора для новой развивающейся технологии лазерного освещения [5]. В связи с этим разработка устройства, позволяющего анализировать физико-химические параметры лазерных люминофорных систем [6] при влиянии на них лазерного излучения с $\lambda = 405\text{--}450$ нм с разными значениями мощности и тока, является важной задачей в области современной светотехники.

2. МЕТОДЫ

Авторами было разработано устройство, позволяющее анализировать физико-химические параметры лазерных люминофорных систем при влиянии на них лазерного излучения с $\lambda = 405\text{--}450$ нм и разными значениями мощности и тока. Его блок-схема представлена на рис. 1. Принцип работы установки для управления полупроводниковым лазером описывается блок-схемой, представленной на рис. 2. В устройстве устанавливаются индикаторы для отображения значений тока, напряжения и мощности лазера, также температуры в пятне лазера. Необходимый

Таблица 1. Характеристики микроконтроллера Atmega328P

Характеристика	Atmega 328P
Количество выходов	28/32
Память, байт	32к
SRAM, байт	2к
EEPROM, байт	1к
SPI	2
TWI (I2C)	1
USART	1
ADC	10-bit 15kSPS
ADC Channels	8
8-bit Timer/Counters	2
16-bit Timer/Counters	1
Частота, МГц	20
Рабочее напряжение, В	1.8–5.5

задаваемый ток через лазер составляет от 10 мА до 1.6 А.

Управляющим микроконтроллером был выбран микроконтроллер Atmega 328P от компании Microchip (рис. 3).

В высокопроизводительном 8-разрядном AVR-RISC-Atmega328P реализована технология управления питанием *power*. Микроконтроллер имеет 32 кБ flash-памяти с поддержкой чтения во время записи, 1 кБ EEPROM и 2 кБ ОЗУ. Доступны 27 линий ввода/вывода общего назначения, 32 регистра общего назначения, пять таймеров/счетчиков с расширенным функционалом и гибкими настройками, внутренние и внешние прерывания, 8-канальный 10-разрядный АЦП, программируемый сторожевой таймер с отдельным генератором, последовательные интерфейсы USART, TWI и SPI.

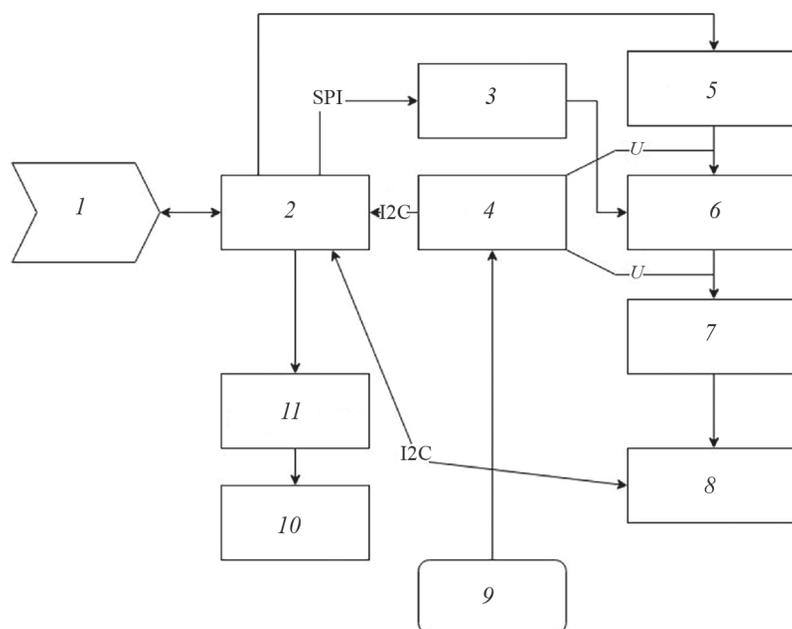


Рис. 2. Блок-схема драйвера устройства: 1 – USB – UART, 2 – микроконтроллер, 3 – регулятор тока, 4 – аналого-цифровой преобразователь, 5 – выключатель лазера, 6 – лазер, 7 – термопара DT, 8 – преобразователь термопары, 9 – шунт.

Таблица 2. Описание выводов микросхемы CH340

Название	Тип	Описание
UD+	USB-сигнал	Сигнал “DATA+” шины USB
UD-	USB-сигнал	Сигнал “DATA-” шины USB
GND	Питание	Общий провод
RTD#	Выход	Дополнительный сигнал “Request To Send” шины UART
VCC	Питание	Напряжение питания чипа
TXD	Выход	Линия передачи данных из CH340N на шину UART
RXD	Вход	Линия передачи данных на CH340N с шины UART
V ₃	Питание	Выход внутреннего стабилизатора на 3.3 В

Микроконтроллер сохраняет полную работоспособность в широком диапазоне напряжений питания (от 1.8 В до 5.5 В). Основные характеристики микроконтроллера представлены в табл. 1 и на блок-схеме.

Для фильтрации высокочастотных помех используется керамический конденсатор C_{11} с емкостью 0.1 пФ. Для обеспечения стабильности работы микроконтроллера используется электролитический конденсатор C_5 емкостью 100 мкФ. Для обеспечения работы устройства на частоте 16 МГц используется внешний кварцевый резонатор X_1 со стабилизирующими конденсаторами C_1 и C_2 емкостью по 33 мкФ каждый. Для связи микроконтроллера с ПК используется USB-конвертер на основе схемы

CH340 (описание выводов микросхемы CH340 приведено в табл. 2).

Микросхема CH340 (рис. 4а) представляет собой преобразователь интерфейсов USB–UART [7] с интегрированным тактовым генератором и схемой начального сброса при включении питания (*Power-On Reset*). Данный чип позволяет легко подключить микроконтроллер к любому современному компьютеру при помощи USB-кабеля. При этом на стороне ПК создается виртуальный COM-порт, работа с которым (с точки зрения пользователя и разработчика ПО) полностью аналогична работе с аппаратным COM-портом, что позволяет использовать существующие приложения для COM-портов без изменений и доработок [8].

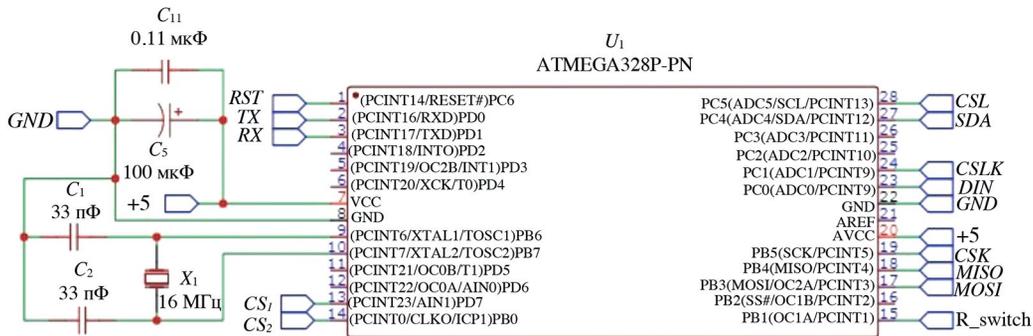


Рис. 3. Управляющий микроконтроллер Atmega328P-PN.

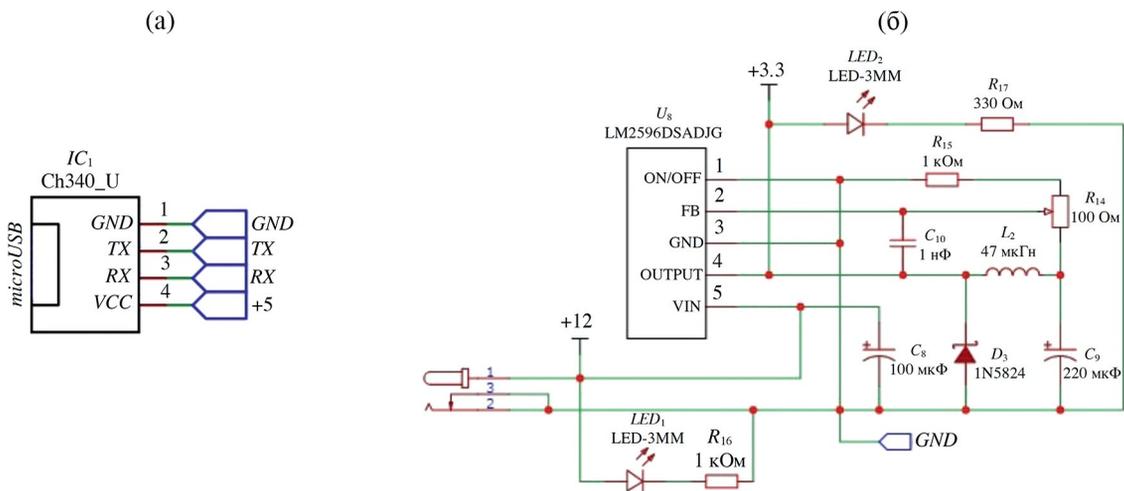


Рис. 4. USB-конвертер (а) и стабилизатор напряжения (б).

Для питания микроконтроллера используется импульсный стабилизатор напряжения на основе микросхемы LM 2596 (рис. 4б).

Микросхема обладает следующими характеристиками:

- напряжение входа – от 2.4 до 40 В;
- напряжение выхода – от 1.2 до 37 В, его можно регулировать и фиксировать с помощью потенциометра R_{14} , установлено значение 3.3 В;
- ток выхода – максимум 3 А;
- преобразовательная частота – 150 кГц;
- КПД – до 95%.

Для регулирования значения тока через лазерный диод применяется транзистор КТ819Г, степень открытия которого контролирует операционный усилитель LM358 (рис. 5а).

Операционный усилитель управляет транзистором так, чтобы на резисторе R_{13} было такое же напряжение, как и на прямом входе [9]. Напряжение на прямой вход операционного

усилителя задает цифровой потенциометр МСР41010, который получает код от микроконтроллера по SPI-интерфейсу.

Сопротивление R_{AB} между выводами P_{B0} и P_{A0} микросхемы МСР41010 составляет 10 кОм. Сопротивление R_9 между напряжением питания и P_{A0} составляет 10 кОм.

Сопротивление между P_{W0} и P_{B0} определяется по формуле

$$R_{WB} = \frac{R_{AB}}{(2^n - 1)} \cdot N + R_W, \quad (1)$$

где n – разрядность, N – код, поступающий от микроконтроллера по SPI-интерфейсу, R_W – сопротивление потенциометра при коде “0”, оно находится в пределах 100 Ом.

Для того чтобы полностью исключить протекание тока через лазерный диод при $N = 0$, в схеме установки используется электромагнитное реле ТІАНВО TR5V (рис. 5б). Для управления реле используется биполярный транзистор 2N39, а для защиты от ЭДС самоиндукции катушки

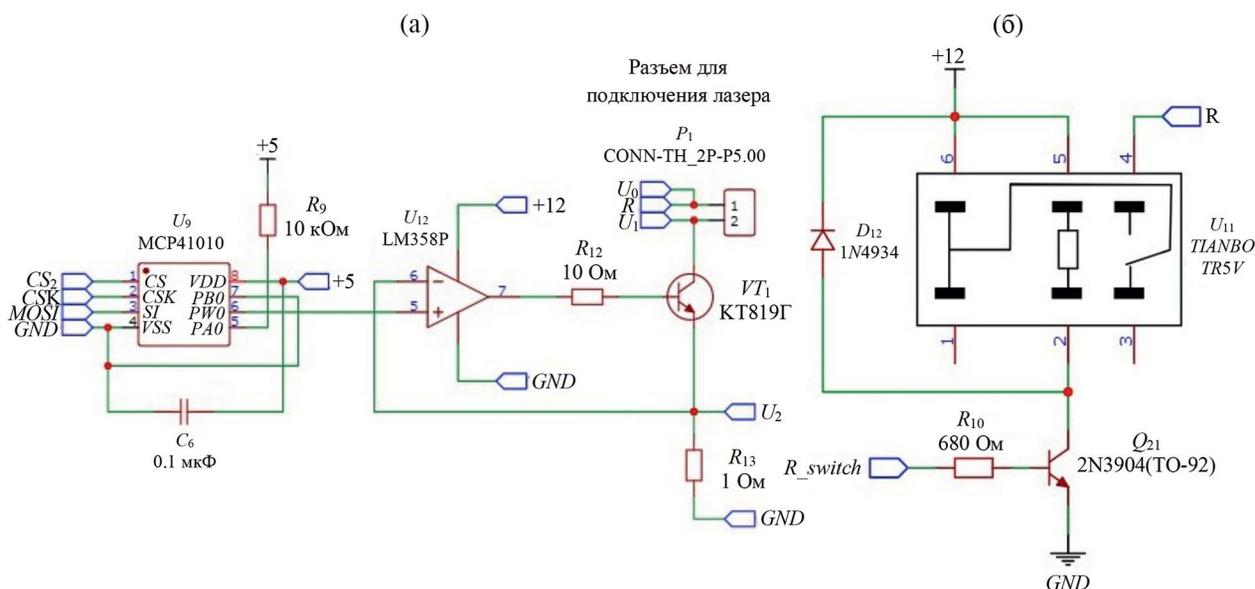


Рис. 5. Схема ограничителя тока с цифровым потенциометром (а) и выключатель лазера (б).

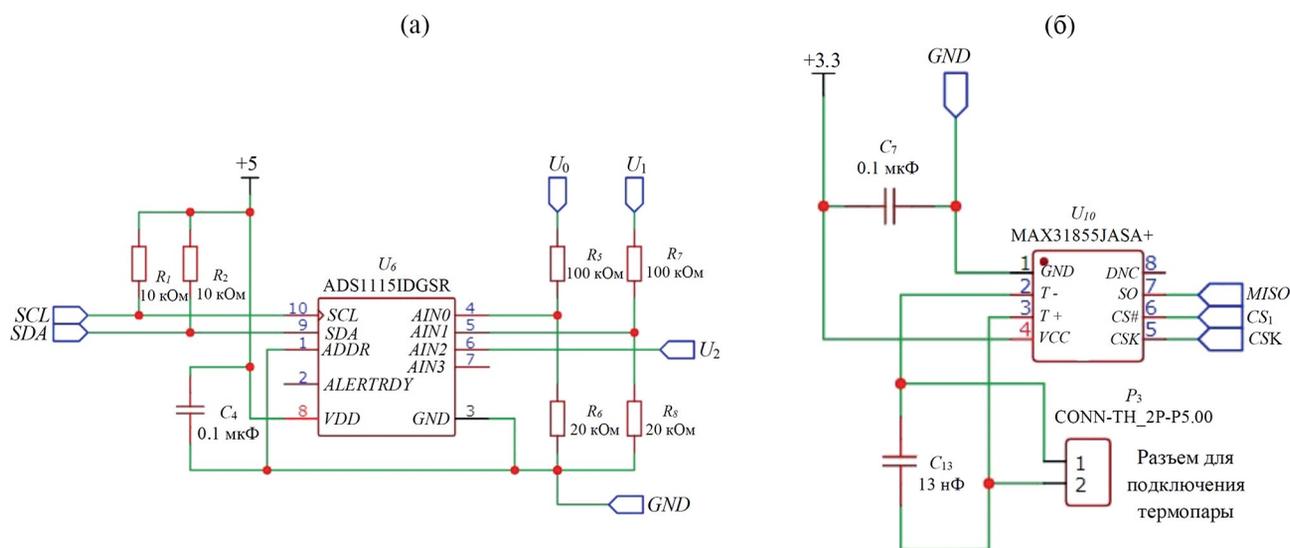


Рис. 6. Аналого-цифровой преобразователь (а) и преобразователь сигнала терморпары (б).

реле используется диод 1N4934. Ток, идущий по цепи без реле, составляет примерно 10 мА.

Для измерения напряжения и тока через светодиода используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ADS1115 [10] (рис. 6а).

ADS1115 – это четырехканальный 16-битный АЦП, он обеспечивает точность, энергоэффективность, простоту в реализации электрической схемы устройства, выполняет преобразование с программируемыми скоростями обработки данных до 860 выборок/с. Потребляемый ток питания составляет всего 150 мкА, а рабочее напряжение – до 2 В. Встроенный усилитель с программируемым коэффициентом усиления (PGA)

имеет диапазоны входных сигналов от ± 256 мВ до ± 6.144 В, что позволяет проводить точные измерения больших и малых напряжений.

Для измерения температуры поверхности, на которую воздействует лазер, используется терморпара К-типа, подключенная к микросхеме преобразователя сигнала терморпары MAX31855.

Высокоточный цифровой преобразователь MAX31855 (рис. 6б) предназначен для преобразования в цифровую форму сигналов с терморпар К-типов, он обеспечивает компенсацию их опорных спаев. Преобразователь имеет цифровой SPI-совместимый интерфейс, функционирующий в режиме чтения данных в знаковом

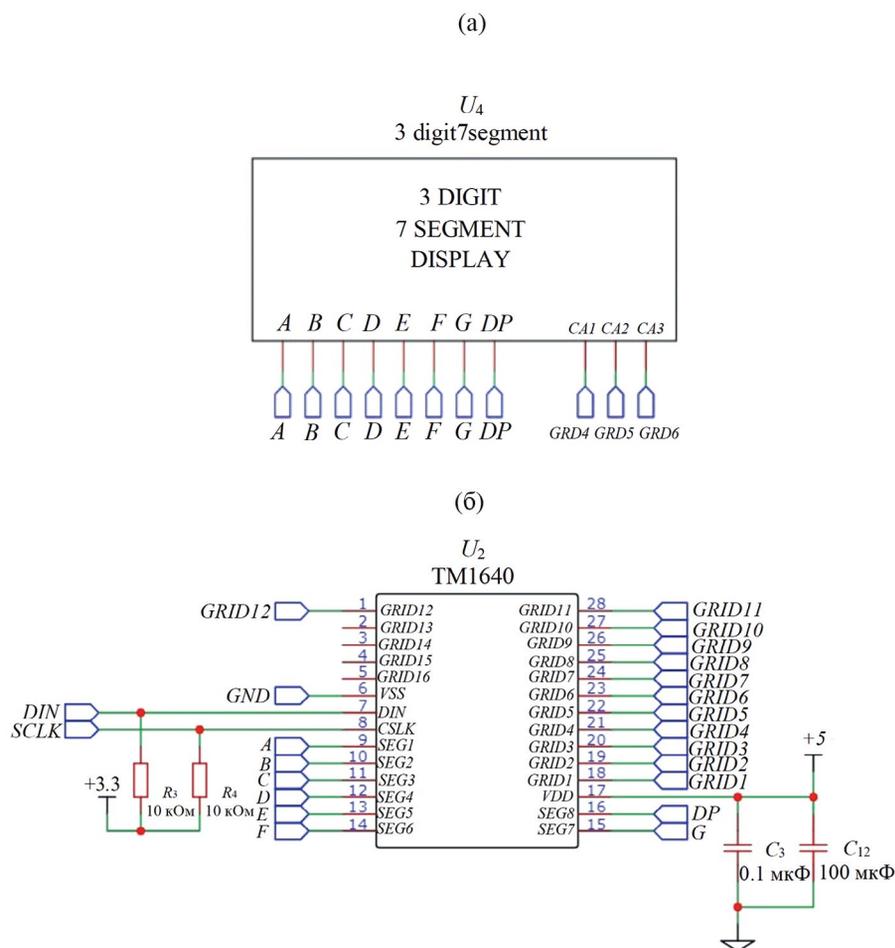


Рис. 7. Сегментарный индикатор (а) и драйвер сегментных индикаторов (б).

четырнадцатиразрядном формате. MAX31855 позволяет проводить измерения как при низких (от $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$), так и высоких температурах (до $+1800\text{ }^{\circ}\text{C}$), что обеспечивает точность $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в температурном диапазоне от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$ для термпар К-типа без необходимости проведения дополнительной калибровки.

Помимо отправки данных на ПК, управляющий микроконтроллер отображает на сегментарных индикаторах значения напряжения, тока, идущего через лазерный диод, рассеиваемую на светодиоде электрическую мощность и температуру в пятне лазера (рис. 7а).

Для управления сегментарными индикаторами используется микросхема TM1640 (рис. 7б). Микросхема TM1640 — это управляющий драйвер для светодиодных индикаторов, LED-матриц, семисегментных индикаторов и отдельных светодиодов. Сам драйвер TM1640 управляется микроконтроллером по шине I2C. Напряжение питания составляет $5 \pm 10\%$ В. Драйвер

поддерживает 8 секций по 16 бит с общим катодом. Входной сигнал передается через двухпроводной последовательный интерфейс CLK, DATA. Также имеется возможность регулировать яркость в пределах 8 рабочих циклов устройства.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ

В ходе экспериментов авторы работы использовали лазерное устройство, описанное выше. С помощью него были получены численные значения светового потока в зависимости от разных значений тока и электрической мощности на образце, который представлял собой систему из люминофора и стекловидного лака. Люминофорные системы наносились на подложку из стекла, в роли которой выступала чашка Петри. На рис. 8а представлена зависимость светового потока от тока, подаваемого на лазерный диод ($\lambda = 450\text{ нм}$), для системы люминофор российского производства ЛСИД-560 — стекловидный лак — стеклянная подложка, полученная

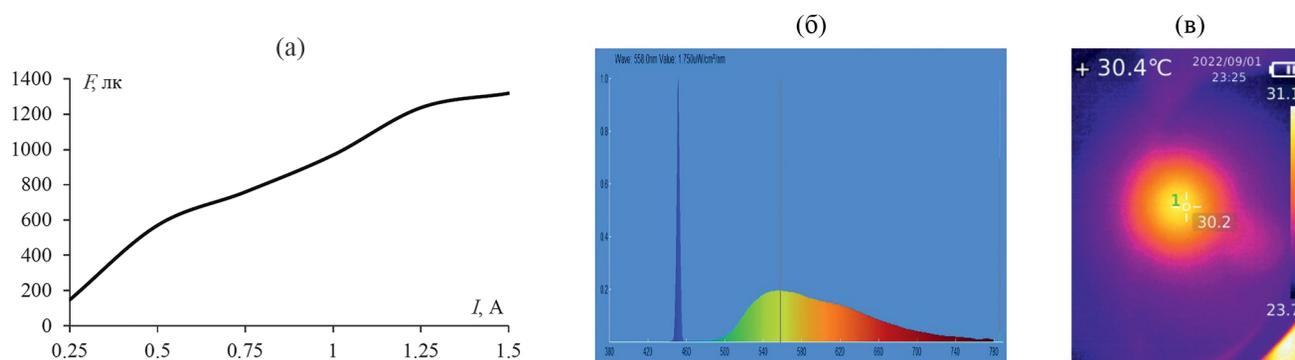


Рис. 8. Зависимость светового потока от тока, подаваемого на лазерный диод ($\lambda = 450$ нм), для системы люминофор ЛСИД560 – стекловидный лак – стеклянная подложка (а). Спектр излучения системы люминофор ЛСИД560 – стекловидный лак – стеклянная подложка при воздействии на него лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 450$ нм и с током $I = (0.25\text{--}1.25)$ А (б). Тепловой градиент на образце при воздействии на него лазерного излучения от устройства (в).

с использованием разработанного лазерного устройства (рис. 1). После генерации лазерного излучения на люминофорный образец с помощью спектрометра ОНСП350 фиксировались форма спектра излучения и световой поток (рис. 8б). Использование тепловизора позволяло регистрировать тепловые поля, образующиеся при воздействии данного рода (рис. 8в).

Результаты работы позволяют определять физико-технические параметры лазерных люминофорных систем, а также безопасные режимы их работы.

4. ВЫВОДЫ

Полученная конструкция лазерного устройства с регулируемой силой тока и электрической мощностью позволяет осуществлять различные прикладные научные исследования, связанные с изучением воздействия лазерного излучения на вещество. Использование результатов данной работы позволит сэкономить время на разработку аналогичных устройств для применения в научных исследованиях по смежным тематикам.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-29-00079, <https://rscf.ru/project/23-29-00079/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Verzellesi G., Saguatti D., Meneghini M., Bertazzi F., Goano M., Meneghesso G., Zanoni E.* // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. P. 71101. <https://doi.org/10.1063/1.4982594>
2. *Зуев С.М., Варламов Д.О., Кукса В.В.* // ПТЭ. 2021. № 6. С. 57. <https://doi.org/10.31857/S0032816221060148>
3. *Зуев С.М., Кретышев А.В.* // Оптика и спектроскопия. 2023. Т. 131. № 3. С. 370. <http://dx.doi.org/10.21883/OS.2023.03.55387.4616-22>
4. *Зуев С.М., Варламов Д.О., Лавриков А.А., Малеев Р.А., Шматков Ю.М.* Электрооборудование и электроника автомобилей. Краткий толковый русско-английский терминологический словарь-справочник / Под общ. ред. С.М. Зуева. Москва: ИНФРА-М, 2021. <https://doi.org/10.12737/1242228>
5. *Chang C.-Y., Majewska N., Chen K.-C., Huang W.-T., Leśniewski T., Leniec G., Kaczmarek S.M., Pang W.K., Peterson V.K., Cherng D.-H., Lu K.-M., Mahlik S., Liu R.-S.* // Chem. Mater. 2022. V. 34 (22). P. 10190. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.2c03045>
6. *Хортов В.П., Скворцов А.А., Зуев С.М.* Лазерное осветительное устройство. Патент РФ № 184953, 2018.
7. *Nakamura S., Senoh M., Nagahama S., Iwasa N., Yamada T., Matsushita T., Kiyoku H., Sugimoto Y., Kozaki T., Umemoto H., Sano M., Chocho K.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. V. 37. P. 309. <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.37.L309>
8. *Скворцов А.А., Зуев С.М.* Светопередающий модуль системы беспроводной связи по технологии VLC. Патент РФ № 197045, 2020.
9. *George N.C., Denault K.A., Seshadri R.* // Annu. Rev. Mater. Res. 2013. V. 43. P. 481. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-matsci-073012-125702>
10. *Хортов В.П., Скворцов А.А., Зуев С.М.* Лазерная лампа освещения. Патент РФ № 167485, 2017.