

УДК 629.4.027.117:621.373

В.И. Барышников, А.А. Штубер

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР ВИЗУАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИНФРАКРАСНОГО КОНТРОЛЯ

Аннотация. Визуализированный импульсный инфракрасный (ИК) лазер на основе кристалла $Er:BaY_2F_8$ значительно повышает эффективность систем тестирования аппаратуры тепловой диагностики на транспорте. Установлено, что при незначительном нагревании диода накачки, происходит смещение рабочей точки в длинноволновую область, интенсивность и стабильность ИК и видимого излучения $Er:BaY_2F_8$ лазера уменьшается. Согласно данным спектроскопических и энергетических исследования длина волны полупроводникового диода накачки, на которой обеспечивается наибольшая эффективность и стабильность работы визуализированного ИК лазера, соответствует 456,7 нм при температурной рабочей точке 55,4°C. Причем для лазерных диодов из одной партии длина волны излучения 456,7 нм для каждого изделия имеет свое значение в интервале 53-57°C. Внедрение, разработанного прецизионного термоблока лазера накачки, в оптоэлектронную конструкцию визуализированного ИК лазера позволило кардинально снизить нестабильность ИК и видимого излучения до величины < 0,25 %.

Ключевые слова: визуализированный инфракрасный лазер, полупроводниковый лазерный диод, лазерный кристалл $Er:BaY_2F_8$, термостабилизация лазерных диодов, элемент Пельтье.

V.I. Baryshnikov, A.A. Shtuber

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

TUNABLE SEMICONDUCTOR LASER OF VISUALIZED INFRARED CONTROL SYSTEM

Abstract. The visualized pulsed infrared (IR) laser based on $Er:BaY_2F_8$ crystals significantly increases the effectiveness of thermal diagnostic testing systems for vehicles. It was found that with insignificant heating of the diode under the action that occurs when the operating point is moved in the long-wavelength region, the intensity and stability of the IR and visible radiation of the $Er:BaY_2F_8$ laser decreases. According to spectroscopic and energy studies, the wavelength of the semiconductor pump diode, which ensures the highest efficiency and stability of the visualized IR laser, corresponds to 456.7 nm at a temperature operating point of 55.4 °C. Moreover, for laser diodes from one batch, the radiation wavelength of 456.7 nm for each product has its own value in the range of 53-57 °C. The incorporation of the developed precision thermo-block of the pump laser into the optoelectronic design of the visualized IR laser made it possible to drastically reduce the instability of IR and visible radiation to <0.25%

Keywords: visualized infrared laser, semiconductor laser diode, laser $Er:BaY_2F_8$ crystal, thermal stabilization of laser diodes, Peltier element.

Введение

Исследования особенностей в механизмах возбуждения кристаллической $Er:BaY_2F_8$ среды при диодной накачке показали возможность одновременного формирования импульсов ИК (теплого) и видимого лазерного излучения [1-2]. Импульсный режим работы визуализированного инфракрасного (ИК) лазера с полупроводниковой накачкой по заданной программе микропроцессора позволяет формировать последовательность визуализированных ИК лазерных импульсов функционально изменяющихся по амплитуде, длительности, скважности и частоте следования. Достижение таких режимов позволяет контролировать оптические и электронные тракты диагностических систем, например КТСМ на железнодорожном транспорте [3], систем инфракрасной (ИК) диагностики лопаток турбин самолетных и газоперекачивающих двигателей и т.д.

К примеру, достоверность инфракрасной (ИК) диагностики теплового состояния буксовых узлов на железнодорожном транспорте в настоящее время определяется качеством настройки КТСМ с помощью стендовых или мобильных ориентирных инерционно

нагреваемых устройств с механическими модуляторами, которые имеют ряд недостатков [4]. Это отсутствие визуализации пятна ИК-излучения, из-за которого погрешность совмещения положения нагретой буксы по отношению к оси болометра достигает 30–40 %. Вторым важным недостатком заключается в невозможности полного оперативного тестирования амплитудных и частотных характеристик электронного тракта системы КТСМ. Указанные недостатки, а также имеющий место при этом человеческий фактор, приводят к пропуску аварийных буксовых узлов и ложным срабатываниям. Кроме того, в перспективе, с увеличением скорости подвижного состава требования к оптическому и электронному тракту систем ИК диагностики состояния железнодорожных буксовых узлов будут значительно выше. Достижение высокой точности и оперативности тестирования аппаратуры ИК диагностики можно достичь лишь путем их системного быстройдействующего мобильного автоматизированного контроля.

В ИрГУПС разработан визуализированный импульсный ИК лазер на основе кристалла $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$. При диодной лазерной двухступенчатой накачке (970 нм) $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ кристалла достигнута эффективная генерация линии стимулированного излучения в видимой – 407, 414 нм, 449, 456, 541, 553, 615, 670, и ИК – 1230, 1650, 2740, 2900 нм областях спектра [1-2]. Анализ показал [1-2], что при лазерной накачке (970 нм) синие лазерные линии 449, 456 нм появляются вследствие нелинейного самосложения частот зеленых линий Er^{3+} при 541 нм и 553 нм соответственно с частотой ИК линии Er^{3+} на 2740 нм. Достигнутый результат расширяет диапазон генерации лазерного излучения $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ в видимую спектральную область и улучшает эффект визуализации теплового луча.

Вместе с тем, эффективность двухступенчатого возбуждения линий излучения Er^{3+} – 449, 456, 541, 553, 1230, 1650, 2740, 2900 нм зависит квадратично от интенсивности пучка лазерного диода на длинах волн 972 нм и поэтому обуславливает значительный вклад в нестабильную работу лазерной $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ среды. Для устранения данного недостатка была реализована накачка $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ среды в режиме прямых электронных переходов на высокоэнергетический уровень $^4F_{7/2}$ при использовании полупроводникового лазера накачки в синем спектральном диапазоне 457 нм [5]. Результаты испытаний показали, что при длительной работе $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ данного лазера наблюдается 10%-дрейф интенсивности ИК-тепловой и видимого излучения.

Задачей данной работы является исследование причины, определяющей указанную нестабильность $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ лазера и на этой основе разработка микропроцессорного модуля обеспечивающего, стабильность функциональной последовательности импульсов полупроводниковой диодной накачки $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ лазера, который обеспечивает генерацию лучей с заданной интенсивностью импульсов в ИК-тепловой (2,7–2,9 мкм) области и в видимом спектральном диапазоне [1-2].

Температурная перестройка частоты диодного лазера накачки $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ среды

В экспериментах использовались полированные $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ кристалл ($4 \times 2 \times 1,5 \text{ mm}^3$), содержащий 1 вес.% Er^{3+} . Кристалл устанавливался в плоско-конфокальную зеркальную оптическую систему – открытый резонатор. Лазерная накачка кристалла осуществлялась через отверстие в глухом длиннофокусном широкополосном сферическом зеркале. С помощью длиннофокусной линзы интенсивность импульсного лазерного излучения, подаваемого на $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ кристалл, регулировалась в интервале $(0,1 - 1,0) \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$. Мощный (1,5 Вт) полупроводниковый лазер накачки $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ кристалла имеет прецизионный термоблок, который обеспечивает перестройку и стабильность линии излучения в диапазоне 448-458 нм. Накачка $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ среды на длине волны 448-458 нм обеспечивает электронные переходы в ионах Er^{3+} на высокоэнергетический уровень $^4F_{5/2}$ (рис. 1). Спектры оптического поглощения кристалла $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ измерены на спектрофотометре Specord M40.

Наблюдение и регистрация спектров лазерного излучения производилось системой, в составе которой двойной решеточный монохроматор МДР-23, фотоэлектронные умножители ФЭУ-106 и ФЭУ-83, микропроцессорная система управления и обработки

данных. Излучение в ИК диапазоне регистрировалось болометром БП-2 с набором калиброванных германиевых и кремниевых инфракрасных фильтров.

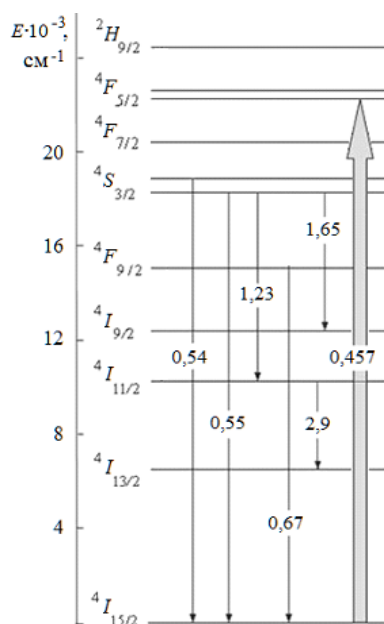


Рис.1. Схема полупроводниковой лазерной накачки кристаллов Er:BaY₂F₈ и вынужденных излучательных электронных переходов ионов Er³⁺. Цифры на стрелках в μm

Анализ оптического спектра поглощения Er:BaY₂F₈ кристалла в области 450-460 нм (Рис.2, кр.2) показывает, что максимум ⁴F_{5/2} линии поглощения соответствует длине волны 456 нм. Поэтому при накачке полупроводниковым лазером 457 нм с (Δλ=1 нм) нм рабочая точка находится на скате линии поглощения Er³⁺ рабочих ионов. В эксперименте обнаружено, что даже незначительном нагревании двойной гетероструктуры диода, происходит смещение рабочей точки в длинноволновую область (рис.3), эффективность накачки падает и интенсивность ИК и видимого излучения Er:BaY₂F₈ лазера уменьшается. Этот механизм определяет 10%-нестабильность теплового и видимого излучения Er:BaY₂F₈ лазера представленного в работе [5]. Кроме того, результаты данного эксперимента указывают

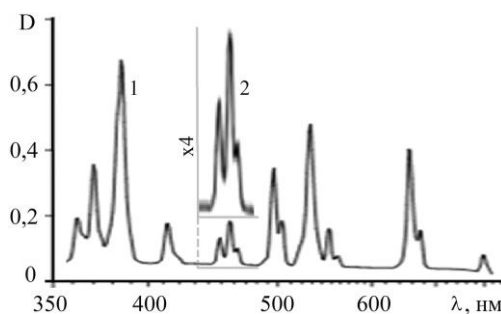


Рис.2. Спектр оптического поглощения кристалла Er:BaY₂F₈ (d = 1 мм) при 300К

на возможность температурной подстройки линии излучения полупроводникового лазера накачки точно в линию поглощения ⁴F_{5/2} активной Er:BaY₂F₈-кристаллической среды визуализированного ИК лазера (рис.2-3). Для достижения такого режима работы полупроводникового лазера накачки необходим термоблок с регулируемой и последующей прецизионной стабилизацией температуры на лазерном диоде.

В соответствии данными эксперимента (рис.2-3) разработан термоблок с регулировкой и последующей прецизионной стабилизацией температуры. Конструктивно мощный лазерный диод накачки закреплен на полупроводниковом элементе Пельтье. Противоположная сторона элемента Пельтье соединена с радиатором охлаждения. На корпус лазерного диода накачки закреплен полупроводниковый миниатюрный терморезистор.

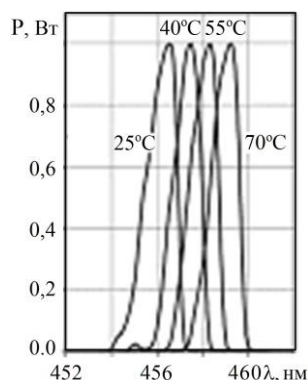


Рис.3. Температурная зависимость спектра излучения мощного лазерного диода

На радиаторе охлаждения крепятся электронные платы термоблока и блока лазерного диода накачки. Данная система полупроводниковой лазерной накачки входит в единую конструкцию визуализированного ИК лазера, оптическая схема которого описана выше.

Электроника прецизионного термоблока лазера накачки

Электронная схема прецизионного термоблока лазера накачки представлена на рис.4, общий алгоритм которой заключается в следующей последовательности. При включении блока, в соответствии с программой микропроцессора (STM8S003F3P6) через нормально замкнутые контакты реле элемент Пельтье включается в обратной полярности и нагревает лазерный диод до заданной, согласно программе, рабочей температуры с точностью 0,1 °С. Блок лазерного диода, согласно программе своего микропроцессора, включается синхронно с термоблоком. При превышении температуры, работающего лазерного диода, более 0,1 °С от рабочей температуры по команде микропроцессора срабатывает реле и на элемент Пельтье подается прямое напряжение на охлаждение лазерного диода. Таким образом, обеспечивается стабилизация заданной температуры на лазерном диоде накачки.

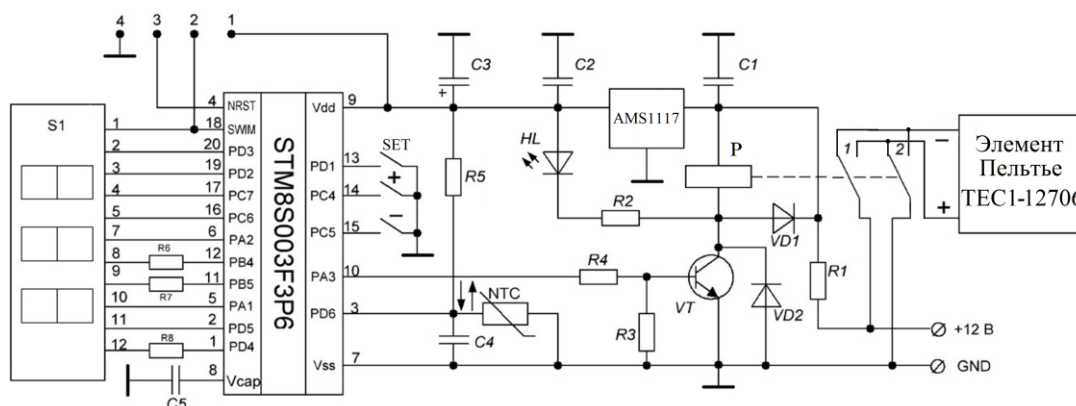


Рис.4. Принципиальная схема термоперестройки спектра излучения мощного лазерного диода

Для установки рабочей температуры используются служебные кнопки (set, +, -) и цифровой сегментный индикатор. Элемент Пельтье имеет рабочий ток 1 А и обеспечивает малую инерционность (< 0,2 с) стабилизации температуры лазерного диода накачки.

Внедрение прецизионного термоблока лазера накачки в опто-электронную конструкцию визуализированного ИК лазера позволило кардинально снизить нестабильность ИК и видимого излучения до величины < 0,25 %. Согласно данным спектроскопических и энергетических исследования длина волны полупроводникового диода накачки, на которой обеспечивается наибольшая эффективность и стабильность работы визуализированного ИК лазера, соответствует 456,7 нм при температурной рабочей точке 55,4°С. Причем для лазерных диодов из одной партии длина волны излучения 456,7 нм для каждого изделия имеет свое значение в интервале 53-57°С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барышников В.И., Криворотова В.В., Болондзь А.В. Генерация и нелинейное самопреобразование частот линий лазерного излучения в кристаллах $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ при плотной электронной и ИК диодной накачке // Известия вузов. Физика. 2013. Т.54. № 2/2. С.51–57.
2. Барышников В.И., Веснина С.Н., Шестаков А.А. Эффективность генерации и самосложения частот линий лазерного излучения при диодной накачке кристаллов $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ // Известия РАН. Серия Физическая. 2017. Т.81. №9. С.1238–1242.
3. Барышников В.И., Криворотова В.В. Тестирование болометров с помощью визуализированного инфракрасного лазерного комплекса // Автоматика Связь Информатика (АСИ). 2018, №10, С. 18-20.
4. Кравцов Ю.А. и др. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики: Учебник для вузов // 1996. М.: Транспорт. 400 с.
5. Барышников В.И., Никонович О.Л., Шестаков А.А. Генерация и нелинейное самосложение частот лазерного излучения при высокоэнергетической диодной накачке $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ кристаллов // Известия вузов. Физика. 2018, Т.61, №7, С. 79-82.

REFERENCES

1. Baryshnikov V.I., Krivorotova V.V., Bolondz A.V. Generatsiya i nelineynoye samopreobrazovaniye chastot liniy lazernogo izlucheniya v kristallakh $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ pri plotnoy elektronnoy i IK diodnoy nakachke [Generation and nonlinear self-conversion of frequencies of laser radiation lines in $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ crystals under dense electron and IR diode pumping]. *Izvestiya vuzov. Fizika* [University Bulletin. Physics], 2013, No. 2/2(54), pp. 51–57.
2. Baryshnikov V.I., Vesnina S.N., Shestakov A.A. Effektivnost' generatsii i samoslozheniya chastot liniy lazernogo izlucheniya pri diodnoy nakachke kristallov $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ [Efficiency of generation and self-addition of frequencies of laser radiation lines during diode pumping of $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ crystals]. *Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Series Physical], 2017, No. 9(81), pp. 1238-1242.
3. Baryshnikov V.I., Krivorotova V.V. Testirovaniye bolometrov s pomoshch'yu vizualizirovannogo infrakrasnogo lazernogo kompleksa [Testing bolometers using a visualized infrared laser complex]. *Avtomatika Svyaz' Informatika (ASI)* [Automation Communication Informatics (ASI)]. 2018, No. 10, pp. 18-20.
4. Kravtsov Yu.A., Nesterov, G.F. Lekuta G.F., Kokurin I.M. Sistemy zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: Uchebnik dlya vuzov [Systems of railway automation and telemechanics: Textbook for universities], 1996, M.: Transport. 400 p.
5. Baryshnikov V.I., Nikonovich O.L., Shestakov A.A. Generatsiya i nelineynoye samoslozheniye lazernykh chastot pri vysokoenergeticheskoy diodnoy nakachke kristallov $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ [Generation and nonlinear self-addition of laser frequencies during high-energy diode pumping of $\text{Er:BaY}_2\text{F}_8$ crystals]. *Izvestiya vuzov. Fizika* [News of universities. Physics], 2018, No. 7(61), pp. 79-82.

Информация об авторах

Барышников Валентин Иванович – д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: vibh@rambler.ru

Штубер Антон Андреевич – студент магистратуры, кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ahtoh101@yandex.ru

Authors

Valentin Ivanovich Baryshnikov – Doctor of Physics and Mathematics. Professor, the Subdepartment of Physics, Mechanics, and Instrument Engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: vibh@rambler.ru

Anton Andreevich Shtuber – graduate student, the Subdepartment of Physics, Mechanics and Instrument Engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: ahtoh101@yandex.ru