

В. И. Барышников¹, Ю. А. Суханова¹

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ИМПУЛЬСНЫЙ ФОТОПРИЕМНЫЙ РЕЖИМ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ МИКРОСЛОЯ Ce:YAG С ДВОЙНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРОЙ

Аннотация. Исследованы режимы работы, быстродействие и энергетические характеристики синих, желтых и белых светодиодов. Анализ данных спектроскопических и кинетических исследований показал, что при импульсном синем лазерном облучении светодиода, излучающего желтый или белый свет, генерируют наносекундные электрические импульсы длительностью до 50 нс. Установлено, что энергии фотонов излучения синего лазера, частично проникающего в белый и желтый светодиодах сквозь Ce:YAG микрокристаллический слой, достаточно для генерации электронно-дырочных пар на высокоэнергетическом межзонном переходе двойной InGaN гетероструктуры. Используя синее лазерное излучение с частотой импульсов до 10 МГц, появляется возможность с большого расстояния фиксировать факт попадания лазерного луча на светодиоды по яркому свечению их Ce:YAG микрокристаллических структур и тем самым поддерживать в них стабильную генерацию электрических импульсов при передаче информации и программировании светодиодных матриц информационных табло, светофоров и экранов.

Ключевые слова: InGaN гетероструктуры, светодиоды, Ce:YAG кристаллы, светодиодные матрицы, полупроводниковые лазеры.

V. I. Baryshnikov¹, J. A. Suhanova¹

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

PULSE PHOTODETECTOR ON BASED LED WITH A Ce: YAG MICROLAYER ON DOUBLE HETEROSTRUCTURE

Abstract. The regimes of operation, speed and energy characteristics of blue, yellow and white LEDs are investigated. Analysis of the data of spectroscopic and kinetic studies showed that at pulse blue laser irradiation LEDs, emitting yellow or white light, are generate electrical pulses at duration of to 50 ns.. It is found that the energy of photons of blue laser radiation, partially penetrating in white and yellow LEDs through the Ce:YAG microcrystalline layer, is sufficient for the generation of electron-hole pairs on the high-energy interband transition of the double InGaN heterostructure. When using blue pulsed laser radiation with a frequency of up to 10 MHz, it becomes possible from a long distance to register the fact of a laser beam hitting to the LEDs by the bright luminescence of their Ce:YAG microcrystalline structures and thereby support stable generation of electrical pulses in them when transmitting information and programming LED matrices information boards, traffic lights and screens.

Keywords: visualized infrared laser, semiconductor laser diode, laser Er:BaY₂F₈ crystal, thermal stabilization of laser diodes, Peltier element.

Введение

С развитием полупроводниковых технологий в разработке эффективных светодиодов на основе двойных гетероструктур появилось новое направление в квантовой электронной технике – это создание и развитие матричных систем визуального представления и анализа информации [1-2]. В рамках данного направления необходимость разработки импульсных светодиодов в видимом спектральном диапазоне 400—700 нм обусловила интенсивные исследования кристаллических материалов с высокой концентрацией рабочих примесных ионов, излучающих в различных областях видимого спектрального диапазона [2-4]. При оптическом возбуждении синим светом кристаллов иттрий алюминиевого граната с трехвалентной примесью церия Ce³⁺:Y₃Al₅O₁₂ (Ce:YAG), наблюдается широкий спектр, содержащий зеленую и красную полосы излучения [5]. На глаз это желтое свечение. Именно такой микрокристаллический слой добавлен на выходе двойной гетероструктуры синего светодиода, который излучает белый свет. В этих светодиодах концентрация примеси Ce³⁺ в Ce:YAG оптимизирована так, что часть возбуждающего синего света не поглощается

микроструктурой и на выходе, смешиваясь с желтым светом, образует белое излучение. Если на выход двойной гетероструктуры синего светодиода нанести микрослой Ce:YAG с высокой концентрацией примеси Ce^{3+} , в котором синий свет практически поглощается полностью, то в этом случае на выходе микроструктуры Ce:YAG наблюдается лишь желтое излучение. Указанные особенности люминесцирующих светодиодов имеют важную практическую значимость, поскольку очевидна возможность вызывать интенсивное их излучение внешним синим источником света.

В настоящее время созданы мощные малогабаритные эффективные полупроводниковые лазеры, как и светодиоды, на основе двойных гетероструктур, излучающие в синей области спектра [6-7]. Таким образом, появляется возможность вызывать возбуждение яркого свечения люминесцентных светодиодов, слабо расходящимся синим лазерным лучом на значительном расстоянии.

Кроме того, известно [8], что гомогенные светодиоды при подсветке оптическим излучением с энергией фотонов равной или превышающей энергию запрещенной зоны генерируют разность потенциалов, то есть работают, как фотодиод. Отсюда очевидно, что светодиоды излучающие белый свет, способны работать в фотодиодном режиме, так как Ce:YAG микрослой лишь частично поглощает излучение в синей области оптического спектра, как со стороны двойной гетероструктуры, так и с внешней стороны. Вместе с тем, в желтых гетероструктурных светодиодах Ce:YAG микрослой практически полностью поглощает синее излучение, как со стороны двойной гетероструктуры, так и с внешней стороны. Поэтому представляет интерес возможность желтого светодиода работать в режиме детектирования синего лазерного излучения с учетом того, что энергия фотонов желтого света уступает энергии высокоэнергетической зоны гетероструктуры. Дополнительно особый интерес вызывает быстрое действие желтых, и белых гетероструктурных светодиодов в режиме излучения и фотодиодном режиме, поскольку они обладают значительно большей емкостью переходов по сравнению с импульсными фотодиодами.

Таким образом, настоящая работа посвящена исследованию режимов работы, быстрого действия и новых возможностей использования синих, желтых и белых светодиодов матричных систем визуального представления и анализа информации.

Объекты, методы и техника эксперимента

Для решения указанной задачи разработан испытательный стенд для исследования энергетических и кинетических параметров лазеров и светодиодов на основе двойной гетероструктуры (рис. 1).

С генератора Г5-72 импульсы поступают на электронный блок и затем на усилитель мощности полупроводникового синего лазера или светодиода на основе двойной гетероструктуры для исследования энергетических и кинетических параметров излучения. Излучение лазера или светодиода поступает на *p-i-n* фотод или светодиод, работающий в режиме фотодиода. Электрический импульсный сигнал *p-i-n* фотода или светодиода в режиме фотодиода через широкополосный усилитель, регистрируется осциллографом Tektronix TDS 3032 В на нагрузке 50 Ом.

Амплитуда импульсного напряжения на лазерном диоде поддерживалась на уровне 4,0 В, а на светодиодах регулировалась в диапазоне 5 – 35 В.

Наблюдение и регистрация спектров излучения Ce:YAG кристаллов и светодиодов производилось спектрометрической системой, в составе которой двойной решеточный монохроматор МДР-23, фотоэлектронный умножитель ФЭУ-106 и микропроцессорная система управления и обработки данных.

Спектры оптического поглощения кристалла Ce:YAG измерены на спектрофотометре Specord M40.

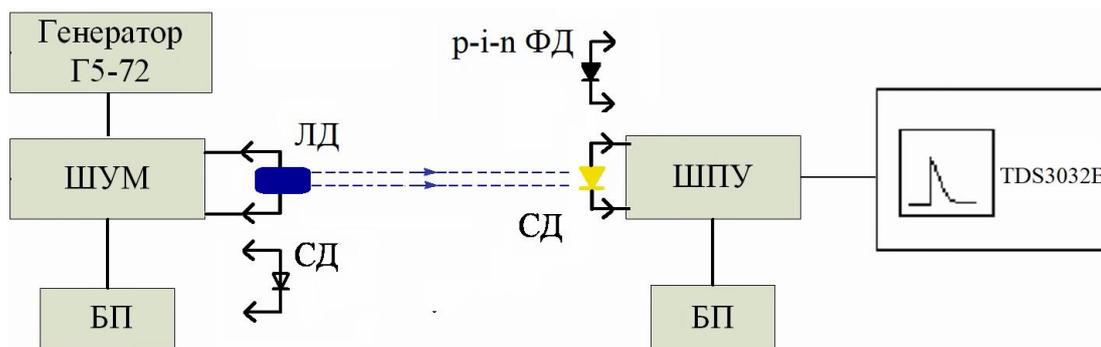


Рис. 1. Блок-схема для исследования энергетических и кинетических параметров лазеров и светодиодов на основе двойной гетероструктуры: ШУМ – широкополосный усилитель мощности, ЛД – лазерный синий диод (450 нм, 1 Вт), СД – светодиод, ШПУ– широкополосный усилитель напряжения, БП– блок питания

Спектрально-кинетические параметры светодиодов в импульсном режиме

В предварительных экспериментах исследовалась большая группа светодиодов мощностью 0,025 – 0,1 Вт. В результате для дальнейших исследований были отобраны синие, желтые и белые светодиоды мощностью 0,1 Вт. С помощью широкополосного (320 – 1100 нм) быстродействующего (1 нс) *p-i-n* фотода (S1722-O1, Hamamatsu) измерены характеристики излучения светодиодов – энергетические (рис. 2), спектральные и временные параметры импульсов (рис. 3). Из данных представленных на рис. 2 видно, что наибольший выход излучения у синего и желтого светодиодов.

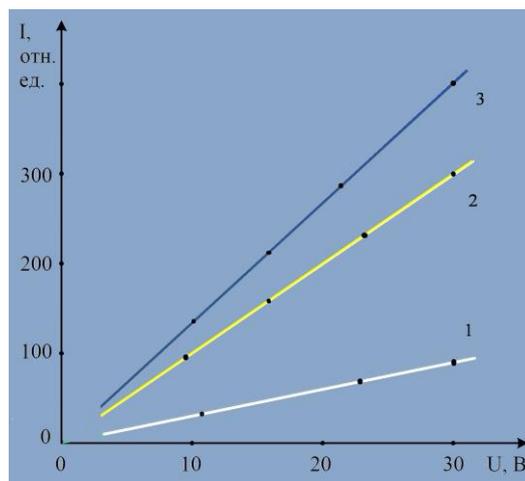


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения светодиодов от импульсного напряжения:
1 - белый, 2 - желтый, 3 - синий

В данных экспериментах (рис. 2) с целью визуализации излучения импульсное напряжение на светодиодах устанавливалось в диапазоне 5 – 35 В, что значительно превышает паспортную предельную величину (3,5 – 4,0 В). Поэтому были проведены исследования по безотказной наработке светодиодов при напряжении 15 В и длительности импульсов 40 нс. Установлено, что при частоте следования импульсов 10,0 МГц синие, желтые и белые светодиоды при температуре окружающей среды 25°C в течение 24 часов не прерывной работы сохраняют амплитудные и временные параметры.

По данным измерений минимальная длительность импульса излучения синего светодиода составила 40 нс, а белого около 50 нс (рис. 3). Более продолжительное затухание излучения у белого светодиода обусловлено тем, что желтая составляющая в спектре излучения связана с люминесценцией Се:YAG микрокристаллического слоя с известным временем затухания 50 нс (рис. 3).

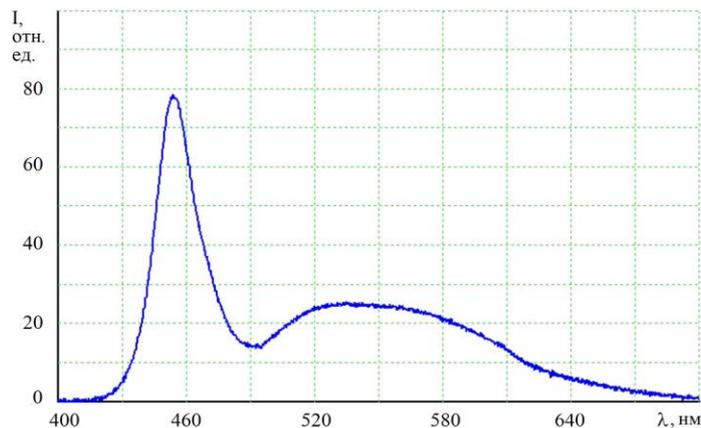
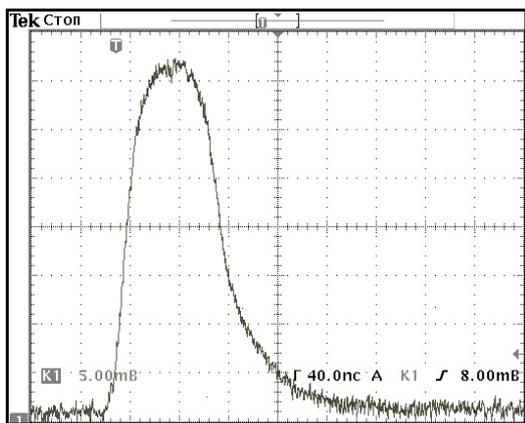


Рис. 3. Осциллограмма и спектр импульсов белого излучения светодиода

Работа светодиодов с двойной гетероструктурой в фотодиодном режиме

Синий полупроводниковый лазер излучает на длине волны 450 нм и, как указанные светодиоды, в качестве активной среды имеет двойную гетероструктуру из нитрида галлия модифицированную индием (InGaN). С учетом, представленных выше, результатов кинетических измерений было решено использовать мощный импульсный лазер (1,0 Вт; 450 нм; 50 нс) с специальным телескопическим объективом для облучения белых и желтых светодиодов с целью исследования их работы в фотодиодном режиме. В этих экспериментах на выходе желтого и синего светодиода, помимо их яркого свечения, генерируются наносекундные электрические импульсы длительностью 50 нс. При подаче зеленых световых импульсов 2ω :YAG:Nd лазера (532 нм; 1,0 Вт/см²; 10 нс) на выходе желтого и синего светодиода электрические импульсы не наблюдаются. Полученные результаты указывают на то, что энергии фотонов излучения синего лазера, частично проникающего в белый и желтый светодиодах сквозь Се:YAG микрокристаллический слой, достаточно для генерации электронно-дырочных пар на высокоэнергетическом межзонном переходе двойной InGaN гетероструктуры. По этому механизму на выходе белых и желтых светодиодов формируются электрические импульсы. Энергии фотонов зеленого и тем более желтого излучения недостаточно для генерации электронно-дырочных пар в двойной InGaN гетероструктуре.

При воздействии синим (450 нм) лазерным лучом диаметром 0,5 см с дистанции 10 м были измерены под углом 90° к оси облучения спектры излучения и осциллограммы импульсного напряжения на выходе белого и желтого светодиода (рис. 4). На глаз интенсивность излучения светодиода при лазерном облучении с указанной дистанции, оказалось выше, чем при подаче на него электрического импульса длительностью 50 нс с максимальным напряжением 35 В.

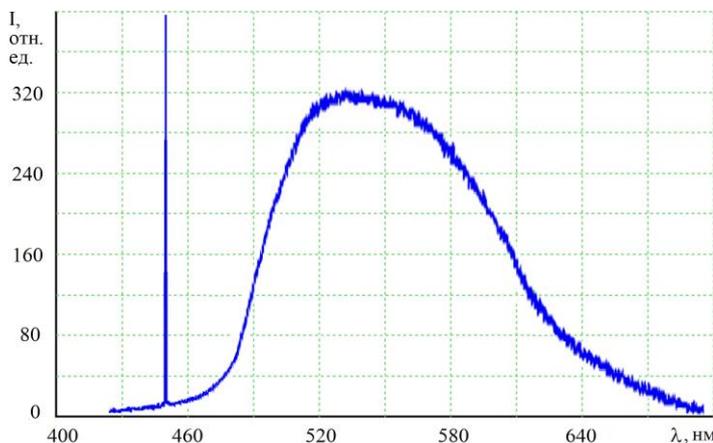
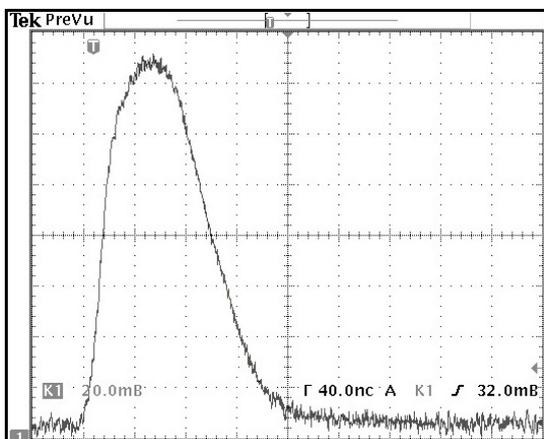


Рис. 4. Осциллограмма и спектр импульсов желтого излучения светодиода

Таким образом, светодиоды на основе двойной гетероструктуры с Се:YAG микрокристаллическим слоем, под действием синего импульсного лазерного излучения генерируют наносекундные электрические импульсы в фотодиодном режиме и при этом обладают интенсивным излучением. Эта уникальная особенность позволяет с большого расстояния фиксировать по свечению Се:YAG микрокристаллической структуры факт попадания лазерного луча, который формирует электрические импульсы на светодиодах, например, в составе матриц. Таким образом, используя синее лазерное излучение с частотой импульсов до 10 МГц, появляется возможность дистанционно с большого расстояния передавать информацию и программировать светодиодные матрицы информационных табло, светофоров и экранов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шуберт Ф. Е. Светодиоды /пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. М.: Физматлит, 2008, 496 с.
2. Олешко В. И., Купчишин А. И., Керимбаев Д. Д., Еремина Н. С., Мокроусов Г. М. Разработка и исследование композитных люминесцирующих материалов для светодиодов белого свечения // Известия вузов. Физика. 2013, Т. 56, № 7/2, С. 93-98.
3. Пат. № 2405804, Рос. Федерация, Полимерная люминесцентная композиция для получения белого света, возбуждаемая синим светодиодом / Лазарева Т. К., Андреева Т. И., Осипчик В. С.
4. Барышников В.И., Болондзь А.В. Особенности радиационного и лазерного возбуждения кристаллов, активированных церием // Известия вузов. Физика. 2011, Т.54, № 2/2, С.53–56.
5. Барышников В.И., Болондзь А.В., Колесникова Т.А., Шипаев И.В. Радиационное возбуждение примесей церия и празеодима в кристаллах $Y_3Al_5O_{12}$. // Известия вузов. Физика. 2013, Т.54, № 2/2, С.47–50.
6. Nakamura S., Senoh M., Nagahama S., Iwasa N., Yamada T., Matsushita T., Sugimoto Y., Kiyoku H. Room-temperature continuous-wave operation of InGaN multi-quantum-well-structure laser diodes with a long lifetime // Appl. Phys. Lett., 1997, No 70, P.868.
7. Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Сахаров А.В. и др. Варизонная активная область на основе короткопериодных InGaN/GaN-сверхрешеток для мощных светоизлучающих диодов диапазона 440 –470 нм. // ФТП. 2010, Т.44, вып.1, С. 96–100.
8. Кавыев А. А. Светодиод-фотодатчик // Радио. 2007, № 6, С. 42–43.

REFERENCES

1. Schubert F. E. Svetodiody [LEDs] 2008 M.: Fizmatlit, 496 p.
2. Oleshko VI, Kupchishin AI, Kerimbaev DD, Eremina NS, Mokrousov GM. Razrabotka i issledovaniye kompozitnykh lyuminestsiruyushchikh materialov dlya svetodiodov belogo svecheniya [Development and research of composite luminescent materials for white LEDs]. *Izvestiya vuzov. Fizika [Izvestiya vuzov. Physics]*, 2013, No. 7/2(56), pp. 93–98.
3. Patent, No. 2405804, Rus. Federation, Polymer luminescent composition for producing white light, excited by a blue LED / Lazareva T.K., Andreeva T.I., Osipchik V.S.
4. Baryshnikov V.I., Bolondz A.V. Osobennosti radiatsionnogo i lazernogo vzbuzhdeniya kristallov, aktivirovannykh tseriyem [Features of radiation and laser excitation of crystals activated by cerium]. *Izvestiya vuzov. Fizika [Izvestiya vuzov. Physics]*, 2011, No. 2/2(54), pp.53–56.
5. Baryshnikov V.I., Bolondz A.V., Kolesnikova T.A., Shipaev I.V. Radiatsionnoye vzbuzhdeniye primesey tseriya i prazeodima v kristallakh $Y_3Al_5O_{12}$ [Radiation excitation of cerium and praseodymium impurities in $Y_3Al_5O_{12}$ crystals]. *Izvestiya vuzov. Fizika [Izvestiya vuzov. Physics]*, 2013, No. 2/2(54), pp. 47–50.
6. Nakamura S., Senoh M., Nagahama S., Iwasa N., Yamada T., Matsushita T., Sugimoto Y., Kiyoku H. Rabota v nepreryvnom rezhime pri komnatnoy temperature lazernykh diodov InGaN s mnogokvantovoy strukturoy i dlitel'nym srokom sluzhby [Room-temperature continuous-wave operation

of InGaN multi-quantum-well-structure laser diodes with a long lifetime]. *Pis'ma po prikladnoy fizike* [*Applied Physics Letters*], 1997, No. 70, 868 p.

7. Tsatsulnikov A.F., Lundin V.V., Sakharov A.V. et al. Varizonnaya aktivnaya oblast' na osnove korotkoperiodnykh InGaN/GaN-sverkhreshetok dlya moshchnykh svetoizluchayushchikh diodov diapazona 440–470 nm [Varizon active region based on short-period InGaN / GaN superlattices for high-power light-emitting diodes in the 440–470 nm range]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov (FTP)* [*Semiconductor physics and technology*]. 2010, No. 1(44), pp. 96–100.

8. Kavyev A.A., Svetodiod-fotodatchik [LED-photosensor]. *Radio*. 2007, No. 6, pp. 42–43.

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

Суханова Юлиана Андреевна – аспирант кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: suhanova_ua@mail.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

Juliana Andreevna Sukhanova – postgraduate student, the Subdepartment of Physics, Mechanics and Instrument Engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: suhanova_ua@mail.ru

Для цитирования

Барышников В.И., Суханова Ю.А. Импульсный фотоприемный режим светодиодов на основе микрослоя Се:YAG с двойной гетероструктурой [Электронный ресурс] / В.И. Барышников, Ю.А. Суханова // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2020. — №4(10). — Режим доступа: <http://mnv.irkups.ru/toma/11-2020>, свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус., англ. (дата обращения: 22.11.2020).

For citation

Baryshnikov V.I., Sukhanova J.A. Pulse photodetector on based led with a Ce: YAG microlayer on double heterostructure. *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2020, no. 4(10). [Accessed 22/11/20].