

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛАЗЕРНОГО МОНОКРИСТАЛЛА $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ

С. М. Томилов, М. К. Тарабрин, В. А. Лазарев, Д. А. Шелестов

НОЦ «Фотоника и ИК-Техника» МГТУ им. Н. Э. Баумана

Существует широкий круг научных и научно-технических задач, для решения которых перспективно применение твердотельных лазеров среднего ИК-диапазона. В среднем ИК-диапазоне находится максимум поглощения жидкой воды, а так же сосредоточено большое количество линий поглощения различных веществ, что делает вышеописанные лазеры применимыми для спектроскопии и медицины. В настоящее время проводятся исследования различных материалов для использования в качестве активных сред таких лазеров. Кристаллы халькогенидов A_2B_6 , легированные ионами переходных металлов, показывают свою перспективность для генерации излучения на длинах волн $\lambda = 2\text{--}5$ мкм [1, 2, 3, 4, 5].

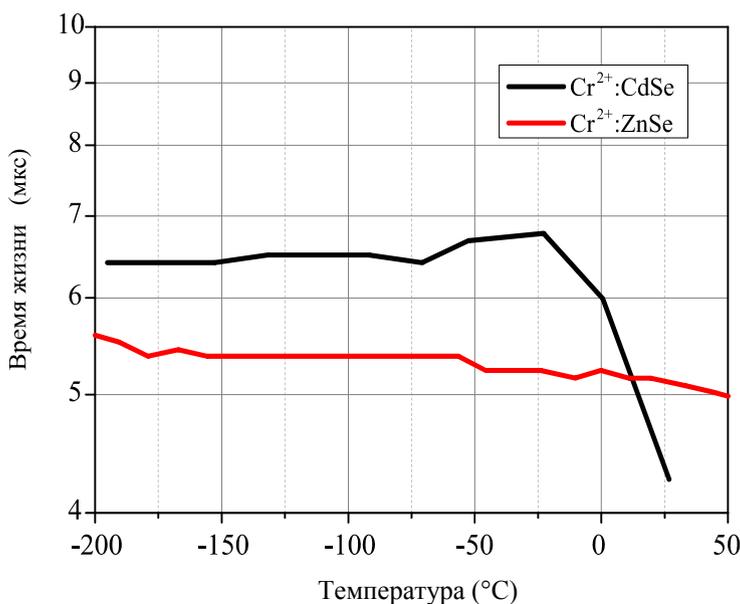


Рис. 1. Время жизни электронов на ВРУ перспективных активных сред для лазеров среднего ИК-диапазона

На рис. 1 представлена зависимость времени жизни электронов на верхнем рабочем уровне для двух сред $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ и $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ в зависимости от температуры. Повышение времени жизни электрона на ВРУ позволяет снизить порог генерации лазера и повысить КПД. Как видно из графика для кристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$, для эффективной работы лазера целесообразно охлаждать активную среду как минимум до 15 °C. Наиболее простым решением является применение водяного охлаждения, однако данный метод обладает несколькими существенными недостатками:

1. Невозможность достижения температур ниже точки заморзания воды;
2. Стабильность контура охлаждения по температуре ограничивается колебаниями температуры воды, охлаждаемой чиллером.

Устранение первого недостатка играет ключевую роль для повышения КПД и снижения порога генерации, а увеличение стабильности температуры воды приводит к уменьшению влияния тепловых эффектов на параметры лазерного излучения.

Лабораторный чиллер способен поддерживать заданную температуру в пределах указанного в паспорте диапазона с точностью $\pm 0,5$ °C. Согласно масштабированному графику времени жизни электронов на ВРУ кристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$, представленному на рис. 2, изменение температуры воды на 1 градус приведет к значительному изменению времени жизни приблизительно на 0,13 мс или на 2,5 %, что говорит о необходимости стабилизации температуры воды для уменьшения нестабильности времени жизни.

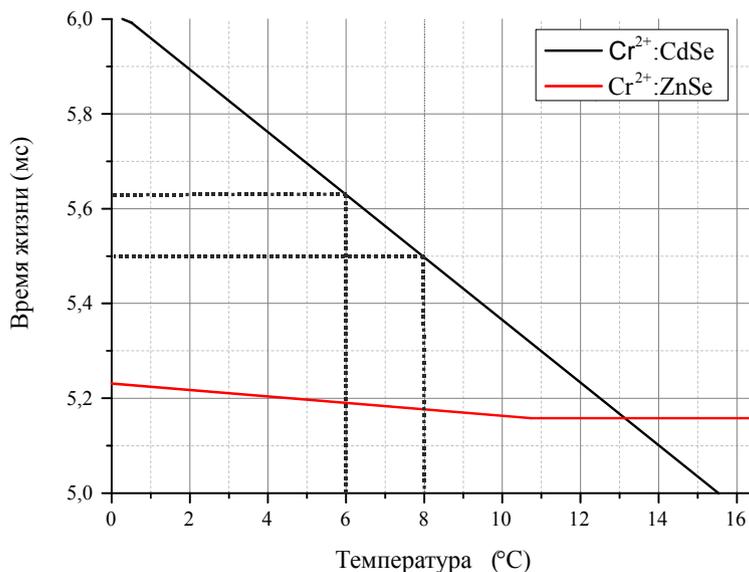


Рис. 2. Масштабированный график времени жизни электронов на ВРУ перспективных активных сред для лазеров среднего ИК-диапазона

На основе рассмотренных в данной работе реализаций систем охлаждения для активных сред твердотельных лазерных систем была определена наиболее подходящая для использования в конкретной реализации лазера конструкция. Для применения $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ лазера в спектроскопии, медицине и биологии целесообразно добиваться высоких значений выходной оптической мощности. Это достигается за счет увеличения мощности и эффективности накачки. Двухзеркальный полусферический резонатор позволяет добиться максимальной выходной мощности для заданной активной среды благодаря малому числу оптических элементов, которые вносят потери.

На рис. 3 представлен полусферический резонатор лазера на кристалле $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ с оптической накачкой.

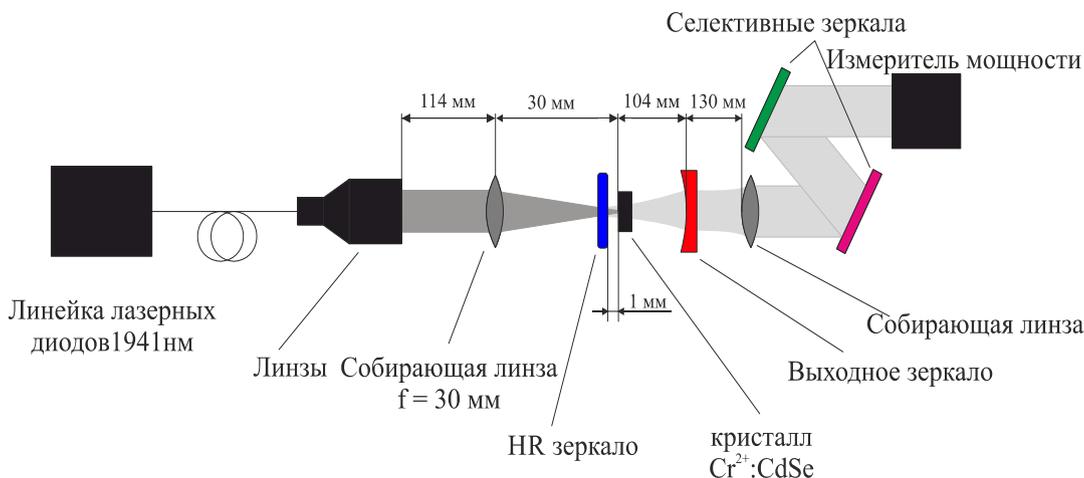


Рис. 3. Схема двухзеркального $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ лазера

Накачка осуществляется за счёт фокусировки мощного (до 10 Вт) лазерного пучка в кристалле. Поскольку кристалл и система его охлаждения находятся внутри резонатора, обладающего ограниченным объемом и жесткими допусками на разъюстировку, целесообразно максимально уменьшить габариты теплоотвода вдоль оптической оси, если это не повлияет на его эффективность.

Наиболее простой теплоотвод для твердотельного лазера представляет собой охлаждаемый водой параллелепипед из материала с высокой теплопроводностью (например, медь), на котором прижимом крепится кристалл.

Основными недостатками прижимного теплоотвода можно считать неравномерный теплообмен между металлическими частями и активной средой. Данный теплоотвод, как и любая из представленных конструкций, обладает недостатками, свойственными любой реализации системы водяного охлаждения – их характеристики ограничены параметрами используемых чиллеров, а значит, при использовании системы водяного охлаждения невозможно достичь температуры ниже точки замерзания воды. Кроме того погрешность работы чиллера будет сказываться на температуре активной среды.

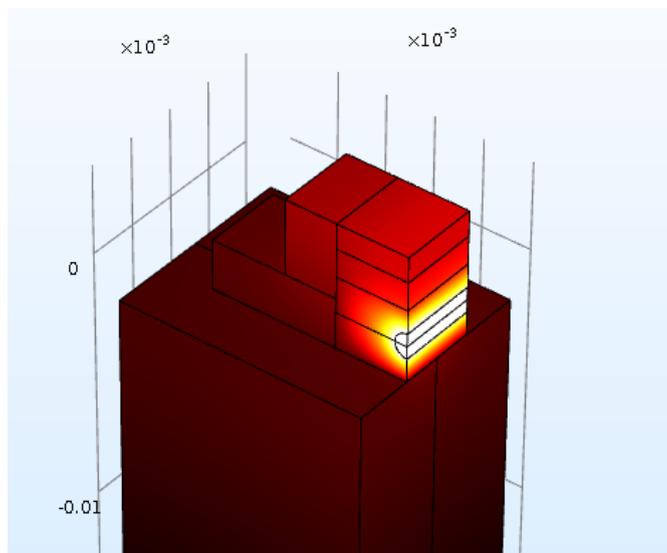


Рис. 4. Результаты моделирования температурного распределения в кристалле $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ и прижимном теплоотводе

Можно утверждать, что повышение теплоёмкости материала теплоотвода приведет к уменьшению амплитуды колебаний системы (она будет выступать в качестве интегратора тепловых колебаний чиллера). Однако увеличение теплоёмкости металлического теплоотвода напрямую сопряжено с увеличением его массы и объема, что нежелательно с точки зрения габаритов конструкции. Также увеличение теплоотвода приведёт к ухудшению его термодинамических характеристик – возрастёт приток тепла от внешней среды и уменьшится быстродействие системы. Таким образом, для создания системы охлаждения и термостабилизации наиболее целесообразно применение дополнительного источника тепловой энергии, такого как элемент Пельтье.

В основе работы элементов Пельтье (далее ЭП) лежит контакт двух полупроводниковых материалов с разными уровнями энергии электронов зоне проводимости. При протекании тока через контакт таких материалов, электрон должен приобрести энергию, чтобы перейти в более высокоэнергетическую зону проводимости другого полупроводника. При поглощении этой энергии происходит охлаждение места контакта полупроводников. При протекании тока в обратном направлении происходит нагревание места контакта полупроводников, дополнительно к обычному тепловому эффекту.

Рассмотрим применимость данного устройства для нашей системы. Если одну из сторон работающего ЭП охлаждать с помощью чиллера, можно достичь на второй стороне отрицательных

относительно воды температур, что позволит расширить диапазон системы охлаждения. Так же, регулируя величину протекающего через ЭП тока, можно компенсировать температурные нестабильности системы. Соответственно, если разделить активную среду и теплоотвод посредством ЭП, можно добиться значительно большей производительности системы охлаждения. Элемент Пельтье может использоваться в качестве гораздо менее инерционного и более точного охладителя активной среды твердотельного лазера, чем охлаждаемая чиллером вода, что позволяет свести роль водяного охлаждения к обеспечению эффективного отвода тепла от ЭП. Благодаря тому, что мы можем управлять потоком тепла через ЭП, компенсируя погрешности, вносимые чиллером, данная система теоретически должна быть лишена недостатков обычных, охлаждаемых водой теплоотводов.

Для создания системы динамической термостабилизации на основе элемента Пельтье было разработано устройство, способное в автоматическом режиме управлять током, протекающим через ЭП. Стабилизация температуры в такой системе осуществляется за счёт контура обратной связи, включающего в себя термодатчики, контроллер, усилитель мощности и ЭП. Зная сигнал ошибки $e(t)$ – расхождение между реальной температурой активной среды и желаемой, а также определив динамику изменения этого сигнала, можно в автоматическом режиме корректировать ток, текущий через ЭП, для минимизации ошибки.

Для достижения точности переходных процессов в системах управления с обратной связью применяется *PID*-алгоритм, преобразующий сигнал ошибки $e(t)$ в соответствии с коэффициентами в исполнительный сигнал $U(t)$, пропорционально которому далее формируется сигнал широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для драйвера Пельтье.

$$U(t) = P + I + D = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt},$$

где P , I , D – пропорциональная, интегральная, дифференциальная составляющие сигнала, K_P , K_I , K_D – соответствующие коэффициенты.

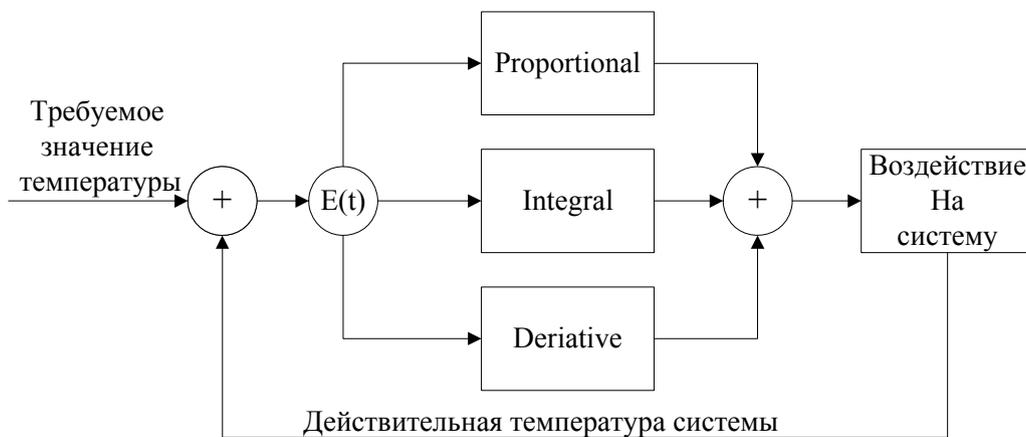


Рис. 5. Схема, поясняющая работу *PID*-алгоритма

Подбор значений коэффициентов выполняется непосредственно в процессе отладки работающей системы на основе её динамики.

Для реализации данного алгоритма была выбрана платформа ArduinoNano. Основным преимуществом платформ Arduino является простота программирования, связанная с модульностью кода и наличием в открытом доступе большого количества пользовательских библиотек, применимых для решения широкого спектра задач. По этой причине использование Arduino является оптимальным решением для задач, не требующих высокого быстродействия и разрешения по времени.

Снимаемая с основного термодатчика температура вычитается из требуемого (заданного пользователем) значения, формируя сигнал ошибки. Данный сигнал служит входным параметром для работы *PID*-алгоритма, который, по завершению вычислений, назначает новое значение выхода. Величина тока через элемент Пельтье регулируется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) – изменения скважности импульсов, выдаваемых микроконтроллером на управляющий вход драйвера. Вычисление нового значения ШИМ в *PID*-алгоритме происходит в зависимости от значения соответствующих коэффициентов *PID*, которые задаются в процессе отладки при связи контроллера и компьютером по последовательному интерфейсу. Текущее и заданное значение температуры выводятся на экран устройства, заданное значение меняется путем нажатия кнопок на передней панели.

Для определения динамических характеристик работающей системы был проведен ряд экспериментов. В первом случае в кристалле $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$, закреплённый в прижимном теплоотводе, фокусировалось излучение волоконного лазера мощностью в 6 Вт. Температура воды, охлаждаемой чиллером, сначала выставлялась на плюс 20 °С, затем на плюс 10 °С. В обоих случаях, система термостабилизации должна была поддерживать температуру на 5 °С ниже, чем температура воды. Показания температурных датчиков записывались в течение нескольких минут, после чего строились графики переходных процессов в системе. Затем мощность волоконного лазера повышалась до 10 Вт, после чего эксперимент повторялся.

На рис. 6 представлены результаты четырёх экспериментов. Как видно из графиков, длительность переходных процессов заметно увеличивается с понижением температуры, что говорит о повышении влияния температуры окружающей среды на систему охлаждения. В случае облучения кристалла лазерным пучком мощностью в 10 Вт, система не может достичь температуры меньшей, чем плюс 6 °С вследствие ограниченной мощности элемента Пельтье.

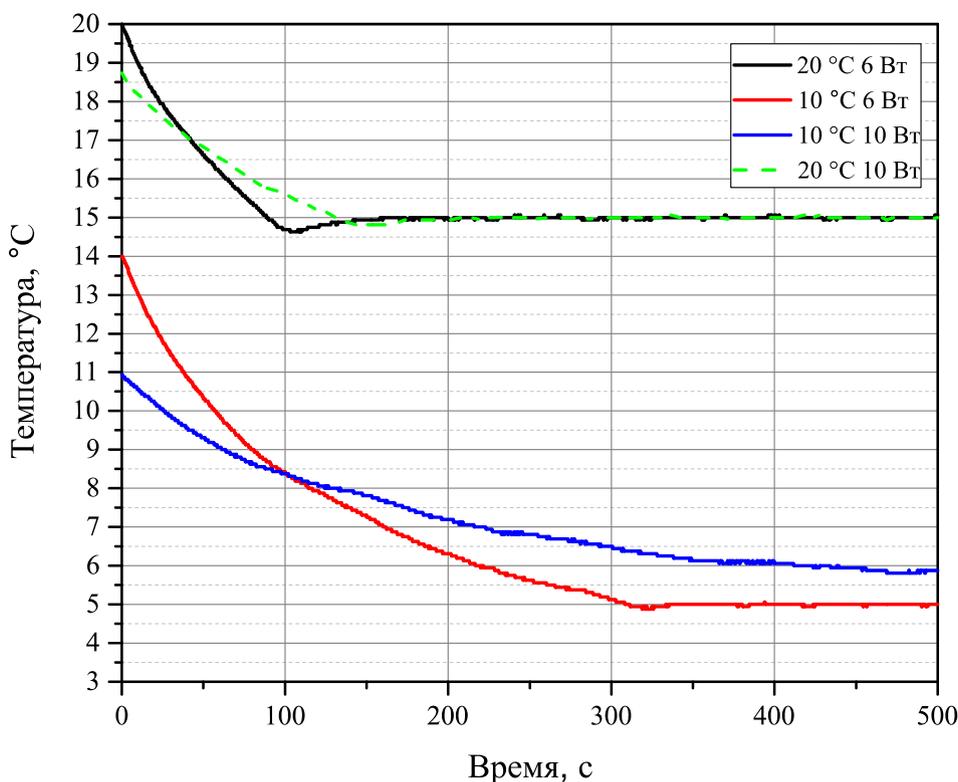


Рис. 6. График переходных процессов системы динамической термостабилизации

Если системе хватает мощности для обеспечения заданной температуры, ее погрешность составляет в среднем $\pm 0,06$ °С, что обусловлено 12-битным разрешением используемого температурного датчика.

В ходе работы была разработана система охлаждения и динамической термостабилизации активной среды твердотельного лазера на основе водяного охлаждения и применения термоэлектрического элемента Пельтье. Точность работы системы по температуре ограничивается погрешностью температурного датчика, и составляет $\pm 0,06$ °С. Также данная система позволяет производить отстройку рабочей температуры приблизительно на 10 °С. Система охлаждения имеет модульное строение и может быть масштабирована для увеличения числа элементов Пельтье, или для замены отдельных компонентов на другие, с лучшими характеристиками. Дальнейшая модернизация системы предполагает увеличение мощности используемых элементов Пельтье, использование термодатчиков на основе измерительного моста с термопарой, позволяющих достичь разрешения по температуре до 0,01 °С.

Список литературы

1. Sorokina IT 2004 Opt. Mater.26 395–412
2. Akimov V A, Frolov M P, Korostelin Y V, Kozlovsky V I, Landman A I, Podmar'kov Y P and Voronov A A 2006 Phys. Status Solidi c 3 1213–6
3. Kasiyan V, Shneck R, Dashevsky Z and Rotman S 2002 Phys.Status Solidi b 229 395–8
4. Kasiyan V, Dashevsky Z, Shneck R and Rotman S 2003 Proc.SPIE 5123 79–84
5. Lazarev V. A. *et al.* // 2015 LaserPhys. Lett. 12. 125003.