

09

## Электронное управление спектром $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера

© Н.Г. Захаров, В.И. Лазаренко, Е.В. Салтыков, А.С. Сафронов

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия  
E-mail: dikaion@yandex.ru

Поступило в Редакцию 28 октября 2024 г.

В окончательной редакции 7 ноября 2024 г.

Принято к публикации 7 ноября 2024 г.

Реализованы акустооптический и электрооптический методы электронного управления спектром  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера для оптического мониторинга взрывоопасных и токсичных аэрозолей. Для акустооптического метода частота переключения между двумя линиями спектра была ограничена частотой следования импульсов излучения накачки и составляла 76 kHz, спектральная ширина линий генерации не превышала  $\sim 2$  nm. Для электрооптического метода частота переключения была ограничена временем релаксации ячеек Поккельса и составляла 38 kHz, спектральная ширина линий генерации не превышала 0.5 nm. Оптический КПД генерации в спектральной области  $\sim 3.3$   $\mu\text{m}$  достигал 4% для акустооптического и 4.5% для электрооптического метода.

**Ключевые слова:** лазерный мониторинг аэрозолей, электронное управление спектром,  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазер.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.05.59905.20172

Лазерное детектирование взрывоопасных и токсичных аэрозолей предполагает измерение ослабления в контролируемом объеме двух близкорасположенных спектральных линий, что позволяет учесть неселективные потери, обусловленные турбулентностью и запыленностью воздушной среды, вариациями коэффициента рассеяния подстилающей поверхности и т.п. Поскольку одновременная генерация двух дискретных длин волн одним твердотельным лазерным источником, как правило, трудно реализуема, а использование нескольких источников практически нецелесообразно, наиболее эффективным решением служит попеременная генерация одним источником нескольких спектральных линий. При этом частота переключений должна быть достаточно большой, чтобы оптические свойства трассы оставались неизменными в интервале между двумя измерениями.

Для  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера был реализован метод акустооптического управления спектром, заключающийся в размещении в резонаторе лазера акустооптического фильтра на основе парателлурита [1]. Указанный метод позволил перестраивать излучение лазера в спектральном диапазоне от 2.17 до 2.71  $\mu\text{m}$  с частотой переключения длины волны излучения 10 Hz. Ширина линий излучения составляла от 50 до 100 GHz, т.е. от 1 до 2 nm, для длины волны  $\sim 2.5$   $\mu\text{m}$ .

Также для  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ - и  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ -лазеров был реализован метод управления спектром, заключающийся в нивелировании стоячей оптической волны в активной среде за счет размещения в резонаторе двух четвертьволновых пластинок [2]. Указанный метод в режиме непрерывного излучения позволял генерировать одну дискретную линию в спектральной области  $\sim 2.4$   $\mu\text{m}$  для  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  и  $\sim 2.3$   $\mu\text{m}$  для  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ . Ширина излучения

не превышала 80 pm, что соответствовало пределу разрешающей способности используемого прибора.

В настоящей работе описан  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазер с возможностью быстрой перестройки длины волны излучения для оптического детектирования огнеопасных и токсичных аэрозолей, обладающих характерными сигнатурами в спектральной области  $\sim 3.3$   $\mu\text{m}$ . Реализовано два варианта лазерного источника: с акустооптическим и электрооптическим способом переключения спектра.

Оптическая схема  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера приведена на рис. 1. В качестве источника накачки 1 использовался волоконный тулиевый лазер, генерирующий импульсы излучения с длиной волны  $\sim 1.908$   $\mu\text{m}$ , длительностью импульсов  $\sim 182$  ns, частотой следования импульсов  $\sim 76$  kHz и максимальным уровнем мощности излучения  $\sim 20$  W. Излучение накачки фокусировалось с помощью линзы 2 с фокусным расстоянием  $\sim 250$  mm в активный элемент 4. Диаметр пучка излучения накачки в активном элементе составлял  $\sim 0.3$  mm. Активный элемент представлял собой кристалл  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$  длиной  $\sim 4.5$  mm, выращенный из паровой фазы. Кристалл имел полированные и просветленные торцы. Активная среда перемещалась перпендикулярно оси резонатора со скоростью  $\sim 28$  m/s.

Резонатор был образован плоскими зеркалами: глухим 7, обладающим высоким коэффициентом отражения в области генерации, выходным 9 с коэффициентом отражения в области генерации  $\sim 90\%$  и двумя поворотными зеркалами 3 и 6, обладающими высоким коэффициентом отражения для излучения генерации и прозрачными для излучения накачки. С целью согласования мод накачки и генерации в резонаторе размещались фокусирующие линзы 5 и 8.

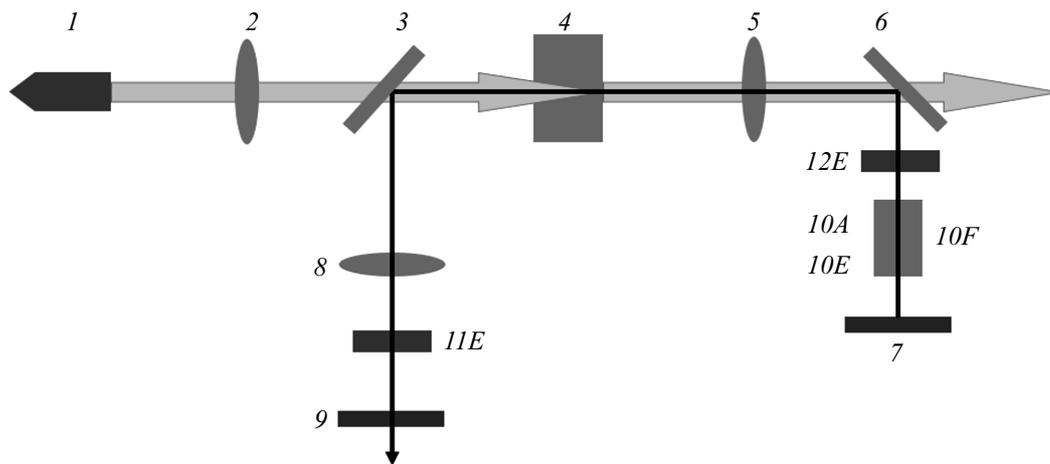


Рис. 1. Оптическая схема  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера. Пояснение в тексте.

Для определения относительной энергетической эффективности используемых методов была реализована схема с перестройкой длины волны излучения в спектральный диапазон  $\sim 3.3 \mu\text{m}$  с помощью размещенного в резонаторе спектрального фильтра  $10F$ . При использовании акустооптического метода на месте спектрального фильтра размещался акустооптический фильтр  $10A$  на основе кристалла парателлуриита с эффективностью дифракции  $\sim 97\%$ . При использовании электрооптического метода на месте спектрального фильтра устанавливалась пластинка  $\text{ZnSe}$   $10E$ , расположенная под углом Брюстера, также в резонаторе размещались ячейки Поккельса  $11E$  и  $12E$  на основе кристаллов ниобата лития.

Лазерный источник с внутррезонаторным спектральным фильтром генерировал излучение в спектральной области  $\sim 3.35 \mu\text{m}$  с оптическим КПД  $\sim 4.3\%$ . Спектральная ширина излучения составляла  $\sim 70 \text{ nm}$  по основанию. Перестройка излучения в диапазоне от  $3.3$  до  $3.4 \mu\text{m}$  осуществлялась механическим вращением фильтра. Фильтр представлял собой пластинку с интерференционным покрытием, поворот которой приводил к спектральному сдвигу максимума пропускания за счет изменения эффективной толщины интерференционных слоев. Спектр генерации  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$  с внутррезонаторным спектральным фильтром приведен на рис. 2. Также на рисунке изображена представленная в спектральной базе HITRAN зависимость коэффициента поглощения широко применяемой в топливных системах пропановой смеси от длины волны излучения.

Лазерные источники с акустооптическим и электрооптическим управлением спектром попеременно генерировали излучение на двух длинах волн за счет чередования амплитуд управляющих сигналов. Во время генерации первого импульса на акустооптический фильтр подавался сигнал с постоянной частотой  $\sim 30.12 \text{ MHz}$ , а на ячейки Поккельса постоянное напряжение  $\sim 4.96 \text{ kV}$ , экспериментально подобранные по величине таким образом, чтобы источники генерировали излучение с длиной

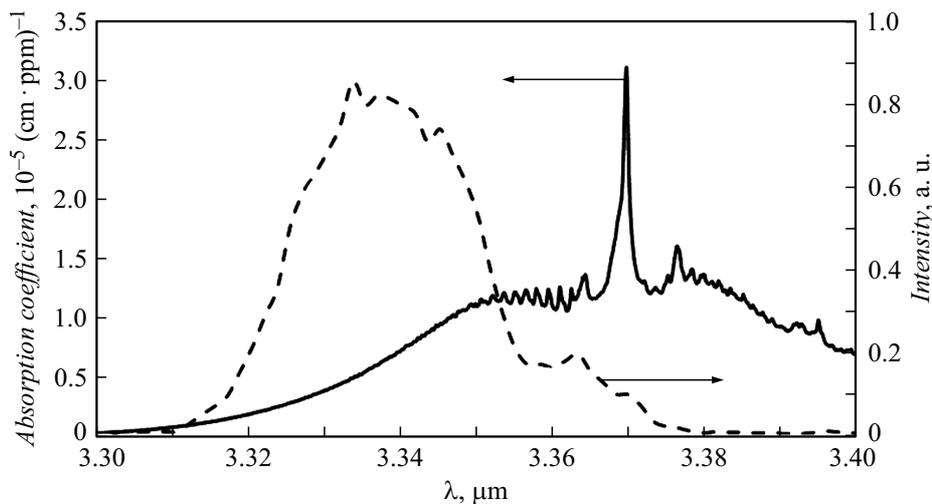
волны  $\sim 3.31 \mu\text{m}$ . Во время генерации второго импульса на акустооптический фильтр подавался сигнал с постоянной частотой  $\sim 29.72 \text{ MHz}$ , а на ячейки Поккельса постоянное напряжение  $\sim 5.03 \text{ kV}$ , экспериментально подобранные по величине таким образом, чтобы источники генерировали излучение с длиной волны  $\sim 3.35 \mu\text{m}$ . Затем цикл повторялся.

Для акустооптического метода максимальная частота переключения между двумя спектральными линиями ограничена временем прохождения звуковой волны через пучок излучения. Поскольку диаметр излучения генерации в области расположения акустооптического фильтра не превышал  $1 \text{ mm}$ , а скорость звука в парателлуриите составляет  $\sim 850 \text{ m/s}$ , максимальная частота переключений могла достигать  $\sim 850 \text{ kHz}$ . В нашем случае частота переключения была ограничена частотой повторения импульсов накачки. Таким образом, для акустооптического метода частота переключения между двумя длинами волн составляла  $\sim 76 \text{ kHz}$ .

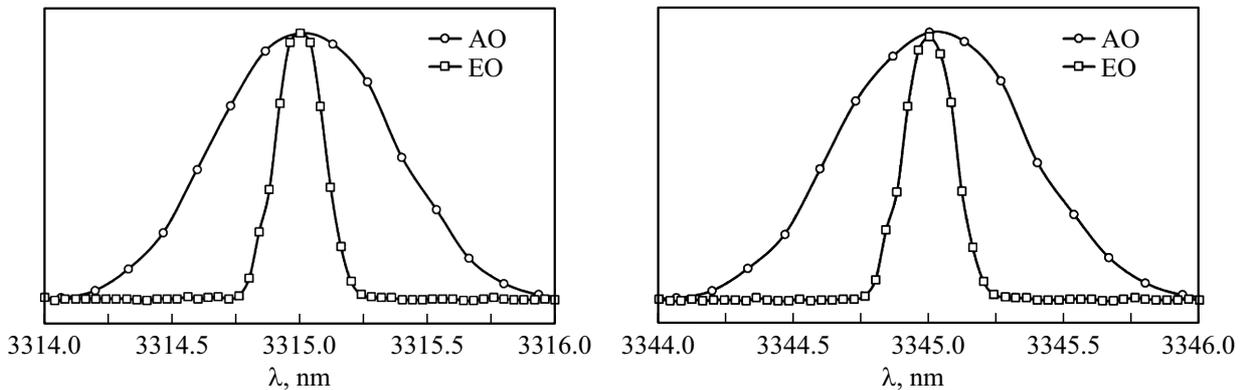
Для электрооптического метода максимальная частота переключения была ограничена временем релаксации пьезоэлектрических напряжений в ячейках Поккельса. Поскольку, согласно экспериментальным данным, время полной релаксации используемых ячеек Поккельса не превышало  $\sim 25 \mu\text{s}$ , на активный элемент подавался лишь каждый второй импульс накачки. Таким образом, для электрооптического метода частота переключения между двумя длинами волн достигала величины  $\sim 38 \text{ kHz}$ .

При использовании обоих методов факт переключения между спектральными линиями подтверждался с помощью дифракционной решетки и двух быстродействующих фотодиодов.

Спектры линий генерации при акустооптическом и электрооптическом управлении спектром в областях  $\sim 3.31$  и  $\sim 3.35 \mu\text{m}$  представлены на рис. 3. Как видно из рисунка, спектральная ширина излучения в случае



**Рис. 2.** Спектр генерации  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$  с внутррезонаторным спектральным фильтром (штриховая линия) и коэффициент поглощения пропановой смеси (сплошная линия).



**Рис. 3.** Спектры линий генерации при акустооптическом (АО) и электрооптическом (ЕО) управлении спектром в областях  $\sim 3.31$  и  $\sim 3.35 \mu\text{m}$ .

акустооптического метода составляла  $\sim 2 \text{ nm}$  по основанию, что соответствовало спектральному разрешению используемого акустооптического фильтра. В случае электрооптического метода спектральная ширина не превышала  $\sim 0.5 \text{ nm}$  по основанию, что соответствовало разрешающей способности используемого прибора.

Истинную спектральную ширину линии генерации при применении электрооптического метода переключения установить довольно проблематично. Если в случае акустооптического метода в резонатор просто вносится спектральный фильтр (в нашем случае излучение с длиной волны и поляризацией, не удовлетворяющими условиям дифракции Брэгга, отклонялось на угол  $\sim 7^\circ$  от оси резонатора), то электрооптический метод кардинально изменяет характер лазерной генерации. Если на ячейке Поккельса подается четвертьволновое напряжение, то излучение генерации имеет различную поляризацию в разных частях резонатора. Между глухим зеркалом 7 и ячейкой 12E излучение обладает линейной поляризаци-

ей, направление которой определяется расположением пластинки 10E. Между ячейками 12E и 11E излучение обладает круговой поляризацией. Между ячейкой 11E и выходным зеркалом 9 поляризация излучения линейная. Направления поляризации в двух крайних сегментах резонатора перпендикулярно ориентированы относительно друг друга.

Поскольку излучение генерации, проходящее через активный элемент 4, обладает круговой поляризацией, в активной среде отсутствует стоячая оптическая волна с чередующимися минимумами и максимумами интенсивности и, следовательно, элиминируется эффект так называемого „выжигания дыр“, приводящий к одновременному сосуществованию множества продольных мод излучения [2]. Таким образом, в условиях абсолютной стабильности такой источник должен был бы генерировать излучение на одной продольной моде, для которой потери при обходе резонатора минимальны. Однако, поскольку поляризационные потери при

отклонении длины волны излучения от длины волны, соответствующей четвертьволновому напряжению, нарастают крайне незначительно, фактически имеет место постоянное переключение генерации между соседними продольными модами, т.е. спектр излучения в этом случае не одномодовый, что можно было бы зафиксировать интерферометрическими методами, но в то же время слишком узкий для определения его ширины стандартными спектральными приборами. Тем не менее для задачи оптического детектирования аэрозолей с плавной зависимостью коэффициента поглощения от длины волны излучения неопределенность спектральной ширины порядка долей нанометра вполне приемлема.

В энергетическом отношении лазерные источники с электрооптическим и акустооптическим методами переключения спектра были сравнимы с источником на основе спектрального фильтра. Источник с электрооптическим методом генерировал излучение в спектральной области  $\sim 3.3 \mu\text{m}$  с оптическим КПД  $\sim 4.5\%$ . Источник с акустооптическим методом генерировал излучение в спектральной области  $\sim 3.3 \mu\text{m}$  с оптическим КПД  $\sim 4\%$ .

Таким образом, для оптического мониторинга взрывоопасных и отравляющих аэрозолей были созданы лазерные источники на основе поликристалла  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ , позволяющие попеременно генерировать излучение на двух длинах волн в спектральной области  $\sim 3.3 \mu\text{m}$ , не доступной для широко распространенных  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазеров. Для источника с акустооптическим методом переключения спектра частота переключения составляла 76 кГц при спектральной ширине линий генерации  $\sim 2 \text{nm}$ . Для источника с электрооптическим методом переключения спектра частота переключения составляла 38 кГц при спектральной ширине линий генерации, не превышающей 0.5 nm.

Длины волн генерации были подобраны таким образом, чтобы одна из них обладала низким, а другая высоким коэффициентом поглощения во взрывоопасной пропановой смеси. Путем изменения частоты акустического сигнала или напряжения, подаваемого на ячейки Погкельса, можно перенастроить линии генерации таким образом, чтобы они совпадали с характерными сигнатурами одного из токсичных аэрозолей группы ВТЕХ (бензол, толуол, этилбензол, ксилол), обладающих сильными полосами поглощения в спектральной области  $\sim 3.3 \mu\text{m}$  [3].

Более того, реализованные частоты переключений в принципе позволяют просканировать спектральную область  $\sim 3.3 \mu\text{m}$  с частотой  $\sim 1 \text{kHz}$ , т.е. получить информацию о поглощении в воздушной среде не для двух, а для нескольких десятков различных спектральных линий. Подобная информация может быть использована для детектирования в воздушной среде произвольной смеси токсичных и взрывоопасных аэрозолей.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке национального проекта „Наука и университеты“ (проект FSWR-2024-0004) за счет субсидии федерального бюджета на финансовое обеспечение государственного задания на выполнение научно-исследовательских работ.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] M. Yumoto, N. Saito, U. Takagi, *Opt. Express*, **23** (19), 25009 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.025009
- [2] R. Danilin, V. Fedorov, D. Martyshkin, O. Gafarov, S. Mirov, *Opt. Express*, **31** (8), 12686 (2023). DOI: 10.1364/OE.486474
- [3] M.M.Y.R. Riad, Y.M. Sabry, D. Khalil, in *2019 36th National Radio Science Conf. (NRSC)* (IEEE, 2019), p. 386. DOI: 10.1109/NRSC.2019.8734644