

Измерение профилей концентрации активных центров лазерных сред ИК-диапазона с помощью пироэлектрической камеры

С. В. Курашкин, О. В. Мартынова, К. Э. Сумачев

Предложен и реализован в эксперименте метод измерения профилей концентрации активных ионов в поликристаллическом $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, с использованием пироэлектрической камеры и непрерывного волоконного тулиевого лазера в качестве источника монохроматического излучения на 1,9 мкм. В результате сравнения с методом сканирования остросфокусированным пучком $\text{Tm}^{3+}:\text{YLF}$ лазера было показано, что оба метода дают близкие результаты при измерении концентрационного профиля в поперечном образце $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, однако предложенный метод обладает большей универсальностью и значительно сокращает время на проведение исследований.

Ключевые слова: концентрационный профиль, пироэлектрическая камера, метод сканирования, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$.

Ссылка: Курашкин С. В., Мартынова О. В., Сумачев К. Э. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 67.

Reference: S. V. Kurashkin, O. V. Martynova, and K. E. Sumachev, Prikl. Fiz., No. 5, 67 (2018).

Введение

В последнее время в связи с растущим интересом к лазерным системам, генерирующим в диапазоне длин волн 2–5 мкм [1], активно ведутся работы по изучению влияния формы концентрационного профиля и глубины легирования поликристаллических активных элементов на характеристики лазерной генерации [2, 3]. Необходимая информация о характере распределения активных центров по толщине активного элемента может быть извлечена из результатов измерения профилей оптического пропускания.

Традиционным методом измерения профилей оптического пропускания является метод сканирования исследуемых образцов в плоскости, параллельной направлению диффузионного потока при легировании, с помощью остросфокусированного пучка монохроматического излучения, попадающего в полосу поглощения активных центров, с одновременной регистрацией прошедшего

излучения [4]. Для халькогенидов цинка, легированных ионами двухвалентного хрома, имеющих широкие полосы поглощения > 350 нм с максимумами на длинах волн 1900 нм ($\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$), 1800 нм ($\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$) и 1700 нм ($\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$), в качестве источника зондирующего излучения может быть использован тулиевый лазер, генерирующий на длине волны около 1,9 мкм. Метод сканирования позволяет получать профили пропускания образцов с пространственным разрешением, ограниченным лишь диаметром лазерного пучка. Однако при этом возникает необходимость в использовании моторизованных линейных трансляторов и стабилизированном калориметрическом измерителе мощности. Кроме того, сканирование по всей поверхности образца, например, с целью исследования объемной неоднородности диффузии активных ионов, занимает значительный промежуток времени, поэтому источник зондирующего излучения должен обладать высокой временной стабильностью генерации.

Рассматриваемая в настоящей работе методика, основанная на применении твердотельной пироэлектрической камеры, позволяет за один акт измерения получать двумерную карту оптического пропускания образца, при этом значительно сокращая время на проведение исследования.

Методика эксперимента

Возможности описываемого метода были апробированы на поликристаллическом CVD-

Курашкин Сергей Владимирович¹, м.н.с.
 Мартынова Ольга Владимировна², инженер.
 Сумачев Кирилл Эдуардович², аспирант.

¹ Институт химии высококислотных веществ РАН.
 Россия, 603951, Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49.
 Тел. +7(909) 293-13-05. E-mail: svkurashkin@gmail.com

² Нижегородский государственный университет
 им. Н. И. Лобачевского.
 Россия, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Статья поступила в редакцию 29 мая 2018 г.

© Курашкин С. В., Мартынова О. В., Сумачев К. Э., 2018

ZnSe, легированном ионами двухвалентного хрома Cr^{2+} . Синтез селенида цинка проводился по методике, подробно описанной в [5]. Химическое осаждение металлической пленки хрома на поверхность полированной подложки ZnSe проводилось с использованием реакции восстановления трихлорида хрома парами цинка. После чего заготовка отжигалась в вакуированной кварцевой ампуле при температуре 1050 °С в течение нескольких суток. Подготовленный образец представлял собой полированную плоскопараллельную прямоугольную пластинку толщиной $d = 2$ мм, вырезанную в плоскости параллельной выделенному направлению диффузии легирующего компонента. Площадь поверхности большой грани пластинки составляла 75 мм².

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Источником монохроматического излучения служил непрерывный волоконный тулиевый лазер 1, генерирующий одномодовое излучение на низшей поперечной моде ($M^2 < 1,05$) с длиной волны 1903 нм [6]. Стабильность мощностных характеристик при выбранном режиме работы была не хуже 1,5 %. Коллиматор, установленный на выходном торце волокна, формировал лазерный пучок диаметром около 1,4 мм. Телескопическая система 2, построенная по схеме Кеплера и состоящая из положительных линз с фокусными расстояниями $F_1 = 50$ см и $F_2 = 5$ см, позволяла расширять лазерный пучок до диаметра, при котором просвечивалась вся поверхность исследуемого образца.

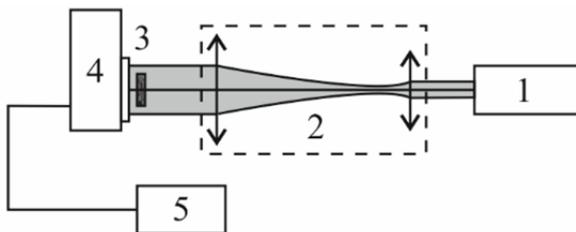


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для измерения оптического пропускания поликристаллического $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$.

Образец 3 закреплялся в быстрозажимной струбине на расстоянии около 5 см от коллиматорной линзы и с помощью гелий-неонового лазера ориентировался перпендикулярно к оптической оси системы. Проходящее сквозь образец излучение попадало на матрицу детектора пироэлектрической камеры 4, расположенной непосредственно за образцом. При этом на экране компьютера 5 формировалось изображение поперечного распределения прошедшего излучения. Моментальный снимок (кадр) сохранялся в файле электронной таблицы данных. Затем образец вынимался из

оправы, и пироэлектрическая камера регистрировала фоновую картину поперечного распределения излучения тулиевого лазера. После этого при помощи математического пакета MATLAB проводился анализ полученных экспериментальных данных.

Основным элементом рассмотренной схемы являлась твердотельная пироэлектрическая камера Ophir Pirocam III [7] со встроенным прерывателем. Матрица LiTaO_3 детектора пироэлектрической камеры представляла собой квадратную площадку с активной площадью 12,4×12,4 мм, состоящую из 15376 (124×124) термоэлектрических элементов (пикселей). Таким образом, максимальная разрешающая способность устройства была ограничена расстоянием между активными элементами матрицы и составляла 100 мкм, что вполне достаточно для визуализации профилей оптического пропускания сильно легированных образцов.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена карта оптического пропускания образца, полученная после компьютерной обработки данных с пироэлектрической камеры. Полученное изображение отличается высокой наглядностью и позволяет легко идентифицировать неоднородности различной природы во всем образце. На рисунке можно увидеть паразитное легирование нижнего и правого торцов образца, вызванное недостаточным прилеганием к подложке в процессе напыления металлической пленки хрома на левый торец образца.

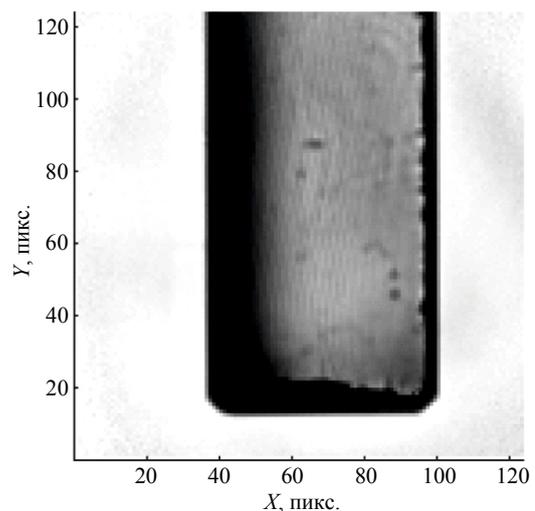


Рис. 2. Карта оптического пропускания поликристаллического $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, полученная после компьютерной обработки данных с пироэлектрической камеры.

Расчет внутреннего оптического пропускания образцов проводился по формуле [8]:

$$T = \frac{P_{\tau}}{P_0(1-R)^2},$$

где P_{τ} – мощность излучения, прошедшая сквозь образец (термическое изображение образца); P_0 – мощность излучения, падающая на образец (фоновая картина); $R = (n-1)^2 / (n+1)^2$ – френелевский коэффициент отражения от границы раздела образец-воздух при нормальном падении света, n – показатель преломления ZnSe на длине волны 1,9 мкм, равный 2,45. Программа позволяла производить расчет как для отдельного среза образца (т. е. по 124 пикселям матрицы детектора), так и для произвольно задаваемой области, позволяя тем самым получать усредненные значения оптического пропускания.

Для оценки достоверности получаемых таким образом результатов был проведен контрольный эксперимент по измерению оптического пропускания данного образца $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ методом сканирования. В условиях этого эксперимента проводилось сканирование исследуемого образца с помощью острогофокусированного пучка излучения $\text{Tm}^{3+}:\text{YLF}$ -лазера на длине волны 1908 нм с одновременной регистрацией прошедшего излучения. Диаметр лазерного пучка и величина шага при сканировании составляли 100 и 50 мкм соответственно. Средняя мощность зондирующего пучка излучения составляла $100 \pm 0,5$ мВт. Перемещение образца в направлении, перпендикулярном распространению зондирующего пучка (параллельно оси X на рис. 2), осуществлялось при помощи моторизованного линейного транслятора. Одновременно с этим калориметрический измеритель мощности Thorlabs S302C, подключенный к компьютеру, регистрировал проходящую через поликристалл мощность. Специально созданная в среде LabView программа в режиме реального времени строила зависимость оптического пропускания образца от координаты вдоль оси X .

На рис. 3 представлены результаты измерения оптического пропускания образца с помощью пирозлектрической камеры и с помощью метода сканирования (графики построены для фиксированного значения координаты Y , см. рис. 2). Из сравнения полученных зависимостей видно, что оба метода хорошо согласуются и дают одинаковое значение глубины залегания поглощающих центров (т. е. ионов Cr^{2+}).

Результаты измерения оптического пропускания были использованы в дальнейшем для вычисления профилей концентраций ионов Cr^{2+} по формуле:

$$N = -\frac{1}{\sigma_{abs}d} \ln T,$$

где σ_{abs} – сечение поглощения $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ на длине волны 1,9 мкм; d – толщина образца ($\sigma_{abs} = 7,3 \times 10^{-19}$ см² [1], $d = 2$ мм). Результаты вычислений представлены на рис. 4. Видно, что на границе образца, где концентрация ионов хрома максимальна, значения, полученные при помощи пирозлектрической камеры, несколько выше значений, полученных методом сканирования, что вероятнее всего связано с дифракционными искажениями и параллактическим эффектом при проецировании изображения образца на матрицу камеры.

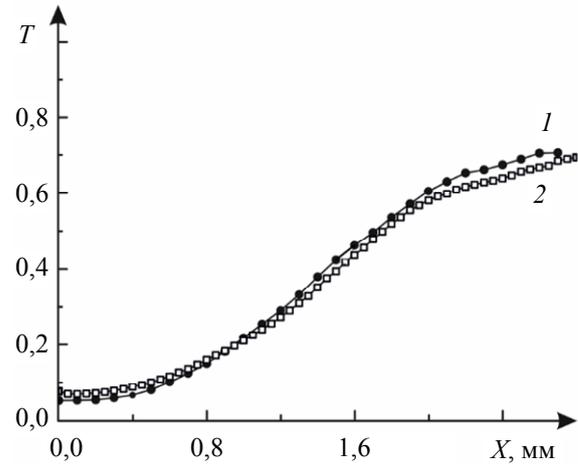


Рис. 3. Оптическое пропускание T образца $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$: 1 – профиль, полученный с помощью пирозлектрической камеры; 2 – профиль, полученный методом сканирования.

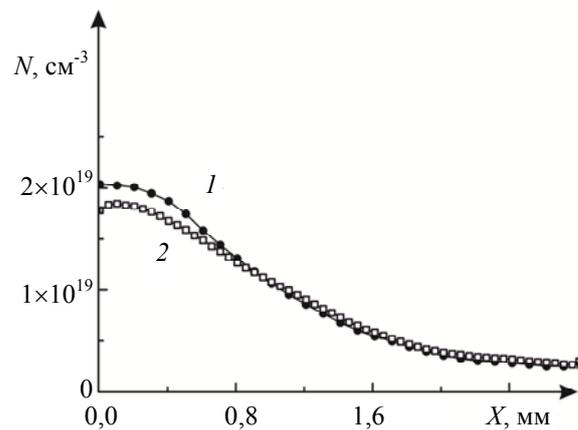


Рис. 4. Распределение концентрации N ионов Cr^{2+} по толщине образца X : 1 – профиль, полученный с помощью пирозлектрической камеры; 2 – профиль, полученный методом сканирования.

Закключение

В работе предложен и экспериментально реализован метод измерения профилей оптического пропускания твердотельных лазерных сред ИК-диапазона с помощью пирозлектрической камеры.

Профили концентрации активных центров в исследуемом образце $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, вычисленные на основе данных оптического пропускания, полученных традиционным методом сканирования и с помощью пирозлектрической камеры, находятся в хорошем соответствии и дают одинаковое значение глубины легирования. Однако предложенный метод позволяет получать двумерную карту оптического пропускания образцов с пространственным разрешением 100×100 мкм, что делает возможным выявление внутренних дефектов и областей паразитного легирования, а также сокращает в несколько раз объем временных ресурсов, необходимых для проведения измерений.

Разработка и создание поликристаллов $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ выполнены в ИХВВ РАН в рамках государственного задания № 0095-2016-0015. Остальные результаты работы получены в ННГУ им. Н. И. Лобачевского

при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-12-00510).

ЛИТЕРАТУРА

1. Mirov S. B., Fedorov V. V., Martyshkin D., Moskalev I. S., Mirov M., Vasilyev S. // IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. 2015. Vol. 21. No. 1. P. 292.
2. Савин Д. В., Гавришчук Е. М., Иконников В. Б., Еремейкин О. Н., Егоров А. С. // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 1. С. 8.
3. Kurashkin S. V., Martynova O. V., Savin D. V., Gavrishchuk E. M., Rodin S. A., Savikin A. P. // Laser Phys. Lett. 2018. Vol. 15. No. 2. P. 025002.
4. Родин С. А., Балабанов С. С., Гавришчук Е. М., Еремейкин О. Н. // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 5. С. 89.
5. Гавришчук Е. М. // Неорганические материалы. 2003. Т. 39. № 9. С. 1030.
6. <http://ntoire-polus.ru/>
7. <http://ophiropt.com/>
8. Ваксман Ю. Ф., Павлов В. В., Ницук Ю. А., Пуртов Ю. Н., Насибов А. С., Шапкин П. В. // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. № 4. С. 401.

PACS: 42.55.Rz, 42.70.Hj, 81.05.Zx, 85.80.Fi

Measurement of concentration profiles of the active centers in IR-laser media with a pyroelectric camera

S. V. Kurashkin¹, O. V. Martynova², and K. E. Sumachev²

¹Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS
49 Tropinina str., Nizhny Novgorod, 603951, Russia
E-mail: svkurashkin@gmail.com

²Nizhny Novgorod State University
23 Gagarin av., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

Received May 29, 2018

The method of measuring active ion concentration profiles in polycrystalline $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, using a pyroelectric camera and a continuous titanium fiber laser as a source of monochromatic radiation at $1.9 \mu\text{m}$, was proposed and implemented in the experiment. As a result of the comparison with the scanning method by a sharply focused $\text{Tm}^{3+}:\text{YLF}$ laser beam, it was shown that both methods give the close results for the concentration profile measuring in the $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ calibration sample, but the proposed method is more versatile and considerably reduces research time.

Keywords: concentration profile, pyroelectric camera, scanning method, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$.

REFERENCES

1. S. B. Mirov, V. V. Fedorov, D. Martyshkin, I. S. Moskalev, M. Mirov, and S. Vasilyev, IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. **21** (1), 292 (2015).
2. D. V. Savin, E. M. Gavrishchuk, V. B. Ikonnikov, O. N. Eremeykin, and A. S. Egorov, Quantum Electron. **45** (1), 8 (2015).
3. S. V. Kurashkin, O. V. Martynova, D. V. Savin, E. M. Gavrishchuk, S. A. Rodin, and A. P. Savikin, Laser Phys. Lett. **15** (2), 025002 (2018).
4. S. A. Rodin, S. S. Balabanov, E. M. Gavrishchuk, and O. N. Eremeykin, J. Opt. Technol. **5**, 325 (2013).
5. E. M. Gavrishchuk, Inorganic mater. **9**, 883 (2003).
6. <http://ntoire-polus.ru/>
7. <http://ophiropt.com/>
8. Yu. F. Vaksman, V. V. Pavlov, Yu. A. Nitsuk, Yu. N. Purtoev, A. S. Nasibov, and P. V. Shapkin, Semiconductors **4**, 377 (2005).