

ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

Дефектоскопия монокристаллов $ZnGeP_2$ излучением лазера на парах стронция

А.И.Грибенюков, С.Н.Подзываетов, А.Н.Солдатов, А.С.Шумейко,
Н.А.Юдин, Н.Н.Юдин, В.Ю.Юрин

Описан модифицированный метод оптический дефектоскопии монокристаллических пластин $ZnGeP_2$ с использованием излучения лазера на парах стронция ($\lambda = 1.03$ и 1.09 мкм), основанный на получении теневой картины внутренних дефектов пластин, вырезанных параллельно плоскости (100). Показано, что применение излучения лазера на парах стронция с длиной волны 6.45 мкм позволяет исследовать неоднородности в крупноразмерных образцах $ZnGeP_2$. Рассмотрена возможность создания проекционного дефектоскопа для мониторинга развития процесса пробоя монокристалла $ZnGeP_2$.

Ключевые слова: лазеры на самоограниченных переходах, дефектоскоп, монокристалл.

К настоящему времени в России, Китае и США созданы и внедрены в производство перестраиваемые компактные твердотельные источники большой мощности, работающие в спектральном диапазоне 3–5 мкм. Как известно, источники излучения среднего ИК диапазона могут использоваться в системах противоракетной обороны, в медицине, газоанализе и спектроскопии [1–4]. В качестве источников накачки для широкополосных или перестраиваемых в широких спектральных диапазонах параметрических генераторов света на основе монокристалла $ZnGeP_2$ используются импульсные лазеры, генерирующие излучение с длинами волн вблизи ~ 2 мкм [5, 6]. Монокристаллы $ZnGeP_2$ могут также широко применяться в качестве нелинейных оптических кристаллов для генерации излучения в терагерцевой области, получаемого с использованием разностной схемы от двух лазерных источников среднего ИК диапазона [7–11]. Из множества нелинейных оптических кристаллов монокристалл $ZnGeP_2$ наиболее подходит для решения данных задач благодаря уникальной совокупности характеристик, таких как широкий диапазон прозрачности 1–12 мкм, большой коэффициент нелинейно-оптического качества $M = 112 \times 10^{-24} \text{ м}^2/\text{В}^2$ ($M = d^2/n_p n_s$, где $d = 2\chi^{(2)}$ – коэффициент нелинейной поляризуемости второго порядка; $n_{p,i,s}$ – показатели преломления для волны накачки, для холостой и сигнальной волн соответственно); порог разрушения при длительности импульса ~ 10 нс достигает порядка 50 МВт/см² на $\lambda = 2.09$ мкм и 150 МВт/см² на $\lambda = 2.96$ мкм [12].

А.И.Грибенюков. Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 10/3; Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 36

С.Н.Подзываетов, А.Н.Солдатов, А.С.Шумейко, Н.А.Юдин, Н.Н.Юдин, В.Ю.Юрин. Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 36; e-mail: yudin@tic.tsu.ru

Поступила в редакцию 30 августа 2017 г., после доработки – 5 февраля 2018 г.

Основная трудность, возникающая при использовании кристаллов сложного состава, связана, как известно, с тем, что в них имеются локальные вариации состава, представляющие собой неоднородности, которые достигают макроскопических (1–50 мкм) размеров, с показателем преломления и коэффициентом поглощения, отличающимися от соответствующих значений для матричной среды [13]. Очевидно, что масштаб и сама реализация возможностей создания различных прикладных приборов с нелинейно-оптическими элементами из монокристаллов $ZnGeP_2$ зависят от уровня воспроизводимости свойств получаемого материала и, следовательно, от развития не только средств контроля и управления технологическими процессами, но и методов обнаружения дефектов и их идентификации на всех этапах технологической цепи. Контроль размеров дефектов, их геометрии и положения в кристалле играет чрезвычайно важную роль при раскройке заготовок на рабочие элементы, а также может помочь при выборе методов и режимов модификации свойств материала при постростовой обработке. Ясно, что методы контроля должны быть быстрыми, бесконтактными и неразрушающими. Наиболее подходят для решения данной задачи оптические методы дефектоскопии. Поскольку окно прозрачности $ZnGeP_2$ лежит в ИК области спектра (в видимой области спектра материал непрозрачен), то обнаружение и визуализацию внутренних дефектов, возникающих в процессе производства нелинейных элементов разного назначения, следует проводить с использованием ИК излучения.

В настоящей работе представлены результаты исследований дефектов в монокристаллах $ZnGeP_2$, полученных путем регистрации и анализа ИК изображений, формируемых на просвет. ИК изображения формировались с помощью излучения лазера на парах стронция и регистрации излучения, вышедшего из монокристалла, анализатором профиля лазерного пучка VeamCube (Ophir).

Лазер на парах стронция генерирует в ИК области спектра на восьми переходах с длинами волн $\sim 1.03, 1.09, 2.6, 3.06, 2.69, 3.01, 2.92$ и 6.45 мкм [14]. Все перечисленные лазерные линии лежат в области прозрачности монокристалла $ZnGeP_2$ (рис. 1).

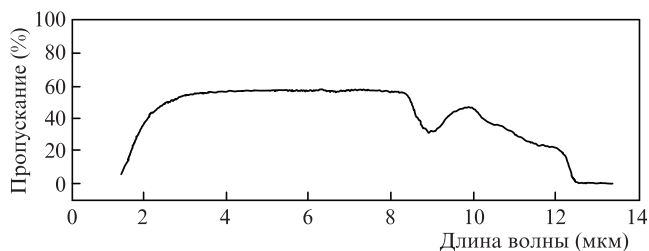


Рис.1. Спектр пропускания пластины ZnGeP₂, измеренный на фурье-спектрофотометре FT-801 (Simex).

Измерения пропускания пластин монокристаллов ZnGeP₂ проводились по схеме, представленной на рис.2. Коэффициенты поглощения с учетом многократного отражения от плоскопараллельных граней пластины рассчитывались по формулам

$$\alpha^{e,o} = -\frac{1}{d} \ln \{ \sqrt{[A^2 + (R^{e,o})^2]} - A \}, \tag{1}$$

$$R^{e,o} = \frac{(n^{e,o} - 1)^2}{(n^{e,o} + 1)^2}, \tag{2}$$

$$T^{e,o} = \frac{I^{e,o}}{I_0} = \frac{(1 - R^{e,o})^2 \exp(-\alpha^{e,o} d)}{(1 - R^{e,o})^2 \exp(-2\alpha^{e,o} d)}, \tag{3}$$

$$T = \frac{1}{I_0} = \frac{T^o}{2} [1 + \cos^2 \theta] + \frac{T^e}{2} \sin^2 \theta, \tag{4}$$

где $\alpha^{e,o}$ – коэффициенты поглощения для необыкновенной и обыкновенной волн соответственно; d – толщина пластины; $R^{e,o}$ – коэффициенты отражения, $n^{e,o}$ – показатели преломления, $T^{e,o}$ – пропускания волн; θ – угол между направлением излучения (или волновым вектором) и оптической осью кристалла; $I^{e,o}$ – интенсивности волн; I и I_0 – интенсивности прошедшего и падающего на монокристалл излучения; T – пропускание образца; $A = (1 - R^{e,o})^2 / [2T(R^{e,o})^2]$.

Решение системы (1) – (4), в которой независимых уравнений только три, а неизвестных – четыре, требует дополнения. Таким дополнением служит отношение коэффициентов поглощения волн с необыкновенной и обыкновенной поляризациями. Спектральная зависимость такого отношения

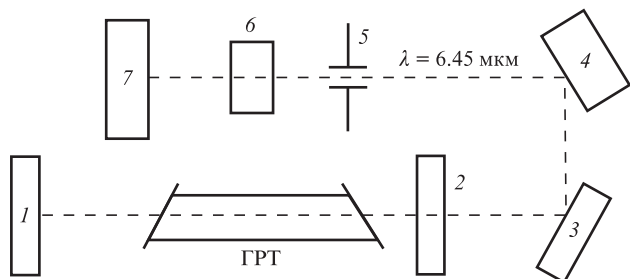


Рис.2. Схема эксперимента по измерению пропускания излучения на длинах волн 6.45, а также 1.03 и 1.09 мкм монокристаллом ZnGeP₂:

1, 2 – зеркала резонатора с помещенной между ними газоразрядной трубкой (ГРТ) лазера на парах стронция; 3 – поворотное алюминиевое зеркало; 4 – дифракционная решетка; 5 – диафрагма; 6 – исследуемая пластина монокристалла ZnGeP₂; 7 – измеритель мощности (Ophir).

$$K = \frac{\alpha^e}{\alpha^o} = 1.08 + 1.83 \exp \left[\frac{-(\lambda - 2.26)^2}{0.29} \right] \tag{5}$$

была найдена путем аппроксимации к распределению Гаусса экспериментальных значений, полученных при измерениях на ориентированных кристаллах ZnGeP₂ (выращены в ИМКЭС СО РАН). Измерения проводились независимо в трех организациях: в ИМКЭС СО РАН, в INRAD Co (США) и в Cleveland Crystals Co (США).

Уже первые измерения показали, что пластины монокристалла ZnGeP₂ толщиной 6 мм пропускают излучение стронциевого лазера с длиной волны 6.45 мкм (диаметр лазерного пучка 12.5 мм, средняя мощность излучения 485 мВт) почти без поглощения: $T \approx 55\%$, что соответствует коэффициенту поглощения $\alpha_{6.45} \approx 0.08 \text{ см}^{-1}$. При этом пропускание излучения лазера на длинах волн 1.03 и 1.06 мкм составило $\sim 1\%$, что отвечает коэффициенту поглощения $\alpha_{1.03} \sim 6.3 \text{ см}^{-1}$.

В кристаллах сложного состава всегда имеются локальные вариации состава – неоднородности, достигающие макроскопических (1–50 мкм) размеров с показателем преломления и коэффициентом поглощения, отличающимися от средних значений этих параметров для самой среды [13].

Таким образом, визуализация дефектов излучением с длиной волны ~ 1 мкм позволяет регистрировать дефекты с размерами ~ 0.5 мкм, но из-за низкой проникающей способности излучения в толстых образцах дефекты будут неразличимы из-за больших потерь на поглощение. Для излучения с длиной волны 6.45 мкм минимальные размеры регистрируемых объектов (~ 3 мкм) будут ограничены длиной волны регистрирующего излучения. Тем не менее измерения на этой длине волны представляют большой интерес из-за малости поглощения самим материалом и минимального влияния рассеяния, т.к. эффективность последнего пропорциональна параметру $(a/\lambda)^n$, где показатель степени n может изменяться от единицы (когда размер неоднородности $a \approx \lambda$) до четырех (при $a \ll \lambda$). Соответственно на длине волны $\lambda = 6.45$ мкм темное изображение дефектов должно иметь более высокую контрастность и разрешение, а кроме того, появляется возможность проводить дефектоскопию в толстых образцах. Конечно, необходимо учитывать, что для визуализации дефектов на длине волны 6.45 мкм необходимо использовать приемники, способные работать в данном диапазоне длин волн, например тепловизоры. Таким образом, благодаря уникальному сочетанию генерируемых длин волн стронциевый лазер может применяться для выявления крупных (свыше 3 мкм) дефектов в заготовках размером 10–15 см, а обнаружение дефектов величиной ~ 1 мкм требует специальной подготовки пластинок толщиной ~ 5 мм.

В настоящей работе проведены исследования по выявлению внутренних дефектов монокристалла ZnGeP₂ путем визуализации теневого ИК изображения, получаемого благодаря проходу через монокристалл излучения стронциевого лазера на длинах волн 1.03 и 1.09 мкм, подобно тому, как это было сделано в работе [15]. Выбор указанных длин волн лазерного излучения обусловлен широкой доступностью приемников излучения, работающих в диапазоне длин волн до 1.1 мкм.

Визуализация дефектов пластины монокристалла ZnGeP₂ с размерами $23 \times 17 \times 6$ мм осуществлялась по схеме, представленной на рис.3. Использовался лазер на па-

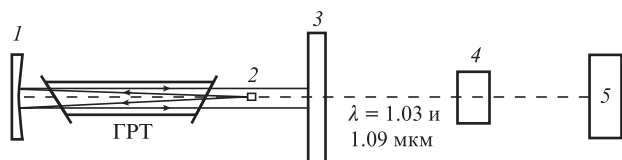


Рис.3. Схема экспериментальной установки для дефектоскопии монокристалла $ZnGeP_2$:

1, 2 – зеркала резонатора; 3 – оптический фильтр ИКС-1; 4 – пластина монокристалла $ZnGeP_2$; 5 – анализатор профиля лазерного излучения BeamCube (Ophir).

рах стронция с диаметром разрядного ВеО-керамического канала 2.6 см и длиной газоразрядной трубки 80 см. Неустойчивый резонатор телескопического типа был образован глухим алюминиевым сферическим зеркалом 1 с радиусом кривизны 300 мм и выходным сферическим выпуклым зеркалом 2 с радиусом кривизны 10 мм с мнимым фокусом, формирующим плоскопараллельный лазерный пучок. Средняя мощность генерации лазера на парах стронция (после фильтра ИКС-1) составляла ~ 500 мВт на длинах волн излучения 1.03 и 1.09 мкм.

Примеры теневых картин внутренних дефектов, полученных при помощи анализатора лазерного пучка BeamCube, приведены на рис.4 и 5. Теневая картина части трещины, которая расположена внутри пластины монокристалла $ZnGeP_2$ и не видна при визуальном осмотре, показана на рис.4. На рис.5 приведено полное изображение внутренней трещины. Оно образовано путем склейки изображений, получаемых при перемещении матрицы приемника на расстояние, равное ее размеру. В итоге имеем изображение требуемой площади, содержащее всю необходимую информацию о внутренних дефектах кристалла.

Недостатком представленного метода является то, что размеры детектируемых дефектов ограничиваются размерами пикселя матрицы приемного устройства. Чтобы повысить чувствительность метода и получить возможность использовать фотоприемники с дешевыми матрицами, предполагается усовершенствовать данный метод дефектоскопии и создать лазерный проекционный

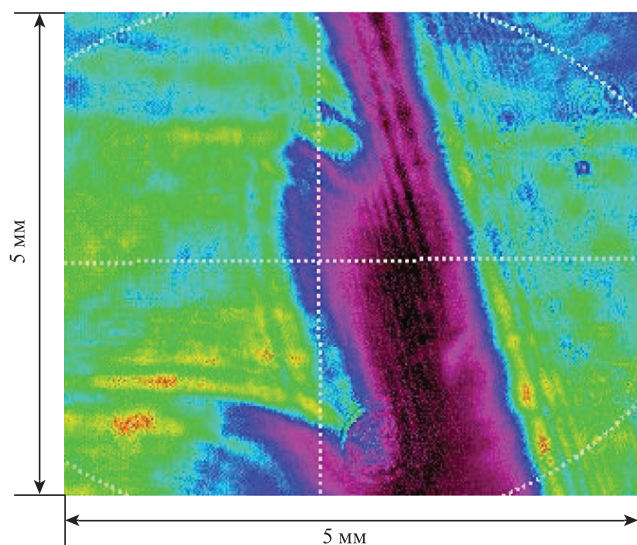


Рис.4. Теневое изображение части внутреннего дефекта пластины $ZnGeP_2$, полученное с помощью излучения на длинах волн 1.03 и 1.09 мкм лазера на парах стронция.

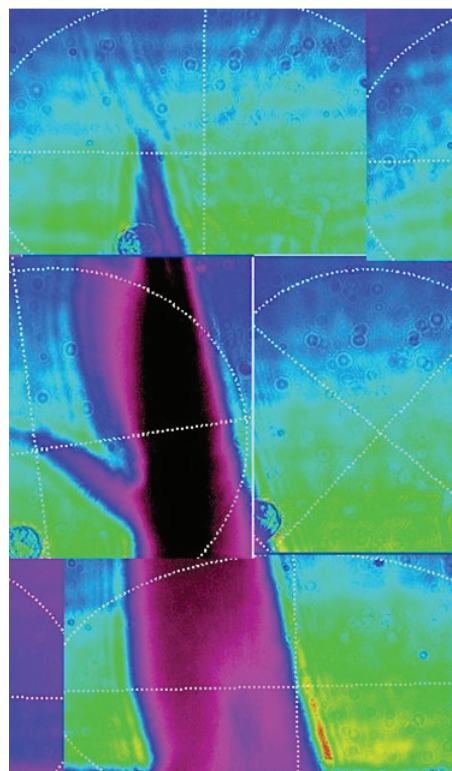


Рис.5. Склейка изображений дефекта, линейные размеры которого превышают размеры матрицы анализатора.

дефектоскоп на базе системы генератор–усилитель по схеме, представленной на рис.6.

Принцип работы данного проекционного дефектоскопа заключается в том, что из всего излучения генератора (ГРТ1), проходящего через узкополосный оптический фильтр 3, выделяется излучение с необходимой длиной волны, которое далее фокусируется линзой 5 в исследуемую область монокристалла. Поскольку показатель преломления монокристалла $ZnGeP_2$ в ближнем и среднем ИК диапазонах составляет ~ 3 [16], пучок излучения в монокристалле практически не расширяется. Излучение, вышедшее из монокристалла, попадает на линзу 7, которая формирует плоскопараллельный пучок, содержащий информацию о внутренних дефектах монокристалла. Данный пучок, пройдя через ГРТ2, усиливается и попадает на линзу 8, с помощью которой изображение увеличивается и проецируется на экран 9. В представленной на рис.6 схеме для визуализации дефектов в монокристалле на длине волны $\lambda = 6.45$ мкм в качестве приемника предполагается использовать тепловизор 10, который фиксирует картину распределения температуры с экрана. Данный проекционный дефектоскоп может служить и для визуализации дефектов с помощью излучения с длинами волн 1 и 3 мкм, если заменить экран матрицей фотоприемника, работающего в данном спектральном диапазоне. Регистрацию изображения можно производить путем сканирования фотоприемником плоскости изображения и последующей его склейки. Минимальные линейные размеры регистрируемых дефектов ограничены длиной волны регистрирующего излучения и составляют 0.5 – 3 мкм (в зависимости от выбора длины волны). Такой метод визуализации может найти применение при регистрации быстропротекающих процессов внутри монокристалла, напри-

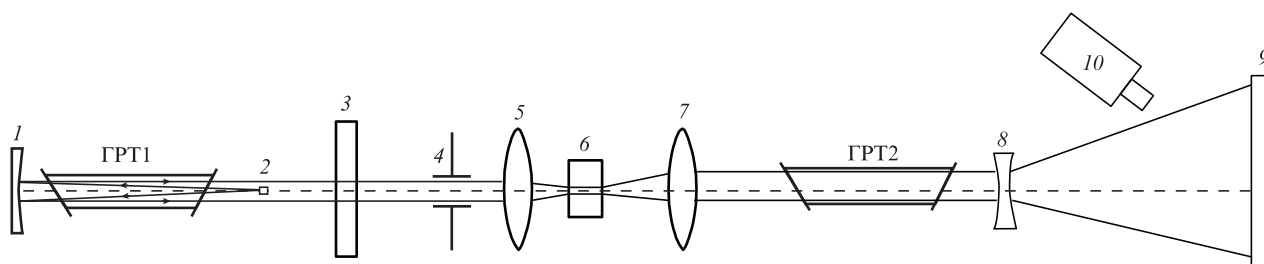


Рис.6. Схема лазерного проекционного дефектоскопа:

1, 2 – зеркала резонатора; ГРТ1, ГРТ2 – газоразрядные трубки лазеров на парах стронция (генератора и усилителя соответственно); 3 – узкополосный оптический фильтр; 4 – диафрагма; 5, 7, 8 – линзы; 6 – исследуемый монокристалл $ZnGeP_2$; 9 – экран; 10 – камера (тепловизор).

мер в момент оптического пробоя или предпробойного состояния, благодаря возможности достижения высокой частоты следования импульсов генерации (~ 1 МГц) лазера на парах стронция [17]. Для регистрации данных процессов потребуется синхронизация импульсного источника накачки лазера с приемным устройством (подобно тому, как это было сделано в [18]).

Итак, проведенные исследования подтверждают перспективность использования ИК излучения лазера на парах стронция для дефектоскопии монокристаллов $ZnGeP_2$ теневым методом. Отмечена возможность создания проекционного дефектоскопа с минимальной разрешающей способностью ~ 0.5 мкм и частотой следования кадров ~ 1 МГц для мониторинга развития процесса пробоя монокристалла $ZnGeP_2$.

- Godard A., Lefebvre M., Hassani S., Galter P. *Technol. Opt. Countermeas. IV*, **6738**, 67380C-1 (2007).
- Lippert E., Nicolas S., Arisholm G., Stenersen K., Rustad G. *Appl. Opt.*, **45** (16), 3839 (2006).
- Stoeppler G., Thilmann N., Pasiskevicius V., Zukauskas A., Canalias C., Eichhorn M. *Opt. Soc. Am.*, **20** (4), 4509 (2012).
- Бочковский Д.А., Васильева А.В., Матвиенко Г.Г., Полунин Ю.П., Романовский О.А., Солдатов А.Н., Харченко О.В., Юдин Н.А., Яковлев С.В. *Оптика атмосферы и океана*, **24** (11), 985 (2011).
- Захаров Н.Г., Антипов О.Л., Шарков В.В., Савикин А.П. *Квантовая электроника*, **40** (2), 98 (2010) [*Quantum Electron.*, **40** (2), 98 (2010)].
- Zhou Ren-Lai, Ju You-Lun, Wang Wei, Zhu Guo-Li, Wang Yue-Zhu. *Chin. Phys. Lett.*, **28** (7), 074210 (2011).
- Shi W., Ding Y.J. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 848 (2003).
- Tanabe T., Suto K., Nishizawa J., Sasaki T. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37**, 155 (2004).
- Luo C., Reimann K., Woerner M., Elsaesser T. *Appl. Phys.*, **78**, 435 (2004).
- Shi W., Ding Y.J. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 1635 (2004).
- Shi W., Ding Y.J., Schunemann P.G. *Opt. Commun.*, **233**, 183 (2004).
- Андреев Ю.М., Воеводин В.Г., Гейко П.П., Горобуц В.А., Ланская О.Г., Петухов В.О., Солдаткин Н.П., Тихомиров А.А. *Лидарные системы и их оптико-электронные элементы* (Томск: изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2004).
- Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. *Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе*. Под общей редакцией В.П.Вейко (СПб: изд-е СПб ГУ ИТМО, 2008).
- Солдатов А.Н., Латуш Е.Л., Чеботарев Г.Д., Юдин Н.А., Васильева А.В., Полунин Ю.П., Пруцаков О.О. *Импульсно-периодические лазеры на парах стронция и кальция* (Томск: ТМЛ-Пресс, 2012).
- Дёмин В.В., Половцев И.Г., Каменев Д.В. *Изв. вузов: Сер. Физика*, **58** (10), 106 (2015).
- Boyd G.D., Buehler E., Storz F.G. *Appl. Phys. Lett.*, **18** (7), 301 (1971).
- Солдатов А.Н., Юдин Н.А., Васильева А.В., Колмаков Е.А., Полунин Ю.П., Костыря И.Д. *Квантовая электроника*, **42** (1), 31 (2012) [*Quantum Electron.*, **42** (1), 31 (2012)].
- Евтушенко Г.С., Тригуб М.В., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н. *Изв. Томского политехнического университета*, **319** (4), 154 (2011).