МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ СО РАН
ИНСТИТУТ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ СО РАН
ООО «ЛАБОРАТОРИЯ ОПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ»
ООО «ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ АЛМАЗНЫЕ УСТРОЙСТВА»

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ФОТОНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКИ И НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКИ

Материалы
всероссийской конференции
с международным участием
10–13 сентября 2024 г.

Ответственный редактор Е. И. Липатов

Томск
Издательство Томского государственного университета
2024

УДК 535, 537.9, 538.9, 548
ББК 22.34, 22.37, 24.12, 24.5
М341

Редакционная коллегия выпуска:
Г.В. Майер, профессор, президент НИ ТГУ, Томск
В.В. Дёмин, доцент, первый проректор НИ ТГУ, Томск
А.Б. Ворожцов, профессор, проректор по НИД НИ ТГУ, Томск
А.Г. Коротаев, декан РФФ НИ ТГУ, Томск
В.В. Винс, директор ООО «ВЕЛМАН», Новосибирск
В.П. Попов, заведующий лабораторией ИФП СО РАН, Новосибирск
М.А. Головатов, начальник УИСНТТ НИ ТГУ, Томск
А.И. Грибенюков, с.н.с. ИМКЭС СО РАН, Томск
С.Н. Ульянов, Директор ООО «ЛОК», Томск
Е.И. Липатов, заведующий ЛКИТ РФФ НИ ТГУ, ИСЭ СО РАН, Томск
Н.Н. Юдин, директор НОЦ ОФТ НИ ТГУ, Томск
А.В. Тяжев, заведующий ЛДСИ ЦПТМ НИТГУ, Томск
М.В. Тригуб, заместитель директора НР ИОА СО РАН, Томск

М341 **Материалы и технологии фотоники, электроники и нелинейной оптики:** материалы Всероссийской конференции с международным участием, 10–13 сентября 2024 г. / отв. ред. Е.И. Липатов. – Томск : Издательство Томского государственного университета, 2024. – 88 с.

ISBN 978-5-907890-18-3

Всероссийская конференция с международным участием «Материалы и технологии фотоники, электроники и нелинейной оптики» была проведена в Томском государственном университете с 10 по 13 сентября 2024 г.

Сборник содержит материалы тезисов докладов, посвященных новейшим достижениям в фотонике, электронике, нелинейной оптике и квантовых технологиях на основе современных и перспективных материалов. Круг рассматриваемых вопросов простирается от синтеза оптических и полупроводниковых материалов до создания оптоэлектронных и полупроводниковых приборов и систем.

УДК 535, 537.9, 538.9, 548
ББК 22.34, 22.37, 24.12, 24.5

ISBN 978-5-907890-18-3

© Томский государственный университет, 2024
© Авторы статей, 2024

Э-0059 ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОЛОС РОСТА МОНОКРИСТАЛЛОВ $ZnGeP_2$ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

М. В. Костылев[1], Н. Н. Юдин[2], М. М. Зиновьев[2], С. Н. Подзывалов[2], Е. С. Слюнько[2], А. Б. Лысенко[2], Д. В. Власов[2], А. Ю. Кальсин[2], М. М. Кулеш[2], А. Ш. Габдрахманов[2]

[1] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия
[2] Томский государственный университет, Томск, Россия,

В лазере на парах стронция реализуется генерация в ИК-области спектра на восьми лазерных переходах с длинами волн генерации: λ ~ 1,03 мкм; 1,09 мкм; 2,6 мкм;3,06 мкм; 2,69 мкм; 3,01 мкм; 2,92 мкм; 6,45 мкм [1]. Все вышеперечисленные лазерные линии лежат в области прозрачности монокристалла $ZnGeP_2$ [2]. Визуализация дефектов в пластинах монокристалла $ZnGeP_2$ осуществлялась по схеме, представленной на рис. 1.

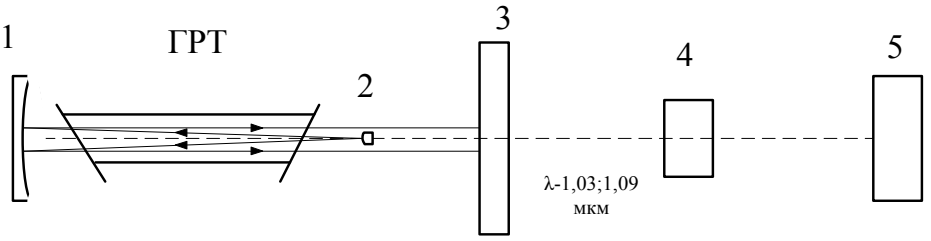

Рис. 1. Схема экспериментальной установки для дефектоскопии монокристалла $ZnGeP_2$: 1, 2 – зеркала резонатор; ГРТ – газоразрядная трубка лазера на парах стронци; 3 – оптический фильтр ИКС-; 4 – пластина монокристалла $ZnGeP_2$; 5 – CCD/CMOS-камера

В экспериментах использовался лазер на парах стронция с газоразрядной трубкой (ГРТ) (диаметр разрядного BeO-керамического канала – 2,6 см, длина – 80 см) помещенной в неустойчивый резонатор телескопического типа. Неустойчивый резонатор с мнимым фокусом, образованный глухим алюминиевым сферическим зеркалом 1 (радиус кривизны 300 мм) и выходным сферическим выпуклым зеркалом 2 (радиус кривизны 10 мм), позволял формировать плоскопараллельный лазерный пучок. Средняя мощность генерации лазера на парах стронция (после фильтра ИКС-1) составляла ~ 600 мВт на длинах волн излучения λ ~ 1,03 и λ ~ 1,09 мкм.

Данный способ визуализации (см. рис. 1) представляет собой типичную осевую схему записи цифровых голограмм Габора. Плоскопараллельный пучок света от ГРТ, проходит через оптический фильтр 3 для выделения требуемой длины волны (1,06; 1,09 мкм) и исследуемый образец 4. В результате прохождения излучения через исследуемый образец формируется картина интерференции опорной волны (часть излучения, которая прошла через однородную часть образца, без рассеяния на дефектах) и предметной волны (часть излучения, рассеянная на дефектах и примесях). Камера 5 регистрирует эту интерференционную картину (голограмму) и передаёт её в память компьютера 6. Таким образом, цифровая голограмма представляет собой дискретный двумерный массив оцифрованных значений интенсивности картины интерференции опорной и предметной волн [3]. Этот массив принимается за распределение (с точностью до константы) поля в плоскости голограммы ($U(x_1, y_1)$). Это распределение используется в качестве исходного, а численный расчет [4] дифракционного интеграла (1) позволяет рассчитать распределение поля (а затем интенсивности) в плоскости на заданном расстоянии от плоскости голограммы $U(x_2, y_2)$ (то есть в соответствующем поперечном сечении исследуемого объема).

$$U\left(x_2, y_2\right) = \frac{1}{i\lambda z}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} U\left(x_1, y_1\right) e^{i\frac{2\pi}{\lambda}z} e^{\frac{i\pi}{z\lambda}\left(\left(x_1-x_2\right)^2+\left(y_1-y_2\right)^2\right)} dx_1 dy_1, \quad (1)$$

где λ – длина волны, z – расстояние между плоскостью голограммы и плоскостью восстановления.

Соответственно, слой за слоем можно формировать изображение исследуемого объема образца. При этом в каждом восстановленном изображении поперечного сечения монокристалла визуализируются дефекты (неоднородности) и появляется возможность определить их размеры, форму, ориентацию, расположение в монокристалле. Описанный процесс записи и восстановления информации в цифровой голографии был успешно применен для диагностики дефектов в оптических материалах [5, 6]. В данной работе в качестве регистрирующей камеры 5 использовалась CCD-камера с матрицей 1600 × 1200 пикселей, размером пикселя не более 7,4 × 7,4 мкм. Длинноволновая граница спектральной чувствительности используемой CCD-камеры соответствует длине волны λ 1,1 мкм, что определило используемый диапазон длин волн лазера на парах стронция.

С целью проведения анализа влияния температурных флуктуаций в процессе роста монокристалла и их влияния на структуру монокристалла было получено распределение интенсивности I(pix) на восстановленном изображении (см. рис. 2, А), содержащем полосы роста, вдоль направления роста кристалла. Далее от полученного распределения было взято Фурье – преобразование

$$\hat{I}\left(1/Pix\right) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} I\left(Pix\right) e^{-i\omega\left(Pix\right)} d\left(Pix\right). \quad (2)$$

Результаты Фурье разложения интенсивности на восстановленном изображении представлены на рис. 2, В, по оси X указан пространственный период повторяемости полос роста в мкм, а по оси Y интенсивность в относительных единицах. Таким образом был по-лучен спектр периодов полос роста.

Рассмотрим механизм формирования полос роста в исследуемом образце исходя из данных полученного спектра. Появление структуры с периодом 10–20 мкм связано с образованием гравитационно-неустойчивых слоев расплава или так называемых «термока-пель» в процессе роста монокристалла. Оценку временного периода этого процесса можно провести по формуле [26]

$$\tau_{tk} = 32\left[\left(\frac{\nu}{g\alpha\Delta T}\right)^2 K^{-1}\right]^{1/3}, \qquad (3)$$

где ν – кинематическая вязкость расплава, g – ускорение свободного падения, α – коэффициент термического расширения, ΔT – разность температур между горизонтальными границами расплава, $K = \frac{æ}{\rho C_\nu}$ – коэффициент тепловой диффузии, æ – теплопроводность, ρ – плотность, C_ν – удельная теплоёмкость при постоянном объеме.

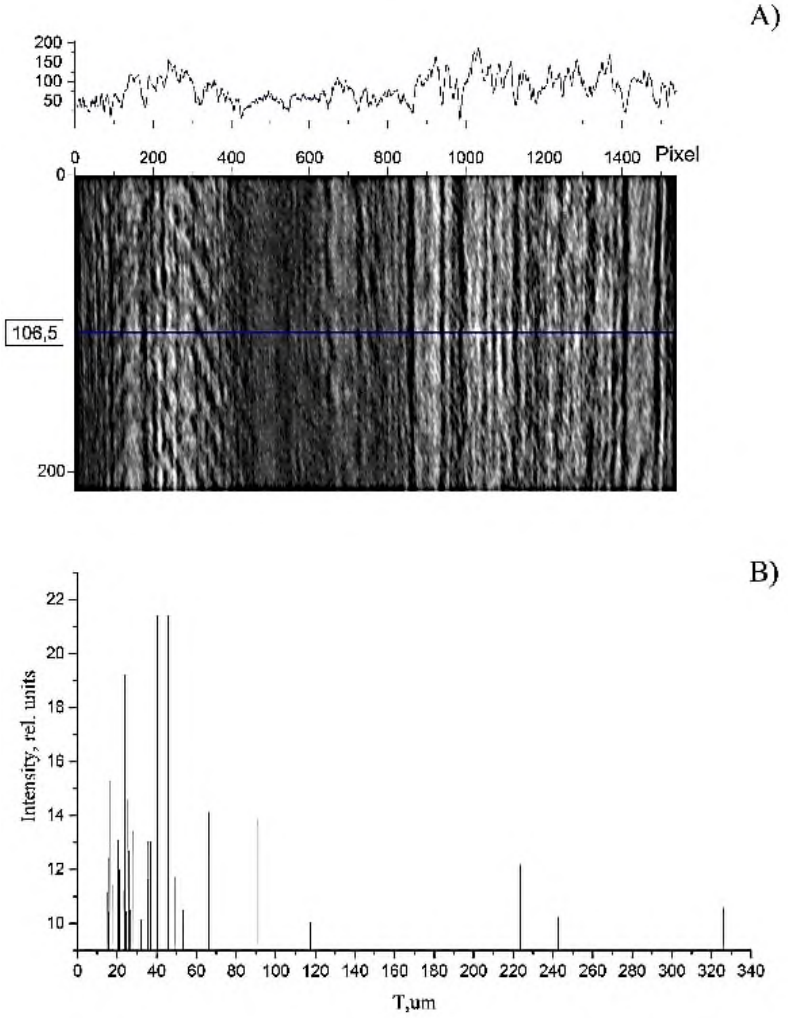

Рис. 2. А) – распределение интенсивности по пикселям в восстановленном изображении полос роста монокристалла $ZnGeP_2$. В) – спектр периода повторения полос роста и распределения интенсивности восстановленного изображения

Подставляя в (3) экспериментальное значения $\Delta T = 10$ °C, известные для $ZnGeP_2$ значения $æ_{ZnGeP_2}$,ρ_{ZnGeP_2}, C_ν [2], $\alpha = 9{,}1 \cdot 10^6\,K^{-1}$ и принимая $\nu = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ см^2/с (величина типичная для расплавов металлов, полупроводников и окислов), в качестве оценки получаем значение $\tau_{tk} \sim 10$ с, что при скорости кристаллизации в процессе роста ~10 мм/сут соответствует периоду полос роста ~10 мкм.

Периодические колебания температуры в расплаве могут появляться также за счет конвекции, создаваемой радиальным градиентом температуры. Период такой неустойчивости гидродинамического слоя у нагреваемой или охлаждаемой вертикальной границы $\tau_{гд} \sim 3{,}6 N_П^{-1/3}$, где $N_П$ – число Прандтля. Для монокристалла $ZnGeP_2$ число $N_П = 0{,}1$, поэтому $\tau_{гд} \sim \tau_{tk}$ и появление полос роста в $ZnGeP_2$ с периодом

T2 ~ 25–90 мкм можно отнести на счет неустойчивости гидродинамического слоя у вертикальных стенок тигля при наличии радиального градиента температуры в расплаве. Большие периоды полос роста ~100–400 мкм и более возможны за счет медленного «концентрационно-капельного» механизма [7], когда оттеснение какого-либо компонента может привести к гравитационной неустойчивости слоя у границы расплав-кристалл. Оценка периода слоев, возникающих за счет концентрационно-капельного механизма, проводилась по формуле

$$= 4\left[\frac{\nu D^3}{g\beta Ck\left(1-k\right)\upsilon_{фр}{}^7}\right]^{1/5},$$

где D – коэффициент диффузии растворенного вещества, β – коэффициент «концентрационного» расширения, C – концентрация растворенного вещества, K – коэффициент сегрегации, $\upsilon_{фр}$ – скорость кристализации. При расчетах полагалось $\beta C = 0{,}1$; $D = 10^{-4}$ см^2/с; $k = 0{,}1$, полученная оценка пространственного периода составила T3 = $\tau\upsilon_{фр}$ ~ 1 мм, что по порядку величины совпадает с экспериментальными значениями для больших периодов полос роста ~200 мкм в монокристалле $ZnGeP_2$.

Литература

1. Soldatov N., Sabotinov N. V., Latush E. L., Chebotarev G. D., Vuchkov N. K., Yudin N. A. Strontium and calcium vapour lasers. Vol. I. Bulgarian. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House, 2013. 293 p.
2. Nikogosyan D. Handbook “Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey”. 1-st ed. Springer, 2005. 427 p.
3. Schnars U., Jueptner W. Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques. Berlin: Sprinder, 2005. 164 p.
4. Collier R., Burkhart C., Lin L. Optical Holography. N.-Y.: Acad. Press, 1971.
5. Dyomin V.V., Polovcev I.G., Kamenev D.V. The internal defects detection in crystals by digital holographic methods // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 737, No. 012072.
6. Dyomin V.V., Polovtsev I.G., Kamenev D.V. Quality control of $ZnGeP_2$ single crystals using optical methods // Russian Physics Journal. 2016. Vol. 58, № 10. P. 1479–1481.
7. Verozubova G.A., Gribenyukov A.I., Korotkova V.V., Ruzaikin M.P. $ZnGeP_2$ synthesis and growth from melt // Materials Science and Engineering B48. 1997. P. l9l–197.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10193, https://rscf.ru/project/23-79-10193/