

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИФОСФИДА ЦИНКА-ГЕРМАНИЯ, СИЛЬНОЛЕГИРОВАННОГО ТЕЛЛУРОМ*

✉А. Б. Лысенко, Н. Н. Юдин, Е. С. Слюнько,
А. Ю. Кальсин, С. Н. Подзывалов, А. Ш. Габдрахманов

*Научно-образовательный центр «Оптические и фотонные технологии»
Томского государственного университета, Томск, Россия*

✉festality@yandex.ru

Тройное соединение дифосфид цинка-германия (ZGP, ZnGeP_2), кристаллизующееся в структуре халькопирит с точечной группой $42m$ [1], обладает высокой теплопроводностью $36 \text{ Вт/см}\cdot\text{К}$, двулучепреломлением, достаточным для фазового согласования, высоким порогом оптического пробоя и твердостью [2–4]. Монокристаллы дифосфида цинка-германия представляют собой уникальную нелинейную среду для параметрического преобразования частоты оптического излучения в среднем инфракрасном ИК-диапазоне, обладающую высоким нелинейно-оптическим качеством. Потенциал нелинейно-оптических кристаллов ZnGeP_2 максимально реализуется в параметрических генераторах света, преобразующих лазерное излучение с длиной волны вблизи $2,1 \text{ мкм}$ в излучение, перестраиваемое в области $3\dots 8 \text{ мкм}$ [5, 6]. В настоящее время изучение влияния объемного легирования халькогенами, в данном случае теллуrom (Te), на оптические свойства ZnGeP_2 не проводилось.

Целью данной работы является модификация и улучшение оптических свойств ZGP с помощью легирования халькогенами, в данном случае Te, для расширения области его применения; изучение влияния большого количества примесных атомов на пропускание и лучевую прочность ZnGeP_2 .

В качестве легирующей примеси для эксперимента по объемному легированию был выбран теллур. Навеска теллура составила $3 \text{ мас.}\%$ от общей массы синтезируемого вещества. Монокристалл выращивался в трубчатой печи вертикального оформления на затравку. Впервые был выращен монокристалл ZnGeP_2 , сильнолегируемый Te.

Для исследований использовался монокристалл ZGP, из которого было вырезано 4 образца с ориентацией (100) и размерами $5 \times 5 \times 2,45 \text{ мм}^3$.

Далее производилось измерение порога оптического пробоя полученных образцов ZGP. В качестве источника излучения использовался Ho:YAG-лазер, генерирующий излучение на длине волны $2,097 \text{ мкм}$ с накачкой непрерывным тулиевым волоконным лазером. Для определения пропускания и порога оптического пробоя легированного Te монокристалла ZGP были вырезаны две пластинки. Пластинки были отшлифованы, затем отполированы.

Благодаря сравнительному анализу кривых пропускания двух наборов образцов — нелегированного без постростового отжига, нелегированного с постростовым отжигом, а также двух образцов, легированных Te без постростового отжига и после отжига (см. рисунок, а) — хорошо прослеживается положительное влияние атомов Te на пропускание ZGP в средней ИК-области спектра. Интересным является тот факт, что постростовой отжиг менее эффективен в случае легированного материала и увеличивает пропускание лишь на 9% в сравнении

* Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-10193).

© А. Б. Лысенко, Н. Н. Юдин, Е. С. Слюнько, А. Ю. Кальсин, С. Н. Подзывалов, А. Ш. Габдрахманов, 2024

с неотожженным легированным кристаллом, против 25 % в сравнении с нелегированным материалом. Разница в пропускании между легированным и нелегированным ~ 10 %.

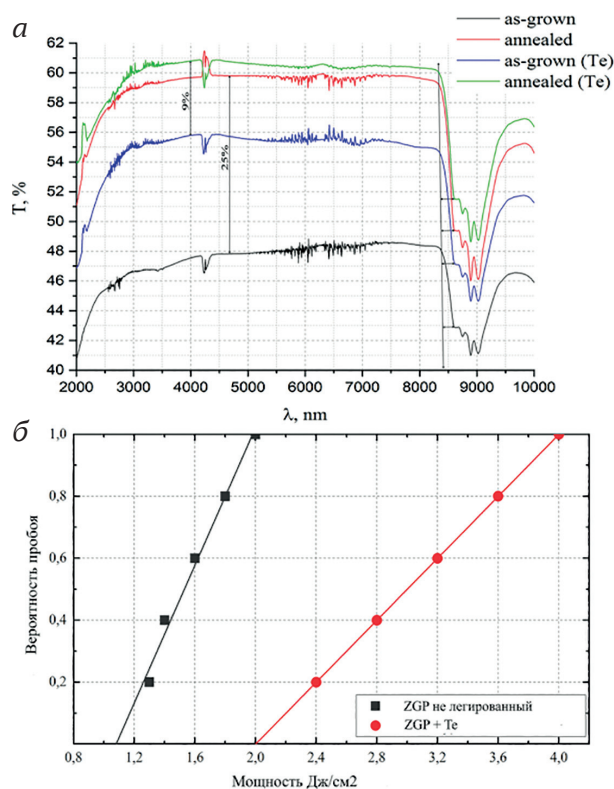
Вероятность оптического пробоя была получена путем построения графика кумулятивной вероятности в зависимости от мощности энергии оптического пробоя. За значение порога оптического пробоя (W_{0d}) принималась величина мощности энергии, соответствующая аппроксимации вероятности оптического пробоя к нулевому значению.

Исходя из данных, полученных при построении графиков вероятности оптического пробоя, образец монокристалла ZGP, легированный Te, показывает значительное увеличение порога оптического пробоя — с 1,1 до 2,0 Дж/см² (см. рисунок, б).

В результате было установлено, что объемное легирование теллуром в большой концентрации положительно сказывается на оптических свойствах дифосфида цинка-германия, приводит к росту пропускания в средней ИК-области спектра и значительному увеличению лучевой прочности. Увеличение порога оптического пробоя при введении примеси халькогенов можно объяснить созданием дополнительных каналов диссипации энергии за счет процессов излучательной и быстрой безызлучательной релаксации через примесные энергетические уровни. Увеличение пропускания можно объяснить тем, что при увеличении концентрации электронов в сильнолегированном полупроводнике быстро наступает вырождение электронного газа и уровень Ферми поднимается выше дна уровня зоны проводимости. Поскольку состояния, расположенные ниже уровня Ферми, уже заполнены, то поглощение, связанное с переходами на эти уровни, уже невозможно.

Литература

1. Nikogosyan D. N. Nonlinear optical crystals: A complete survey. N. Y.: Springer, 2005.
2. Dmitriev V. G., Gurzadyan G. G., Nikoghosyan D. N. Handbook of Nonlinear Optical Crystals, 2nd. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1995.
3. Рудь В. Ю. Оптоэлектронные явления в дифосфиде цинка и германия // Физ. и Техн. ПП. 1994. Т. 28. С. 1105.
4. Водопьянов К. Л., Воеводин В. Г., Грибенюков А. И., Кулевский Л. А. Высокоэффективная пикосекундная параметрическая суперлюминесценция в кристалле $ZnGeP_2$ в диапазоне 5–6,3 мкм // Кв. эл. 1987. Т. 14. С. 1815–1819.
5. Henriksson M., Tiihonen M., Pasiskevicius V., Laurell F. $ZnGeP_2$ parametric oscillator pumped by a line width narrowed parametric 2 μ m source // Opt. Lett. 31. 2006. P. 1878–1880.
6. Vodopyanov K. L., Ganikhanov F., Maffetone J. P. et al. $ZnGeP_2$ optical parametric oscillator with 3.8–12.4 μ m tenability // Opt. Lett. 2000. Vol. 25. P. 841–843.



Спектральные зависимости пропускания для нелегированного и объемно-легированных Te образцов в диапазоне длин волн 2000–10000 нм (а).

Приведены зависимости без постростового отжига и после него. Зависимость вероятности оптического пробоя от мощности энергии падающего лазерного излучения с длиной волны 2,1 мкм. Аппроксимированные графики черного и красного цвета соответствуют образцам $ZnGeP_2$ — нелегированному и легированному Te соответственно (б)