

## Влияние структурного несовершенства кристаллов ванадатов иттрия, гадолиния и смешанных ванадатов редкоземельных элементов на генерационные характеристики лазеров с полупроводниковой накачкой

Г.Ю.Орлова, В.И.Власов, Ю.Д.Заварцев, А.И.Загуменный, И.И.Калашникова, С.А.Кутовой, В.С.Наумов, А.А.Сироткин

*Впервые обнаружена зависимость эффективности генерации лазеров с полупроводниковой накачкой и активными элементами из кристаллов ортованадатов иттрия, гадолиния и смешанных ванадатов иттрия-гадолиния и иттрия-скандия (ванадатов редкоземельных элементов) от степени структурного несовершенства (качества) кристаллов. Это позволяет предсказывать генерационные параметры на стадии заготовок без изготовления активных элементов.*

**Ключевые слова:** ванадат иттрия, ванадат гадолиния, смешанные ванадаты редкоземельных элементов, структурное несовершенство, генерационные параметры.

Применение кристаллов ванадатов иттрия [1–5], гадолиния [4, 6] и смешанных ванадатов редкоземельных элементов (РЗЭ) [7–9] в качестве активных элементов в лазерах с полупроводниковой накачкой накладывает определенные требования на их качество. В настоящее время в литературе практически нет данных по исследованию качества кристаллов ванадатов иттрия и смешанных ванадатов РЗЭ рентгеновскими методами и отсутствуют сведения о связи качества таких элементов с их генерационными характеристиками. Поэтому исследование качества кристаллических активных элементов из ванадатов РЗЭ и влияния качества кристаллов на генерационные параметры лазеров с полупроводниковой накачкой представляет научный и практический интерес.

В настоящей работе с помощью рентгеновского дифрактометра [10] исследовано качество кристаллов ванадатов иттрия, гадолиния и смешанных ванадатов иттрия-гадолиния и иттрия-скандия, легированных ионами неодима; использовалось излучение линии  $\text{CuK}_{\alpha 1}$  с длиной волны 1.54 Å. Концентрация неодима во всех кристаллах составляла 0.5 ат.%.

Качество кристаллов определялось по кривым качания – зависимостям интенсивности дифрагированного рентгеновского излучения от угла поворота образца вокруг максимума интенсивности [11–13]. Использовались отражения от плоскостей (100), (110) и (001). Характерным параметром кривой качания является полуширина максимума интенсивности. В использованной однокристалльной рентгенооптической схеме аппаратная функция (минимальная полуширина кривой качания) составляет 1.6'. Поскольку у всех исследованных кристаллов вана-

датов РЗЭ полуширина кривой качания составляла от 2 до 19', использованная однокристалльная схема подходила для первоначальной отбраковки кристаллов по качеству. По уширению кривой качания можно судить о степени мозаичности монокристалла, т.е. о степени разупорядоченности кристаллической решетки исследуемого материала.

В работе были исследованы кристаллы  $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{GdVO}_4:\text{Nd}^{3+}$ , а также кристаллы смешанных ванадатов  $\text{Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Gd}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$  и  $\text{Y}_{0.97}\text{Sc}_{0.03}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$ . Известно, что изоморфное замещение влияет на теоретическую полуширину кривой качания. Однако при использовании кристаллов ванадатов РЗЭ этим влиянием можно пренебречь, т.к. мозаичность кристаллической структуры гораздо сильнее влияет на полуширину кривой качания, чем разупорядоченность структуры вследствие изоморфного замещения. Поэтому сравнение влияния мозаичности кристаллической решетки ванадатов РЗЭ на генерационные характеристики проводилось независимо от состава кристаллов.

Всего было изучено более 50 кристаллов ортованадатов РЗЭ. В настоящей работе представлены результаты исследований типичных образцов кристаллов. Рентгеновские исследования показали, что все изученные кристаллы ванадатов РЗЭ были разного качества. По структурному несовершенству и эффективности лазерной генерации они были условно разделены на три группы: кристаллы хорошего качества, у которых полуширина кривой качания  $\Delta\theta$  не превышает 4', а эффективность генерации  $\eta$  составляет 40%–60%; кристаллы удовлетворительного качества с  $\Delta\theta = 4\text{--}6'$  и  $\eta \sim 35\%$  и кристаллы неудовлетворительного качества с  $\Delta\theta > 6'$  и  $\eta = 10\text{--}20\%$ . Под эффективностью генерации подразумевается отношение выходной мощности лазерного излучения к поглощенной мощности накачки в активном элементе. На рис.1 в качестве примера приведены кривые качания двух кристаллов –  $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  и  $\text{Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$ .

Некоторые из исследованных кристаллов (либо их отдельные области) имели блочную структуру, которая определялась наличием отдельных пиков на кривой кача-

Г.Ю.Орлова, И.И.Калашникова, В.С.Наумов. ФГУП «НИИ “Полнос” им. М.Ф. Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3  
В.И.Власов, Ю.Д.Заварцев, А.И.Загуменный, С.А.Кутовой, А.А.Сироткин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: vlasov@lsk.gpi.ru

Поступила в редакцию 22 ноября 2011 г., после доработки – 13 февраля 2012 г.

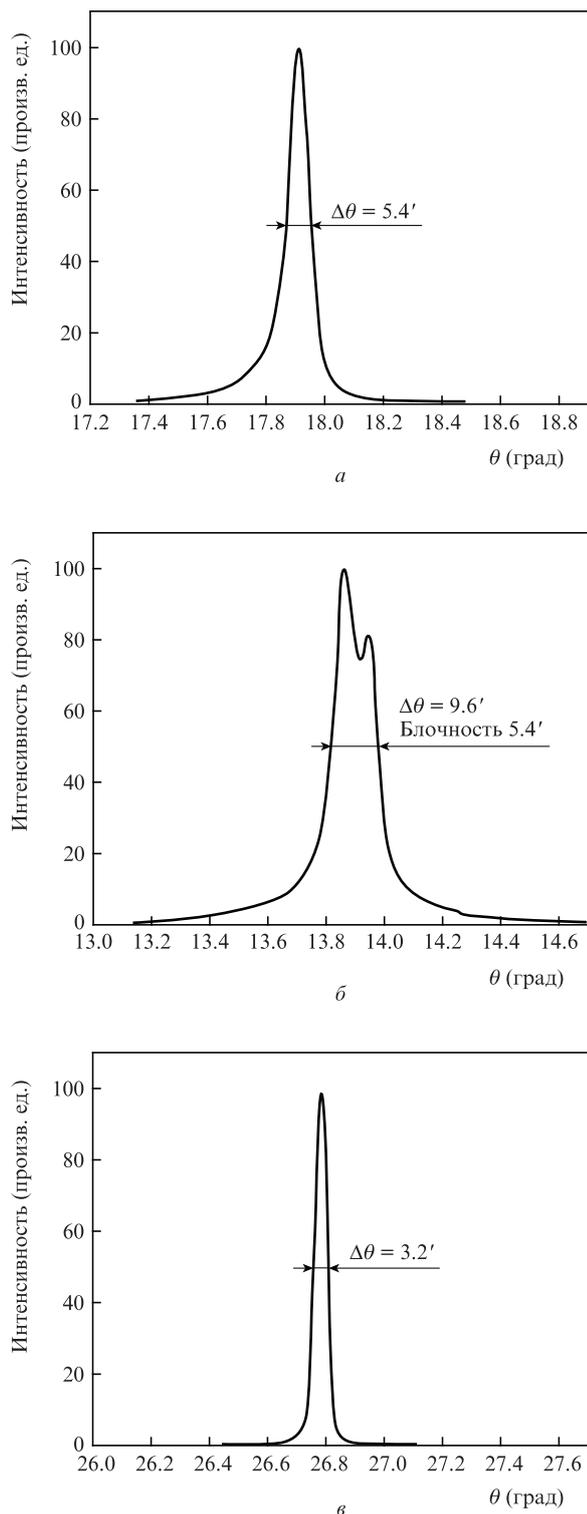


Рис.1. Типичные кривые качания активных элементов в случае кристалла  $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  удовлетворительного качества ( $\Delta\theta = 5.4'$ ) (а), кристалла  $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  неудовлетворительного качества ( $\Delta\theta = 9.6'$ ) (б) и кристалла  $\text{Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$  хорошего качества ( $\Delta\theta = 3.2'$ ) (в).

ния. Разориентация блоков в некоторых образцах составляла от 3 до 40'. Такие кристаллы мы отнесли к третьей группе (неудовлетворительное качество), т. к. изготовленные из них элементы имели очень низкую эффективность генерации. Поэтому блочные кристаллы следует отбраковывать уже на стадии заготовок и не использовать для изготовления активных элементов.

Генерационные характеристики кристаллов изучались в непрерывном режиме генерации с продольной диодной накачкой. Лазерный диод (длина волны  $\lambda = 808$  нм) генерировал непрерывное излучение в одной поперечной моде  $\text{TEM}_{00}$  с максимальной мощностью 16 Вт на выходе волоконного вывода (диаметр 100 мкм,  $\text{NA} = 0.22$ ). Излучение накачки фокусировалось в активном элементе в пятно диаметром 200 мкм. Резонатор был образован плоским глухим зеркалом и выходным зеркалом с коэффициентом пропускания 13%. Относительная погрешность измерений составляла не более  $\pm 15\%$ .

На рис.2,а приведены зависимости мощности излучения лазеров на основе активных элементов из кристаллов  $\text{GdVO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Gd}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  от мощности накачки.

Сравнение генерационных характеристик активных элементов из кристаллов иттрия, гадолиния и смешанных ванадатов  $\text{Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Gd}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Y}_{0.97}\text{Sc}_{0.03}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$  со степенью их структурного несовершенства (по полуширине кривой качания, полученной в рентгеновских исследованиях активных элементов) позволило установить определенную зависимость между этими

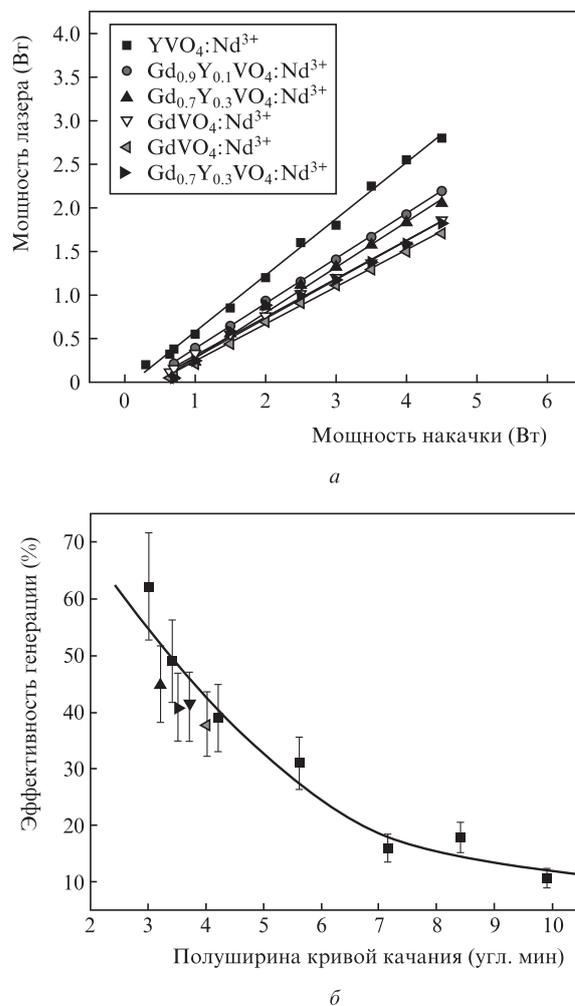


Рис.2. Зависимости от поглощенной мощности накачки мощности излучения лазеров на основе активных элементов из кристаллов  $\text{GdVO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Gd}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$  и  $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  (а), а также зависимости эффективности генерации от полуширины кривых качания активных элементов  $\text{GdVO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Gd}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  и  $\text{Y}_{0.97}\text{Sc}_{0.03}\text{VO}_4:\text{Nd}^{3+}$  при мощности накачки 4.5 Вт (б).

параметрами. Зависимость эффективности генерации от полуширины кривых качания образцов при мощности накачки 4.5 Вт представлена на рис.2,б. Видна однозначная зависимость эффективности лазерной генерации активных элементов из кристаллов ванадатов РЗЭ от степени их структурного несовершенства, а именно от полуширины кривой качания рентгеновского отражения.

Полученная зависимость дает возможность прогнозировать генерационные характеристики кристаллов по рентгеновским исследованиям их качества без изготовления активных элементов и проведения экспериментов по лазерной генерации, что намного упрощает и удешевляет процесс получения качественных активных элементов из кристаллов ванадатов редкоземельных элементов.

1. O'Connor J.R. *Appl. Phys. Lett.*, **9** (11), 407 (1966).
2. Kalisky Y. *Opt. Mater.*, **13**, 135 (1999).
3. Чижиков В.И. *Соросовский образовательный журн.*, **7** (8), 103 (2001).
4. Кравцов Н.В. *Квантовая электроника*, **31** (8), 661 (2001).
5. Wu S. et al. *J. Crystal Growth*, **266**, 496 (2004).
6. Загуменный А.И., Остроумов В.Г., Щербаков И.А., Йенсен Т., Мейен Я.П., Хубер Г. *Квантовая электроника*, **19** (12), 1149 (1992).
7. Сироткин А.А., Власов В.И., Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Кутовой С.А. *Квантовая электроника*, **41** (7), 584 (2011).
8. Liu J., Wang Zh., Meng X., Shao Z., Ozygus B., Ding A., Weber H. *Opt. Lett.*, **28** (23), 2330 (2003).
9. Власов В.И., Гарнов С.В., Заварцев Ю.Д., Загуменный А.И., Кутовой С.А., Сироткин А.А., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **37** (10), 938 (2007).
10. Миркин Л.И. *Рентгеноструктурный анализ. Справочное руководство* (М.: Наука, 1976, с.9).
11. Иверонова В.И., Ревкевич Г.П. *Теория рассеяния рентгеновских лучей* (М.: изд-во Моск. ун-та, 1976, с.187).
12. Бублик В.Т., Дубровина А.Н. *Методы исследования структуры полупроводников и металлов* (М.: Металлургия, 1978, с.167).
13. Klassen A.V., Kochurikhin V.V., Ivanov M.A., Matsucura M., Nakamura O., Miyamoto A., Furukawa Y., Orlova G.Yu. *J. Crystal Growth*, **310** (11), 2895 (2008).