

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ $\text{Er:KGd}_x\text{Yb}_y\text{Y}_{(1-x-y)}(\text{WO}_4)_2$ ДЛЯ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ЛАЗЕРОВ

Дернович О.П.¹, Курильчик С.В.¹, Кисель В.Э.¹, Кулешов Н.В.¹
Гурецкий С.А.², Колесова И.М.²

¹НИЦ оптических материалов и технологий БНТУ

²ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»
Минск, Республика Беларусь

Твердотельные лазеры на основе монокристаллических слоев, называемые волноводными, сочетают в себе преимущества как волоконных, так и объемно-кристаллических лазеров. Они характеризуются пространственной согласованностью мод резонатора и накачки, отличаются высокими коэффициентами усиления, имеют низкий порог генерации, и могут использоваться вместе с другими оптическими компонентами в составе современных интегральных оптических систем. В настоящее время для создания волноводных лазеров стали активно применяться монокристаллические слои калий-редкоземельных вольфраматов $\text{KRe}(\text{WO}_4)_2$ ($\text{Re}=\text{Y}, \text{Gd}, \text{Lu}$) [1-3]. Указанные моноклинные кристаллы, активированные ионами редкоземельных элементов, обладают большими сечениями поглощения и стимулированного испускания, допускают возможность высокого уровня легирования примесными ионами (до 100 ат.%), имеют широкие спектральные линии при активации редкоземельными ионами, а также характеризуются сравнительно высокими показателями преломления ($\sim 2,0$ - $2,1$) [1,4]. В случае использования ионов Er^{3+} в качестве активных, их концентрация в таких матрицах не может превышать 1,5-2,0 ат.% по причине наличия ап-конверсионных потерь [5], что не позволит достичь необходимой разницы показателей преломления слоя и подложки для получения волноводного режима. В работе [6] был предложен подход, позволяющий увеличить показатель преломления слоя и добиться хорошего согласования кристаллической решетки подложки и слоя, состоящий в дополнительном легировании слоя оптическими инертными ионами, такими как Gd^{3+} и Lu^{3+} . Основная задача исследователей при этом заключается в выборе оптимального химического состава слоя, обеспечивающего необходимые значения показателя преломления и согласование кристаллической структуры слоя и подложки для получения образцов требуемой толщины без трещин и дефектов.

Цель данной работы заключалась в расчете химического состава и получении методом жидкофазной эпитаксии на подложке кристалла $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ (KYW) монокристаллических слоев $\text{KGd}_x\text{Yb}_y\text{Y}_{(1-x-y)}(\text{WO}_4)_2$, легированных ионами Er^{3+} , для использования в качестве активных сред планарных волноводных лазеров. Для этого

была разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать параметры кристаллической ячейки и показатель преломления слоя $\text{KGd}_x\text{Yb}_y\text{Y}_{(1-x-y)}(\text{WO}_4)_2$ при различном соотношении ионов Gd и Yb . Расчет производился на основании выражений для размеров кристаллической ячейки вдоль кристаллических осей a , b и c , описанных в [7]. Как было показано в [7], для получения свободных от трещин слоев требуется рассогласование по размерам кристаллической решетки слоя и подложки не более $\sim 0,08\%$.

На рисунке 1 представлено соотношение между содержанием ионов Gd и Yb в слое $\text{KGd}_x\text{Yb}_y\text{Y}_{(1-x-y)}(\text{WO}_4)_2$, обеспечивающее выполнение условия по рассогласованию параметров решетки при изменении содержания ионов Gd^{3+} в пределах от 0 до 60 %.

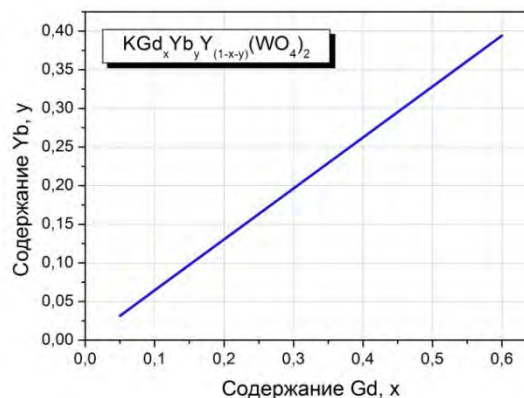


Рисунок 1 – Содержание ионов Gd и Yb в слое $\text{KGd}_x\text{Yb}_y\text{Y}_{(1-x-y)}(\text{WO}_4)_2$, обеспечивающее минимальное рассогласование параметров кристаллической решетки слоя и подложки $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$

На рисунке 2 показано, как изменяется разность показателя преломления слоя и подложки $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$, при различном содержании ионов Gd^{3+} в слое на длине волны 1,6 мкм. При этом содержание ионов Yb^{3+} в слое линейно зависит от содержания Gd^{3+} , как показано на рисунке 1.

По результатам выполненных расчетов выбран химический состав экспериментального образца слоя – $\text{Er}_{0,01}:\text{KGd}_{0,2}\text{Yb}_{0,148}\text{Y}_{0,642}(\text{WO}_4)_2$. Разность показателя преломления подложки и слоя при этом составляет 0,004-0,006.

Рост монокристаллического слоя $\text{Er}_{0,01}:\text{KGd}_{0,2}\text{Yb}_{0,148}\text{Y}_{0,642}(\text{WO}_4)_2$ на подложке KYW

производился методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ).

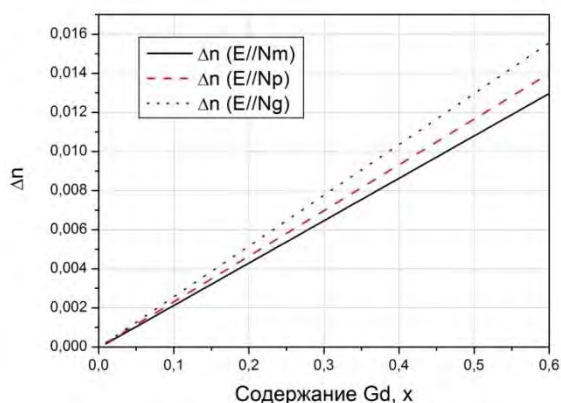


Рисунок 2 – Разность показателя преломления на длине волны 1,6 мкм слоя $\text{KGd}_x\text{Yb}_y\text{Y}_{(1-x-y)}(\text{WO}_4)_2$ и подложки $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ при различном содержании ионов Gd в слое

В результате был получен образец монокристаллического слоя указанного состава на подложке KYW толщиной 250 мкм и площадью 25×20 мм, выращенный вдоль кристалло-графической оси **b**, совпадающей с осью оптической индикатрисы N_p . Для устранения клиновидности образец подвергался тонкой полировке. Полученная в результате толщина слоя составила 180 мкм. На рисунке 3 приведена фотография торца изготовленного слоя, сделанная через микроскоп Полам РП-1 (ЛОМО).

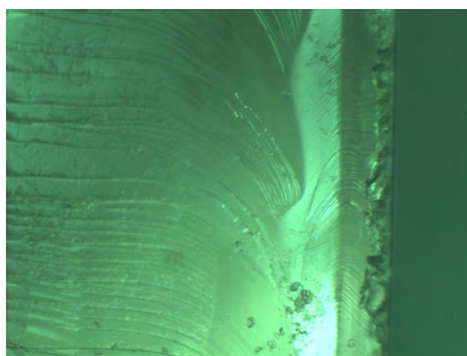


Рисунок 3 – Фотография торца выращенного монокристаллического слоя $\text{Er}_{0,01}:\text{KGd}_{0,2}\text{Yb}_{0,148}\text{Y}_{0,642}(\text{WO}_4)_2$

Спектр поглощения образца, измеренный на спектрофотометре Cary 5000 (Varian) в спектральном диапазоне около 1,45-1,65 мкм для излучения, поляризованного вдоль осей оптической индикатрисы N_m и N_g , приведен на рисунке 4. На основании анализа спектров коэффициента поглощения слоя в сравнении с литературными данными, было установлено, что концентрация ионов Er^{3+} в образце составляет $9,15 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что соответствует 1,4 ат. %.

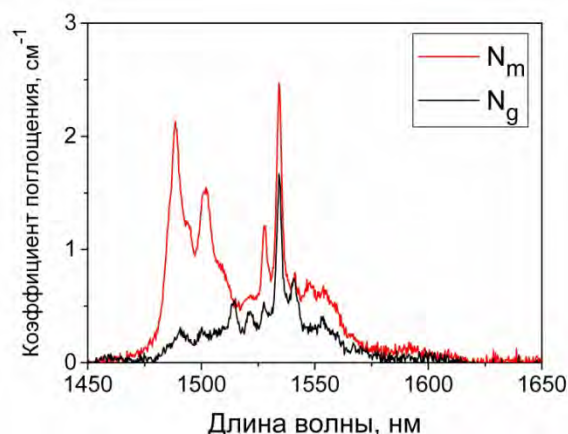


Рисунок 4 – Спектр поглощения выращенного монокристаллического слоя $\text{Er}_{0,01}:\text{KGd}_{0,2}\text{Yb}_{0,148}\text{Y}_{0,642}(\text{WO}_4)_2$

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет рассчитывать параметры кристаллической ячейки и показатель преломления слоя $\text{KGd}_x\text{Yb}_y\text{Y}_{(1-x-y)}(\text{WO}_4)_2$ при различном соотношении ионов Gd и Yb. Методом жидкофазной эпитаксии получен образец слоя $\text{KGd}_{0,2}\text{Yb}_{0,148}\text{Y}_{0,642}(\text{WO}_4)_2$ с содержанием ионов Er^{3+} 1,4 ат. %, толщиной 180 мкм, который может использоваться в качестве активной среды планарных волноводных лазеров, излучающих в спектральной диапазоне около 1,5 мкм.

1. Double Tungstate Lasers: From Bulk Toward On-Chip Integrated Waveguide Devices / M. Pollnau [et.al.] // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2007. – Vol.13, No.3. – P. 661-671.
2. Tm:KY(WO₄)₂ waveguide laser / S. Rivier [et.al.] // Optics express. – 2007. – Vol.15, No.9. – P. 5885-5892.
3. Yb-doped KY(WO₄)₂ planar waveguide laser / Y.E. Romanyuk [et.al.] // Optics letters. – 2006. – Vol. 31, No.1. – P. 53-55.
4. Pulsed laser operation of Yb-doped KY(WO₄)₂ and KGd(WO₄)₂ / N.V. Kuleshov [et.al.] // Optics letters. – 1997. – Vol.22, No.17. – P. 1317-1319.
5. In-band pumped room-temperature Er:KY(WO₄)₂ laser emitting around 1.6 μm / K. Gorbachenya [et.al.] // Laser Physics. – 2013. – Vol.23. – P. 125005.
6. Lu, Gd codoped KY(WO₄)₂:Yb epitaxial layers: Towards integrated optics based on KY(WO₄)₂ / F. Gardillou [et.al.] // Optics letters. – 2007. – Vol.32, No.5. – P. 488-490.
7. Engineering lattice matching, doping level, and optical properties of KY(WO₄)₂:Gd, Lu, Yb layers for a cladding-side-pumped channel waveguide laser / S. Aravazhi [et.al.] // Appl. Phys. B. – 2013. – Vol. 111. – P. 433-446.