

СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ФИЛАМЕНТА В КРИСТАЛЛЕ ВАНАДАТА ИТТРИЯ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ ИК ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

И.А. Ходасевич¹⁾, Н.В. Ржеуцкий¹⁾, Е.В. Луценко¹⁾,

П.В. Емельянчик²⁾, П.А. Апанасевич¹⁾, А.С. Грабчиков¹⁾

¹⁾ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,

пр. Независимости 68-2, 220072 Минск, Беларусь, *i.khodasevich@dragon.bas-net.by,*

m.rzheutski@ifanbel.bas-net.by, e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by,

apanasevich.pavel@gmail.com, a.grabtchikov@dragon.bas-net.by

²⁾Белорусский государственный университет,

пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, *fiz.emelyanc@bsu.by*

В докладе представлены данные по экспериментальному исследованию спектральных и временных характеристик люминесценции филамента в кристалле ванадата иттрия (YVO₄), возникающей вследствие возбуждения фемтосекундными импульсами с $\lambda = 1040$ нм. Кристалл YVO₄ обладает высоким значением нелинейного показателя преломления ($n_2 = 21.6 \cdot 10^{-16}$ см²/Вт). Его использование представляется перспективным для преобразования инфракрасного фемтосекундного излучения в видимый диапазон спектра, поэтому характеристика люминесценции филамента представляет интерес. Полученные данные показывают, что зарегистрированный спектр люминесценции соответствует испусканию из зоны проводимости. Спектр люминесценции находится в области 370 - 535 нм. Полное время затухания сигнала люминесценции составляет около 5 мксек. Кривая затухания может быть представлена быстрой и медленной составляющими с характерными временами суб-микросекундного и микросекундного диапазонов – 0.26 мксек и 1.8 мксек соответственно.

Ключевые слова: инфракрасный фемтосекундный импульс; филамент; кристалл; YVO₄; люминесценция; время затухания.

SPECTRAL-TEMPORAL CHARACTERISTICS OF FILAMENT LUMINESCENCE IN YTTRIUM VANADATE CRYSTAL AT IR FEMTOSECOND PULSES EXCITATION

I.A. Khodasevich¹⁾, M.V. Rzheutski¹⁾, E.V. Lutsenko¹⁾,

P.V. Emelyanchik²⁾, P.A. Apanasevich¹⁾, A.S. Grabtchikov¹⁾

¹⁾B.I. Stepanov Institute of Physics of the National academy of sciences of Belarus,

68-2 Nezavisimosti Ave., 220072 Minsk, Belarus, *i.khodasevich@dragon.bas-net.by,*

m.rzheutski@ifanbel.bas-net.by, e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by,

apanasevich.pavel@gmail.com, a.grabtchikov@dragon.bas-net.by

²⁾Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus,

fiz.emelyanc@bsu.by

We present at the first time the data on the spectral and temporal characterization of filament luminescence in yttrium vanadate crystal (YVO₄) at femtosecond IR excitation. YVO₄ is attractive for applications in the femtosecond nonlinear optics as a medium with high value of nonlinear refraction coefficient ($n_2 = 21.6 \cdot 10^{-16}$ cm²/W). Nonlinear refraction can be used to strong focus femtosecond pulses propagating through medium. Intensive laser radiation and medium create so called “filament”. Filament can propagate on the long distance and is characterized by strong luminescence. The Yb:KYW laser pulses with 200 femtosecond duration, central wavelength near 1040 nm, repetition rate being 35 kHz and mean power of equal 1W were focused into the crystal. To avoid strong thermal effects the laser radiation was decreased by the mechanical chopper and polarizing attenuator. The luminescence signal from lateral side of the crystal was collected by the fiber and directed to the spectrometer MDR-23 with streak camera Hamamatsu C4334. The streak camera registered the spectrums and luminescence decay simultaneously.

Obtained data demonstrate the broad spectral band in the range of 370-535 nm. Its comparison with traditional spectrum of YVO_4 luminescence excited by UV lamp radiation at 320 nm showed a very similar their forms, spectral range and maximum intensity peak locations. It allows us to make conclusion that the spectrum filament luminescence corresponds to $[VO_4]^{3-}$ -complexes emission.

The registered temporal decay trace has the near 5 microsecond duration. Its decay curve can be approximate by the two exponents with the fast (sub microsecond) and slow (microsecond) scales. These decay times are equals to 0.26 μ s and 1.8 μ s accordingly and differ from lifetimes of $[VO_4]^{3-}$ complexes luminescence, exciting CW UV or nanosecond VIS-IR radiation at room temperature (13-30 μ s). So the filament luminescence corresponds to the conduction band emission, but its excitation mechanism has to be investigated.

Keywords: infrared femtosecond pulse; filament; crystal; YVO_4 ; luminescence; decay time.

Введение

Распространение интенсивного фемтосекундного импульса в оптической среде может сопровождаться самофокусировкой лазерного пучка [1] и генерацией суперконтинуума [2]. В последнее время обнаружено и широко исследуется в таких условиях формирование особой пространственной структуры, получившей название «филамент» и обуславливающей локализованное распространение фемтосекундного излучения в среде на расстояниях, превышающие длину Рэлея. При определенных условиях нелинейные процессы, происходящие в пространственной области филамента, сопровождаются формированием низкотемпературной плазмы [3]. Развитие плазмы вносит изменения в нелинейность среды и влияет на преобразование фемтосекундного излучения [4].

Интерес к получению короткоимпульсного излучения длительностью вплоть до нескольких периодов поля, генерации электронов в объеме взаимодействия, реализуемых в условиях одновременного развития многих нелинейных процессов [3, 4], стимулируют изучение и подробную характеризацию спектрально-временных свойств люминесценции филамента, которые дают информацию о процессах, протекающих в среде, как во время действия фемтосекундного импульса, так и после его прекращения.

Одной из перспективных сред для такого исследования, обладающих высоким значением нелинейного показателя преломления, является кристалл ванадата иттрия (YVO_4) ($n_2 = 21.6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$) [5, 6],

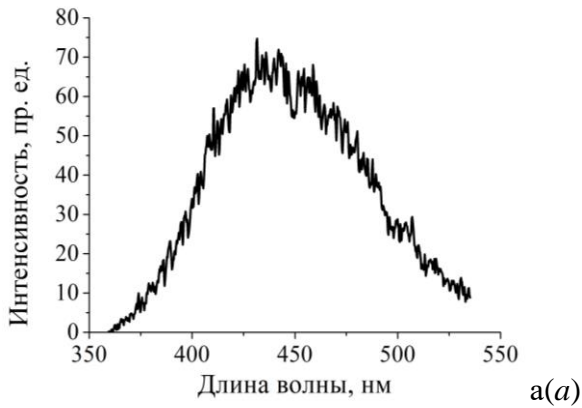
известный также как комбинационно-активная и лазерная среда [7, 8].

Результаты и их обсуждение

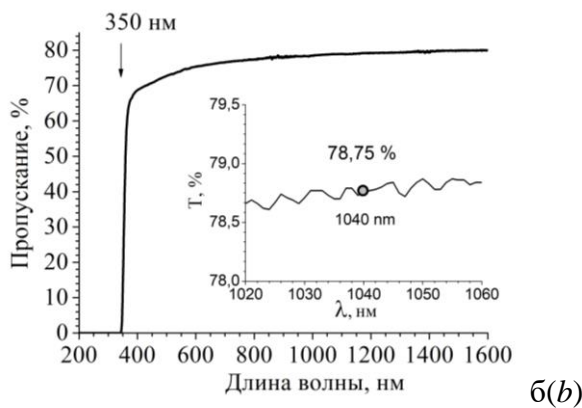
В докладе представлены результаты экспериментальных исследований временных характеристик люминесценции, возбуждаемой излучением фемтосекундной лазерной системы в кристалле YVO_4 в пространственной области филамента. Лазерная система включала генератор фемтосекундных импульсов на кристалле $Yb:KYW$, производящий последовательность фемтосекундных импульсов с центральной длиной волны 1040 нм при частоте следования 86 МГц. Часть импульсов с уменьшенной частотой следования направлялась в регенерационный усилитель, который производил выходное излучение средней мощностью 1 Вт, частотой импульсов 35 кГц и длительностью около 200 фемтосекунд. Чтобы избежать влияния тепловых эффектов, средняя мощность пучка ослаблялась выделением части импульсов механическим ослабителем. Импульсная мощность варьировалась поляризационным ослабителем, после чего пучок фокусировался ахроматической оптикой в кристалл при распространении вдоль оптической оси a . При этом в кристалле формировался филамент, сигнал люминесценции которого снимался через боковую поверхность кристалла с помощью оптоволоконной системы и подавался на спектрометр МДР-23 со скоростной камерой Hamamatsu C4334. Для сравнения также был зарегистрирован спектр люминесценции образца при ламповом возбуждении.

Спектральные характеристики кри-

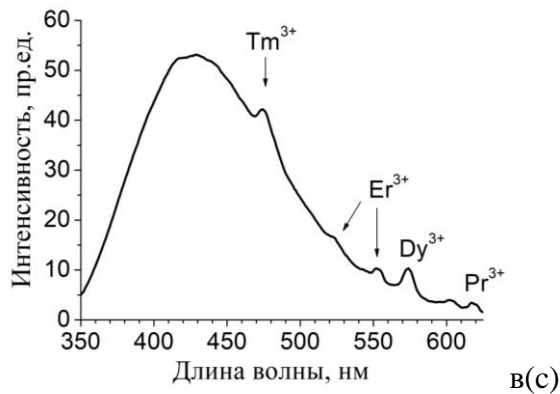
сталла YVO_4 и исследуемой в нем люминесценции приведены на рисунке 1.



а(а)



б(б)



в(в)

Рис. 1. Спектры кристалла YVO_4 : а – люминесценции филамента; б – пропускания в диапазоне 200 – 1600 нм; в – люминесценции ($\lambda_{\text{возб}} = 320$ нм)
Fig. 1. Spectra of YVO_4 crystal: а – filament luminescence; б – transmission in 200 – 1600 nm range; в – luminescence ($\lambda_{\text{exc}} = 320$ nm)

Спектр люминесценции, возбуждаемой фемтосекундным излучением, и приведенный на рисунке 1а, простирается от 370 до 535 нм. Его ширина по полувысоте достигает около 76 нм. Из приведенных данных по пропусканию кристалла YVO_4 (рисунке 1 б) видно, что спектральный

диапазон до 350 нм соответствует поглощению в зоне проводимости. Форма спектра люминесценции филамента (рисунке 1а) и положение его максимума соответствует спектру люминесценции YVO_4 , возбуждаемой в зону проводимости излучением лампы с $\lambda = 320$ нм. Это позволяет сделать заключение о том, что люминесценция в области филамента обусловлена процессами, происходящими в кристаллической решетке [9, 10], в том числе возбуждением свободных носителей заряда [4] или высвобождением экситонов [11]. Несколько слабых пиков, присутствующих на длиноволновом крае в спектрах фундаментальной люминесценции YVO_4 (рисунке 1в) и люминесценции филамента (рисунке 1а), соответствуют испусканию низкоконцентрированных примесей редкоземельных ионов в образце, которые также способны участвовать в процессах передачи энергии возбуждения [12, 10].

Результат измерения временных характеристик показан на рисунке 2.

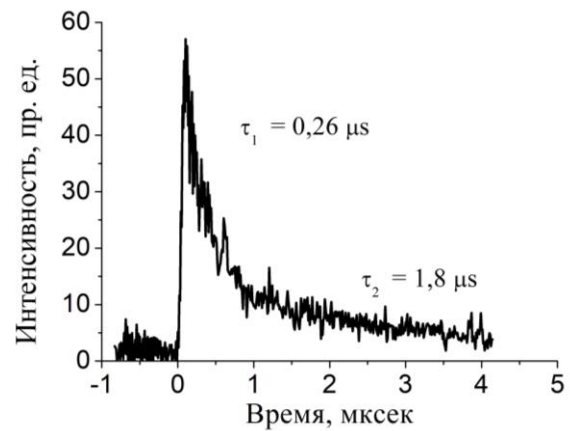


Рис. 2. Сигнал временной зависимости интенсивности люминесценции филамента. Частота следования лазерных импульсов 35 кГц
Fig. 2. Temporal dependence of filament luminescence intensity. Repetition rate of laser pulses is 35 kHz

Время затухания характеризуется длительностью около 5 мкс (рисунке 2). Кривая затухания может быть аппроксимирована двумя экспонентами. Первая характеризует быструю стадию затухания с характерным временем 0.26 мксек. Вторая экспонента демонстрирует более медлен-

ный режим длительностью 1.8 мксек. Поскольку время рекомбинации электронов осуществляется на временах сравнимых с длительностью используемых нами фемтосекундных импульсов возбуждения [4, 13], то эти характерные времена указывают на процессы, протекающие уже после действия импульса.

Время жизни люминесценции ванадатных комплексов $[VO_4]^{3-}$, измеренное при комнатной температуре для термолюминесценции [9] и при возбуждении наносекундными импульсами видимого излучения [10], составляет 13 и 30 мксек соответственно, а временные зависимости являются одноэкспоненциальными. Микросекундный масштаб полученных нами данных качественно коррелирует с имеющимися представлениями о времени затухания интенсивности люминесценции зоны проводимости кристаллических диэлектриков при возбуждении фемтосекундными импульсами с $\lambda = 800$ нм [14]. Наблюдаемые различия указывают на отличие механизма возбуждения люминесценции филамента, изучение которого является целью наших дальнейших исследований.

Заключение

Изучены спектральные и временные характеристики люминесценции филамента в кристалле YVO_4 , возбуждаемой фемтосекундными лазерными импульсами. Спектр люминесценции расположен в области 370-545 нм, длительность времени затухания составила более 5 мксек. Насколько нам известно, данные, характеризующие люминесценцию фемтосекундного филамента в кристалле YVO_4 , получены впервые. Приводимые результаты важны для создания новых твердотельных преобразователей фемтосекундных импульсов.

Библиографические ссылки

1. Ахманов С.А., Сухоруков А.П., Хохлов Р.В. Самофокусировка и дифракция света в нели-

нейной среде. *Успехи физических наук* 1967; 93(9): 19-70.

2. Alfano R.R., Shapiro S.L. Observation of Self-Phase Modulation and Small-Scale Filaments in Crystals and Glasses. *Physical Review Letters* 1970; 24(11): 592-594.
3. Couairon A., Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media. *Physics Reports* 2007; 441: 47-190.
4. Bergé L., Skupin S., Nuter R., Kasparian J., Wolf J.-P. Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media. *Reports of Progress in Physics* 2007; 70: 1633-1713.
5. Vodchits A.I., Orlovich V.A., Apanasevich P.A. Nonlinear refractive index of vanadate crystals in the near IR region. *Journal of Applied Spectroscopy* 2012; 78: 918-921.
6. Bradler M., Baum P., Riedle E. Femtosecond continuum generation in bulk laser host materials with sub- μ J pump pulses. *Applied Physics* 2009; B 97: 561-574.
7. Burakevich V.N., Lisinetskii V.A., Grabtchikov A.S., Demidovich A.A., Orlovich V.A., Matrosov V.N. Diode-pumped continuous-wave Nd:YVO₄ laser with self-frequency Raman conversion. *Applied Physics* 2007; B 86(3): 511-514.
8. Agnesi A., Pennacchio C., Reali G.C. High-power diode-pumped picosecond Nd³⁺:YVO₄ laser. *Optics Letters* 1997; 22(21): 1645-1647.
9. Ronde H., Blasse G. The nature of the electronic transitions of the vanadate group. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry* 1978; 40(2): 215-219.
10. Ryba-Romanowski W., Golab S., Solarz P., Dominiak-Dzik G., Lukaszewicz T. Anti-Stokes emission in undoped YVO₄. *Applied Physics Letters* 2002; 80: 1183-1185.
11. Hsu Ch., Powell R.C. Energy transfer in europium doped yttrium vanadate crystals. *Journal of Luminescence* 1975; 10: 273-293.
12. Khodasevich I.A., Kornienko A.A., Pershukovich P.P., Aseev V.A., Khodasevich M.A., Grabtchikov A.S. Upconversion of IR Radiation in a KGd(WO₄)₂ Crystal on Erbium and Thulium Ions in Trace Concentrations: Change of Excitation Schemes and Energy Transfer Through the Crystal Lattice. *Journal of Applied Spectroscopy* 2018; 84: 986-994.
13. Miirk V., Yaroshevich N. Exciton and recombination processes in YAG crystals. *Journal of Physics: Condensed Matter* 1995; 7: 5857-5864.
14. Kononenko V.V., Zavedeev E.V., Okhrimchuk A.G., Konov V.I. Excitation of an electronic subsystem of YAG crystal with femtosecond laser pulses. *Laser Physics Letters* 2017; 14: 066002.

References

1. Akhmanov S.A., Sukhorukov A.P., Khokhlov R.V. Samofokusirovka I difrakciya sveta v

- nelinejnoj srede. [Self-focusing and diffraction of light in nonlinear medium]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 1967; 93(9): 19-70. (In Russian).
- Alfano R.R., Shapiro S.L. Observation of Self-Phase Modulation and Small-Scale Filaments in Crystals and Glasses. *Physical Review Letters* 1970; 24(11): 592-594.
 - Couairon A., Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media. *Physics Reports* 2007; 441: 47-190.
 - Bergé L., Skupin S., Nuter R., Kasparian J., Wolf J.-P. Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media. *Reports of Progress in Physics* 2007; 70: 1633-1713.
 - Vodchits A.I., Orlovich V.A., Apanasevich P.A. Nonlinear refractive index of vanadate crystals in the near IR region. *Journal of Applied Spectroscopy* 2012; 78: 918-921.
 - Bradler M., Baum P., Riedle E. Femtosecond continuum generation in bulk laser host materials with sub- μ J pump pulses. *Applied Physics* 2009; B 97: 561-574.
 - Burakevich V.N., Lisinetskii V.A., Grabtchikov A.S., Demidovich A.A., Orlovich V.A., Matrosov V.N. Diode-pumped continuous-wave Nd:YVO₄ laser with self-frequency Raman conversion. *Applied Physics* 2007; B 86(3): 511-514.
 - Agnesi A., Pennacchio C., Reali G.C. High-power diode-pumped picosecond Nd³⁺:YVO₄ laser. *Optics Letters* 1997; 22(21): 1645-1647.
 - Ronde H., Blasse G. The nature of the electronic transitions of the vanadate group. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry* 1978; 40(2): 215-219.
 - Ryba-Romanowski W., Golab S., Solarz P., Dominiak-Dzik G., Lukasiewicz T. Anti-Stokes emission in undoped YVO₄. *Applied Physics Letters* 2002; 80: 1183-1185.
 - Hsu Ch., Powell R.C. Energy transfer in europium doped yttrium vanadate crystals. *Journal of Luminescence* 1975; 10: 273-293.
 - Khodasevich I.A., Kornienko A.A., Pershukevich P.P., Aseev V.A., Khodasevich M.A., Grabtchikov A.S. Upconversion of IR Radiation in a KGd(WO₄)₂ Crystal on Erbium and Thulium Ions in Trace Concentrations: Change of Excitation Schemes and Energy Transfer Through the Crystal Lattice. *Journal of Applied Spectroscopy* 2018; 84: 986-994.
 - Miirk V., Yaroshevich N. Exciton and recombination processes in YAG crystals. *Journal of Physics: Condensed Matter* 1995; 7: 5857-5864.
 - Kononenko V.V., Zavedeev E.V., Okhrimchuk A.G., Konov V.I. Excitation of an electronic subsystem of YAG crystal with femtosecond laser pulses. *Laser Physics Letters* 2017; 14: 066002.