

Conclusions. Thus, it was shown that the dimensionally-quantized spectrum of electrons in a semiconductor, the conduction band of which consists of two subzones, between which there is an energy gap, consists of a set of dimensionally quantized levels that do not intersect each other due to the presence of an energy gap. Expressions are obtained for the wave functions and energy spectra of electrons for different cases, differing from each other by relations for the characteristic wave vectors, which, in turn, depend on the band parameters of the semiconductor and on the energy gap between the subbands of the conduction band.

Literature

1. Ivchenko E.L. Optical spectroscopy of semiconductor nanostructures // E.L. Ivchenko.-Harrow (UK) : Alpha Science, 2005.-350 p.
2. Vorobyev L.Ye., Ivchenko E.L., Firsov D.A., Shalygin V.A. Optical properties of nanostructures. S.-Pb. Noahaka. 2001. -192 p.
3. Petrov A.G., Shik A. Phys.Rev. -1993V.48. P.11883.
4. Petrov A.G., Shik A. FTP. -1993V.27. P. 1047.
5. Levine B.V., Gunapala S.D., Kuo J.M., Pey S.S., Hui S. Appl.Phys.Lett. -1991. V.59. P.1964.
6. Chang Y.-C. Phys.Tev. -1989. V.B39. P.12672.
7. Aleshkin V.Ya., Romanov Yu.A. -1993FTP. V.27. P. 329.
8. Petrov A.G., Shik A. FTP. -1994. V.28. C. 2185.
9. Golub L.E., Ivchenko E.L., Rasulov R.Ya. FTP. -1995V. 29. P. 1093.
10. Bir G.L., Pikus G.E. Symmetry and strain-induced effects in semiconductors. - М.: Nauka, -1972. - 584 p.
11. Ivchenko E.L., Rasulov R.Ya. Symmetry and real band structure of a conductor. Tashkent. Fan. -1989. -126 p.
12. Ivchenko, E. L., & Rasulov, R. Y. (1989). Symmetry and real band structure of semiconductors. Fan, Tashkent.
13. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Axmedov, B. B., Muminov, I. A., & Nematov, X. (2020). TWO-PHOTON LINEAR-CIRCULAR DICHROISM IN NARROW-ZONE SEMICONDUCTORS. European Science Review, (7-8), 54-59.
14. Rasulov, R. Y., Rasulov, V. R., Kuchkarov, M. K., & Eshboltaev, I. M. (2023). Interband Multiphoton Absorption of Polarized Radiation and Its Linear Circular Dichroism in Semiconductors in the Kane Approximation. Russian Physics Journal, 65(10), 1746-1754.
15. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Mamatova, M. A., & Gofurov, S. Z. U. (2022). GENERALIZED MODEL FOR THE ENERGY SPECTRUM OF ELECTRONS IN TUNNEL-COUPLED SEMICONDUCTOR QUANTUM WELLS. EPRA International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR), 8(12), 1-5.

Синтез YAG:Ce керамики электронной радиацией

Жунусбеков А.М.¹, Лисицын В.М.², Карипбаев Ж.Т.¹, Жильгилдинов Ж.С.¹, Стрелкова А.В.¹

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, Астана Казахстан;

²Национального исследовательского Томского политехнического университета Россия,

Аннотация: В работе представлены результаты исследования структуры и люминесцентных свойств керамических образцов YAG:Ce (Y₃Al₅O₁₂, легированных ионами Ce³⁺). Синтез осуществлялся путем спекания образцов из исходных оксидных порошков под мощным воздействием пучка высокоэнергетических электронов с энергией 1,4 МэВ и плотностью

мощности 22–25 кВт/см². Изучены характеристики люминесценции в стационарных/разрешенных по времени режимах. Показано, что при воздействии мощного электронного пучка на смесь порошков можно синтезировать люминесцентную керамику YAG:Ce с характеристиками, близкими к известной люминофорной керамике YAG:Ce, полученной традиционными методами твердофазного синтеза.

Ключевые слова: синтез; YAG:Ce керамика; структура; мощный поток электронов; люминесценция

Введение. Наиболее распространенными для изготовления белых светодиодов являются люминофорные соединения иттрий-алюминиевого граната Y₃Al₅O₁₂, легированные ионами Ce³⁺ (YAG:Ce) [1–4]. Материалы на основе ИАГ также применяются в качестве сцинтилляторов [5,6], в дозиметрии [7,8], а также в различных люминесцентных устройствах [1,9,10], где их используют в порошках, пленках, керамике, одиночных кристаллы и композиты. Материалы и элементы конструкций, производимые на основе YAG, высокотехнологичны и обладают высокой устойчивостью к различным внешним воздействиям, в том числе механическим, термическим, химическим и радиационным.

Люминесцентные характеристики ионов Ce³⁺ в соединениях граната различаются в зависимости не только от состава граната, но и от способа его кристаллизации; поэтому максимумы полосы излучения Ce³⁺ можно перестраивать в достаточно широком диапазоне 505–585 нм. Для улучшения спектральных свойств YAG:Ce-люминофоров при синтезе для модификации часто вводят дополнительные элементы, например Gd³⁺ или другие редкоземельные элементы.

Синтез материала YAG:Ce любой морфологии затруднен, так как формирование основной структуры алюмоиттриевого граната происходит при температуре выше 1700° С. Поэтому существующие технологии необходимо постоянно совершенствовать, осуществляется постоянный поиск новых разработок. Среди многих предложений одним из наиболее перспективных видится использование излучения частиц высоких энергий для ускорения реакций между исходными элементами вещества исходных материалов с целью получения новых и более сложных материалов. При этом, как обычно, ведущие лаборатории и компании не только разрабатывают новые методы производства, но и совершенствуют существующие.

Экспериментальные методы. Синтез исследуемой в данной работе керамики осуществлялся путем спекания образцов из порошков исходных оксидов путем воздействия на них мощного электронного пучка. Для такого процесса мощный пучок быстрых электронов ускорителя ЭЛВ-6 направлялся на массивный медный тигель, содержащий порошковую смесь. Таким образом, электронный пучок с энергией 1,4 МэВ и плотностью мощности 22–25 кВт/см² осуществлял программируемое сканирование вдоль тигля со скоростью 1 см/с. Электронный пучок с сечением на поверхности тигля 1 см² превращал тигель в керамический образец за 1 с. После однократного облучения всей поверхности тигель охлаждали и образцы извлекали из тигля. Типичные фотографии синтезированных образцов керамики YAG:Ce и YAG:Ce в тигле диаметром 100 x 40 мм представлены на рисунке 1. Структуру кристаллической решетки синтезированной керамики YAG:Ce и YAG:Ce,Gd изучали на рентгеновском дифрактометре Rigaku MiniFlex 600. Спектры отражения измеряли на

спектрофотометре Jasco 660 с интегрирующей сферой. Измерения спектров фотолюминесценции (ФЛ) и возбуждения люминесценции керамических образцов проводили с помощью флуоресцентного спектрофотометра Cary Eclipse компании Agilent Technologies Inc. (Санта-Клара, Калифорния, США) и Solar CM2203.

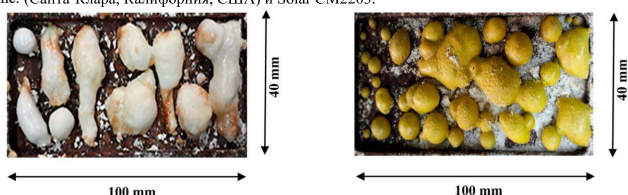


Рисунок 1. Типичный вид синтезированного YAG (а) и YAG:Ce (б) керамических образцов

Результаты. Были измерены спектры возбуждения и фотолюминесценции (ФЛ) керамических образцов люминофора. Для исследования образцы керамики перемешивались механическим способом. Полученный порошок засыпали в шайбы и слегка прижимали, чтобы поверхность была ровной; порошок не рассыпался во время движения. Результаты исследования спектров люминесценции образцов при возбуждении на длине волны 450 нм представлены на рисунке 2. Диаграмма цветности является эффективным изображением для представления результатов. Светотехники широко используют эту картину для характеристики источников света и осветительных приборов, а также для расчета осветительных установок. Однако эта схема не помогает установить природу процессов синтеза и люминесценции. Все исследованные образцы демонстрируют достаточно интенсивную люминесценцию при возбуждении длиной волны 450 нм. Подобные спектры наблюдаются и при возбуждении на длине волны 340 нм.

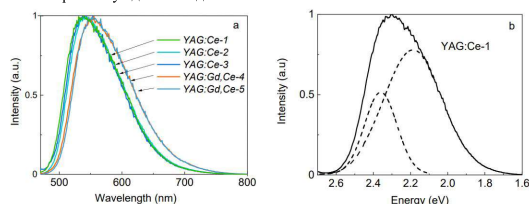


Рисунок 3. Спектры люминесценции, возбужденные при длине волны 450 нм — (а) и гауссова разложение спектра люминесценции — (б).

Было показано, что путем воздействия мощного потока электронов на порошковую смесь нескольких оксидов (Al_2O_3 , Y_2O_3 и Ce_2O_3) можно сформировать люминесцентную керамику на основе YAG:Ce с характеристиками, близкими к известным YAG:Ce люминофору и керамика, полученные другими традиционными методами. Формирование

керамики происходит не более чем за 1 с, без использования каких-либо других веществ, облегчающих синтез. В условиях эксперимента производительность синтеза составляла 0,5 г/с керамики.

Используемый здесь линейный ускоритель электронов высокого напряжения имеет очень высокий КПД, превышающий 80%, а мощность потока электронов может превышать 500 кВт. Поэтому радиационная технология синтеза диэлектрических тугоплавких материалов может оказаться дешевле. Потоками ускоренных электронов по величине, положению и распределению в трехмерном координатном пространстве можно легко управлять с помощью простых устройств. Поэтому можно с уверенностью сказать, что высокая скорость и эффективность радиационного синтеза различных керамик, а также возможность управления процессом их синтеза позволяют считать радиационный синтез весьма перспективным.

Финансирование: Работа выполнена в рамках гранта AP14871114 Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан. Российским научным фондом Российской Федерации. (Грант № 23-73-00108).

Литература

- George, N.C.; Denault, K.A.; Seshadri, R. Phosphors for solid-state white lighting. *Annual Rev. Mater. Res.* 2013, *43*, 481–501.
- Narukawa, Y.M.; Ichikawa, M.; Sanga, D.; Sano, M.; Mukai, T. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy. *J. Physics D—Appl. Phys.* 2010, *43*, 354002.
- Qiao, J.; Zhao, J.; Liu, Q.; Xia, Z. Recent advances in solid-state LED phosphors with thermally stable luminescence. *J. Rare Earths* 2019, *37*, 565–572.
- Lisitsyn, V.M.; Tulegenova, A.T.; Lisitsyna, L.A.; Vaganov, V.A.; Soshchin, N.P.; Polissadova, E.F.; Abdullin, K.A.; Yangyang, J. Photo and cathodoluminescence of commercial YAG:Ce based phosphors in UV region. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.* 2020, *478*, 120–124.
- Yoshikawa, A.; Kamada, K.; Kurosawa, S.; Shoji, Y.; Yokota, Y.; Chani, V.I.; Nikl, M. Crystal growth and scintillation properties of multi-component oxide single crystals: Ce:GGAG and Ce:La-GPS. *J. Lumin.* 2016, *169*, 387–393.
- Osipov, V.V.; Ishchenko, A.V.; Shitov, V.A.; Maksimov, R.N.; Lukyashin, K.E.; Platonov, V.V.; Orlov, A.N.; Osipov, S.N.; Yagodin, V.V.; Viktorov, L.V. Fabrication, optical and scintillation properties of transparent YAG:Ce. *Opt. Mater.* 2017, *71*, 98–102.
- Chen, L.; O’Keeffe, S.; Chen, S.; Woulfe, P.; Gillespie, S.; Jiang, B.; Lewis, E. Investigation of YAG:Ce-Based Optical Fibre Sensor for Use in Ultra-Fast External Beam Radiotherapy Dosimetry. *J. Light. Technol.* 2019, *37*, 4741–4747.
- Kulkarni, M.S.; Muthe, K.P.; Rawat, N.S.; Mishra, D.R.; Kakade, M.B.; Ramanathan, S.; Gupta, S.K.; Bhatt, B.C.; Yakhmi, J.V.; Sharma, D.N. Carbon doped yttrium aluminum garnet (YAG:Ce)—A new phosphor for radiation dosimetry. *Radiat. Meas.* 2008, *43*, 492–496.
- Liu, Y.; Wang, T.; Nie, Y.; Xu, L.; Zhang, M. Microstructures, optical properties and application in WLEDs of large size YAG:Ce³⁺-Al₂O₃ eutectic grown by HDS method. *J. Alloy. Compd.* 2019, *782*, 348–354.
- Choe, J.Y. Luminescence and compositional analysis of Y₃Al₅O₁₂:Ce films fabricated by pulsed-laser deposition. *J. Mat. Res. Innov.* 2002, *6*, 238–241.