

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА, ИНДУЦИРОВАННАЯ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

**И. Н. Мисюра¹, С. И. Кононенко¹, О. В. Калантарьян¹, В. П. Журенко¹,
Р. В. Скиба¹, С. С. Авотин², Н. Я. Рохманов²**

¹Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,

г. Харьков, Украина,

²Харьковский национальный аграрный университет им. В. В. Докучаева,

г. Харьков, Украина

Поступила в редакцию 22.09.2016

В работе была исследована люминесценция кварцевого стекла, которая возбуждалась рентгеновским излучением с энергиями фотонов до 60 кэВ. В измеренных спектрах было зафиксировано наличие двух интенсивных полос люминесценции кварца с максимумами 3,1 эВ (голубая полоса) и 4,3 эВ (УФ полоса), которые связаны с известными типами собственных дефектов. Положение максимума голубой полосы отличается от случая ионолюминесценции. Мощное влияние высокой удельной энергии, которую ионы теряют в веществе, приводит к модификации собственного дефекта кварца и смещению максимума голубой полосы с 3,1 эВ до 2,7 эВ. Экспериментальные спектры радиолюминесценции хорошо фитируются тремя функциями Гаусса.

Ключевые слова: кварцевое стекло, люминесценция, рентгеновское излучение.

ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ КВАРЦЕВОГО СКЛА, ІНДУКОВАНА РЕНТГЕНІВСЬКИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

**І. М. Мисюра, С. І. Кононенко, О. В. Калантарьян, В. П. Журенко,
Р. В. Скиба, С. С. Авотін, М. Я. Рохманов**

У роботі була досліджена люмінесценція кварцевого скла, яка збуджувалася рентгенівським випромінюванням з енергіями фотонів до 60 кеВ. У вимірних спектрах було зафіксовано наявність двох інтенсивних смуг люмінесценції кварцу з максимумами 3,1 еВ (блакитна смуга) та 4,3 еВ (УФ смуга), які пов'язані з відомими типами власних дефектів. Положення максимуму блакитної смуги відрізняється від випадку іонолюмінесценції. Потужний вплив високої питомої енергії, яку іони втрачають у речовині, призводить до модифікації власного дефекту кварцу і зміщенню максимуму блакитної смуги з 3,1 еВ до 2,7 еВ. Експериментальні спектри радіолюмінесценції добре фітуються трьома функціями Гауса.

Ключові слова: кварцове скло, люмінесценція, рентгенівське випромінювання.

LUMINESCENCE OF QUARTZ GLASS INDUCED BY X-RAYS

**I. Mysiura, O. Kalantaryan, S. Kononenko, V. Zhurenko,
R. Skiba, S. Avotin, N. Rokhmanov**

The paper was investigated luminescence of quartz glass excited by X-rays with photon energies up to 60 keV. In the measured luminescence spectra of quartz was observed presence of two intense bands at 3.1 eV (blue) and 4.3 eV (UV) related to its own defects. Position of maximum blue band different from the case ion luminescence. Effect of high energy that ions lose in substance, leading to modifications of quartz defect and maximum of blue band shifting from 3.1 eV to 2.7 eV. The experimental radioluminescence spectra can be well fitted by three Gaussian function.

Keywords: quartz glass, luminescence, X-rays.

ВВЕДЕНИЕ

Кварц широко распространенный конструкционный и технологический материал во многих отраслях современной науки и техники. Он активно применяется в условиях, когда ионизирующие излучения различной

природы воздействуют на его поверхность и объем. Облучение ионизирующим излучением кварца происходит в процессе эксплуатации его в плазменных установках (термоядерных, плазмо-химических и пр.) [1], в космическом пространстве, при

проведении различных технологических процессов, таких как имплантация, распыление и т. п. [2]. Кроме того, оптические волноводы, изготовленные из кварца, имеют малое затухание и высокую пропускную способность и широко используются в современной науке и технике [3]. Они используются для передачи больших объемов данных, полученных в физике высоких энергий на современных установках, таких как большой адронный коллайдер (LHC) [4]. Низкий вес и объем, связанный с этими линиями передачи, являются ключевыми преимуществами для их использования в космическом корабле [5, 6] или для диагностики плазмы в термоядерных установках, таких как JET или строящийся ITER [7, 8].

Воздействие ионизированного излучения на кварц приводит к изменению его структуры. Направленное изменение свойств кварца может быть целью технологического процесса. Наиболее существенно изменяется структура кварцевого стекла при облучении его ионными пучками. При движении быстрого иона в твердом теле происходят процессы образования как точечных дефектов, так и каскадов дефектов, их отжиг, рекомбинация и т. п. Кроме того, процесс дефектообразования сопровождается различными сопутствующими явлениями (распылением материала, электронной эмиссией, генерацией фотонов различных энергий, в том числе в оптическом диапазоне) [9, 10].

Сопутствующим эффектом процессу дефектообразования является люминесценция [11]. Оптическое излучение возникает при перестройке структуры твердого тела под воздействием частицы, движущейся в веществе. Эта перестройка может проявляться в виде непосредственного создания дефектов (как точечных, так и дефектов электронной структуры), либо в виде генерации частиц и квазичастиц, которые могут распространяться по твердому телу [11]. Распад квазичастицы может также привести к образованию дефектов. Для обоих каналов диссипации энергии частицы релаксационные процессы могут привести к генерации электромагнитной волны. Источник энергии в обоих случаях это

ионизирующее излучение. В случае возбуждения люминесцентного излучения заряженной частицей, движущейся в веществе, энергия в электронную систему твердого тела в основном передается непосредственно за счет кулоновского взаимодействия.

Идеальная структура кварца изображена на рис. 1 [12]. В процессе производства возникают дефекты структуры, влияющие на свойства вещества. Весьма существенно эти дефекты влияют на люминесцентные процессы, индуцированные ионизирующим излучением. Люминесценцию кварца вызывает облучение образца потоками заряженных частиц (электронами и ионами), нейтронами, фотонами различных энергий.

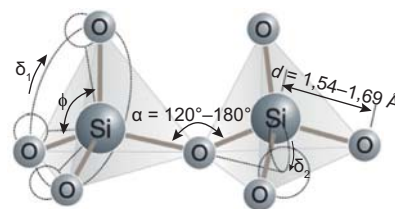


Рис. 1. Трехмерная схема фрагмента идеальной структуры кварца. Структура определяется несколькими параметрами: длина связи Si-O (d), угол при вершине тетраэдра (ϕ), угол между тетраэдрическими структурами (α) и углы закручивания связей (δ_1 , δ_2)

Кварц прозрачен в видимом и ближнем УФ диапазоне длин волн и поэтому свет, который генерируется во всей области облучения, выходит из образца и может быть зарегистрирован. В оптическом диапазоне длин волн зарегистрировано ряд люминесцентных полос, которым соответствует наличие в образце различных дефектов [14]. Наиболее интенсивные из них возбуждаются при кулоновском взаимодействии заряженных частиц с атомами вещества. На рис. 2 приведен спектр люминесценции плавленого кварца индуцированной протонами с энергиями 1, 6 МэВ [15]. Спектр состоит из трех широких полос:

- ультрафиолетовая полоса с максимумом около 285 нм (УФП);
- голубая полоса с максимумом около 456 нм (ГП);
- красная полоса с максимумом около 650 нм (КП).

В настоящее время генерацию этих полос в люминесцентных спектрах связывают

с наличием в кварце собственных дефектов [9, 10, 16]. Эти дефекты создаются еще на стадии производства кварцевого стекла и есть в любом образце. Кроме того, они дополнительно создаются при движении ионов в веществе мишени за счет кулоновского взаимодействия с его атомами. Излучение в УФП и ГП чаще всего связывают с собственными дефектами кварца — E' центрами или кислородно-дефицитными центрами (КДЦ) (oxygen-deficiency centers — ODC). Это либо кислородная вакансия, либо двухкоординированный кремний, либо временно образующийся атом кремния с одной разорванной связью с кислородом за счет распада автолокализованного экситона $\equiv\text{Si}\cdot$ [8, 10]. УФП связывается с ODC (I), а ГП — ODC (II) [14].

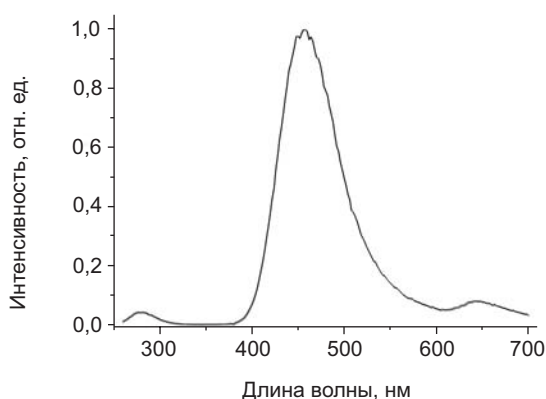


Рис. 2. Спектр люминесценции кварцевого стекла, возбужденной ионами водорода с энергией 1,6 МэВ, угол наблюдения 45°

Излучение в КП с максимумом на длине волны около 650 нм все исследователи связывают с собственным дефектом другого типа – немостиковым кислородом (НМКЦ) (non-bridging oxygen hole center — NBOHC) [8, 10, 16]. Это атом кислорода с одной разорванной связью $\equiv\text{Si}-\text{O}\cdot$. НМК образуются при производстве кварцевого стекла, особенно активно при наличии групп ОН в образце (см. рис. 3 [14]). Количество групп ОН в кварцевом стекле является важным параметром и обязательно указывается в паспорте.

Однако эта реакция не является единственным способом создания НМКЦ.



Рис. 3. Возможный процесс создания НМКЦ в кварце

Оборванные связи кислорода могут быть созданы во влажных и в сухом (незначительное количество ОН-групп) кварцевом стекле с помощью разрыва деформированной (напряженной) Si-O связи ($\equiv\text{Si}\cdot\cdots\text{O}-\text{Si}\equiv$) в его структуре (рис. 4 [14]).

Интенсивность ЛИ напрямую связана с плотностью (числом) активных дефектов в кварце. Дефекты в образце можно разделить на следующие группы:

- первичные дефекты образца;
- дефекты, созданные ионами;
- пассивированные (модифицированные) дефекты.

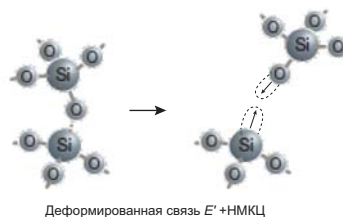


Рис. 4. Схематическая модель E' -центра в чистом SiO_2 , стрелками обозначен неспаренный спин, пунктиром — орбитали

Суммарный вклад каждой из этих групп дефектов определяет интенсивность ЛИ. Кроме того, происходят процессы отжига (рекомбинации) дефектов, влияющие на интенсивность ЛИ.

Процессы возбуждения и создания дефектов существенно интенсифицируются при наличии внешнего воздействия. Достаточно хорошо изучена люминесценция кварцевого стекла, возбужденная движущимися в веществе ионами и электронами. Радиолюминесценция и влияние рентгеновских квантов на структуру и свойства кварцевого стекла изучены значительно меньше.

В работе исследуется люминесценция кварцевого стекла, индуцированная рентгеновским излучением с энергией до 60 кэВ. Рассмотрены возможные причины отличия спектров радиолюминесценции от спектров ионо- и катодолюминесценции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные работы по изучению радиолюминесценции кварцевого стекла проводились на установке, блок-схема которой приведена на рис. 5. Эксперименты проводились с использованием в качестве источника

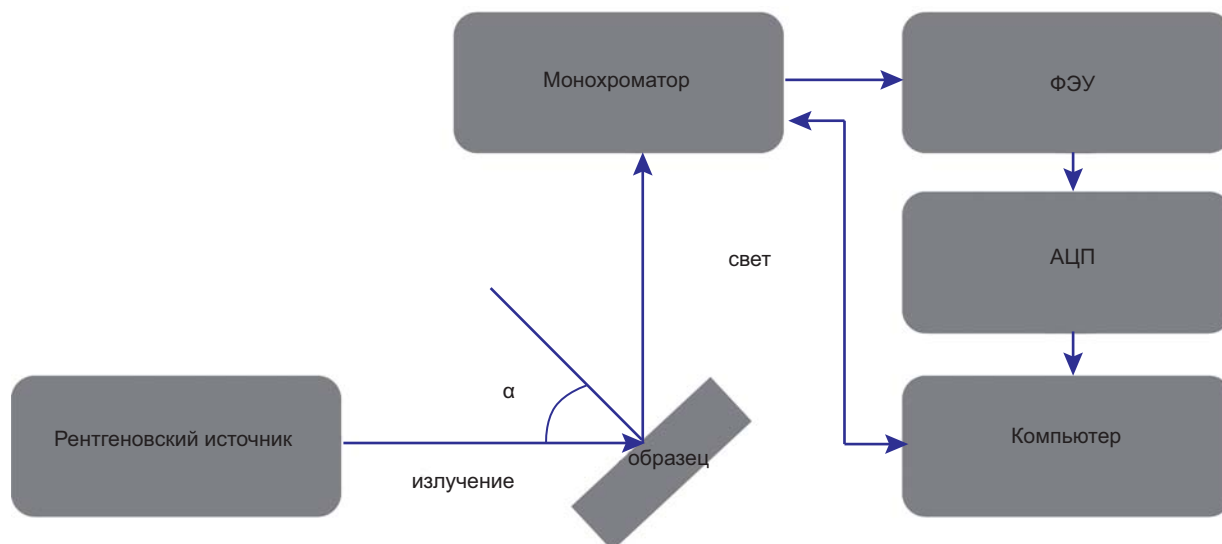


Рис. 5. Блок-схема экспериментальной установки по исследованию радиолуминесценции кварцевого стекла

рентгеновского излучения установки УРС-60 (рентгеновская трубка с медным анодом БСВ-4). Рабочее напряжение трубки до 60 кВ, ток — до 10 мА. Анод располагался под углом 90° к электронному пучку и к бериллиевому окну. Спектр рентгеновского излучения состоял из характеристического рентгеновского излучения медного анода и тормозного излучения электронов.

Люминесцентное излучение образца фокусировалось кварцевым конденсором на входную щель монохроматора МДР-23. Оптический сигнал преобразовывался фотоэлектронным умножителем типа ФЭУ-100, выход которого подключался к входному усилителю блока АЦП, соединенного с компьютером. При помощи компьютера осуществлялось управление экспериментом, а также накопление и обработка экспериментальных данных.

Экспериментальные образцы представляли собой плоскопараллельные пластины с полированной поверхностью диаметром 21 мм и толщиной 1 мм, изготовленные из кварцевого стекла марки КУ-1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

На рис. 6 приведен спектр люминесценции кварцевого стекла, индуцированной рентгеновским излучением. В спектре наблюдается широкая полоса с максимумом около 395 нм (3,1 эВ) и шириной на полувысоте 85 нм. В спектре также наблюдается менее

интенсивная УФП с максимумом около 290 нм. На красном крыле спектра наблюдается особенность в районе 570 нм.

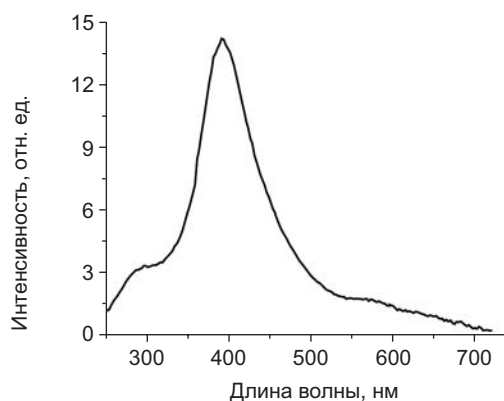


Рис. 6. Спектр люминесценции кварца, индуцированной рентгеновским излучением

Люминесценция — это процесс случайных равновесных переходов электронов между уровнями в твердом теле, поэтому функция распределения случайной величины — энергии фотонов, часто аппроксимируется функцией Гаусса. Корректно процесс фитирования спектров проводить с графиками, построенными в энергетических единицах. Наилучший результат показывает аппроксимация тремя функциями Гаусса. Это указывает на наличие еще одной слабой полосы люминесценции кварцевого стекла помимо обсуждаемых ранее. Результаты фитирования экспериментальных данных приведены на рис. 7.

В экспериментах по ионолуминесценции максимум ГП располагался в области 2,7 эВ

(450 нм) [15]. Наличие полосы люминесценции с максимумом 3,1 эВ в некоторых работах связывалось с присутствием в образце примесных атомов германия, которые создают центры люминесценции в этой области длин волн [10]. Однако в экспериментах по фотолюминесценции, проведенных с кварцевыми образцами, допированными германием (до 2 %) и беспримесными, было показано, что спектры люминесценции, измеренные в обоих случаях, практически не отличаются [17].

Возбуждение люминесценции в кварцевом стекле при облучении рентгеновским излучением происходит через «электронный канал»: генерацию электронов за счет поглощения энергии фотонов. Существуют три основных механизма создания таких электронов: комптоновское и рэлеевское рассеяние рентгеновских фотонов, а также фотоэффект [11]. Как показывают оценки, основным механизмом возбуждения люминесценции в нашем случае является фотоэффект. Таким образом, ситуация подобна катодолюминесценции при средних энергиях электронов до 60 кэВ. Исследование дозовой зависимости катодолюминесценции плавленого кварца показало, что существует интервал времени в начале облучения, когда существуют одновременно обе полосы КДЦ: 3,1 эВ и 2,7 эВ [19]. Кроме того, для недопированной пленки кварца методом фотолюминесценции было показано, что короткое время существуют в окрестности 3,1 эВ две полосы 3,08 эВ ($\tau \sim 100$ мкс) и 3,15 эВ ($\tau \sim 10$ мс) [20].

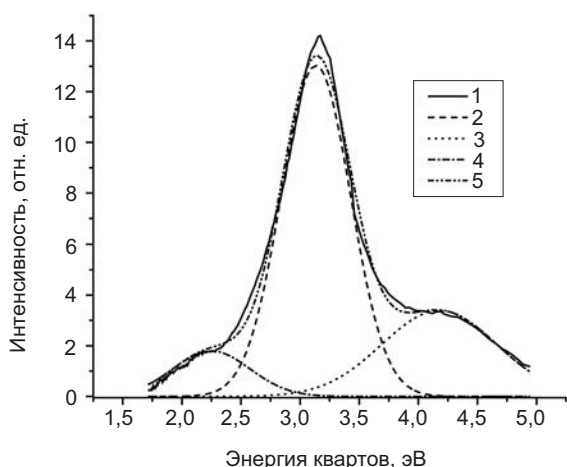


Рис. 7. Спектр излучения кварца, фитированный функциями Гаусса: 1 — экспериментальная кривая; 2–4 гауссианы с центрами в 3,1, 4,2 и 2,2 эВ соответственно; 5 — сумма 2–4 гауссиан

Наличие полосы собственной люминесценции кварцевого стекла с максимумом 3,1 эВ (2,7 эВ) связывается с наличием кислородно-дефицитных центров в образце [10, 21]. В начале воздействия ионизирующего излучения энергия, соответствующая максимуму ЛИ, равна 3,1 эВ. Интенсивное воздействие заряженных частиц приводит к модификации этого центра и, соответственно, уменьшению максимального значения энергии эмитированных фотонов до 2,7 эВ.

Существенные отличия в прохождении через вещество заряженных частиц и фотонов заключаются в значительной разнице величины плотности поглощенной веществом (потерянной частицей) энергии. 1,6 МэВ-е ионы, возбуждавшие люминесценцию, спектр которой представлен на рис. 2, полностью отдают всю свою энергию в слое толщиной 30,61 мкм с начальными удельными потерями на входе в вещество 3,349 эВ/Å (данные получены в пакете SRIM). Большая часть рентгеновских фотонов со значительно меньшей энергией (40–60 кэВ) пронизывают образец насквозь. Меньшая часть их отдает свою энергию в точечных местах, равномерно распределенных во всем облучаемом объеме образца. Энергия, поглощенная кварцевым стеклом при ионной имплантации, приводит к модификации КДЦ дефекта, при этом максимум люминесцентной полосы заметно смещается из района 400 нм (3,1 эВ) на длину волны 450 нм (2,7 эВ).

ВЫВОДЫ

В работе изучалась радиолюминесценция кварцевого стекла, индуцированная рентгеновским излучением с энергией до 60 кэВ. В измеренных спектрах зафиксировано наличие двух полос люминесценции кварца, которые связываются с наличием в образце собственных дефектов типа КДЦ (ODC (I) и ODC (II)). Отмечено, что длина волны максимума ГП равнялась 400 нм (3,1 эВ), что характерно для фото- и радиолюминесценции и для катодолюминесценции в начале облучения. Это можно объяснить тем, что воздействие на кислородно-дефицитный центр излучения с большой плотностью поглощенной энергией (ионо- и катодолюминесценция) приводит к модификации его

с изменением положения максимума с 400 нм (3,1 эВ) на 450 нм (2,7 эВ). В предположении о стохастичности процесса люминесценции проведено фиттирование полученных спектров двумя функциями Гаусса, центры которых достаточно хорошо совпадают с максимумами полос люминесцентного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brichard B., Fernandez A., Ooms H. Radiation-hardening techniques of dedicated optical fibres used in plasma diagnostic systems in ITER // *Journal of Nuclear Materials*. — 2004. — Vol. 329–333. — P. 1456–1460.
2. Goorsky M. Ion Implantation. InTech, 2012. — P. 330–335.
3. Girard S., Kuhnhen J., Gusarov A., Brichard B., Van Uffelen M. Radiation Effects on Silica-Based Optical Fibers: Recent Advances and Future Challenges // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. — 2013. — Vol. 60, No. 3. — P. 2015–2036.
4. Troska J., Cervelli G., Faccio F., Gill K., Grabit R., Jareno R. M., Sandvik A. -M., Vasey F. Optical readout and control systems for the CMS tracker // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* — 2003. — Vol. 50, No. 4. — P. 1067–1072.
5. Marshall P. W., Dale C. J., LaBel K. A. Space radiation effects in high performance fiber optic data links for satellite data management // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* — 1996. — Vol. 43, No. 2. — P. 645–653.
6. Barnes C., Dorsky L., Johnston A., Bergman L., Stassinopoulos E. Overview of fiber optics in the natural space environment // *Proc. SPIE Fiber Optics Reliability: Benign and Adverse Environments IV*. — 1990. — Vol. 1366. — P. 9–16.
7. Kakuta T., Shikama T., Nishitani T., Brichard B., Krassilnikov A., Tomashuk A., Yamamoto S., Kasai S. Round-robin irradiation test of radiation resistant optical fibers for ITER diagnostic application // *J. Nucl. Mater.* — 2002. — Vol. 307–311. — P. 1277–1281.
8. Ermolaeva G. M., Eronyan M. A., Dukelskii K. V., Komarov A. V., Kondratev Y. N., Serkov M. M., Tolstoy M. N., Shilov V. B., Shevandin V. S., Powell H. T., Thompson C. E. Low-dispersion optical fiber highly transparent in the UV spectral range // *Opt. Eng.* — 2004. — Vol. 43. — P. 2896–2903.
9. Skuja L. Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide // *Journal of Non-Crystalline Solids*. — 1998. — Vol. 239. — P. 16–48.
10. Griscom D. L. A Minireview of the Natures of Radiation-Induced Point Defects in Pure and Doped Silica Glasses and Their Visible/Near-IR Absorption Bands, with Emphasis on Self-Trapped Holes and How They Can Be Controlled // *Physics Research International*. — 2013. — Vol. 2. — P. 1–14.
11. Силинь А. Р., Трухин А. Н. Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO₂. — Рига: Зинатне, 1985. — 244 с.
12. Галунов Н. З., Семиноженко В. П., Радиолюминесценция органических конденсированных сред. — Киев: «Наукова думка», 2015. — С. 72–75.
13. Henderson G. S., Baker D. R. Synchrotron Radiation: Earth, Environmental and Material Sciences Applications // *Short Course Series* — 2002. — Vol. 30. — P. 159–178.
14. Salh R. Defect Related Luminescence in Silicon Dioxide Network: A Review / *Crystalline Silicon-Properties and Uses* / editor Basu S. — Rijeka, Croatia: InTech, 2011. — P. 137–150.
15. Kononenko S. I., Kalantaryan O. V., Muratov V. I. Quartz investigation under fast proton irradiation by luminescence method // *Func. Mat.* — 2003. — Vol. 10. — P. 1–7.
16. Trukhin A. N. Self-trapped exciton luminescence in α -quartz // *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B*. — 1994. — Vol. 91. — P. 334–337.
17. Corazza A., Crivelli B., Martini M., Spinolo G. The double nature of the 3.1 eV emission in silica and in Ge-doped silica // *Journal of Physics: Condensed Matter*. — 1995. — Vol. 7, No. 33.
18. Koyama H. Cathodoluminescence study of SiO₂ // *J. Appl. Phys.* — 1980. — Vol. 51. — P. 2228–2235.
19. Colin E. J., Embree D. Correlations of the 4.77–4.28 eV luminescence band in silicon dioxide with the oxygen vacancy // *J. Appl. Phys.* — 1976. — Vol. 47. — P. 5365.
20. Sakurai Y. The 3.1 eV photoluminescence band in oxygen-deficient silica glass // *J Non-Cryst. Solids*. — 2000. — Vol. 271. — P. 218–223.

21. Kononenko S. I., Kalantaryan O. V., Muratov V. I., Zhurenko V. P. Silica luminescence induced by fast light ions // *Radiat. Meas.* — 2007. — Vol. 42. — P. 751–754.

LITERATURA

1. Brichard B., Fernandez A., Ooms H. Radiation-hardening techniques of dedicated optical fibres used in plasma diagnostic systems in ITER // *Journal of Nuclear Materials.* — 2004. — Vol. 329–333. — P. 1456–1460.
2. Goorsky M. Ion Implantation. InTech, 2012. — P. 330–335.
3. Girard S., Kuhnhenh J., Gusarov A., Brichard B., Van Uffelen M. Radiation Effects on Silica-Based Optical Fibers: Recent Advances and Future Challenges // *IEEE Transactions on Nuclear Science.* — 2013. — Vol. 60, No. 3. — P. 2015–2036.
4. Troska J., Cervelli G., Faccio F., Gill K., Grabit R., Jareno R. M., Sandvik A. -M., Vasey F. Optical readout and control systems for the CMS tracker // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* — 2003. — Vol. 50, No. 4. — P. 1067–1072.
5. Marshall P. W., Dale C. J., LaBel K. A. Space radiation effects in high performance fiber optic data links for satellite data management // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* — 1996. — Vol. 43, No. 2. — P. 645–653.
6. Barnes C., Dorsky L., Johnston A., Bergman L., Stassinopoulos E. Overview of fiber optics in the natural space environment // *Proc. SPIE Fiber Optics Reliability: Benign and Adverse Environments IV.* — 1990. — Vol. 1366. — P. 9–16.
7. Kakuta T., Shikama T., Nishitani T., Brichard B., Krassilnikov A., Tomashuk A., Yamamoto S., Kasai S. Round-robin irradiation test of radiation resistant optical fibers for ITER diagnostic application // *J. Nucl. Mater.* — 2002. — Vol. 307–311. — P. 1277–1281.
8. Ermolaeva G. M., Eronyan M. A., Dukelskii K. V., Komarov A. V., Kondratev Y. N., Serkov M. M., Tolstoy M. N., Shilov V. B., Shevandin V. S., Powell H. T., Thompson C. E. Low-dispersion optical fiber highly transparent in the UV spectral range // *Opt. Eng.* — 2004. — Vol. 43. — P. 2896–2903.
9. Skuja L. Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide // *Journal of Non-Crystalline Solids.* — 1998. — Vol. 239. — P. 16–48.
10. Griscom D. L. A Minireview of the Natures of Radiation-Induced Point Defects in Pure and Doped Silica Glasses and Their Visible/Near-IR Absorption Bands, with Emphasis on Self-Trapped Holes and How They Can Be Controlled // *Physics Research International.* — 2013. — Vol. 2. — P. 1–14.
11. Silin' A. R., Truhin A. N. *Tochechnye defekty i elementarnye vzbuzhdeniya v kristallicheskom i stekloobraznom SiO₂.* — Riga: Zinatne, 1985. — 244 p.
12. Galunov N. Z., Seminozhenko V. P., Radioluminescenciya organicheskikh kondensirovannyh sred. — Kiev: «Naukova dumka», 2015. — P. 72–75.
13. Henderson G. S., Baker D. R. *Synchrotron Radiation: Earth, Environmental and Material Sciences Applications* // Short Course Series — 2002. — Vol. 30. — P. 159–178.
14. Salh R. *Defect Related Luminescence in Silicon Dioxide Network: A Review / Crystalline Silicon-Properties and Uses / editor Basu S.* — Rijeka, Croatia: InTech, 2011. — P. 137–150.
15. Kononenko S. I., Kalantaryan O. V., Muratov V. I. Quartz investigation under fast proton irradiation by luminescence method // *Func. Mat.* — 2003. — Vol. 10. — P. 1–7.
16. Trukhin A. N. Self-trapped exciton luminescence in α -quartz // *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B.* — 1994. — Vol. 91. — P. 334–337.
17. Corazza A., Crivelli B., Martinit M., Spinolo G. The double nature of the 3.1 eV emission in silica and in Ge-doped silica // *Journal of Physics: Condensed Matter.* — 1995 — Vol. 7, No. 33.
18. Koyama H. Cathodoluminescence study of SiO₂ // *J. Appl. Phys.* — 1980. — Vol. 51. — P. 2228–2235.
19. Colin E. J., Embree D. Correlations of the 4.77–4.28 eV luminescence band in silicon dioxide with the oxygen vacancy // *J. Appl. Phys.* — 1976. — Vol. 47. — P. 5365.
20. Sakurai Y. The 3.1 eV photoluminescence band in oxygen-deficient silica glass // *J Non-Cryst. Solids.* — 2000. — Vol. 271. — P. 218–223.
21. Kononenko S. I., Kalantaryan O. V., Muratov V. I., Zhurenko V. P. Silica luminescence induced by fast light ions // *Radiat. Meas.* — 2007. — Vol. 42. — P. 751–754.