



УДК 538.91;539.21

ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПЛЕНОК SiO₂ НА Si, ПОЛУЧЕННЫХ ТЕРМИЧЕСКИМ ОКИСЛЕНИЕМ И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ

И. А. РОМАНОВ¹⁾, Н. С. КОВАЛЬЧУК²⁾, Л. А. ВЛАСУКОВА¹⁾, И. Н. ПАРХОМЕНКО¹⁾,
В. А. СОЛОДУХА²⁾, В. А. ПИЛИПЕНКО^{1),2)}, Д. В. ШЕСТОВСКИЙ²⁾, С. А. ДЕМИДОВИЧ²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾«Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»,
ул. Казинца, 121А, 220108, г. Минск, Беларусь

Проведено сравнение светоизлучающих свойств при электрическом возбуждении свечения пленок оксида кремния, полученных термическим окислением в парах воды при 900 °С и методом плазмохимического осаждения из газовой фазы из смеси SiH₄ + N₂O при 350 °С. Спектры электролюминесценции сняты в системе

Образец цитирования:

Романов ИА, Ковальчук НС, Власукова ЛА, Пархоменко ИН, Солодуха ВА, Пилипенко ВА, Шестовский ДВ, Демидович СА. Электролюминесценция пленок SiO₂ на Si, полученных термическим окислением и плазмохимическим осаждением. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2021;3:26–31.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-3-26-31>

For citation:

Romanov IA, Kovalchuk NS, Vlasukova LA, Parkhomenko IN, Saladukha VA, Pilipenka UA, Shestovski DV, Demidovich SA. Electroluminescence of SiO₂ films grown on Si by thermal oxidation and plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2021;3:26–31. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-3-26-31>

Авторы:

Иван Александрович Романов – ассистент кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиоп физики и компьютерных технологий.

Наталья Станиславовна Ковальчук – кандидат технических наук, доцент; заместитель главного инженера.

Людмила Александровна Власукова – кандидат физико-математических наук; заведующий научно-исследовательской лабораторией материалов и приборных структур микро- и нанoeлектроники факультета радиоп физики и компьютерных технологий.

Ирина Николаевна Пархоменко – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории материалов и приборных структур микро- и нанoeлектроники факультета радиоп физики и компьютерных технологий.

Виталий Александрович Солодуха – доктор технических наук; генеральный директор.

Владимир Александрович Пилипенко – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор; профессор кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета¹⁾, заместитель директора по научному развитию государственного центра «Белмикрoанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемь»²⁾.

Дмитрий Викторович Шестовский – инженер-технолог отдела перспективных технологических процессов.

Сергей Александрович Демидович – ведущий инженер отраслевой лаборатории новых технологий и материалов.

Authors:

Ivan A. Romanov, assistant at the department of physical electronics and nanotechnologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

romivan@bsu.by

Natalya S. Kovalchuk, PhD (engineering), docent; deputy chief engineer.

nkovalchuk@integral.by

Liudmila A. Vlasukova, PhD (physics and mathematics); head of the laboratory of materials and device structures for micro- and nanoelectronics, faculty of radiophysics and computer technologies.

vlasukova@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0001-8273-6908>

Irina N. Parkhomenko, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of materials and device structures for micro- and nanoelectronics, faculty of radiophysics and computer technologies.

parkhomenko@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0003-0982-3938>

Vitali A. Saladukha, doctor of science (engineering); general director.

Uladzimir A. Pilipenka, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, doctor of science (engineering), full professor; professor at the department of physics of semiconductors and nanoelectronics, faculty of physics^a, and deputy director for scientific development, state center «Belmicroanalysis», branch «Belmicrosystems»^b.

Dmitry V. Shestovski, engineer-technologist at the department of advanced technological processes.

dshestovski@integral.by

<https://orcid.org/0000-0002-4259-3276>

Sergey A. Demidovich, leading engineer at the branch laboratory of new technologies and materials.

sdemidovich@integral.by





электролит – диэлектрик – полупроводник. В спектре электролюминесценции оксидной пленки, полученной термическим окислением, доминирует интенсивная полоса в красной области с максимумом при 1,9 эВ. Сделан вывод о связи данной полосы с наличием в оксиде силанольных групп (Si—OH). В спектре электролюминесценции оксидной пленки, полученной плазмохимическим осаждением, наблюдается мультиполосное свечение в УФ-области. Дополнительные исследования методами ИК-спектроскопии и КРС показали, что модуляция спектра имеет колебательную природу, а не является результатом интерференции. Предположительно, люминесценция в УФ-области обусловлена наличием центров дефицита кислорода, содержащих связи с атомами водорода.

Ключевые слова: пленки оксида кремния; электролюминесценция; система электролит – диэлектрик – полупроводник; центры дефицита кислорода; кремниевая оптоэлектроника.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (задание 3.8.1, № гос. регистрации 20212595).

ELECTROLUMINESCENCE OF SiO₂ FILMS GROWN ON Si BY THERMAL OXIDATION AND PLASMA-ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION

I. A. ROMANOV^a, N. S. KOVALCHUK^b, L. A. VLASUKOVA^a, I. N. PARKHOMENKO^a,
V. A. SALADUKHA^b, U. A. PILIPENKA^{a,b}, D. V. SHESTOVSKI^b, S. A. DEMIDOVICH^b

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^b«Integral» – Holding Management Company, 121A Kazinca Street, Minsk 220108, Belarus

Corresponding author: L. A. Vlasukova (vlasukova@bsu.by)

Emission of the silicon oxide films grown on Si by wet thermal oxidation at 900 °C and by plasma-enhanced chemical vapor deposition from the SiH₄ + N₂O mixture at 350 °C has been compared using electroluminescence. The electroluminescence spectra were recorded in electrolyte – insulator – semiconductor system. The intense band in the red range with a maximum at 1.9 eV dominates the electroluminescence spectrum of the thermal oxide film. It was concluded that this band is related with the existence of silanol groups (Si—OH) in the oxide matrix. Multiband emission in the UV range is observed in the electroluminescence spectrum of the oxide film formed by plasma-enhanced chemical vapor deposition. Additional investigations using IR and RS spectroscopy revealed that observed spectrum modulation is of an oscillatory nature and is not the result of interference. Presumably, the luminescence in the UV region is due to the presence of oxygen deficiency centers containing bonds with hydrogen atoms.

Keywords: silicon oxide films; electroluminescence; electrolyte – insulator – semiconductor system; oxygen deficiency centers; silicon optoelectronics.

Acknowledgements. This work was supported by the state program of scientific research «Photonics and electronic for innovations» (assignment 3.8.1, reg. No. 20212595).

Введение

Люминесцентные методы широко используются при проведении фундаментальных исследований и диагностики твердотельных объектов, включая структуры полупроводник – диэлектрик [1–3]. Возросший в последние годы интерес к изучению люминесценции пленок нитрида и оксида кремния на кремнии, а также композиций на их основе связан со стремлением к созданию оптоэлектронных устройств на базе существующей кремниевой технологии [4–6]. Разработка эффективного источника света на основе кремния по технологии, совместимой с техпроцессом изготовления КМОП-приборов, позволила бы объединить в одной интегральной схеме фотонные и электронные устройства. Данная мечта научного сообщества стала рассматриваться в качестве реальной возможности после публикации пионерской работы Л. Т. Кэнхэма, посвященной фотолюминесценции пористого кремния [7]. С этого времени начались интенсивные исследования по созданию светоизлучающих материалов на базе кремния. Однако, несмотря на достигнутый прогресс, светоизлучающие диоды на основе Si пока не могут конкурировать с аналогами на основе соединений A³B⁵ или A²B⁶. Одной из наиболее существенных нерешенных проблем на пути к их практическому применению является низкая эффективность электролюминесценции. Перспективным подходом к преодолению данного препятствия считается использование многослойных структур на базе нитрида и оксида кремния со встроенными кремниевыми нанокристаллами [8–11]. В качестве основного светоизлучающего материала рассматривается



нанокompозит из кремниевых агломератов, окруженных аморфной матрицей диоксида кремния [12]. Механизм и спектр излучательной рекомбинации в такой системе пока являются предметом дискуссий и определяются не только свойствами кремниевых кристаллов и химией их поверхности, но и вкладом точечных дефектов матрицы диоксида кремния. Этот вклад зависит от метода получения оксидной пленки, ее толщины и способа возбуждения свечения. Поэтому важное значение имеет информация о светоизлучающих свойствах самой матрицы SiO_2 и их связи с технологией изготовления оксидных слоев. При изучении диэлектриков на основе кремния ключевым методом исследования является электролюминесценция. Данный метод позволяет изучить состав и структурные особенности диэлектрических слоев, определить концентрацию центров люминесценции, исследовать деградацию диэлектриков в результате воздействия сильного электрического поля. Однако из-за трудностей получения интенсивного сигнала электролюминесценции опубликовано небольшое количество работ по свечению пленок SiO_2 при электрическом возбуждении [6; 13–15]. В настоящей статье представлены результаты сравнительных исследований электролюминесценции пленок SiO_2 , полученных термическим окислением и плазмохимическим осаждением.

Методика эксперимента

В качестве подложек для нанесения диэлектрических пленок использовались пластины кремния p -типа кристаллографической ориентации (111) диаметром 100 мм. Пленки диоксида кремния были получены методами термического окисления и плазмохимического осаждения из газовой фазы. Термическое окисление проводилось в парах воды при температуре 900 °С в течение 120 мин. Толщина термически выращенной пленки составляла 130 нм. Для плазмохимического осаждения использовалась смесь моносилана (SiH_4) и закиси азота (N_2O), температура подложки составляла 350 °С, время осаждения – 12 мин. Толщина пленки, нанесенной данным методом, достигала 110 нм. Толщины пленок определялись методом растровой электронной микроскопии [14]. Для получения электролюминесценции в качестве верхнего контакта к излучающим слоям SiO_2 применялся прозрачный электролит. Преимуществами электролита перед твердотельными контактами для реализации метода электролюминесценции являются более высокое напряжение пробоя, высокая спектральная прозрачность в исследуемом диапазоне длин волн, возможность измерения спектрального распределения электролюминесценции при послыном стравливании диэлектрического слоя [13; 15]. Электролюминесценция исследовалась в спектральном диапазоне 1,8–5,3 эВ в гальваностатическом режиме при положительном смещении кремниевой подложки. В качестве электролита использовался 1 моль/л водный раствор Na_2SO_4 . Спектры электролюминесценции регистрировались при напряжениях более 60 В и плотностях тока 150 и 250 мкА/см² с помощью монохроматора МДР-23, оснащенного фотоэлектронным множителем ФЭУ-100. Для регистрации ИК-спектров использовался ИК-фурье-спектрометр Spectrum 3 Optica (*PerkinElmer*, США), спектры комбинационного рассеяния света (КРС) записывались на спектрофотометре Ramanor U1000 (*Horiba Jobin Yvon*, Франция). Спектры отражения регистрировались на спектрометре Lambda 1050 (*PerkinElmer*). Все оптические измерения проводились при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждение

Спектр электролюминесценции структуры SiO_2/Si , полученной термическим окислением, представлен на рис. 1, а. Он характеризуется интенсивной полосой в красной области с максимумом при 1,9 эВ и фоновым свечением в диапазоне 2,0–3,5 эВ. Ранее была установлена связь полосы электролюминесценции при 1,9 эВ с наличием в слое SiO_2 силанольных групп ($\text{Si}-\text{OH}$) [13]. В процессе возбуждения люминесценции силанольные группы разрушаются с образованием центра люминесценции – однокоординированного кислорода ($\equiv\text{Si}-\text{O}\cdot$) в возбужденном состоянии. Его релаксация до основного состояния сопровождается излучением фотона [6]. Полоса с энергией 1,9 эВ и полушириной 0,18 эВ была зарегистрирована в спектрах фотолюминесценции стекла [16]. Авторы работы [16] также связали данную полосу с наличием в SiO_2 силанольных групп ($\text{Si}-\text{OH}$). Появление свечения приписывалось излучательным переходам между расщепленными под воздействием локальных электрических полей $2p$ -орбиталями немостиковых атомов кислорода, образующихся в результате диссоциации связи $\text{Si}-\text{OH}$. В нашем случае в процессе формирования слоев SiO_2 использовались газы, содержащие водород и кислород. Это могло приводить к образованию связей $\text{Si}-\text{OH}$ по всей толщине слоев оксида кремния. Таким образом, возникновение полосы электролюминесценции с энергией 1,9 эВ в термически выращенной оксидной пленке можно связать с наличием в слоях SiO_2 силанольных групп ($\text{Si}-\text{OH}$).

Электролюминесценция структуры SiO_2/Si , полученной плазмохимическим осаждением, представлена на рис. 1, б. Для данного образца зарегистрировано мультиполосное свечение высокой интенсивности в УФ-области спектра, полоса в красной области на спектре электролюминесценции не проявилась.



Спектр представляет собой набор узких полос с шириной на полувысоте около 0,11 эВ, локализованных в диапазоне энергий 3,2–5,2 эВ. Максимум наиболее интенсивной центральной полосы находится при 4,43 эВ. Энергетический сдвиг между соседними полосами составляет от 0,25 до 0,27 эВ. Вероятнее всего, наблюдаемая модуляция спектра – проявление тонкой структуры, а не результат интерференции. В пользу тонкой структуры говорит отсутствие полос интерференции на соответствующих спектрах отражения (см. рис. 1, б), а также отсутствие смещения полос при уменьшении толщины пленки методом травления. По-видимому, наблюдаемое свечение представляет собой электронно-колебательную полосу излучения. Величина энергетического сдвига 0,25–0,27 эВ в пересчете на сантиметры в минус первой степени соответствует 2000–2200 см^{-1} . Для подтверждения колебательной природы модуляции спектра были сняты спектры КРС и ИК-поглощения исследуемого образца, показанные на рис. 2. На ИК-спектрах в области частот 2000–2200 см^{-1} полос поглощения не наблюдалось, однако на спектре КРС проявилась слабая широкая полоса с максимумом при 2150 см^{-1} . Полосы в данном частотном диапазоне связаны с колебанием связей Si—H [17].

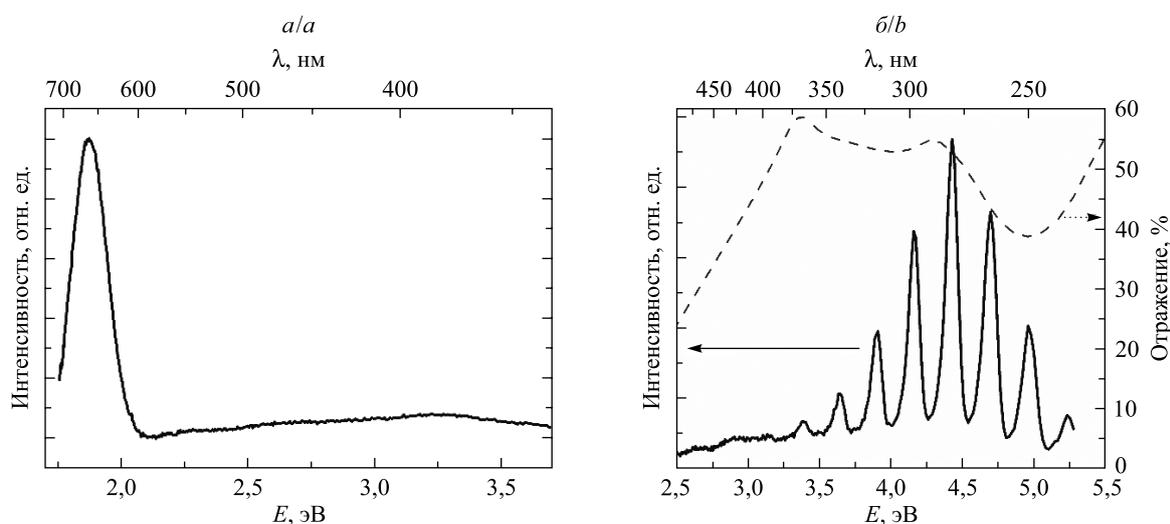


Рис. 1. Спектры электролюминесценции структур SiO_2/Si , полученных методами термического окисления (а) и плазмохимического осаждения (б).
Плотность тока через образец составляла 150 и 250 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ соответственно.
На рисунке б дополнительно показан спектр отражения

Fig. 1. Electroluminescence spectra of the SiO_2/Si structures formed by thermal oxidation (a) and plasma-enhanced chemical vapor deposition (b).
The current density through the sample was 150 and 250 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectively.
Figure b additionally shows a reflectance spectrum

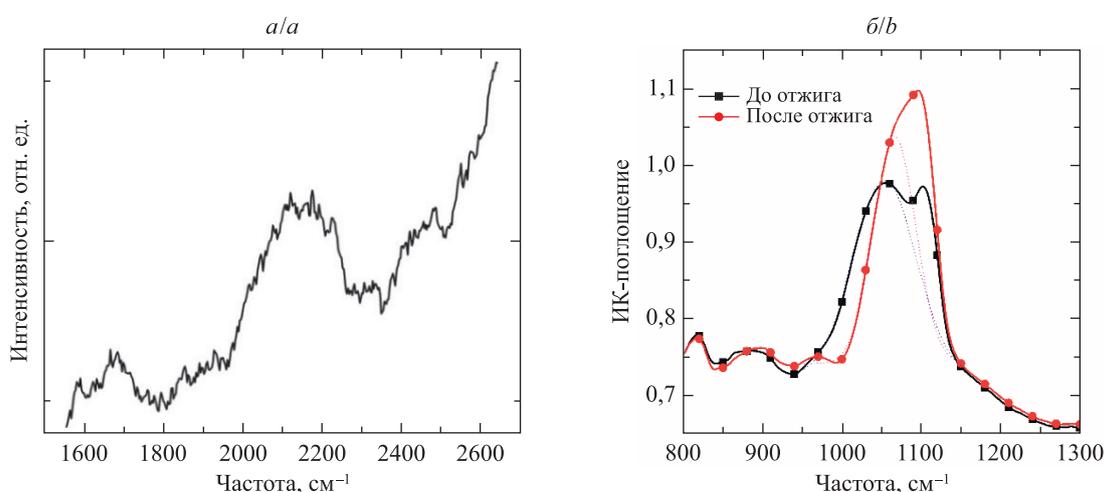


Рис. 2. Спектр КРС в области колебаний связей Si—H (а) и спектры ИК-поглощения в области колебаний связей Si—O до и после отжига (б) для структуры SiO_2/Si , полученной методом плазмохимического осаждения

Fig. 2. RS spectrum in the range of Si—H vibrations (a) and IR absorbance spectra in the range of Si—O vibrations before and after annealing (b) for the SiO_2/Si structure formed by plasma-enhanced chemical vapor deposition



В проводимом эксперименте формирование в оксиде таких связей ожидаемо из-за низкой температуры осаждения оксидного слоя и использования моносилана (SiH_4) в качестве прекурсора. В соответствии с [17] свечение оксида кремния в области 3,5–5,0 эВ связано с избытком кремния и (или) дефектами дефицита кислорода типа силиленовых центров, представляющих собой двухкоординированные по кислороду атомы кремния ($\text{O}_2=\text{Si}$). Наличие избытка кремния также подтверждают данные ИК-спектроскопии, приведенные на рис. 2, б. Известно, что положение полосы, обусловленной колебаниями связей $\text{Si}-\text{O}$, на спектрах ИК-поглощения зависит от концентрации избыточного кремния в SiO_2 . Так, для аморфного кремния с небольшой концентрацией кислорода полоса $\text{Si}-\text{O}$ проявляется при 940 см^{-1} , тогда как для стехиометрического диоксида кремния SiO_2 максимум данной полосы находится при 1075 см^{-1} [18]. В нашем случае валентные колебания связи $\text{Si}-\text{O}$ в оксидной пленке, полученной методом плазмохимического осаждения, наблюдаются при частоте 1050 см^{-1} , что говорит о недостатке кислорода в пленке SiO_x ($x \sim 1,7$) [18]. Для подтверждения роли связей $\text{Si}-\text{H}$ в формировании мультиполосного спектра электролюминесценции структур SiO_2/Si , полученных методом плазмохимического осаждения, был проведен дополнительный отжиг данного образца при $900 \text{ }^\circ\text{C}$ в атмосфере аргона. При отжиге в таком режиме должна происходить диссоциация связей $\text{Si}-\text{H}$. На спектрах КРС отожженного образца полосы, связанной с колебанием связей $\text{Si}-\text{H}$, не наблюдалось. Отжиг привел к полному тушению сигнала электролюминесценции в УФ-области, в то время как на спектрах ИК-поглощения отожженного образца максимум полосы $\text{Si}-\text{O}$ наблюдался при 1066 см^{-1} . Смещение полосы $\text{Si}-\text{O}$ в высокочастотную область, в сравнении со спектром неотожженного образца, говорит об улучшении качества пленки (возрастании параметра x). Наблюдаемое свечение в УФ-области, вероятнее всего, обусловлено наличием центров дефицита кислорода, содержащих связи с атомами водорода.

Заключение

Проведено сравнительное исследование электролюминесценции пленочных композиций SiO_2/Si , в которых пленки диоксида кремния наносились методами термического окисления и плазмохимического осаждения из газовой фазы. В спектре электролюминесценции оксидной пленки, полученной термическим окислением, доминирует интенсивная полоса в красной области с максимумом при 1,9 эВ. Сделан вывод о связи данной полосы с наличием в оксиде силанольных групп ($\text{Si}-\text{OH}$).

В спектре электролюминесценции структуры SiO_2/Si , полученной плазмохимическим осаждением, зарегистрировано мультиполосное свечение в УФ-области спектра с максимумом наиболее интенсивной центральной полосы при 4,43 эВ. Энергетический сдвиг между соседними полосами составляет от 0,25 до 0,27 эВ. С использованием дополнительных исследований методами ИК-спектроскопии и КРС показано, что модуляция спектра имеет колебательную природу, а не является результатом интерференции. Сделано предположение, что люминесценция в УФ-области обусловлена наличием центров дефицита кислорода, содержащих связи с атомами водорода. Тушение УФ-свечения после отжига при $900 \text{ }^\circ\text{C}$ в аргоне, а также сравнение ИК-спектров исходного и отожженного образцов подтвердили этот вывод.

Библиографические ссылки

1. Константинова-Шлезингер МА, редактор. *Люминесцентный анализ*. Москва: Физматгиз; 1961. 400 с.
2. Барабан АП, Дмитриев ВА, Петров ЮВ. *Электролюминесценция в твердотельных слоистых структурах на основе кремния*. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского университета; 2009. 195 с.
3. McKnight SW, Palic ED. Cathodoluminescence of SiO_2 films. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1980;40(3):595–603. DOI: 10.1016/0022-3093(80)90133-7.
4. Dyakov SA, Zhigunov DM, Hartel A, Zacharias M, Perova TS, Timoshenko VYu. Enhancement of photoluminescence signal from ultrathin layers with silicon nanocrystals. *Applied Physics Letters*. 2012;100(6):061908. DOI: 10.1063/1.3682537.
5. Parkhomenko I, Vlasukova L, Komarov F, Milchanin O, Makhavikou M, Mudryi A, et al. Origin of visible photoluminescence from Si-rich and N-rich silicon nitride films. *Thin Solid Films*. 2017;626:70–75. DOI: 10.1016/j.tsf.2017.02.027.
6. Baraban AP, Samarina SN, Prokofiev VA, Dmitriev VA, Selivanov AA, Petrov Y. Luminescence of SiO_2 layers on silicon at various types of excitation. *Journal of Luminescence*. 2019;205:102–108. DOI: 10.1016/j.jlumin.2018.09.009.
7. Canham LT. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers. *Applied Physics Letters*. 1990;57(10):1046–1048. DOI: 10.1063/1.103561.
8. Jambois O, Rinnert H, Devaux X, Vergnat M. Photoluminescence and electroluminescence of size-controlled silicon nanocrystallites embedded in SiO_2 thin films. *Journal of Applied Physics*. 2005;98:046105. DOI: 10.1063/1.2034087.
9. Sheng-Wen Fu, Hui-Ju Chen, Hsuan-Ta Wu, Chuan-Feng Shih. Effect of SiO_2 layers on electroluminescence from Si nanocrystal/ SiO_2 superlattices prepared using argon ion beam assisted sputtering. *Vacuum*. 2016;126:59–62. DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.01.020.
10. Berencén Y, Mundet B, Rodríguez JA, Montserrat J, Domínguez C, Garrido B. Hot electron engineering for boosting electroluminescence efficiencies of silicon-rich nitride light emitting devices. *Journal of Luminescence*. 2017;183:26–31. DOI: 10.1016/j.jlumin.2016.11.020.



11. Martínez HP, Luna JA, Morales R, Casco JF, Hernández JAD, Luna A, et al. Blue electroluminescence in SRO-HFCVD films. *Nanomaterials*. 2021;11(4):943. DOI: 10.3390/nano11040943.
12. Rodríguez JA, Vásquez-Agustín MA, Morales-Sánchez A, Aceves-Mijares M. Emission mechanisms of Si nanocrystals and defects in SiO₂ materials. *Journal of Nanomaterials*. 2014;2014:409482. DOI: 10.1155/2014/409482.
13. Барабан АП, Булавинов ВВ, Коноров ПП. *Электроника слоев SiO₂ на кремнии*. Ленинград: Издательство Ленинградского университета; 1988. 304 с.
14. Романов ИА, Комаров ФФ, Власукова ЛА, Пархоменко ИН, Ковальчук НС. Процессы деградации электролюминесценции светоизлучающих структур на основе тонких пленок оксида и нитрида кремния. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2021;65(2):158–167. DOI: 10.29235/1561-8323-2021-65-2-158-167.
15. Baraban AP, Egorov DV, Askinazi AYU, Miloglyadova LV. Electroluminescence of Si – SiO₂ – Si₃N₄ structures. *Technical Physics Letters*. 2002;28(12):978–980. DOI: 10.1134/1.1535507.
16. Skuja L. The origin of the intrinsic 1.9 eV luminescence band in glassy SiO₂. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1994;179:51–69. DOI: 10.1016/0022-3093(94)90684-X.
17. Bugaev KO, Zelenina AA, Volodin VA. Vibrational spectroscopy of chemical species in silicon and silicon-rich nitride thin films. *International Journal of Spectroscopy*. 2012;2012:281851. DOI: 10.1155/2012/281851.
18. Lucovsky G, Richard PD, Tsu DV, Lin SY, Markunas RJ. Deposition of silicon dioxide and silicon nitride by remote plasma enhanced chemical vapor deposition. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 1986;4:681–688. DOI: 10.1116/1.573832.

References

1. Konstantinova-Shlezinger MA, editor. *Lyuminescentnyi analiz* [Luminescence analysis]. Moscow: Fizmatgiz; 1961. 400 p. Russian.
2. Baraban AP, Dmitriev VA, Petrov YuV. *Elektrolyuminescentiya v tverdotel'nykh sloistykh strukturakh na osnove kremniya* [Electroluminescence in solid-state silicon-based layered structures]. Saint Petersburg: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo universiteta; 2009. 195 p. Russian.
3. McKnight SW, Palic ED. Cathodoluminescence of SiO₂ films. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1980;40(3):595–603. DOI: 10.1016/0022-3093(80)90133-7.
4. Dyakov SA, Zhigunov DM, Hartel A, Zacharias M, Perova TS, Timoshenko VYu. Enhancement of photoluminescence signal from ultrathin layers with silicon nanocrystals. *Applied Physics Letters*. 2012;100(6):061908. DOI: 10.1063/1.3682537.
5. Parkhomenko I, Vlasukova L, Komarov F, Milchanin O, Makhavikou M, Mudryi A, et al. Origin of visible photoluminescence from Si-rich and N-rich silicon nitride films. *Thin Solid Films*. 2017;626:70–75. DOI: 10.1016/j.tsf.2017.02.027.
6. Baraban AP, Samarina SN, Prokofiev VA, Dmitriev VA, Selivanov AA, Petrov Y. Luminescence of SiO₂ layers on silicon at various types of excitation. *Journal of Luminescence*. 2019;205:102–108. DOI: 10.1016/j.jlumin.2018.09.009.
7. Canham LT. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers. *Applied Physics Letters*. 1990;57(10):1046–1048. DOI: 10.1063/1.103561.
8. Jambois O, Rinnert H, Devaux X, Vergnat M. Photoluminescence and electroluminescence of size-controlled silicon nanocrystallites embedded in SiO₂ thin films. *Journal of Applied Physics*. 2005;98:046105. DOI: 10.1063/1.2034087.
9. Sheng-Wen Fu, Hui-Ju Chen, Hsuan-Ta Wu, Chuan-Feng Shih. Effect of SiO₂ layers on electroluminescence from Si nanocrystal/SiO₂ superlattices prepared using argon ion beam assisted sputtering. *Vacuum*. 2016;126:59–62. DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.01.020.
10. Berencén Y, Mundet B, Rodríguez JA, Montserrat J, Domínguez C, Garrido B. Hot electron engineering for boosting electroluminescence efficiencies of silicon-rich nitride light emitting devices. *Journal of Luminescence*. 2017;183:26–31. DOI: 10.1016/j.jlumin.2016.11.020.
11. Martínez HP, Luna JA, Morales R, Casco JF, Hernández JAD, Luna A, et al. Blue electroluminescence in SRO-HFCVD films. *Nanomaterials*. 2021;11(4):943. DOI: 10.3390/nano11040943.
12. Rodríguez JA, Vásquez-Agustín MA, Morales-Sánchez A, Aceves-Mijares M. Emission mechanisms of Si nanocrystals and defects in SiO₂ materials. *Journal of Nanomaterials*. 2014;2014:409482. DOI: 10.1155/2014/409482.
13. Baraban AP, Bulavinov VV, Konorov PP. *Elektronika sloev SiO₂ na kremnii* [Electronics of SiO₂ layers on silicon]. Leningrad: Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta; 1988. 304 p. Russian.
14. Romanov IA, Komarov FF, Vlasukova LA, Parkhomenko IN, Kovalchuk NS. Processes of electroluminescence degradation of light-emitting structures based on thin silicon oxide and nitride films. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2021;65(2):158–167. DOI: 10.29235/1561-8323-2021-65-2-158-167. Russian.
15. Baraban AP, Egorov DV, Askinazi AYU, Miloglyadova LV. Electroluminescence of Si – SiO₂ – Si₃N₄ structures. *Technical Physics Letters*. 2002;28(12):978–980. DOI: 10.1134/1.1535507.
16. Skuja L. The origin of the intrinsic 1.9 eV luminescence band in glassy SiO₂. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1994;179:51–69. DOI: 10.1016/0022-3093(94)90684-X.
17. Bugaev KO, Zelenina AA, Volodin VA. Vibrational spectroscopy of chemical species in silicon and silicon-rich nitride thin films. *International Journal of Spectroscopy*. 2012;2012:281851. DOI: 10.1155/2012/281851.
18. Lucovsky G, Richard PD, Tsu DV, Lin SY, Markunas RJ. Deposition of silicon dioxide and silicon nitride by remote plasma enhanced chemical vapor deposition. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 1986;4:681–688. DOI: 10.1116/1.573832.

Получена 20.08.2021 / исправлена 25.08.2021 / принята 22.09.2021.
Received 20.08.2021 / revised 25.08.2021 / accepted 22.09.2021.