УДК 538.958

**ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР
CaF₂/Si/CaF₂/Si(111), ОБЛАДАЮЩИХ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЕЙ
В ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА**

**И.Е. Руденко, А.А. Величко, А.Ю. Крупин,
Н.И. Филимонова, В.А. Илюшин**

Новосибирский государственный технический университет

В работе представлена методика получения многослойных периодических структур CaF₂/Si/CaF₂/Si(111) с излучательной способностью в видимой области спектра. Особенностью данной методики является то, что осаждение слоев Si и CaF₂ осуществлялось при комнатной температуре с последующим импульсным отжигом.

Получены спектры фотолюминесценции выращенного образца, измеренные при длине волны возбуждения 325 и 405 нм.

Исследование низкотемпературной фотолюминесценции проводилось лазером с длиной волны 405 нм, так как при возбуждении лазером с длиной волны 325 нм излучение в структуре не наблюдалась. Представлены спектры фотолюминесценции, измеренные при комнатной температуре и температуре жидкого азота, по которым было установлено смещение максимума фотолюминесценции на 20 нм. Ширина на полувысоте уменьшилась с 284 до 210 нм при понижении температуры.

Ключевые слова: фотолюминесценция, молекулярно-лучевая эпитаксия, фторид кальция, гетероструктуры, нанокристаллы кремния.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-3-44-51

Введение

На сегодняшний день быстродействие современных интегральных схем высокой степени интеграции ограничивается задержками в линиях связи. Одним из способов решения данной проблемы, возможно, является использование оптических технологий, которые требуют создания интегральных оптоэлектронных компонентов, совместимых с технологией кремниевых интегральных схем. Обнаружение фотолюминесценции (ФЛ) в пористом кремнии [1, 2] стимулировало интерес к поиску способов увеличения излучательной способности кремния, что позволило бы использовать данный материал в качестве основы в оптоэлектронике.

В настоящее время имеется множество работ, посвященных исследованию люминесценции в структурах с нанокристаллами кремния, полученных разными способами [3–8].

Большинство работ, связанных с люминесценцией нанокристаллов Si, посвящено изучению излучательных свойств в структурах с аморфной диэлектрической матрицей SiO₂. Главным преимуществом данного диэлектрика является его широкое использование в кремниевой технологии. Однако, как правило, получение нанокристаллов кремния в матрице SiO₂ сопровождается высокотемпературным отжигом [9–11]. Помимо этого, большое рассогласование по постоянной решетки Si и SiO₂ характеризуется высокой плотностью состояний на интерфейсе Si/SiO₂, которые вносят существенный вклад в ФЛ [12].

Одним из альтернативных способов получения нанокристаллического Si является создание квантоворазмерных структур в массиве диэлектрика CaF_2 [13–16].

В отличие от аморфного SiO_2 рассогласование по постоянной решетки между кремнием и фторидом кальция не превышает 0,6 % (при комнатной температуре), а кубическая гранецентрированная кристаллическая решетка CaF_2 по своим структурным свойствам близка к кристаллической решетке кремния. Данные факторы обеспечивают создание эпитаксиальных структур $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$.

В данной работе представлена методика получения наноразмерных многослойных периодических структур $\text{CaF}_2/\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$, обладающих люминесценцией в видимой области излучения.

1. Методика эксперимента

Для получения наноразмерных многослойных периодических структур $\text{CaF}_2/\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ использовалась установка молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100», оснащенная дифрактометром быстрых электронов для контроля качества роста. Осаждение слоев осуществлялось в замкнутом технологическом цикле на подложке Si с ориентацией (111) КДБ-20. Источником молекулярного пучка фторида кальция являлся источник резистивного типа со стеклоуглеродным тиглем. Пучок кремния формировался методом электронно-лучевого испарения.

Чтобы уменьшить дефектообразование во время осаждения, подложка кремния прошла стандартную предэпитаксиальную обработку, состоящую из очистки в органических растворителях, травления поверхностного окисла в HF и формирования пассивирующего окисла $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{HNO}_3$.

После загрузки подложки в камеру роста пассивирующий окисел удалялся отжигом в слабом потоке кремния при температуре $\sim 700^\circ$. После появления дифракционной картины $\text{Si}(111)$ – (7×7) выращивался буферный слой кремния. Далее подложка остужалась до комнатной температуры (30°) и происходило осаждение Si и CaF_2 . При этом скорость осаждения фторида кальция составляла $0,21 \text{ \AA}/\text{с}$, а Si – $0,13 \text{ \AA}/\text{с}$. Толщина CaF_2 – 1,2 нм, Si – 1,6 нм. Общее количество слоев в структуре составляет 27 штук. Для защиты от окисления кремния последним слоем наносился CaF_2 .

После формирования многослойной структуры образец подвергался импульсному отжигу при температуре 670° в течение 3 мин в атмосфере азота. Таким образом формирование структуры происходило с помощью твердофазной эпитаксии.

Для возбуждения ФЛ использовались лазеры с длиной волны 325 и 405 нм. Регистрацию фотолюминесценции выполняли с помощью двойного дифракционного монохроматора и кремниевой CCD-матрицы.

2. Анализ спектров ФЛ

С учетом того, что во время твердофазной эпитаксии происходит формирование поликристаллов кремния в структуре, толщина слоев выбрана таким образом, чтобы фотолюминесценция наблюдалась в видимой области спектра за счет квантово-размерных эффектов. Полученные спектры фотолюминесценции структуры $\text{CaF}_2/\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ при комнатной температуре представлены на рис. 1. При возбуждении ФЛ лазером с длиной волны излучения 325 нм максимум излучения наблюдался на длине волны 480 нм. Полная ширина спектра на полувысоте составляет 165 нм. Ширина спектра, видимо, обусловлена вариацией толщины слоев кремния по пластине, из-за чего варьируется ширина квантовых ям и меняется их энергетический спектр.

Рис. 1 – Нормированные спектры ФЛ образца, возбужденного лазерами с разными длинами волн при комнатной температуре

Fig. 1 – Normalized PL spectra of a sample excited by lasers with different wavelengths at room temperature.

При возбуждении ФЛ лазером с длиной волны 405 нм максимум спектра смещается к 500 нм. Толщина слоев кремния в структурах хорошо коррелирует с наблюдаемыми при фотолюминесценции энергиями [17, 18] и позволяет заключить, что появление фотолюминесценции в видимом диапазоне в наших структурах связано с квантово-размерными эффектами.

Рис. 2 – Нормированный спектр ФЛ образца, измеренный при разной температуре при длине волны возбуждения 405 нм

Fig. 2 – Normalized PL spectrum of the sample measured at different temperatures at an excitation wavelength of 405 nm

На рис. 2 представлено сравнение спектров ФЛ, полученных при комнатной температуре и при температуре жидкого азота. Длина волны возбуждающего излучения 405 нм. Наблюдалось сужение ширины спектра на 85 нм. При этом спектр ФЛ при температуре 77 К и при возбуждении лазером с длиной волны 325 нм не удалось обнаружить. Возможно, на данной длине волны происходит генерация горячих носителей с их последующей безызлучательной рекомбинацией. Однако данный вопрос требует дальнейшего отдельного исследования.

Закключение

Представленная в работе методика позволила получить многослойную периодическую структуру $\text{CaF}_2/\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$, обладающую ФЛ в видимой области излучения. Поэтому данная методика может быть применена для создания интегральных оптических компонентов, совместимых с кремниевой технологией [19].

Положение максимума спектра позволило предположить, что основным механизмом излучения является квантово-размерный эффект.

Исследования ФЛ при пониженной температуре выявили, что спектр ФЛ не наблюдается при возбуждении лазером с длиной волны 325 нм, что требует дальнейшего исследования в этой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Canham L.T.** Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers // *Applied Physics Letters*. – 1990. – Vol. 57, N 10. – P. 1046–1048. – DOI: 10.1063/1.103561.
2. **John G.C., Singh V.A.** Theory of the photoluminescence spectra of porous silicon // *Physical Review B*. – 1994. – Vol. 50, N 8. – P. 5329–5334. – DOI: 10.1103/physrevb.50.5329.
3. **Saeta P.N., Gallagher A.C.** Photoluminescence properties of silicon quantum-well layers // *Physical Review B*. – 1997. – Vol. 55, N 7. – P. 4563–4574. – DOI: 10.1103/PhysRevB.55.4563.
4. **Zhang Q., Bayliss S.C., Hutt D.A.** Blue photoluminescence and local structure of Si nanostructures embedded in SiO_2 matrices // *Applied Physics Letters*. – 1995. – Vol. 66. – P. 1977–1979.
5. Photo- and electroluminescence from nanocrystalline silicon single and multilayer structures / P. Photopoulos, A.G. Nassiopoulou, D.N. Kouvatsos, A. Travlos // *Materials Science and Engineering B*. – 2000. – Vol. 69, N 70. – P. 345–349.
6. Photoluminescence in crystalline silicon quantum wells / E.-Ch. Cho, M.A. Green, R. Corkish, P. Reece, M. Gal, S.-H. Lee // *Journal of Applied Physics*. – 2007. – Vol. 101. – P. 024321–024321-6. – DOI: 10.1063/1.2430919.
7. Излучение кремниевых нанокристаллов. Обзор / О.Б. Гусев, А.Н. Поддубный, А.А. Прокофьев, И.Н. Ясиевич // *Физика и техника полупроводников*. – 2013. – Т. 47 (2). – С. 147–167.
8. **Canham L.T.** Introductory lecture: origins and applications of efficient visible photoluminescence from silicon-based nanostructures // *Faraday Discussions*. – 2020. – Vol. 222, N 10. – P. 10–81. – DOI: 10.1039/d0fd00018c.
9. Influence of a high electric field on the photoluminescence from silicon nanocrystals in SiO_2 / V. Ioannou-Sougleridis, B. Kamenev, D.N. Kouvatsos, A.G. Nassiopoulou // *Materials Science and Engineering B*. – 2003. – Vol. 101. – P. 324–328. – DOI: 10.1016/S0921-5107(02)00733-X.
10. Composition and optical properties of amorphous a-SiOx:H films with silicon nanoclusters / V.A. Terekhov, E.I. Terukov, Yu.K. Undalov, E.V. Parinova, D.E. Spirin, P.V. Seredin, D.A. Minakov, E.P. Domashevskaya // *Semiconductors*. – 2016. – Vol. 50, N 2. – P. 212–216. – DOI: 10.1134/S1063782616020251.

11. Формирование нанокластеров кремния в гетероструктурах Si-SiO₂-α-Si-SiO₂ при высокотемпературных обработках: эксперимент, моделирование / И.Г. Неизвестный, В.А. Володин, Г.Н. Камаев, С.Г. Черкова, С.В. Усенков, Н.Л. Шварц // Автометрия. – 2016. – Т. 52, № 5. – С. 84–96. – DOI: 10.15372/AUT20160510.
12. Visible luminescence from Si/SiO₂ quantum wells and dots: confinement and localization of excitons / Y. Kanemitsu, Y. Fukunishi, S. Iiboshi, Okamoto, T. Kushida // Physica E. – 2000. – Vol. 7. – P. 456–460.
13. **Maruyama T., Nakamura N., Watanabe M.** Improvement of the visible electroluminescence from nanocrystalline silicon embedded in CaF₂ on Si(111) substrate prepared by rapid thermal annealing // Japanese Journal of Applied Physics. – 2000. – Vol. 39. – P. 1996–2000.
14. Luminescence of nanocrystalline Si in (Si + CaF₂)/CaF₂ structures in the visible range of the spectrum / A.A. Velichko, V.A. Ilyushin, A.Y. Krupin, N.I. Filimonova // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 64, N 2. – P. 198–202.
15. Влияние режимов роста гетероструктур CaF₂/(Si + CaF₂)/CaF₂/Si(111) на спектр фотолюминесценции / А.А. Величко, А.Ю. Крупин, Н.И. Филимонова, В.А. Илюшин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2021. – № 5. – С. 13–19.
16. Анализ интенсивности осцилляций зеркального рефлекса ДБЭ в процессе получения структур CaF₂/Si/CaF₂ методом молекулярно-лучевой эпитаксии / А.А. Величко, В.А. Илюшин, А.Ю. Крупин, В.А. Гавриленко, Н.И. Филимонова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – № 9. – С. 33–37.
17. **Бурдов В.А.** Зависимость ширины оптической щели кремниевых квантовых точек от их размера // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. 36, № 10. – С. 1233–1236.
18. **Delerue C., Allan G., Lannoo M.** Theoretical aspects of the luminescence of porous silicon // Physical Review B. – 1993. – Vol. 48, N 15. – P. 11024–11036. – DOI: 10.1103/physrevb.48.11024.
19. Патент 2642132 Российская Федерация. Оптоэлектронное устройство / А.Ю. Крупин, А.А. Величко, В.А. Гавриленко. – № 2016129923; заявл. 20.07.2016; опубл. 24.01.2018.

PREPARATION OF MULTILAYER PERIODIC CaF₂/Si/ CaF₂/Si (111) STRUCTURES WITH PHOTOLUMINESCENCE IN THE VISIBLE SPECTRUM

**Rudenko I.E., Velichko A.A., Krupin A.Yu.,
Filimonova N.I., Ilyushin V.A.**

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The paper presents a method for obtaining some multilayer periodic CaF₂/Si/CaF₂/Si (111) structures with an emissivity in the visible region of the spectrum. A feature of this technique is that the deposition of Si and CaF₂ layers was carried out at room temperature, followed by pulsed annealing.

The photoluminescence spectra of the grown sample were obtained and measured at excitation wavelengths of 325 nm and 405 nm.

The study of low-temperature photoluminescence was carried out with a laser with a wavelength of 405 nm, since no radiation in the structure was observed upon excitation with a laser with a wavelength of 325 nm. The photoluminescence spectra measured at room temperature and

liquid nitrogen temperature are presented, according to which the shift of the photoluminescence maximum by 20 nm was established. The FWHM decreased from 284 nm to 210 nm with decreasing temperature.

Keywords: photoluminescence, molecular beam epitaxy, calcium fluoride, heterostructures, silicon nanocrystals.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-3-44-51

REFERENCES

1. Canham L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers. *Applied Physics Letters*, 1990, vol. 57, no. 10, pp. 1046–1048. DOI: 10.1063/1.103561.
2. John G.C., Singh V.A. Theory of the photoluminescence spectra of porous silicon. *Physical Review B*, 1994, vol. 50, no. 8, pp. 5329–5334. DOI: 10.1103/physrevb.50.5329.
3. Saeta P.N., Gallagher A.C. Photoluminescence properties of silicon quantum-well layers. *Physical Review B*, 1997, vol. 55, no. 7, pp. 4563–4574. DOI: 10.1103/PhysRevB.55.4563.
4. Zhang Q., Bayliss S.C., Hutt D.A. Blue photoluminescence and local structure of Si nanostructures embedded in SiO₂ matrices. *Applied Physics Letters*, 1995, vol. 66, pp. 1977–1979.
5. Photopoulos P., Nassiopoulou A.G., Kouvatsos D.N., Travlos A. Photo- and electroluminescence from nanocrystalline silicon single and multilayer structures. *Materials Science and Engineering B*, 2000, vol. 69, no. 70, pp. 345–349.
6. Cho E.-Ch., Green M.A., Corkish R., Reece P., Gal M., Lee S.-H. Photoluminescence in crystalline silicon quantum wells. *Journal of Applied Physics*, 2007, vol. 101, pp. 024321–024321-6. DOI: 10.1063/1.2430919.
7. Gusev O.B., Poddubny A.N., Prokofiev A.A., Yassievich I.N. Izluchenie kremnievykh nanokristallov. Obzor [Light emission of silicon nanocrystals (a review)]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 2013, vol. 47 (2), pp. 147–167. (In Russian).
8. Canham L.T. Introductory lecture: origins and applications of efficient visible photoluminescence from silicon-based nanostructures. *Faraday Discussions*, 2020, vol. 222, no. 10, pp. 10–81. DOI: 10.1039/d0fd00018c.
9. Ioannou-Sougleridis V., Kamenev B., Kouvatsos D.N., Nassiopoulou A.G. Influence of a high electric field on the photoluminescence from silicon nanocrystals in SiO₂. *Materials Science and Engineering B*, 2003, vol. 101, pp. 324–328. DOI: 10.1016/S0921-5107(02)00733-X.
10. Terekhov V.A., Terukov E.I., Undalov Yu.K., Parinova E.V., Spirin D.E., Seredin P.V., Minakov D.A., Domashevskaya E.P. Composition and optical properties of amorphous a-SiO_x:H films with silicon nanoclusters. *Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 2, pp. 212–216. DOI: 10.1134/S1063782616020251.
11. Neizvestnyi I.G., Volodin V.A., Kamaev G.N., Cherkova S.G., Usenkov S.V., Shwartz N.L. Formirovanie nanoklasteroi kremniya v geterostrukturakh Si-SiO₂-α-Si-SiO₂ pri vysokotemperaturnykh obrabotkakh: eksperiment, modelirovanie [Formation of silicon nanocrystals in Si-SiO₂-α-Si-SiO₂ heterostructures during high-temperature annealing: experiment and simulation]. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2016, vol. 52, no. 5, pp. 84–96. DOI: 10.15372/AUT20160510. (In Russian).
12. Kanemitsu Y., Fukunishi Y., Iiboshi M., Okamoto S., Kushida T. Visible luminescence from Si/SiO₂ quantum wells and dots: confinement and localization of excitons. *Physica E*, 2000, vol. 7, pp. 456–460.

13. Maruyama T., Nakamura N., Watanabe M. Improvement of the visible electroluminescence from nanocrystalline silicon embedded in CaF_2 on Si(111) substrate prepared by rapid thermal annealing. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 39, pp. 1996–2000.
14. Velichko A.A., Ilyushin V.A., Krupin A.Y., Filimonova N.I. Luminescence of nanocrystalline Si in $(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2$ structures in the visible range of the spectrum. *Russian Physics Journal*, 2021, vol. 64, no. 2, pp. 198–202.
15. Velichko A.A., Krupin A.Y., Ilyushin V.A., Filimonova N.I. Vliyanie rezhimov rosta geterostruktur $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ na spektr fotolyuminesentsii [Influence of growth modes of the $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ heterostructures on their photoluminescence spectrum]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neutronnye issledovaniya = Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2021, no. 5, pp. 13–19. (In Russian).
16. Velichko A.A., Ilyushin V.A., Krupin A.Y., Gavrilenko V.A., Filimonova N.I. Analiz intensivnosti ostsillyatsii zerkal'nogo refleksa DBE v protsesse polucheniya struktur $\text{CaF}_2/\text{Si}/\text{CaF}_2$ metodom molekulyarno-luchevoi epitaksii [Oscillations intensity analysis of RHEED mirror-like reflex during MBE growth of the $\text{CaF}_2/\text{Si}/\text{CaF}_2$ structures]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neutronnye issledovaniya = Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2016, no. 9, pp. 33–37. (In Russian).
17. Burdov V.A. Zavisimost' shiriny opticheskoi shcheli kremnievykh kvantovykh toчек ot ikh razmera [Dependence of the optical gap of Si quantum dots on the dot size]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 2002, vol. 36, no. 10, pp. 1233–1236. (In Russian).
18. Delerue C., Allan G., Lannoo M. Theoretical aspects of the luminescence of porous silicon. *Physical Review B*, 1993, vol. 48, no. 15, pp. 11024–11036. DOI: 10.1103/physrevb.48.11024.
19. Krupin A.Yu., Velichko A.A., Gavrilenko V.A. *Optoelektronnoe ustroystvo* [Optoelectronic device]. Patent RF, no. 2642132, 2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Руденко Игорь Евгеньевич – родился в 1997 году, аспирант кафедры ПИМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: молекулярно-лучевая эпитаксия гетероструктур. Опубликовано четыре научные работы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: igor_rudenko.ru@mail.ru).

Rudenko Igor Evgenyevich (b. 1997) – a postgraduate student at the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on molecular beam epitaxy of heterostructures. He is the author of 4 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: igor_rudenko.ru@mail.ru).

Величко Александр Андреевич – родился в 1949 году, д-р техн. наук, профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нанотехнологии в электронике и оптоэлектронике. Опубликовано более 95 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: velichko@corp.nstu.ru).

Velichko Aleksandr Andreevich (b. 1949) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the Semiconductors and Microelectronics Department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nanotechnology in electronics and optoelectronics. He is the author of more than 95 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: velichko@corp.nstu.ru).

Крупин Алексей Юрьевич – родился в 1986 году, ассистент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нанотехнологии в электронике и оптоэлектронике. Опубликовано 17 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: krupin@corp.nstu.ru).

Krupin Aleksey Yurievich (b. 1986) – assistant of the Semiconductors and Microelectronics Department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nanotechnology in electronics and optoelectronics. He is the author of 17 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: krupin@corp.nstu.ru).

Филимонова Нина Ивановна – родилась в 1963 году, канд. техн. наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования процессов роста при молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) полупроводниковых пленок, многослойных гетероэпитаксиальных систем, наноструктур. Опубликовано более 60 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: filimonova@corp.nstu.ru).

Filimonova Nina Ivanovna (b. 1963) – PhD (Eng.), associate professor at the Semiconductors and Microelectronics Department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on theoretical and experimental investigation of molecular beam epitaxy (MBE) growth processes of semiconductor films, multilayer heteroepitaxial systems, and nanostructures. She is the author of more than 60 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: filimonova@corp.nstu.ru).

Илюшин Владимир Александрович – родился в 1956 году, канд. техн. наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования процессов роста при молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) полупроводниковых пленок, многослойных гетероэпитаксиальных систем, наноструктур. Опубликовано более 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: ilval@ngs.ru).

Ilyushin Vladimir Aleksandrovich (b. 1956) – PhD (Eng.), associate professor at the Semiconductors and Microelectronics Department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on theoretical and experimental investigation of molecular beam epitaxy (MBE) growth processes of semiconductor films, multilayer heteroepitaxial systems, and nanostructures. He is the author of more than 50 papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ilval@ngs.ru).

Статья поступила 24 августа 2021 г.
Received August 17, 2021

To Reference:

Rudenko I.E., Velichko A.A., Krupin A.Yu., Filimonova N.I., Ilyushin V.A. Poluchenie mnogoslownykh periodicheskikh struktur $\text{CaF}_2/\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$, obladayushchei fotoluminestsentsiei v vidimoi oblasti spektra [Preparation of multilayer periodic $\text{CaF}_2/\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ structures with photoluminescence in the visible spectrum]. *Doklady Akademii nauk vyssheï shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 3 (52), pp. 44–51. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-3-44-51.