

8. *Alferov Z.I. Double Heterostructure Lasers: Early Days and Future Perspectives, IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, Vol. 6, No. 6, pp. 832-840.
9. *Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Injection Laser with a Functionally Integrated Frequency Modulator Based on Spatially Shifted Quantum Wells, Technical Physics Letters*, 2013, Vol. 39, No. 11, pp. 986-989.
10. *Ryndin E.A., Denisenko M.A. A Functionally Integrated Injection Laser-Modulator with the Radiation Frequency Modulation, Russian Microelectronics*, 2013, Vol. 42, No. 6, pp. 360-362.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

Рындин Евгений Адальбертович – Южный федеральный университет; e-mail: rynenator@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634311584; кафедра конструирования электронных средств; д.т.н.; профессор.

Денисенко Марк Анатольевич – e-mail: dema.bmfe@gmail.com; тел.: +79061833629; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; ассистент.

Ryndin Evgeniy Adalbertovich – Southern Federal University; e-mail: rynenator@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634311584; the department of electronic apparatuses design; dr. of eng. sc.; professor.

Denisenko Mark Anatolievich – e-mail: dema.bmfe@gmail.com; phone: +79061833629; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.; assistant.

УДК 681.518: 666.1/28

С.П. Малюков, А.В. Саенко, Ю.В. Клунникова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ САПФИРА

Проведены экспериментальные исследования лазерной обработки сапфира и формирования пленок на поверхности сапфира на установке LIMO 100-532/1064-U. Обработка осуществлялась с помощью твердотельного Nd:YAG лазера с фиксированной длиной волны 1064 нм. При исследовании процессов лазерной обработки структур пленка-сапфир наиболее важным является расчет температуры и определение режимов термической обработки, обеспечивающих максимальный отжиг дефектов. Проведен расчет распределения температур в процессе лазерного воздействия на структуру пленка-сапфир численным моделированием нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности, заключающимися в аппроксимации частных производных исходных уравнений соответствующими конечными разностями. Результаты моделирования позволили определить оптимальные режимы обработки образца при различном нагреве лазерным излучением. Установлено, что при средней мощности лазерного излучения 80–90 Вт температура на поверхности составляет порядка 800–900 К, что является необходимым условием для роста пленки на поверхности подложки сапфира.

Технологический процесс; монокристаллы сапфира; распределение температуры; лазерная обработка.

S.P. Malyukov, A.V. Sayenko, Y.V. Klunnikova

PROCESS SIMULATION OF SAPPHIRE LASER PROCESSING

The experimental researches of sapphire laser processing and film formation on the sapphire surface were made on the plant LIMO 100-532/1064-U. The processing was realized by solid-state Nd:YAG laser with a fixed wavelength 1064 nm. The most important thing in the research of laser processing film – sapphire structures is to calculate the temperature and to determine the condition modes of heat treatment providing maximum of defects annealing. The calculation of temperature distribution in the course of laser action on the film – sapphire structure was made by numerical modeling of the non-stationary differential equations of heat conductivity that

consists in approximation of the particular derivatives initial equations by corresponding final differences. The simulated results allowed to determine the optimal process rates of the sample processing in different temperatures of laser radiation. It was established that when the average laser power was 80–90 W the surface temperature was approximately 800–900 K, which is the required condition for film growth on the surface of sapphire substrate.

Technological process; sapphire single-crystals; temperature distribution; laser treatment.

Введение. В настоящее время в различных областях науки и техники широкое распространение получили лазерные технологические операции. Задача лазерной обработки заключается в том, чтобы обеспечить расположение ионов в области, находящейся ближе к поверхности подложки, и уменьшить количество дефектов структуры [1].

Монокристаллы сапфира обладают комплексом определенных физических свойств (высокая температура плавления, химическая и радиационная стойкость, высокая твердость и прозрачность), благодаря чему они находят широкое применение в микроэлектронике, квантовой электронике, оптике высокого разрешения и нанотехнологиях [2–5].

Методика исследования. Экспериментальные исследования обработки сапфира и формирования пленок на поверхности сапфира были выполнены на установке (модель LIMO 100-532/1064-U), которая включает в себя инфракрасный (ИК) Nd:YAG лазер с фиксированной длиной волны 1064 нм, длительностью импульса 84 нс и мощности лазерного излучения, которая может задаваться программно в диапазоне от 0,1 до 100 Вт. Для контроля мощности лазерного излучения использовался измеритель мощности Coherent FieldMaxII-TOP.

Эксперименты по получению пленки на поверхности сапфира проводились путем обработки пластины сапфира в присутствии воды и 3 %-ного раствора FeCl_3 четырьмя проходами лазерного луча мощностью 90 Вт. На рис. 1, а, б представлены изображения нерастворимой в воде пленки Fe_2O_3 желтого цвета на поверхности сапфира.

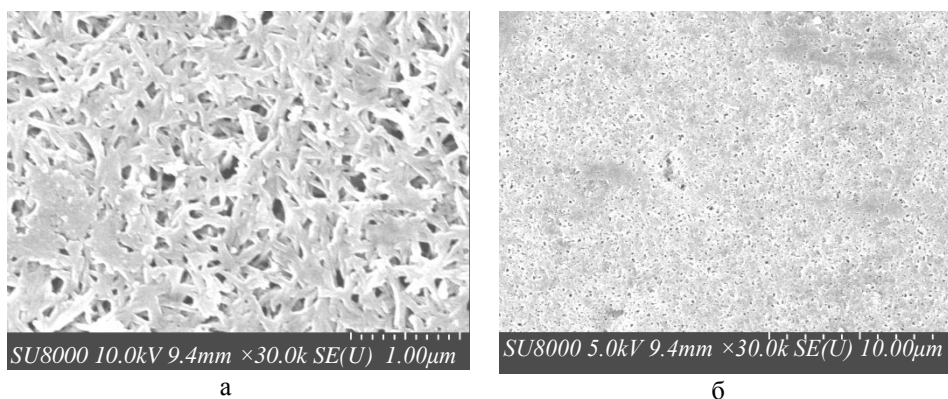


Рис. 1. Изображение пленки Fe_2O_3 на поверхности сапфира

На рис. 2 приведены масс-спектры полученного образца пленки на сапфире.

При исследовании процессов лазерной обработки структур пленка–сапфир, наиболее важным является расчет температуры и определение режимов термической обработки, обеспечивающих максимальный отжиг дефектов (вакансий или межузельных атомов), максимальную активацию внедренной примеси и эффективный рост пленки [6].

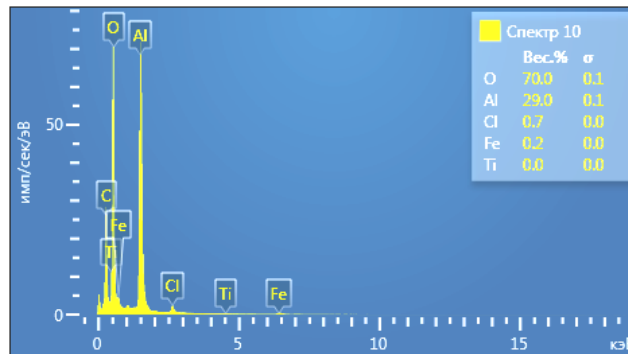


Рис. 2. Масс-спектры полученного образца пленки на сапфире

Взаимодействие лазерного излучения с твёрдым телом в спектральном диапазоне от ультрафиолетовой до инфракрасной области происходит на уровне электронной подсистемы [7]. Детально описать каждый из вышеперечисленных процессов достаточно сложно. Также сложно получить строгое математическое описание процесса взаимодействия света с твердым телом даже для частного случая. Однако для большинства практически важных случаев, значение времени протекания процессов возбуждения, термализации и рекомбинации носителей заряда много меньше длительности светового импульса, что позволяет говорить о преимущественно тепловых процессах в материале [7].

Известно, что перенос тепловой энергии в материале определяется процессами теплопроводности. Процесс переноса теплоты теплопроводностью возможен лишь тогда, когда в различных точках тела температура неодинакова. Передача теплоты теплопроводностью в материале сопровождается изменением температуры как в пространстве, так и во времени. Поэтому при обработке материала лазерным излучением возникает нестационарное температурное поле. Связь между величинами, определяющими передачу теплоты, устанавливает уравнение теплопроводности [8].

Рассмотрим случай лазерного облучения пленки оксида железа Fe_2O_3 толщиной порядка 1 мкм на поверхности сапфира (рис. 3).

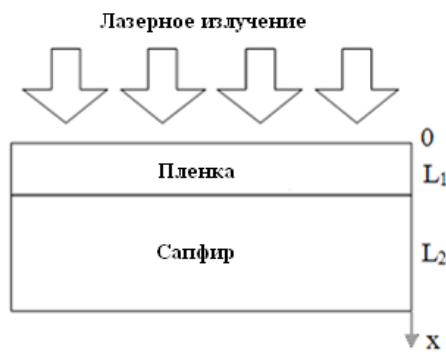


Рис. 3. Схема лазерного облучения структуры пленка–сапфир

Структура пленка–сапфир, облучаемая импульсным лазерным излучением (Nd:YAG-лазер, длина волны 1064 нм, длительность лазерного импульса 84 нс, частота следования импульсов 10 кГц), изотропна и гомогенна. Одномерные нестационарные уравнения теплопроводности для каждого слоя будут иметь вид [9, 10]:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial t} = k_1 \frac{\partial^2 T_1(x,t)}{\partial x^2} + F_1(x), \quad (1)$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t} = k_2 \frac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial x^2} + F_2(x), \quad (2)$$

где T_i – температуры (К), ρ_i – плотности (г/см³), c_i – удельные теплоемкости (Дж/(г·К)), k_i – коэффициенты теплопроводности (Вт/(см·К)) соответственно пленки и сапфира, $F_i(x)$ – тепловые источники (результат поглощения лазерного излучения) в каждом материале, X – координата, t – время лазерного воздействия (с).

При нагревании различных материалов лазерным излучением распределение плотности мощности светового потока $I(x)$ в поглощающей среде по глубине x описывается законом Бугера–Ламберта, в дифференциальном виде [6]:

$$\frac{dI(x)}{dx} = -\alpha I(x), \quad (3)$$

где α – коэффициент поглощения (см⁻¹).

В диапазоне длин волн от дальней инфракрасной до ближней ультрафиолетовой области для большинства материалов характерен большой коэффициент поглощения, который можно считать неизменным [8]. В этом случае изменение плотности светового потока по глубине описывается интегральным законом Бугера–Ламберта (тепловой источник). Таким образом, при нагревании структуры пленка–сапфир лазерным излучением распределение плотности мощности светового потока в поглощающей среде по глубине x определяется следующими выражениями [8]:

$$F_1 = \alpha_1(1 - R_1)I_0 \exp(-\alpha_1 x), \quad (4)$$

$$F_2 = \alpha_2(1 - R_2)(1 - R_1)I_0 \exp(-\alpha_2(x - L_1)), \quad (5)$$

где I_0 – плотность мощности падающего лазерного излучения на поверхность Fe₂O₃ (Вт/см²), R_i – показатель отражения соответственно пленки и сапфира.

Вид решения уравнений (1), (2) определяется функцией, зависящей от тепловых источников $F_i(x)$ и значений теплофизических постоянных ρ_i , c_i , k_i , а однозначность решения – граничными условиями для каждой конкретной задачи нагрева. Следовательно, для решения задачи нагрева структуры пленка–сапфир, необходимы дополнительные условия, которые однозначно определяют данную задачу теплопроводности (условия однозначности) [8].

Запишем граничные и начальные условия для структуры пленка–сапфир. На облучаемой поверхности (пленка при $x = 0$) действуют граничные условия третьего рода (поскольку заданы температура окружающей среды и закон теплообмена между окружающей средой и поверхностью обрабатываемого материала), определяющие конвекционный теплообмен (по закону Ньютона) между окружающей средой и поверхностью пленки [8]:

$$-k_1 \frac{\partial T_1(x=0,t)}{\partial x} = \beta(T_1 - T_0), \quad (6)$$

где T_0 – температура окружающей среды, β – коэффициент конвекционной теплопередачи (Вт/(см²·К)), характеризующий интенсивность теплообмена между поверхностью Fe₂O₃ и окружающей средой.

На второй границе структуры пленка–сапфир ($x = L_1 + L_2$) выполняется граничное условие первого рода (на границе тела не происходит никаких процессов с поглощением или выделением теплоты), задающее распределение температуры на поверхности для любого момента времени:

$$T_2(x = L_1 + L_2, t) = T_0. \quad (7)$$

Начальное условие для уравнения теплопроводности состоит в задании температуры в начальный момент времени $t = 0$ во всех точках обрабатываемой лазерным излучением структуры:

$$T_1(x, 0) = T_0. \quad (8)$$

$$T_2(x, 0) = T_0. \quad (9)$$

Для решения нестационарных уравнений теплопроводности (1), (2) при воздействии лазерного излучения на структуру пленка–сапфир с учетом граничных условий (6), (7) использовался численный метод [11], заключающийся в аппроксимации частных производных исходных дифференциальных уравнений соответствующими конечными разностями.

Результаты и обсуждение. На рис. 4 представлено распределение температуры в образце при средней мощности лазерного излучения 90 Вт. На рис. 5 показано распределение температур при мощности 50 Вт. Результаты моделирования показывают, что процесс лазерного нагрева на границе сапфир–пленка характеризуется большими градиентами температур, при этом максимум температуры приходится на пленку (рис. 4, 5).

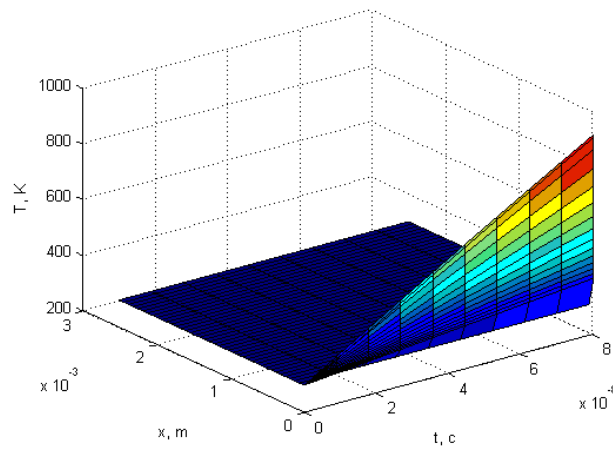


Рис. 4. Распределение температуры в образце при средней мощности лазерного излучения 90 Вт

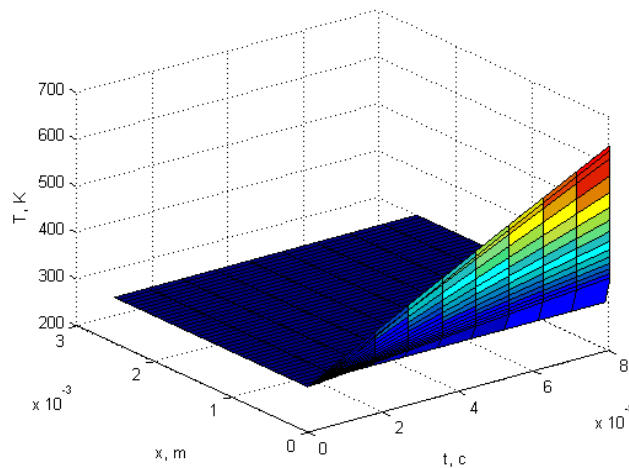


Рис. 5. Распределение температуры в образце при средней мощности лазерного излучения 50 Вт

На рис. 6 представлена зависимость температуры на поверхности пленки от средней мощности лазерного излучения.

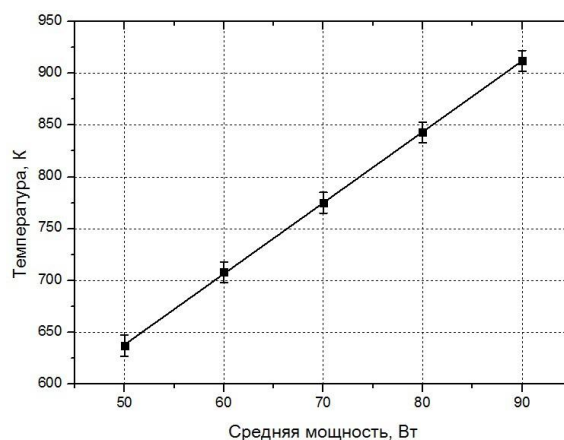


Рис. 6. Зависимость температуры на поверхности пленки от средней мощности лазерного излучения

Заключение. Таким образом, исследованы процессы лазерной обработки поверхности сапфира при различных условиях с использованием установки (ЛИМО 100-532/1064-U). Выполнено численное моделирование процесса лазерной обработки сапфира. В результате моделирования установлено, что при средней мощности лазерного излучения 80–90 Вт температура на поверхности составляет порядка 800–900 К, что является необходимым условием для роста пленки на поверхности сапфира. При этом время роста пленки достаточно мало, поскольку поверхность сапфира имеет относительно высокую температуру в течение нескольких наносекунд после лазерного импульса. Однако под воздействием лазерного излучения раствор FeCl_3 приводится в сверхкритическое состояние и имеет наибольшую температуру по сравнению с подложкой. Раствор диссоциирует в жидкости и происходит рост пленки.

Путем изменения мощности лазерного излучения и температуры можно изменять морфологию структуры, что в конечном случае позволяет перераспределить дефекты в структуре с учетом высокой плотности молекул оксида (пленки) на поверхности.

Изучение процессов абляции и осаждения пленок лазерным излучением представляется интересным для тонкопленочной оптики и микроэлектроники. Данная работа выполнена при содействии Отдела структурных исследований ИОХ РАН (г. Москва, исследование образцов методом электронной микроскопии) и ГУП РО «Ростовлфармация» (помощь при проведении экспериментальных исследований).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронов В.В., Долгаев С.И., Шафеев Г.А. Гетероэпитаксиальный рост пленок при лазерном облучении границы раздела «сапфир/поглощающая жидкость» // Доклады Академии наук. – 1998. – Т. 358. – С. 465-469.
2. Dobrovinskaya E.R., Lytvynov L.A., Pishchik V.V. Sapphire. Material, Manufacturing, Applications. – New York: Springer, 2009. – 481 p.
3. Cherednichenko D.I., Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V. Sapphire: Structure, Technology and Applications. – New York: Nova Science Publishers, 2013. – P. 101-118.
4. Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V. Nano- and Piezoelectric Technologies, Materials and Devices. – New York: Nova Science Publishers, 2013. – P. 133-150.
5. Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V. Advanced Materials // Springer Proceedings in Physics. – 2014. – Vol. 152. – P. 55-69.
6. Довбня А.Н., Ефимов В.П., Абызов А.С., Шаповал И.И., Рыбка А.В., Березняк Е.П., Закутин В.В., Решетняк Н.Г., Ромасько В.П. Радиационное дефектообразование для изменения электрофизических характеристик в кремниевых фотопреобразователях // Вопросы атомной науки и техники. – 2010. – № 2. – С. 164-167.

7. *Gibbons I.F., Hess L.D., Sigmon T.W.* Laser and Electron Beam Solid Interactions and Materials Processing. – Elsevier Science Publishing, 1981. – 547 p.
8. *Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д.* Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – 184 с.
9. *Malyukov S.P., Sayenko A.V.* Laser Sintering of a Porous TiO₂ Film in Dye-Sensitized Solar Cells // *Journal of Russian Laser Research*. – 2013. – Vol. 34, Issue 6. – P. 531-536.
10. *Jinjing Feng, Jixiang Yan, Shouhuan Zhou.* Dynamic Behaviors of PbS Irradiated by Laser Pulse // *Piers online*. – 2007. – Vol. 3, № 6. – P. 847-850.
11. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150 с.

REFERENCES

1. *Voronov V.V., Dolgaev S.I., Shafeev G.A.* Geteroepitaksial'nyy rost plenok pri lazer-nom obluchenii granitsy razdela «safir/pogloshchayushchaya zhidkost'» [Heteroepitaxial growth of films by laser irradiation boundary "sapphire/absorbing fluid], *Doklady Akademii Nauk* [Reports of The Academy of Sciences], 1998, Vol. 358, pp. 465-469.
2. *Dobrovinskaya E.R., Lytvynov L.A., Pishchik V.V.* Sapphire. Material, Manufacturing, Applications. New York: Springer, 2009, 481 p.
3. *Cherednichenko D.I., Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V.* Sapphire: Structure, Technology and Applications. New York: Nova Science Publishers, 2013, pp. 101-118.
4. *Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V.* Nano- and Piezoelectric Technologies, Materials and Devices. New York: Nova Science Publishers, 2013, pp. 133-150.
5. *Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V.* Advanced Materials, Springer Proceedings in Physics, 2014, Vol. 152, pp. 55-69.
6. *Dovbnya A.N., Efimov V.P., Abyzov A.S., Shapoval I.I., Rybka A.V., Berezhnyak E.P., Zakutin V.V., Reshetnyak N.G., Romas'ko V.P.* Radiatsionnoe defektoobrazovanie dlya izmeneniya elektrofizicheskikh kharakteristik v kremnievykh fotopreobrazovatelyakh [Radiation defect formation to changes in the electrophysical characteristics of silicon solar cells], *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki* [Problems of Atomic Science and Technology], 2010, No. 2, pp. 164-167.
7. *Gibbons I.F., Hess L.D., Sigmon T.W.* Laser and Electron Beam Solid Interactions and Materials Processing. Elsevier Science Publishing, 1981, 547 p.
8. *Yakovlev E.B., Shandybina G.D.* Vzaimodeystvie lazernogo izlucheniya s veshchestvom (silovaya optika) [Interaction of laser radiation with matter (power optics)]. St. Petersburg: SPbGU ИТМО, 2011, 184 p.
9. *Malyukov S.P., Sayenko A.V.* Laser Sintering of a Porous TiO₂ Film in Dye-Sensitized Solar Cells, *Journal of Russian Laser Research*, 2013, Vol. 34, Issue 6, pp. 531-536.
10. *Jinjing Feng, Jixiang Yan, Shouhuan Zhou.* Dynamic Behaviors of PbS Irradiated by Laser Pulse, *Piers online*, 2007, Vol. 3, № 6, pp. 847-850.
11. *Patankar S.* Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti [Numerical methods for solving heat transfer and fluid dynamics]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 150 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Жорник.

Малюков Сергей Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: malyukov@sfedu.ru; 347928, Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371603; кафедра конструирования электронных средств; д.т.н.; профессор.

Клунникова Юлия Владимировна – e-mail: jklunnikova@rambler.ru; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; ассистент.

Саенко Александр Викторович – e-mail: alex_rus.07@mail.ru; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; ассистент.

Malyukov Serguei Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: malyukov@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; dr. of eng. sc.; professor.

Klunnikova Yulia Vladimirovna – e-mail: jklunnikova@rambler.ru; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.; assistant.

Sayenko Alexander Viktorovich – e-mail: alex_rus.07@mail.ru; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.; assistant.