

Роль дислокаций в процессе деградации полупроводниковых лазеров с электронным накачиванием энергии.

Экспериментальное исследование

Докт. физ.-мат. наук А. С. Гаркавенко¹⁾, докт. техн. наук, проф. В. А. Мокрицкий²⁾,
докт. техн. наук, доц. О. В. Маслов²⁾, канд. техн. наук А. В. Соколов²⁾

¹⁾Фирма «Гайтескрафт» (Корнвестхайм, Германия),

²⁾Одесский национальный политехнический университет (Одесса, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Световое саморазрушение-деградация второго типа наблюдалось в образцах полупроводниковых лазеров с электронным накачиванием энергии с высокой оптической однородностью и хорошим качеством обработки поверхности. В этих образцах появлялись повреждения в виде шнуров, перпендикулярных торцам резонатора. Согласно имеющимся представлениям о прохождении мощных световых потоков через различные среды, возникновение узких световых каналов обусловлено явлением самофокусировки. Оно относится к фундаментальным физическим механизмам распространения лазерного излучения и обусловлено нелинейными явлениями, возникающими в среде под воздействием мощного лазерного излучения. Физическая причина самофокусировки – возрастание показателя преломления n в сильном световом поле. Тепловая самофокусировка – наиболее вероятная причина перераспределения излучения в активной области кристалла. Однако не исключено, что на начальном этапе возникновения световых каналов определенную роль играет рост интенсивности излучения в отдельных участках кристалла из-за нестабильности генерации либо небольших флуктуаций плотности тока накачки. Далее процесс приобретает лавинный характер, поскольку локализация луча в канале увеличивает плотность светового излучения, что может приводить к перегреву вещества и включению механизма тепловой самофокусировки. Выполненные исследования показали, что максимальной устойчивостью к процессам деградации обладают оптически однородные кристаллы. В них величина критической мощности светового разрушения определяется порогом самофокусировки излучения в материале. Поскольку нелинейная добавка к показателю преломления $\Delta n = n_2 E^2$ на пороге самофокусировки определяется изменением концентрации неравновесных носителей $\Delta N(E^2)$, то сама величина максимальной флуктуации ΔN_{\max} пропорциональна значению концентрации неравновесных носителей на пороге генерации $\Delta N_{\text{пор}}$ и относительному превышению порога генерации $J = (j - j_n)/j_n$. Таким образом, низкая пороговая концентрация неравновесных носителей является одним из условий увеличения устойчивости материала к процессам деградации. В легированных кристаллах $\Delta N_{\text{пор}}$ меньше, чем в собственных материалах. Это, возможно, и объясняет достаточно большие значения $P_{\text{кр}}$ в оптимально легированном однородном n -GaAs. Меньшие значения $P_{\text{кр}}$ в образцах p -типа, легированных цинком, могут быть связаны не только с неоднородностью этих кристаллов, но и с большими порогами генерации. Кроме того, сечение поглощения излучения дырками примерно в 3–4 раза больше, чем электронами, что также может снижать порог саморазрушения лазеров. При $T = 300$ К пороги генерации выше, что, естественно, снижает величину порога самофокусировки.

Ключевые слова: деградация, дислокация, лазер, полупроводник, мощность излучения, резонатор

Для цитирования: Роль дислокаций в процессе деградации полупроводниковых лазеров с электронным накачиванием энергии. Экспериментальное исследование / А. С. Гаркавенко [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 6. С. 507–511. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-507-511>

Role of Dislocations in the Process of Degradation of Semiconductor Lasers with Electronic Energy Pumping. Experimental Research

A. S. Garkavenko¹⁾, V. A. Mokritsky²⁾, O. V. Maslov²⁾, A. V. Sokolov²⁾

¹⁾Gaisteskraft Firm (Kornwestheim, Germany),

²⁾Odessa National Polytechnic University (Odessa, Ukraine)

Abstract. Light self-destruction-degradation of the second type has been observed in samples of semiconductor lasers with electronic energy pumping with high optical homogeneity and good quality of surface treatment. In these samples, damage

Адрес для переписки

Мокрицкий Вадим Анатольевич
Одесский национальный политехнический университет
просп. Шевченко, 1,
65044, г. Одесса, Украина
Тел.: +38 048 734-86-36
mokrickiy37@gmail.com

Address for correspondence

Mokritsky Vadim A.
Odessa National Polytechnic University
1, Shevchenko Ave.,
65044, Odessa, Ukraine
Tel.: +38 048 734-86-36
mokrickiy37@gmail.com

appeared in the form of cords perpendicular to the ends of the resonator. According to the current understanding of the passage of powerful light streams through various media, the emergence of narrow light channels is due to the phenomenon of self-focusing. It refers to the fundamental physical mechanisms of propagation of laser radiation and is caused by nonlinear phenomena arising in a medium under the influence of high-power laser radiation. The physical reason for self-focusing is an increase in the refractive index n in a strong light field. Thermal self-focusing is the most probable cause of radiation redistribution in the active region of the crystal. However, it is possible that in the initial stage of the appearance of light channels a certain role is played by the growth of the intensity of radiation in certain sections of the crystal because of the instability of generation or small fluctuations in the pump current density. Then the process acquires an avalanche character, since the localization of the ray in the channel increases the density of light radiation which can lead to overheating of the substance and the activation of the thermal self-focusing mechanism. The experiments performed in this paper have shown that optically homogeneous crystals possess maximum resistance to degradation processes. In them, the critical power of light destruction is determined by the self-focusing threshold of radiation in a material. Since the nonlinear addition to the refractive index $\Delta n = n_2 E^2$ at the self-focusing threshold is determined by the change in the concentration of non-equilibrium carriers $\Delta N(E^2)$, the value of the maximum fluctuation ΔN_{\max} itself is proportional to the value of the non-equilibrium carrier concentration at the generation threshold ΔN_{pores} and the relative excess of the generation threshold $J = (j - j_n)/j_n$. Thus, a low threshold concentration of non-equilibrium carriers is one of the conditions for increasing material resistance to degradation processes. In doped crystals ΔN_{pores} is less than in pure materials. This, perhaps, explains the rather higher value of P_{critical} in the optimally doped homogeneous n -GaAs. Smaller values of P_{critical} in p -type samples doped with zinc can be associated not only with the inhomogeneity of these crystals, but also with large generation thresholds. In addition, the cross section for absorption of radiation by holes is about 3–4 times larger than by electrons, which can also reduce the self-destruction threshold of lasers. At $T = 300$ K, the lasing thresholds are higher that naturally reduces the value of the self-focusing threshold.

Keywords: degradation, dislocation, laser, semiconductor, radiation power, resonator

For citation: Garkavenko A. S., Mokritsky V. A., Maslov O. V., Sokolov A. V. (2020) Role of Dislocations in the Process of Degradation of Semiconductor Lasers with Electronic Energy Pumping. Experimental Research. *Science and Technique*. 19 (6), 507–511. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-507-511> (in Russian)

Введение

Изучение процессов деградации источников когерентного излучения и возможных путей их устранения представляет собой фундаментальную проблему лазерной техники. Решение этой проблемы определяет практическое применение лазеров в различных областях науки и техники. Ранее авторами статьи было отмечено, что плотность дислокаций внутри лазерного кристалла увеличивается с увеличением мощности собственного излучения [1]. При этом возникает дислокационная лавина, вызывающая образование микро- и макротрещин, разрушающих кристалл. Это приводит к необратимому падению мощности излучения и увеличению порога генерации.

Рассмотрим данную проблему на примере лазеров с электронным накачиванием энергии [2–5], которые имеют определенные преимущества с точки зрения изучения в них физических процессов деградации. Это обусловлено довольно большим размером рабочей области кристалла и возможностью подробно исследовать дефекты практически в любой точке внутри активного слоя и на поверхности образца. При этом удобно использовать кристаллы разными типов и с разными исходными характеристиками, в том числе с высокой оптической однородностью.

Экспериментальные результаты и обсуждение

В статье представлены результаты экспериментальных исследований процессов деградации

полупроводниковых лазеров под воздействием собственного лазерного излучения. Исследования проводились на радиационно модифицированных с помощью ионизирующих излучений кристаллах арсенида галлия и сульфида кадмия, типичных представителях полупроводниковых соединений групп A^3B^5 и A^2B^6 . Модификацию выполняли с целью создания оптически однородных сред с флуктуациями показателя преломления в диапазоне $\Delta n \sim 10^{-6} - 10^{-1}$ [4–7]. Для всех исследованных образцов имела место деградация под воздействием собственного лазерного излучения. Значение критической плотности мощности светового разрушения оптически однородных кристаллов было максимальным и на некоторых образцах составляло $P_{\text{кр}} \sim (2-17)$ МВт/см². Деградация сопровождалась разрушением матрицы кристалла, резким возрастанием плотности дислокаций, достигающей величины $N^0_{\text{д}} \geq (10^{15} - 10^{17})$ см⁻², механическим разрушением поверхности торцов резонатора, необратимым падением мощности излучения и увеличением порога генерации [1, 6, 8]. Исследовались образцы с $\Delta n \sim 10^{-4} - 10^{-3}$ и флуктуацией концентрации свободных носителей $N \sim (10^{15} - 10^{16})$ см⁻³. Установлено, что при достижении больших световых потоков на образцах из GaAs, эффективность которых была более 14 %, при $T = 80$ К наблюдалось необратимое падение мощности лазерного излучения, сопровождающееся разрушением кристалла. Повреждения возникали как результат воздействия светового потока, генерируемого лазером (рис. 1).

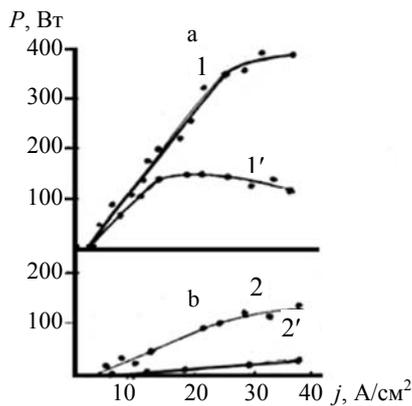


Рис. 1. Зависимость мощности излучения лазера на основе оптически однородного кристалла ($\Delta n \sim 10^{-3}$) GaAs от плотности тока накачки при $T = 80$ К (а) и $T = 300$ К (б): 1, 2 – до деградации; 1', 2' – после деградации

Fig. 1. Dependence of radiation power of laser based on optically homogeneous crystal ($\Delta n \sim 10^{-3}$) GaAs on pumping current density at $T = 80$ К (а) and $T = 300$ К (б): 1, 2 – before degradation; 1', 2' – after degradation

Существующая корреляция величины внешней дифференциальной квантовой эффективности η_d со значением $P_{кр}$ позволила использовать экспериментальную зависимость $P_{кр}(\eta_d)$ для оценки величины критической мощности разрушения в данном материале (рис. 2).

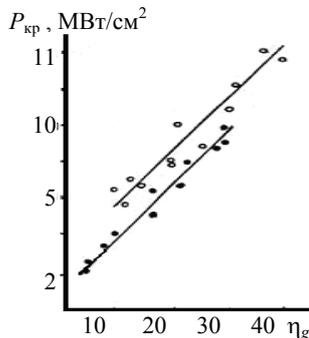


Рис. 2. Зависимость критического потока лазерного излучения от внешней дифференциальной квантовой эффективности оптически однородных кристаллов GaAs при $T = 80$ К: \circ – n -тип, $\Delta n \sim 10^{-6}$; \bullet – p -тип, $\Delta n \sim 10^{-5}$

Fig. 2. Dependence of critical laser radiation flux on external differential quantum efficiency of optically homogeneous GaAs crystals at $T = 80$ К: \circ – n -type, $\Delta n \sim 10^{-6}$; \bullet – p -type, $\Delta n \sim 10^{-5}$

Критическая плотность мощности разрушения $P_{кр}$ при $T = 80$ К составляла 3–17 МВт/см², при $T = 300$ К – $P_{кр} = (2-7)$ МВт/см² [4, 5]. Процессы деградации при 80 К сопровождались значительными механическими разрушениями поверхности зеркал резонатора, которые иногда распространялись за пределы активного слоя (т. е. >5 мкм). Отметим, что механические разрушения лазеров, как при 300 К, так и при 80 К, связаны с возникновением в этих образцах дислокационной лавины, образующейся

под действием собственного лазерного излучения внутри резонатора лазера и приводящей к возникновению микро- и макротрещин [1, 8].

До возникновения дислокационной лавины величина критической плотности мощности излучения $P_{кр}$ зависела от исходных свойств арсенида галлия и в первую очередь – от исходной плотности дислокаций в кристалле. В образцах, где исходная плотность дислокаций составляла $\geq 10^6$ см⁻², она была крайне малой ($P_{кр} = (2-4)$ МВт/см²) по сравнению с кристаллами с плотностью дислокаций $N_D = (1-5) \cdot 10^3$ см⁻², где $P_{кр} = (10-15)$ МВт/см².

Величина $P_{кр}$ зависела также от типа легирующей примеси: в кристаллах p -типа, легированных цинком, она была менее 3–10 МВт/см². С ростом уровня легирования (теллур, $N > 10^{18}$ см⁻³) значение $P_{кр}$ уменьшалось, что обусловлено увеличением плотности и размера микронеоднородностей. В эпитаксиальных образцах, легированных оловом до $(3-4) \cdot 10^{19}$ см⁻³, значение $P_{кр}$ не уменьшалось, что свидетельствует о более высокой оптической прочности таких материалов. Слабо легированные кристаллы и нелегированные эпитаксиальные образцы были также однородны. Однако величина $P_{кр}$ в них была несколько меньше, чем в легированных. Это обусловлено большой исходной плотностью дислокаций ($N_D \sim 10^4$ см⁻²), а также более высокими значениями пороговой плотности тока (особенно при $T = 300$ К) в этих образцах. Следует заметить, что механические свойства GaAs зависят от уровня легирования мелкими донорами, и при больших концентрациях примеси наблюдается эффект его упрочнения [9–11].

Установлено, что деградация сопровождается образованием большого количества дислокаций в активной области лазеров, что в итоге приводит к катастрофическим последствиям [1, 4, 5, 8]. Плотность дислокаций в этой области составляла $10^{12}-10^{17}$ см⁻², а это свидетельствует о возникновении в них дислокационной лавины [1, 8].

Зарождение дислокаций предшествует хрупкому разрушению материала. Это снижает механическую прочность образца и уменьшает величину порога оптического разрушения. В таких образцах наблюдались рост пороговой плотности тока, падение эффективности лазерного излучения в 2–3 раза и неравномерность свечения активной области в результате возрастания структурной неоднородности кристаллов. После удаления верхнего нарушенного слоя путем бомбардировки низкоэнергетиче-

скими ионами аргона в вакууме отмечалось увеличение порога разрушения в 1,5–2 раза.

Процессы деградации лазеров из CdS имеют те же закономерности, что и GaAs, и объясняются теми же механизмами, в результате которых генерируются дислокации, однако характеризуются меньшими значениями плотности мощности разрушения – примерно (2–5) МВт/см² [1, 6]. В сильно легированных кристаллах CdS значение критической плотности мощности оказалось больше примерно на (7–10) МВт/см², чем у большинства образцов, специально нелегированных.

Наряду с высокими энергетическими параметрами, такой материал обладает большей оптической однородностью, поскольку роль собственных дефектов в условиях высокой концентрации свободных носителей заряда и в присутствии мелких легирующих примесей менее существенна [12, 13]. Установлено, что легированные неоним методом ионной имплантации кристаллы CdS ($N \geq 10^{18}$ см⁻³) обладали наиболее высокой однородностью свечения при сканировании пучком электронов вдоль грани резонатора (рис. 3). Неоднородность свечения уменьшалась с 80–90 % до 20–30 %, что и привело к росту $P_{кр}$ до $7 \cdot 10^6$ Вт/см² (рис. 4). Также увеличились значения $P_{кр}$ в кристаллах CdS, радиационно легированных мелкими акцепторными примесями изотопов палладия (^{108}Pd) и серебра (^{109}Ag) ($N \sim (10^{16}–10^{17})$ см⁻³): при $T = 80$ К $P_{кр} \sim 10^8$ Вт/см², при $T = 300$ К $P_{кр} \sim 6 \cdot 10^6$ Вт/см².

Изложенное показывает, что процесс деградации полупроводниковых лазеров прямо связан с генерацией и размножением дислокаций во время работы лазера [1, 8].

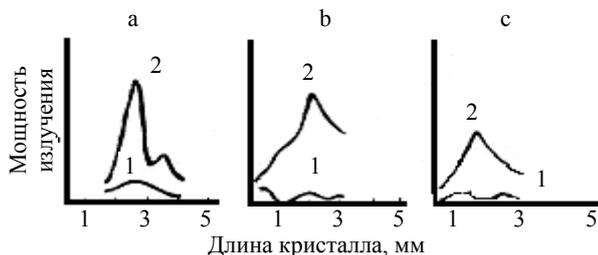


Рис. 3. Распределение мощности лазерного излучения по длине оптически однородных кристаллов CdS (а – $\Delta n \sim 10^{-6}$; б – $\Delta n \sim 10^{-5}$; в – $\Delta n \sim 10^{-4}$), легированных неоним дозой $1,5 \cdot 10^{14}$ ион. см⁻², при плотности тока ($T = 80$ К): 1 – $j = 2$ А/см²; 2 – $j = 15$ А/см²

Fig. 3. Distribution of laser radiation power along length of optically homogeneous CdS crystals (а – $\Delta n \sim 10^{-6}$; б – $\Delta n \sim 10^{-5}$; в – $\Delta n \sim 10^{-4}$), neon doped with dose of $1,5 \cdot 10^{14}$ ion cm⁻², at current density ($T = 80$ К): 1 – $j = 2$ А/см²; 2 – $j = 15$ А/см²

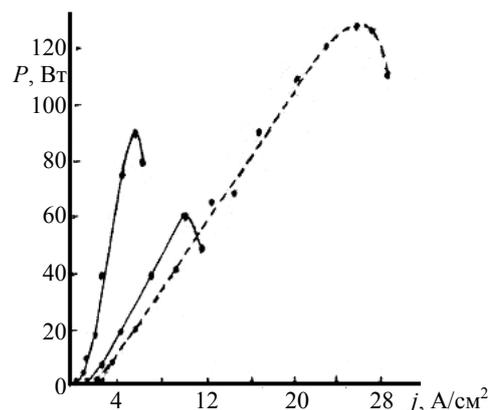


Рис. 4. Ватт-амперные характеристики излучения оптически однородных кристаллов CdS: сплошные линии – нелегированные кристаллы, $\Delta n \sim 10^{-4}, 10^{-3}, \dots$; пунктир – легированные неоним, $\Delta n \sim 10^{-4}$ ($T = 80$ К, $N \sim 10^{18}$ см⁻³)

Fig. 4. Watt-ampere characteristics of radiation of optically homogeneous CdS crystals: solid lines – undoped crystals, $\Delta n \sim 10^{-4}, 10^{-3}, \dots$; dotted lines – doped with neon, $\Delta n \sim 10^{-4}$ ($T = 80$ К, $N \sim 10^{18}$ см⁻³)

При критических значениях плотности мощности излучения и плотности дислокаций происходит механическое разрушение матрицы кристалла. Подобный вывод об определяющем (доминирующем) влиянии дислокаций на катастрофическую деградацию подтверждается результатами экспериментальных исследований в сильно легированных ($N \geq 1 \cdot 10^{18}$ см⁻³) кристаллах GaAs, GaAlAs и GaSb, в которых наблюдался эффект увеличения оптической прочности лазеров [9, 10]. Значение мощности излучения с увеличением легирования возрастало до $P = 10^3$ Вт, а в нелегированных кристаллах механическое разрушение наблюдалось при $P = (300–500)$ Вт. Таким образом, сильное легирование препятствует генерации и размножению дислокаций [9, 10], а с ним – деградации лазера.

Проведенные эксперименты подтверждают разработанную в [1] теоретическую модель о прямом взаимодействии исходных дислокаций с собственным излучением лазера, при котором на них поглощается значительная доля световой мощности. Это и приводит, в конечном счете, к саморазрушению и деградации лазера [1, 8].

ВЫВОДЫ

1. Процессы деградации полупроводниковых лазеров зависят от исходных свойств активной среды, состояния ее поверхности и условий возбуждения. Применение оптически однородных материалов с оптимальным легированием соответствующими примесями и с хорошо обработанной поверхностью является

основным фактором, определяющим их способность к длительной, устойчивой работе в роли активной лазерной среды и позволяет существенно повысить критические значения мощности разрушения лазеров.

2. Таким образом, взаимодействие собственного лазерного излучения с исходными дислокациями внутри лазерного резонатора приводит к их размножению в кристалле и возникновению дислокационной лавины, плотность дислокаций в которой составляет $(10^{12}-10^{17})\text{ см}^{-2}$. Это, в свою очередь, вызывает зарождение микро- и макротрещин и деградацию лазера [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Природа деградации полупроводниковых лазеров с электронным накачиванием энергии. Теоретические предпосылки / А. С. Гаркавенко [и др.] // Наука и техника. 2020. Т. 19, № 4. С. 311–319. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-311-319>.
2. Богданкевич, О. В. Полупроводниковые лазеры / О. В. Богданкевич, С. А. Дарзнец, П. Г. Елисеев. М.: Наука, 1976. 243 с.
3. Грибковский, В. П. Полупроводниковые лазеры / В. П. Грибковский. Минск: Университетское, 1988. 240 с.
4. Напівпровідникові лазери з електронним накачуванням / О. С. Гаркавенко [и др.]. Одеса: Поліграф, 2006. Т. 1. Механізм генерації. Властивості випромінювання. 320 с.
5. Напівпровідникові лазери з електронним накачуванням / О. С. Гаркавенко [и др.]. Одеса: Поліграф, 2006. Т. 2. Активні середовища. Розробка приладів. 360 с.
6. Гаркавенко, А. С. Радиационная модификация физических свойств широкозонных полупроводников и создание на их основе лазеров большой мощности / А. С. Гаркавенко. Львов: ЗУКЦ, 2012. 257 с.
7. Радиационное легирование сульфида кадмия и арсенида галлия / В. А. Мокрицкий [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2002. № 7. С. 15–18.
8. Гаркавенко, А. С. О деградации полупроводниковых лазеров / А. С. Гаркавенко // Теоретический и научно-практический журнал радиосвязи, радиовещания и телевидения: тр. УНИИРТ. 2000. Т. 1, № 21. С. 65–68.
9. Влияние легирования на пластическую деформацию монокристаллов арсенида галлия / Н. П. Сажин [и др.] // Физика твердого тела. 1966. Т. 3, № 5. С. 1539–1544.
10. Эффект увеличения мощности и оптической прочности лазеров на сильно легированном антимониде галлия / Э. П. Бочкарев [и др.] // Письма ЭТФ. 1981. Т. 7, № 23. С. 1455–1458.
11. Халл, Д. Введение в дислокации / Д. Халл. М.: Атомиздат, 1968. 260 с.
12. Ионизационный отжиг полупроводниковых кристаллов. Часть первая. Теоретические предпосылки / А. С. Гаркавенко [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2014. № 4. С. 50–55.
13. Ионизационный отжиг полупроводниковых кристаллов. Часть вторая. Эксперимент / А. С. Гаркавенко [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2014. № 5–6. С. 51–56. <https://doi.org/10.15222/TKEA2014.2.5>

Поступила 06.06.2018

Подписана в печать 12.02.2019

Опубликована онлайн 30.11.2020

REFERENCES

1. Garkavenko A. S., Mokritskii V. A., Maslov O. V., Sokolov A. V. (2020) Nature of Degradation in Semiconductor Lasers with Electronic Energy Pumping. Theoretical Background. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 19 (4), 311–319 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-311-319>.
2. Bogdankevich O. V., Darznez S. A., Eliseev P. G. (1976) *Semiconductor Lasers*. Moscow, Nauka Publ. 243 (in Russian).
3. Gribovskii V. P. (1988) *Semiconductor Lasers*. Minsk, Universitetskoe Publ. 240 (in Russian).
4. Garkavenko A. S., Lenkov S. V., Mokritskii V. A., Pashkov O. S. (2006) *Semiconductor Lasers with Electronic Pumping. Vol. 1. Generation Mechanism. Radiation Properties*. Odessa, Poligraph Publ. 320 (in Ukrainian).
5. Garkavenko O. S. [et al.] (2006) *Semiconductor Lasers with Electronic Pumping. Vol. 2. Active Environments. Device Development*. Odessa, Poligraph Publ. 360 (in Ukrainian).
6. Garkavenko A. S. (2012) *Radiation Modification of the Physical Properties of Wide-Gap Semiconductors and the Creation of High-Power Lasers on their Basis*. Lvov, Publishing House of Western Ukrainian Consulting Center. 257 (in Russian).
7. Mokritskii V. A., Garkavenko A. S., Zubarev V. V., Lenkov S. V. (2002) Radiation Doping of Cadmium Sulfide and Gallium Arsenide. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature = Technology and Design in Electronic Equipment*, (7), 15–18 (in Russian).
8. Garkavenko A. S. (2000) On Degradation of Semiconductor Lasers. *Teoreticheskii i Nauchno-Prakticheskii Zhurnal Radiosvyazi, Radioveshchaniya i Televideniya. Trudy UNIIRT* [Theoretical and Scientific-Practical Journal of Radio Communication, Broadcasting and Television: Proceedings of Ukrainian Scientific Research Institute of Radio and Television], 1 (21), 65–68 (in Russian).
9. Sazhin N. P., Mil'vidskii M. G., Osvenskii V. B., Klimovich F. F. (1966) Effect of Doping on Plastic Deformation of Gallium Arsenide Single Crystals. *Fizika Tverdogo Tela = Soviet Physics, Solid State*, 3 (5), 1539–1544.
10. Bochkariov E. P. [et al.] (1981) Effect of Increasing the Power and Optical Strength of Lasers Based on Heavily Doped Gallium Antimonide. *Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 7 (23), 1455–1458 (in Russian).
11. Hull D. (1965) *Introduction to Dislocations*. Pergamon Press LTD, Oxford. 260.
12. Garkavenko A. S., Mokritskii V. A., Banzak O. V., Zavadskii V. A. (2014) Ionization Annealing of Semiconductorcrystals. Part One. Theoretical Background. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature = Technology and Design in Electronic Equipment*, (4), 50–55. <https://doi.org/10.15222/tkea2014.4.50> (in Russian).
13. Garkavenko A. S., Mokritskii V. A., Banzak O. V., Zavadskii V. A. (2014) Ionization Annealing of Semiconductorcrystals. Part Two. Experiment. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature = Technology and Design in Electronic Equipment*, (5–6), 51–56. <https://doi.org/10.15222/tkea2014.2.51> (in Russian).

Received: 06.06.2018

Accepted: 12.02.2019

Published online: 30.11.2020