

Я. В. Лебядок, Д. М. Кабанаў

*ДНВА «Оптыка, оптаэлектроніка і лазерная тэхніка», Мінск, Беларусь***ШЫРЫНЯ ЗАБОРОНЕНОЙ ЗОНЫ І АЖЭ-РЭКАМБІНАЦЫЯ Ё СВЯТЛОДЫЁДАХ
НА АСНОВЕ GaInAsSb ПРЫ ТЭМПЕРАТУРАХ 10–300 К**

Анотацыя. На падставе эксперыментальных спектраў выпрамянення для актыўнага пласта святлодыёдаў на аснове гетэраструктур $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{AlGaAsSb}$ былі атрыманы параметры Варшні тэмпературнай залежнасці шырыні забароненай зоны ў інтэрвале тэмператур 10–300 К, а таксама тэмпературная залежнасць велічыні энергіі спіна-арбітальнага расшчাপлення. Для тэмператур 10–80 К працэсам, што абмяжоўвае рост інтэнсіўнасці выпрамянення, з'яўляецца працэс Ажэ-рэкамбінацыі, для якога энергія рэкамбінацыі электронна-дзіркавай пары перадаецца дзірцы з пераходам апошняй у спіна-арбітальную зону. З павышэннем тэмпературы больш за 100 К адбываецца рост каэфіцыента Ажэ-рэкамбінацыі для працэсу з удзелам двух электронаў і цяжкай дзіркі, які суправаджаецца ўзбуджэннем электрона з яго пераходам у высокаэнергетычны стан у зоне праводнасці. Сума гэтых працэсаў абумоўлівае тушэнне выпрамянення з павелічэннем тэмпературы больш за 150 К.

Ключавыя словы: GaInAsSb, шырыня забароненай зоны, спіна-арбітальнае расшчাপленне, Ажэ-рэкамбінацыя

Для цытавання. Лебядок, Я. В. Шырыня забароненай зоны і Ажэ-рэкамбінацыя ў святлодыёдах на аснове GaInAsSb пры тэмпературах 10–300 К / Я. В. Лебядок, Д. М. Кабанаў // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2017. – № 3. – С. 118–126.

Y. V. Lebiadok, D. M. Kabanau

*SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk, Belarus***AMPLIFIED LUMINESCENCE AND AUGER RECOMBINATION
IN GaInAsSb-BASED LEDs IN THE TEMPERATURE RANGE OF 10–300 K**

The parameters for a temperature dependence of the band gap in the temperature range of 10–300 K and for a temperature dependence of spin-orbit splitting energy were obtained using the experimental emission spectra for LEDs based on $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{AlGaAsSb}$ heterostructures. For temperatures of 10–80 K, the rise of the emission intensity is limited by the Auger recombination process, for which the recombination energy of an electron-hole pair is transferred to a hole with its transition to the spin-orbital band. With an increase in a temperature of more than 100 K, there is a rise of the coefficient of the Auger recombination process, for which the energy released by the recombination of an electron-hole pair excites another electron in the conduction band. The sum of these processes results in quenching the LED emission with increasing temperature over 150 K.

Keywords: GaInAsSb, band gap energy, spin-orbit splitting, Auger recombination

For citation. Lebiadok Y. V., Kabanau D. M. Amplified luminescence and auger recombination in GaInAsSb-based leds in the temperature range of 10–300 K. *Vesti Natsyianal'noi akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2017, no. 3, pp. 118–126 (in Russian).

Уводзіны. Оптаэлектронныя прылады на аснове святлодыёдаў з актыўнымі пластамі GaInAsSb шырока выкарыстоўваюцца для экалагічнага маніторынгу, кантролю тэхналагічных працэсаў, а таксама ў медыцыне і іншых галінах тэхнікі і навукі [1–3]. Прымяненне святлодыёдаў сярэдняга інфрачырвонага дыяпазону ў названых сферах патрабуе дэталёвых ведаў спектральных і энергетычных характарыстык паўправадніковых структур як паблізу пакаёвых тэмператур [3], так і пры крыягенных тэмпературах [4, 5]. Даных аб некаторых фізічных працэсах, што адбываюцца ў актыўных пластах святлодыёдаў з актыўнымі пластамі на аснове цвёрдых раствораў GaInAsSb, недастаткова. Так, вядома, што ў вузказонных паўправадніках асноўным працэсам, адказным за тушэнне люмінесценцыі, з'яўляецца Ажэ-рэкамбінацыя [2]. Аднак дэталёвае эксперыментальнае даследаванне дадзенага працэсу для святлодыёдаў на аснове гетэраструктур $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{AlGaAsSb}$ у шырокім інтэрвале тэмператур не праводзілася. Гэтак жа недастаткова

данных [6] аб тэмпературнай залежнасці значэнняў шырыні забароненай зоны і велічыні спін-арбітальнага расшчаплення для цвёрдых раствораў $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$.

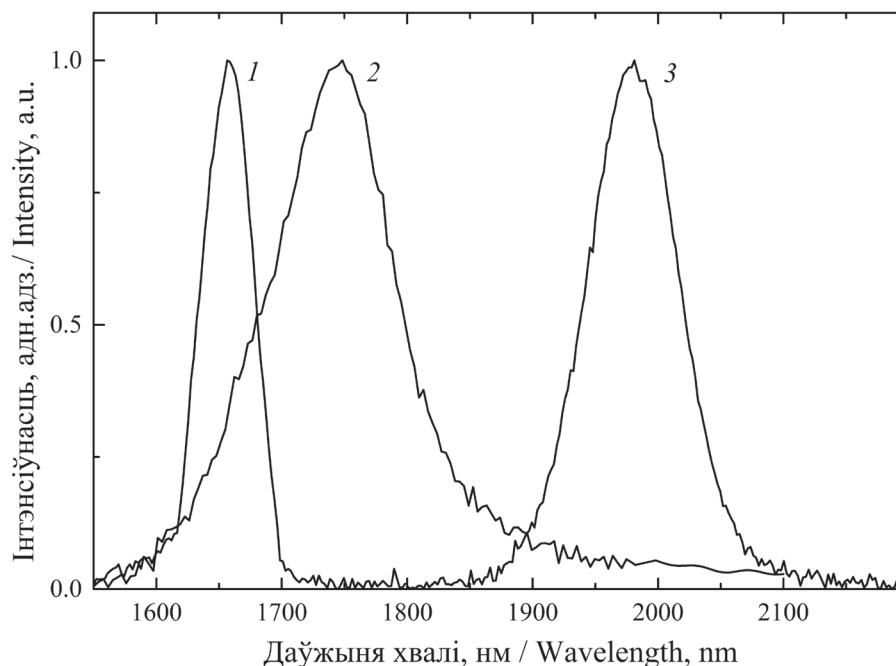
Артыкул прысвечаны ацэнцы тэмпературнай залежнасці шырыні забароненай зоны і велічыні спін-арбітальнага расшчаплення ў цвёрдых растворах $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$, а таксама даследаванню працэсаў Ажэ-рэкамбінацыі ў святлодыёдах на аснове гетэраструктур $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/AlGaAsSb$.

Эксперымент. Аналізаваліся спектры выпрамянення святлодыёдаў на аснове гетэраструктур $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/AlGaAsSb/GaSb$ з трыма тыпамі актыўнага пласта: $Ga_{0.96}In_{0.04}As_{0.03}Sb_{0.97}$ (даўжыня хвалі максімуму выпрамянення пры пакаёвай тэмпературы каля 1.75 мкм), $Ga_{0.92}In_{0.08}As_{0.07}Sb_{0.93}$ (1.90 мкм) і $Ga_{0.80}In_{0.20}As_{0.17}Sb_{0.83}$ (2.20 мкм). Таўшчыня актыўнага пласта 3 мкм. Гетэраструктуры святлодыёдаў вырошчваліся ў Фізіка-тэхнічным інстытуце імя А. Ф. Ёфэ РАН метадам вадкафазнай эпітаксіі. Форма кантактнай пляцоўкі чыпаў святлодыёдаў уяўляе сабой кальцо з унутраным дыяметрам 200 мкм і таўшчынёй 30 мкм. Святлодыёдныя чыпы манціраваліся падкладачным бокам на корпус ТО-18. Пры сілкаванні дыёдаў выкарыстоўваўся квазіімпульсны (квазі-бесперапынны) рэжым работы з сілаватасцю $\frac{1}{2}$. Працягласць імпульсу току складала 10 мкс, велічыня току – 208 мА.

У ходзе эксперымента святлодыёды змяшчаліся ў вакуумны крыятат з выхадным акном з CaF_2 , спектр прапускання якога з’яўляецца раўнамерным у доследным спектральным дыяпазоне. Кантакты ад дыёда герметычным чынам выводзіліся за межы крыятата. Халадзільная сістэма дазваляла змяняць і кантраляваць тэмпературу ад 10 да 300 К. Для вымярэння спектраў выкарыстоўваўся спектраметр MS2004i (вытворчасці «SOL Instruments») са спектральным разрозненнем не горш за 3 нм. Рэгістрацыя выпрамянення ажыццяўлялася фотапрымальнікамі на аснове $HgCdTe$ з аўтаматычнай карэкцыяй адчувальнасці ў дыяпазоне ад 1 да 5 мкм. Спектры выпрамянення святлодыёдаў рэгістраваліся ў адносных адзінках (мал. 1).

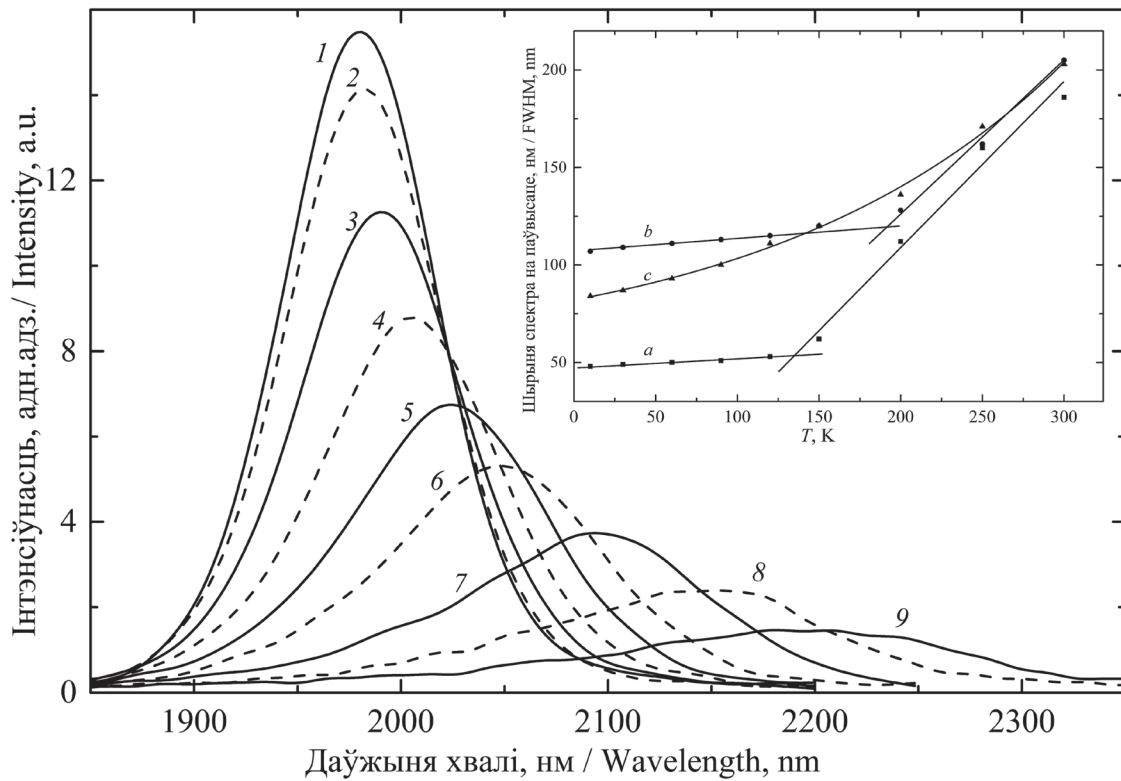
З паніжэннем тэмпературы да 200–150 К назіраецца змяшэнне шырыні спектра для ўсіх святлодыёдаў (мал. 2).

Было выяўлена, што з павелічэннем тэмпературы T з 10 да 300 К інтэгральная інтэнсіўнасць выпрамянення для святлодыёдаў з актыўным пластам $Ga_{0.96}In_{0.04}As_{0.03}Sb_{0.97}$ падае больш чым у 2.9 раза, для $Ga_{0.80}In_{0.20}As_{0.17}Sb_{0.83}$ – у 4.3 раза, пры гэтым тэмпературныя зрухі даўжыні хвалі



Мал. 1. Спектры выпрамянення святлодыёдаў з актыўным пластам $Ga_{0.96}In_{0.04}As_{0.03}Sb_{0.97}$ (1), $Ga_{0.92}In_{0.08}As_{0.07}Sb_{0.93}$ (2) і $Ga_{0.80}In_{0.20}As_{0.17}Sb_{0.83}$ (3) пры тэмпературы 10 К

Fig. 1. Emission spectra of LEDs with active layers of $Ga_{0.96}In_{0.04}As_{0.03}Sb_{0.97}$ (1), $Ga_{0.92}In_{0.08}As_{0.07}Sb_{0.93}$ (2) and $Ga_{0.80}In_{0.20}As_{0.17}Sb_{0.83}$ (3) at a temperature of 10 K



Мал. 2. Залежнасць выпрамянення святлодыёда з актыўным пластам $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$ ад тэмпературы: 1 – 10, 2 – 30, 3 – 60, 4 – 90, 5 – 120, 6 – 150, 7 – 200, 8 – 250, 9 – 300 К.

На ўстаўцы: залежнасць шырыні спектраў выпрамянення ад тэмпературы для святлодыёдаў з актыўным пластам $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ (a); $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ (b); $\text{Ga}_{0.80}\text{In}_{0.20}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$ (c)

Fig. 2. Temperature dependence of the emission spectra of LEDs with an active layer of $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$: 1 – 10, 2 – 30, 3 – 60, 4 – 90, 5 – 120, 6 – 150, 7 – 200, 8 – 250, 9 – 300 K.

The insert shows the temperature dependence of FWHM of the emission spectra for LEDs with active layers of $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ (a); $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ (b); and $\text{Ga}_{0.80}\text{In}_{0.20}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$ (c)

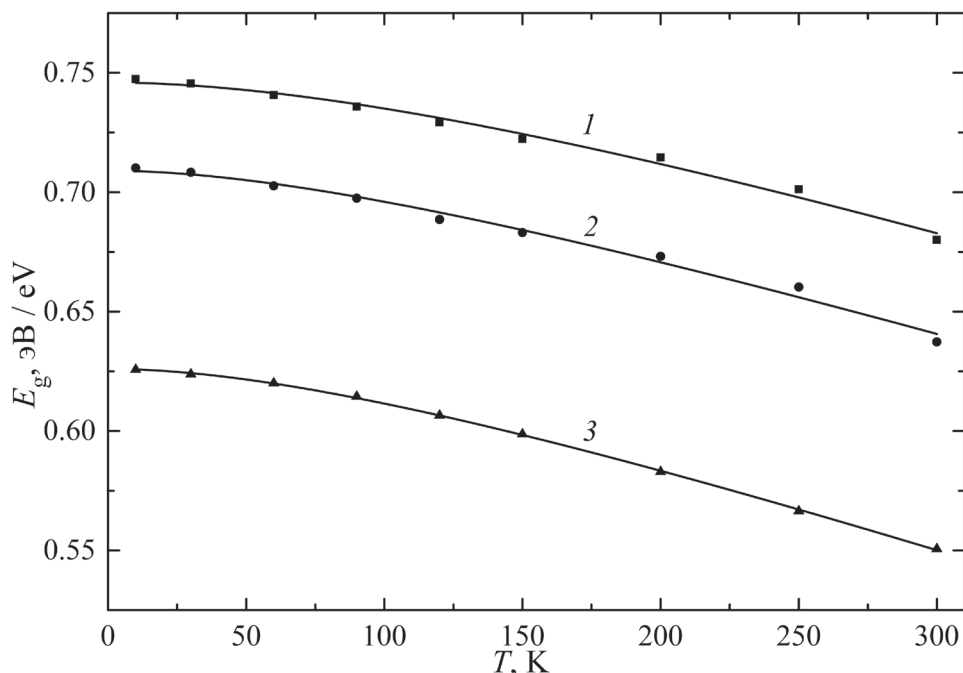
максімуму спектра выпрамянення для святлодыёдаў з актыўнымі пластамі $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$, $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ і $\text{Ga}_{0.80}\text{In}_{0.20}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$ роўныя 0.39, 0.57, 0.75 нм/К адпаведна.

Тэмпературная залежнасць шырыні забароненай зоны. Шырыня забароненай зоны E_g ад тэмпературы для актыўных пластоў GaInAsSb святлодыёдаў ацэньвалася з дапамогай метаду пабудовы залежнасці палажэння (па энергетычнай шкале) максімуму спектра выпрамянення ад тэмпературы з папраўкай на велічыню $kT/2$ [7], дзе k – канстанта Больцмана. Атрыманая такім чынам эксперыментальная залежнасць шырыні забароненай зоны актыўных пластоў святлодыёдаў на аснове гетэраструктур $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{AlGaAsSb}$ у дыяпазоне тэмператур ад 10 да 300 К добра апраксімуецца крывой (мал. 3), што адпавядае формуле Варшні:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T}, \quad (1)$$

дзе $E_g(0)$ – шырыня забароненай зоны пры $T = 0$ К, α і β – параметры Варшні.

Такім чынам, тэмпературная залежнасць шырыні забароненай зоны для актыўных пластоў святлодыёдаў на аснове цвёрдых раствораў $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ адпавядае формуле Варшні, пры гэтым супастаўленне эксперыментальных даных і апраксімацыйнай крывой дае магчымасць вызначыць адпаведныя параметры Варшні (табл. 1). Адноснае адхіленне апраксімацыйнай крывой (1) (з параметрамі табл. 1) ад эксперыментальнай тэмпературнай залежнасці шырыні забароненай зоны не перавышае 0.15 %.



Мал. 3. Залежнасць шырыні забароненай зоны E_g ад тэмпературы для $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ (1), $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ (2) і $\text{Ga}_{0.80}\text{In}_{0.20}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$ (3); кропкамі пазначаны адпаведныя эксперыментальныя значэнні

Fig. 3. The bandgap E_g dependence on temperature for LEDs with active layer $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ (1), $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ (2) and $\text{Ga}_{0.80}\text{In}_{0.20}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$ (3); the experimental values are presented by points in the figure

Табліца 1. Параметры Варшні для цвёрдых раствораў $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$
 Table 1. Parameters of Varshni for solid solutions of $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$

Параметр	Актыўны пласт		
	$\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$	$\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$	$\text{Ga}_{0.80}\text{In}_{0.20}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$
$E_g(0)$, мэВ	745.9	709.0	626.0
α , эВ/К	$3.9377 \cdot 10^{-4}$	$3.6540 \cdot 10^{-4}$	$4.0353 \cdot 10^{-4}$
β , К	261.53	181.12	178.50

Велічыня шырыні забароненай зоны пры тэмпературы 300 К для святлодыёда з актыўным пластам $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ роўная 0.682 эВ. У [8] для блізкага па складзе раствору $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.04}\text{Sb}_{0.96}$ пры $T = 300$ К велічыня $E_g = 0.685$ эВ. Для святлодыёда з актыўным пластам $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ атрыманая велічыня $E_g = 0.641$ эВ, для такога ж раствору ў [8] прыводзіцца значэнне $E_g = 0.632$ эВ. Шырыня забароненай зоны для $\text{Ga}_{0.80}\text{In}_{0.20}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$ складае 0.550 эВ, для блізкага раствору $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ па даных [8] $E_g = 0.543$ эВ. Такім чынам, атрыманыя значэнні шырыні забароненай зоны пры тэмпературы 300 К даволі блізкія да вядомых з літаратуры даных.

Спін-арбітальнае расщяпленне і Ажэ-рэкамбінацыя. Даследаванне ўплыву тэмпературы на інтэгральную інтэнсіўнасць выпрамянення святлодыёдаў дазваляе вызначыць параметры тэмпературнага тушэння выпрамянення і выявіць базавыя працэсы, што адказваюць за невыпраменную рэкамбінацыю ў актыўным пласце святлодыёда. Метад разліку энергіі актывацыі працэсаў тэмпературнага тушэння выпрамянення грунтуецца на пабудове эксперыментальнай залежнасці інтэгральнай інтэнсіўнасці выпрамянення святлодыёдаў ад тэмпературы [9, 10]. Вядома [2, 11–13], што ў вузказонных паўправадніках асноўным працэсам, адказным за змяншэнне інтэнсіўнасці выпрамянення, з’яўляецца Ажэ-рэкамбінацыя. У сваю чаргу для гэтых паўправаднікоў асноўнымі працэсамі Ажэ-рэкамбінацыі з’яўляюцца працэсы CHSH (conduction-heavy hole spin-orbit-heavy hole, энергія рэкамбінацыі электронна-дзіркавай пары перадаецца дзірцы з пераходам апошняй у спін-арбітальную зону) і CHCC (conduction-heavy hole conduction-conduction, працэс з удзелам двух электронаў і цяжкай дзіркі, які суправаджаецца ўзбуджэннем электрона

з пераходам яго ў высокаэнергетычны стан у зоне праводнасці). З павелічэннем току інжэкцыі святлодыёдаў адбываецца рост канцэнтрацыі носьбітаў у актыўным пласце гетэраструктуры. Пры гэтым залежнасць хуткасці рэкамбінацыі Шоклі – Рыда – Хола ад канцэнтрацыі носьбітаў з’яўляецца лінейнай, а хуткасць выпраменнай і Ажэ-рэкамбінацыі расце як квадрат і куб канцэнтрацыі адпаведна. У сувязі з гэтым пры току інжэкцыі больш за 100 мА на рэкамбінацыю Шоклі – Рыда – Хола ў святлодыёдах на аснове гетэраструктур $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{AlGaAsSb}$ можна не звяртаць увагі [2]. Таму тэмпературнае тушэнне люмінесценцыі для гэтых святлодыёдаў можна апісаць формулай Арэніуса – Мота для двух працэсаў [9, 10]:

$$I(T) = \frac{I(0)}{1 + Z_1 \cdot \exp\left(\frac{-E_{\text{CHSH}}}{kT}\right) + Z_2 \cdot \exp\left(\frac{-E_{\text{CHCC}}}{kT}\right)}, \quad (2)$$

дзе $I(T)$ – інтэгральная інтэнсіўнасць выпрамянення для тэмпературы T ; $I(0)$ – інтэгральная інтэнсіўнасць выпрамянення для тэмпературы 0 К; Z_1 і Z_2 – канстанты тушэння для адпаведных каналаў; E_{CHSH} і E_{CHCC} – энергіі актывацыі CHSH- і CHCC-працэсаў Ажэ-рэкамбінацыі, якія вызначаюцца наступнымі формуламі [12, 13]:

$$\begin{aligned} E_{\text{CHSH}}(T) &= (2m_v + m_c)(E_g(T) - \Delta_{\text{SO}}(T)) / (2m_v + m_c + m_{\text{SO}}), \\ E_{\text{CHCC}}(T) &= m_c E_g(T) / (m_c + m_v), \end{aligned} \quad (3)$$

дзе $\Delta_{\text{SO}}(T)$ – энергія спін-арбітальнага расшчаплення, m_{SO} , m_c і m_v – масы носьбітаў у спін-арбітальнай зоне, зоне праводнасці і валентнай зоне адпаведна.

Тэмпературная залежнасць энергіі спін-арбітальнага расшчаплення для паўправаднікоў, падобных да GaInAsSb, апісваецца формулай [14]:

$$\Delta_{\text{SO}}(T) = \Delta(0) + \chi T, \quad (4)$$

дзе $\Delta(0)$ – энергія спін-арбітальнага расшчаплення для тэмпературы 0 К, χ – параметр лінейнай тэмпературнай залежнасці.

Супастаўленне эксперыментальнай залежнасці інтэгральнай інтэнсіўнасці выпрамянення святлодыёда ад тэмпературы з крывымі, што разлічваліся на падставе суадносін (2)–(4), дазваляе з эксперыментальных даных атрымаць залежнасць $\Delta_{\text{SO}}(T)$ і велічыню m_{SO} . Лічачы параметры $\Delta(0)$, χ і m_{SO} падчас супастаўлення падгонкавымі, іх велічыні вызначаюць, калі дасягаецца адпаведнасць разлічанай і эксперыментальнай крывых залежнасці інтэгральнай інтэнсіўнасці выпрамянення ад тэмпературы. Пры разліках выкарыстоўваліся параметры m_c і m_v з [6] (пры гэтым тэмпературная залежнасць эфектыўных мас лічыцца дастаткова малой), залежнасць шырыні забароненай зоны бралася з папярэдняга раздзела (формула (1) з параметрамі табл. 1). Атрыманая на падставе эксперыментальных даных значэнні параметраў $\Delta(0)$, χ і m_{SO} прыводзяцца ў табл. 2 (m_0 – маса свабоднага электрона).

Табліца 2. Параметры тэмпературнай залежнасці спін-арбітальнага расшчаплення

Table 2. Parameters of the temperature dependence of the spin-orbit splitting

Параметр	Цвёрды раствор		
	$\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$	$\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$	$\text{Ga}_{0.80}\text{In}_{0.20}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$
$\Delta_{\text{SO}}(0)$, мэВ	720	678	619
χ , эВ/К	$0.22 \cdot 10^{-4}$	$0.44 \cdot 10^{-4}$	$0.76 \cdot 10^{-4}$
M_{SO}/m_0	0.3	0.2	0.18

Залежнасць $E_{\text{CHSH}}(T)$ з формулы (3) справядлівая пры $E_g(T) > \Delta_{\text{SO}}(T)$ [12, 14]. Такім чынам, з эксперыментальных даных атрымаць $\Delta_{\text{SO}}(T)$ можна да тэмператур, пры якіх $E_g(T) = \Delta_{\text{SO}}(T)$. Аднак атрыманая параметры можна скарыстаць для экстрапаляцыі на аснове формулы (4)

залежнасці $\Delta_{SO}(T)$ да больш высокіх тэмператур. Экстрапаляцыя $\Delta_{SO}(T)$ для тэмпературы 300 К з параметрамі табл. 2 для святлодыёда з актыўным пластам $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ дае значэнне $\Delta_{SO} = 0.727$ эВ. Для блізкага па складзе раствору $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.04}\text{Sb}_{0.96}$ у розных артыкулах прыводзяцца наступныя даныя: 0.753 [6] і 0.768 эВ [8], што дастаткова блізка па складзе да атрыманых.

Для выяўлення працэсу Ажэ-рэкамбінацыі, што прыводзіць да тушэння люмінесцэнцыі, можна скарыстаць атрыманыя тэмпературныя залежнасці $E_g(T)$ і $\Delta_{SO}(T)$ (з экстрапаляцыяй на большы дыяпазон тэмператур) і наступныя суадносіны [15–17]:

$$C_{\text{CHCC}}(T) = \frac{\pi^{1/2} m_c(m_c + m_v)^2}{2\hbar (2m_v + m_c)} |M_{\text{ee}}^2| \frac{E_{\text{CHCC}}(T)^2}{(kT)^{3/2}} \exp\left(\frac{-E_{\text{CHCC}}(T)}{kT}\right); \quad (5)$$

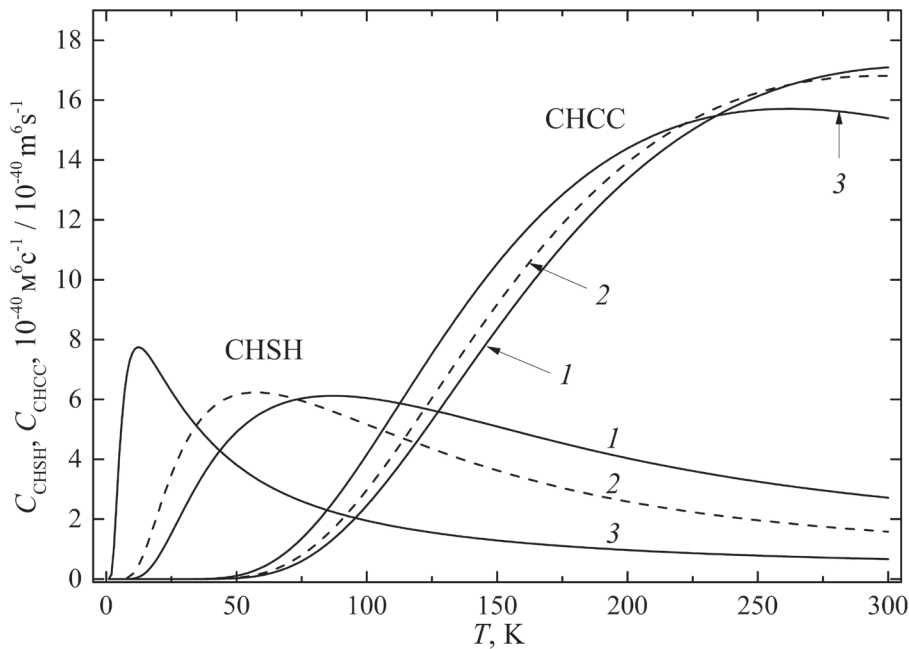
$$\begin{cases} C_{\text{CHSH}} = ABx^2 e^x \frac{2}{\pi^{1/2}} \left(\Gamma\left(\frac{3}{2}, \mu x\right) - \frac{2\Gamma\left(\frac{5}{2}, \mu x\right)}{\mu x} + \frac{\Gamma\left(\frac{7}{2}, \mu x\right)}{\mu^2 x^2} \right), & E_g \geq \Delta_{SO}, \\ C_{\text{CHSH}} = ABx^2 e^x \left(1 - \frac{3}{\mu x} + \frac{15}{4\mu^2 x^2} \right), & E_g \leq \Delta_{SO}, \end{cases} \quad (6)$$

$$A = \frac{G(\epsilon)\pi^3 \hbar^3 e^4}{2m_0^2} \left(\frac{m_v}{m_h}\right)^3 \left(\frac{m_{SO}}{2m_v + m_c}\right)^{3/2}, \quad B = \frac{\left(|M_{\text{ee}}^2| \frac{2}{m_0}\right)^2 (1 + m_{SO}/m_0)}{9E_g^2 \Delta^2 (E_g + \Delta_{SO})},$$

$$x = \frac{E_g - \Delta_{SO}}{kT}, \quad \mu = \frac{2m_v + m_c}{2m_v + m_c - m_{SO}},$$

дзе $\Gamma(a, x_0) = \int_{x_0}^{\infty} t^{a-1} \text{Exp}(-t) dt$, $G(\epsilon)$ – функцыя экранавання [15], $|M_{\text{ee}}^2|$ – квадрат матрычнага элемента невыпрамененных пераходаў. Параметры для разлікаў узятыя з [6, 18–19].

На мал. 4 прадстаўлены тэмпературныя залежнасці каэфіцыентаў працэсаў CHSH і CHCC, разлічаныя на аснове суадносін (5)–(6). Працэс Ажэ-рэкамбінацыі CHSH пачынае інтэнсіўна



Мал. 4. Тэмпературныя залежнасці каэфіцыентаў CHSH- і CHCC-працэсаў Ажэ-рэкамбінацыі для святлодыёдаў з актыўным пластам $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ (1), $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ (2), $\text{Ga}_{0.80}\text{In}_{0.20}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$ (3)

Fig. 4. Temperature dependences for CHSH and CHCC coefficients of Auger recombination for LEDs with active layers of $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ (1), $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ (2), $\text{Ga}_{0.80}\text{In}_{0.20}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$ (3)

развіваецца з ростам тэмпературы ад 10 да 80, 50, 25 К для святлодыёдаў з актыўным пластам $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$, $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$, $\text{Ga}_{0.80}\text{In}_{0.20}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$ адпаведна. Пасля чаго розніца $E_g(T) - \Delta_{\text{SO}}(T)$ пачынае расці, што прыводзіць да плаўнага змяншэння каэфіцыента Ажэ-рэкамбінацыі C_{CHSH} . З павелічэннем тэмпературы навакольнага асяроддзя больш за 100 К для трох святлодыёдаў пачынае інтэнсіўна развівацца працэс СНСС. Такім чынам, атрыманыя даныя дазваляюць устанавіць, што пры нізкіх тэмпературах 10–80 К для святлодыёдаў на аснове гетэраструктур $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{AlGaAsSb}$ працэсам, які абмяжоўвае інтэнсіўнасць выпрамянення, з'яўляецца Ажэ-рэкамбінацыя СНSH. Пры гэтым з павышэннем тэмпературы больш за 100 К адбываецца рост каэфіцыента C_{CHCC} Ажэ-рэкамбінацыі для працэсу СНСС, які пачынае дамінаваць над каэфіцыентам C_{CHSH} . Сума гэтых працэсаў абумоўлівае тушэнне выпрамянення пры павелічэнні тэмпературы больш за 150 К.

Заклучэнне. На падставе атрыманых эксперыментальных даных залежнасці ад тэмпературы спектральных параметраў трох розных святлодыёдаў на аснове гетэраструктур $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{AlGaAsSb}/\text{GaSb}$ былі атрыманы параметры Варшні і велічыні спін-арбітальнага расщачлення для цвёрдых раствораў $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$, $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ і $\text{Ga}_{0.80}\text{In}_{0.20}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$ у тэмпературным дыяпазоне 10–300 К.

Устаноўлена, што пры нізкіх тэмпературах 10–80 К для святлодыёдаў на аснове гетэраструктур $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{AlGaAsSb}$ працэсам, што абмяжоўвае інтэнсіўнасць выпрамянення, з'яўляецца працэс Ажэ-рэкамбінацыі СНSH. Пры гэтым з павышэннем тэмпературы больш за 100 К адбываецца рост каэфіцыента Ажэ-рэкамбінацыі для працэсу СНСС, які пачынае дамінаваць над каэфіцыентам для працэсу СНSH. Сума гэтых працэсаў абумоўлівае тушэнне выпрамянення пры павелічэнні тэмпературы больш за 150 К.

Падзякі. Аўтары ўдзячныя прафесару Ю. П. Якаўлеву (Фізіка-тэхнічны інстытут імя А. Ф. Ёфэ РАН) за святлодыёды, перададзеныя для даследаванняў, а таксама М. В. Ржэуцкаму за дапамогу пры выкананні эксперыменту.

Acknowledgements. The authors are grateful to Prof. Yu. P. Yakovlev (Ioffe Institute) for LEDs, as well as M. V. Rzhetski for assistance with experiment.

Спіс выкарыстаных крыніц

1. GaSb based lasers operating near 2.3 μm for high resolution absorption spectroscopy / S. Civias [et al.] // Spectrochim. Acta, Part A. – 2005. – Vol. 61, № 13/14. – P. 3066–3069.
2. Высокоэффективные светодиоды спектрального диапазона 1,6–2,4 мкм для медицинской диагностики и экологического мониторинга / Н. Д. Стоянов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2003. – Т. 37, № 8. – С. 996–1009.
3. Измеритель содержания воды в нефти и нефтепродуктах на основе инфракрасных оптоэлектронных пар светодиод-фотодиод / М. В. Богданович [и др.] // Журн. техн. физики. – 2017. – Т. 87, вып. 2. – С. 315–318.
4. The NASA light-emitting diode medical program – progress in space flight and terrestrial applications / Н. Т. Whelan [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2000. – P. 37–43.
5. Light-emitting diodes for space applications / W. Lu [et al.] // Opt. Quant. Electron. – 2009. – Vol. 41, № 11/13. – P. 883–893.
6. Vurgaftman, I. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys / I. Vurgaftman, J. R. Meyer // J. Appl. Phys. – 2001. – Vol. 89, № 11. – P. 5815–5875.
7. Разъединенный гетеропереход в системе $p\text{-GaSb-n-InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0,18$) / С. С. Кижаяев [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27, № 22. – С. 66–72.
8. Mikhailova, M. P. Type II heterojunctions in the GaInAsSb/GaSb system / М. P. Mikhailova, A. N. Titkoba // Semicon. Sci. Technol. – 1994. – Vol. 9, № 7. – P. 1279–1295.
9. Temperature quenching of photoluminescence intensities in undoped and doped GaN / M. Leroux [et al.] // J. Appl. Phys. – 1999. – Vol. 86, № 7. – P. 3721–3728.
10. Температурное тушение спонтанного излучения в туннельно-инжекционных наноструктурах / В. Г. Талалаев [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49, вып. 11. – С. 1531–1539.
11. Takeshima, M. Auger recombination in InAs, GaSb, InP, and GaAs / M. Takeshima // J. Appl. Phys. – 1972. – Vol. 43, № 11. – P. 4114–4119.
12. Takeshima, M. Green's-function formalism of band-to-band Auger recombination in semiconductors. Correlation effect / M. Takeshima // Phys. Rev. B. – 1982. – Vol. 26, № 11. – P. 917–930.
13. Direct evidence for suppression of Auger recombination in GaInAsSbP/InAs midinfrared light-emitting diodes / K. J. Cheetham [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2011. – Vol. 99, № 14. – P. 141110.

14. Takeshima, M. Unified theory of the impurity and phonon scattering effects on Auger recombination in semiconductors / M. Takeshima // *Phys. Rev. B.* – 1982. – Vol. 25, № 8. – P. 5390–5414.
15. Haug, A. Temperature dependence of Auger recombination in gallium antimonide / A. Haug // *J. Phys. C: Solid State Phys.* – 1984. – Vol. 17, № 34. – P. 6191–6197.
16. Haug, A. Band-to-band auger recombination in semiconductors / A. Haug // *J. Phys. Chem. Solids.* – 1988. – Vol. 49, № 6. – P. 599–605.
17. Pidgeon, C. R. Suppression of non-radiative processes in semiconductor mid-infrared emitters and detectors / C. R. Pidgeon, C. M. Ciesla, B. N. Murdin // *Progress in Quantum Electronics.* – 1998. – Vol. 21, № 6. – P. 361–419.
18. Handbook series on semiconductor parameters / eds. M. Levinshtein, S. Rumyantsev, M. Shur. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1999. – Vol. 2: Ternary and Quaternary III-V Compounds. – 205 p.
19. Miller, A. Semiconductors and Semimetals / A. Miller, E. Garmire, A. Kost. – New York: Academic, 1999. – Vol. 59. *Nonlinear Optics in Semiconductors. II.*

References

1. Civiš S., Horká V., Šimeček T., Hulicius E., Pangrác J., Oswald J., Petříček O., Rouillard Y., Alibert C., Werner R. GaSb based lasers operating near 2.3 μm for high resolution absorption spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2005, vol. 61, no. 13–14, pp. 3066–3069. Doi: 10.1016/j.saa.2004.11.029
2. Stoyanov N. D., Zhurttanov B. E., Astakhova A. P., Imenkov A. N., Yakovlev Yu. P. High Efficient LEDs of 1.6–2.4 μm spectral range for medical diagnostics and ecological monitoring. *Semiconductors*, vol. 37, no. 8, pp. 971–984. Doi: 10.1134/1.1601668
3. Bogdanovich M. V., Kabanov D. M., Lebedok E. V., Shpak P. V., Ryabtsev A. G., Ryabtsev G. I., Shchemelev M. A., Andreev I. A., Kunitsyna E. V., Ivanov E. V., Yakovlev Yu. P. Measurement of the water content in oil and oil products using IR light-emitting diode–photodiode optrons. *Technical Physics*, 2017, vol. 62, no. 2, pp. 344–346. Doi: 10.1134/s1063784217020049
4. Whelan H. T. The NASA light-emitting diode medical program – progress in space flight and terrestrial applications. *AIP Conference Proceedings*, 2000, pp. 37–43. Doi: 10.1063/1.1302454
5. Lu W., Zhang T., He S. M., Zhang B., Li N., Liu S. S. Light-emitting diodes for space applications. *Optical and Quantum Electronics*, 2009, vol. 41, no. 11–13, pp. 883–893. Doi: 10.1007/s11082-010-9402-2
6. Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*, 2001, vol. 89, no. 11, pp. 5815–5875. Doi: 10.1063/1.1368156
7. Kizhaev S. S., Molchanov S. S., Zotova N. V., Grebenshchikova E. A., Yakovlev Yu. P., Hulicius E., Šimeček T., Melichar K., Pangrác J. Broken-gap heterojunction in the p-GaSb-n-InAs $_{1-x}$ Sb $_x$ ($0 \leq x \leq 0.18$) system. *Technical Physics Letters*, 2001, vol. 27, no. 11, pp. 964–966. Doi: 10.1134/1.1424407
8. Mikhailova M. P., Titkoba A. N. Type II heterojunctions in the GaInAsSb/GaSb system. *Semiconductor Science and Technology*, 1994, vol. 9, no. 7, pp. 1279–1295. Doi: 10.1088/0268-1242/9/7/001
9. Leroux M., Grandjean N., Beaumont B., Nataf G., Semond F., Massies J., Gibart P. Temperature quenching of photoluminescence intensities in undoped and doped GaN. *Journal of Applied Physics*, 1999, vol. 86, no. 7, pp. 3721–3728. Doi: 10.1063/1.371242
10. Talalaev V. G., Novikov B. V., Tsyrlin G. E., Leipner H. S. Temperature quenching of spontaneous emission in tunnel-injection nanostructures. *Semiconductors*, 2015, vol. 49, no. 11, pp. 1483–1492. Doi: 10.1134/s1063782615110214
11. Takeshima M. Auger recombination in InAs, GaSb, InP, and GaAs. *Journal of Applied Physics*, 1972, vol. 43, no. 11, pp. 4114–4119. Doi: 10.1063/1.1660882
12. Takeshima M. Green's-function formalism of band-to-band Auger recombination in semiconductors. Correlation effect. *Physical Review B*, 1982, vol. 26, no. 11, pp. 917–930. Doi: 10.1103/physrevb.26.917
13. Cheetham K. J., Krier A., Marko I. P., Aldukhayel A., Sweeney S. J. Direct evidence for suppression of Auger recombination in GaInAsSbP/InAs midinfrared light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 2011, vol. 99, no. 14, pp. 141110. Doi: 10.1063/1.3646910
14. Takeshima M. Unified theory of the impurity and phonon scattering effects on Auger recombination in semiconductors. *Physical Review B*, 1982, vol. 25, no. 8, pp. 5390–5414. Doi: 10.1103/physrevb.25.5390
15. Haug A. Temperature dependence of Auger recombination in gallium antimonide. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 1984, vol. 17, no. 34, pp. 6191–6197. Doi: 10.1088/0022-3719/17/34/019
16. Haug A. Band-to-band auger recombination in semiconductors. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1988, vol. 49, no. 6, pp. 599–605. Doi: 10.1016/0022-3697(88)90190-4
17. Pidgeon C. R., Ciesla C. M., Murdin B. N. Suppression of non-radiative processes in semiconductor mid-infrared emitters and detectors. *Progress in Quantum Electronics*, 1998, vol. 21, no. 6, pp. 361–419. Doi: 10.1016/s0079-6727(97)00012-8
18. Levinshtein M., Rumyantsev S., Shur M. (eds.). *Handbook series on semiconductor parameters. Vol. 2: Ternary and Quaternary III-V Compounds*. Singapore, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1999. 205 p. Doi: 10.1142/2046-vol2
19. Miller A., Garmire E., Kost A. *Semiconductors and Semimetals, Volume 59. Nonlinear Optics in Semiconductors. II*. New York, Academic, 1999.

Информация об авторах

Лебедок Егор Викторович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией оптико-электронного приборостроения, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: y.lebiadok@ifanbel.bas-net.by

Кабанов Дмитрий Михайлович – младший научный сотрудник лаборатории оптико-электронного приборостроения, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: d.kabanau@ifanbel.bas-net.by

Information about the authors

Yahor V. Lebiadok – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of Optoelectronic Engineering, SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: y.lebiadok@ifanbel.bas-net.by

Dzmitry M. Kabanau – Junior Researcher of the Laboratory of Optoelectronic Engineering, SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: d.kabanau@ifanbel.bas-net.by