



UDK: 533.537

**Ganjimurod SHIRINOV,**  
PhD, Tashkent davlat texnika universiteti, Toshkent, O'zbekiston  
E-mail: ganjimurod777@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7188-2560

F-m.f.n. dotsent F.Xudoyqulov taqrizi asosida

## ELECTRONIC STRUCTURE AND EMISSION PROPERTIES OF TERNARY NANOFILMS FORMED ON THE GaP SURFACE BY LOW-ENERGY ION IMPLANTATION AND SUBSEQUENT ANNEALING

Annotation

In this work, thin single-crystal nanofilms of GaAlP and GaInP type were fabricated by implanting Al<sup>+</sup> and In<sup>+</sup> ions into the GaP surface followed by an annealing process. The obtained structures were comprehensively investigated using Auger electron spectroscopy, ultraviolet photoelectron spectroscopy, as well as studies of the energy and angular dependences of light absorption and secondary electron emission. As a result, the main band-structure and emission parameters of Ga<sub>0.6</sub>Al<sub>0.4</sub>P/GaP(111) and Ga<sub>0.6</sub>In<sub>0.4</sub>P/GaP(111) nanofilms with a thickness of up to 50 Å were determined. The studies demonstrated the epitaxial growth of the films and the consistency of their crystallographic orientation with that of the substrate. In particular, the band gap of the Ga<sub>0.6</sub>In<sub>0.4</sub>P film was found to be smaller than that of the substrate, which affects the emission properties of the system, leading to a certain decrease in the values of  $\sigma_m$  and K. The obtained results are of significant importance for the development of modern optoelectronic devices based on semiconductor heterostructures.

**Key words:** monocrystal, nanofilms, ion implantation, low-energy ions, thermal annealing process, secondary electron emission, photoluminescence spectra, band-structure parameters.

## ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА ТРЁХКОМПОНЕНТНЫХ НАНОПЛЁНОК, СФОРМИРОВАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ GaP МЕТОДОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ОТЖИГОМ

Аннотация

В данной работе путем имплантации ионов Al<sup>+</sup> и In<sup>+</sup> в поверхность GaP с последующим процессом отжига были сформированы тонкие монокристаллические нанопленки типа GaAlP и GaInP. Полученные структуры были исследованы комплексными методами, включая оже-электронную спектроскопию, ультрафиолетовую фотоэлектронную спектроскопию, а также изучение энергетической и угловой зависимости поглощения света и вторичной электронной эмиссии. В результате были определены основные зонно-энергетические и эмиссионные параметры нанопленок Ga<sub>0.6</sub>Al<sub>0.4</sub>P/GaP(111) и Ga<sub>0.6</sub>In<sub>0.4</sub>P/GaP(111) с толщиной до 50 Å. Проведенные исследования показали эпитаксиальный характер роста пленок и соответствие их кристаллографической ориентации подложке. В частности, в пленке Ga<sub>0.6</sub>In<sub>0.4</sub>P ширина запрещенной зоны оказалась меньше по сравнению с подложкой, что оказывает влияние на эмиссионные свойства системы, приводя к определенному снижению значений  $\sigma_m$  и K. Полученные результаты имеют важное значение для разработки современных оптоэлектронных устройств на основе полупроводниковых гетероструктур.

**Ключевые слова:** монокристалл, нанопленки, ионная имплантация, низкоэнергетические ионы, процесс термического отжига, вторичная электронная эмиссия, спектры фотolumинесценции, зонно-энергетические параметры.

## PAST ENERGIYALI ION IMPLANTATSIYASI VA KEYINGI TAVLASH JARAYONIDA GaP YUZASIDA HOSIL QILINGAN UCH KOMPONENTLI NANOPLYONKALARNING ELEKTRON TUZILISHI VA EMISSIYA XUSUSIYATLARI

Annotatsiya

Ushbu ishda Al<sup>+</sup> va In<sup>+</sup> ionlarini GaP yuzasiga implantatsiya qilish hamda keyingi tavlash jarayoni asosida GaAlP va GaInP turidagi yupqa monokristall nanoplyonkalar hosil qilindi. Olingan tuzilmalar kompleks ravishda Oje-elektron spektroskopiyasi, ultrabinafsha fotoelektron spektroskopiyasi, yorug'lik yutilishi hamda ikkilamchi elektron emissiyasining energetik va burchak bog'liqliklarini o'rganish orqali tadqiq etildi. Natijada, qalinligi 50 Å gacha bo'lgan Ga<sub>0.6</sub>Al<sub>0.4</sub>P/GaP(111) va Ga<sub>0.6</sub>In<sub>0.4</sub>P/GaP(111) nanoplyonkalarining asosiy zona-energetik va emissiya parametrlari aniqlandi. Tadqiqotlar plyonkalarining epitaksial tarzda o'sishini va ularning kristallografik yo'nalishlari taglik bilan mos kelishini ko'rsatdi. Xususan, Ga<sub>0.6</sub>In<sub>0.4</sub>P plyonkasida taqiqlangan zona kengligi taglikka nisbatan kichik bo'lib, bu holat tizimning emissiya xususiyatlariga ta'sir ko'rsatadi, ya'ni  $\sigma_m$  va K qiymatlarining ma'lum darajada kamayishiga olib keladi. Olingan natijalar yarimo'tkazgichli geterotuzilmalar asosida zamonaviy optoelektron qurilmalarni yaratishda muhim ahamiyatga ega.

**Kalit so'zlar:** monokristall, nanoplyonkalar, ion implantatsiyasi, past energiyali ionlar, termik tavlash jarayoni, ikkilamchi elektron emissiyasi, fotoluminessensiya spektrlari, zona-energetik parametrlar.

**Kirish.** A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> turkumiga mansub ikkilik yarimo'tkazgichlar hamda ular asosida yaratilgan ko'p komponentli geterotuzilmalar hozirgi kunda optoelektronika, mikroelektronika va nanoelektronika sohalarida turli qurilmalarni ishlab chiqishda keng qo'llanilmoqda. Xususan, GaP, GaInP va AlGaInP qatlamlaridan tashkil topgan ko'p qatlamli tuzilmalar lazer diodlari,

quyosh elementlari, fotoelektrik va boshqa optoelektron qurilmalarni yaratishda muhim ahamiyat kasb etadi hamda istiqbolli materiallar sifatida qaraladi.

**Mavzuga oid adabiyotlarning tahlili.**  $Ga_{1-x}Al_xAs$  va  $Ga_xIn_{1-x}P$  kabi uch komponentli qattiq eritmalarini olish, ularning taqiqlangan zona kengligini boshqarish imkoniyati tufayli alohida ilmiy va amaliy qiziqish uyg'otmoqda [1-4]. Hozirgi vaqtga kelib, turli epitaksiya usullari yordamida olingan  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$  ko'p qatlamli tuzilmalarining tarkibi, kristall tuzilishi, optik va elektron xossalari yetarlicha chuqur o'rganilgan bo'lib, bu ularning mikro- va optoelektron qurilmalarda keng qo'llanilishi bilan izohlanadi [5-10].

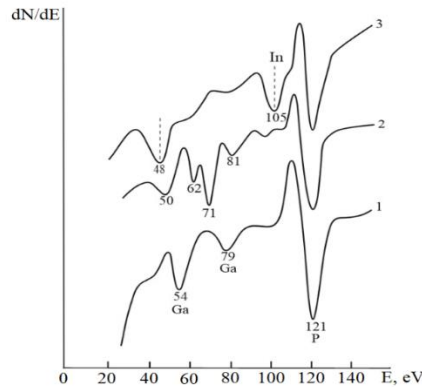
Keng taqiqlangan zona kengligiga ega bo'lgan  $GaxIn_{1-x}P$  qotishmalarida zaryad tashuvchilarni cheklash bilan bog'liq muammolar mavjud bo'lishiga qaramay [11, 12], to'g'ri va bilvosita zonalar orasidagi energiya farqiga bog'liq ravishda lyuminessensiya intensivligining kamayishini tavsiflash uchun soddalashtirilgan modellashirish usuli taklif etilgan [13]. Ushbu yondashuv materialning optik xususiyatlarini tahlil qilishda hamda ularning samaradorligini baholashda muhim ahamiyatga ega.  $GaxIn_{1-x}P$  plyonkalari  $7 \cdot 10^{16}$  dan  $2 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-2}$  gacha bo'lgan konsentratsiyada Te ionlari bilan legirlangani aniqlangan [14]. Fotolyuminessensiya spektrlari tahlili natijalariga ko'ra, bilvosita zonadan to'g'ridan-to'g'ri zonaga o'tish 40-100 K harorat oralig'ida yuz beradi, xona haroratida esa spektrlarda to'g'ridan-to'g'ri zonaga mos nurlanish ustunlik qiladi. So'nggi yillarda yarimo'tkazgich va dielektrik materiallar yuzasida nanoplyonkalar hosil qilish uchun past energiyali ion implantatsiyasi usuli, odatda keyingi tavlash jarayoni bilan birgalikda, keng qo'llanilayotgan samarali texnologiyalardan biri hisoblanadi [15-19].

Xususan, yuqori dozalarda  $Ar^+$  ionlari bilan bombardimon qilinganda material yuzasi galliy (Ga) atomlari bilan boyishi aniqlangan, Me (Ba va Na) ionlari bilan ta'sir ettirilganda esa sirt tarkibida Ga bilan birga Me atomlarining ham ortishi kuzatiladi. Shu bilan birga, past energiyali  $In^+$  va  $Al^+$  ionlari bilan implantatsiya qilingan GaP holatida bunday jarayonlar yetarli darajada o'rganilmagan. Ushbu ish aynan GaP asosida  $In^+$  va  $Al^+$  ionlarini implantatsiya qilish orqali GaInP va GaAlP turidagi nanoplyonkalarni hosil qilish hamda ularning fizik xususiyatlarini tadqiq etishga bag'ishlangan.

**Tadqiqot metodologiyasi.** Tadqiqot obyekti sifatida monokristall GaP(111) namunalar tanlab olindi. Ion implantatsiyasidan oldin GaP(111) namunasi yuqori vakuum sharoitida ( $P \approx 10^{-7} \text{ Pa}$ ) 900 K haroratda taxminan 4 soat davomida termik tozalash amalga oshirildi. Implantatsiya jarayoni  $In^+$  va  $Al^+$  ionlari yordamida  $E_0 = 1 \text{ keV}$  energiyada, to'yingan doza ( $D \approx D_n \approx 10^{17} \text{ sm}^{-2}$ ) sharoitida amalga oshirildi. Natijada ion implantatsiyasi ta'sirida GaP ning sirt qatlamlari to'liq darajada tartibsiz holatga o'tdi va ushbu qatlamlarda Al hamda In atomlarining konsentratsiyasi taxminan 30-35 at.% ni tashkil etdi.

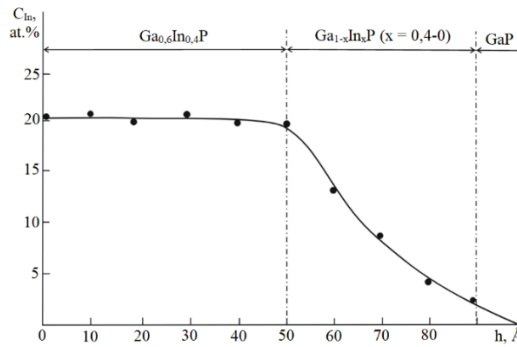
In va Al atomlarining ma'lum qismi (~30-35 at.%) matritsa atomlari bilan kimyoviy bog'lanish hosil qiladi.  $Al^+$  ionlari bilan implantatsiya qilingan GaP namunasi 900 K haroratda qizdirilgandan so'ng uning yuzasida  $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$  turiga mansub monokristall plyonka shakllanishi kuzatiladi. Xuddi shuningdek,  $In^+$  ionlari bilan implantatsiya qilingan namunani 950 K haroratda termik ishlov berish natijasida  $Ga_{0,6}In_{0,4}P$  tarkibli plyonka hosil bo'ladi. Tadqiqotlar Oje-elektron spektroskopiyasi (OES), tez elektronlar difraksiyasi (TED), ultrabinafsha fotoelektron spektroskopiyasi (UFES) usullari yordamida hamda ikkilamchi elektron emissiyasi koeffitsientining (IEEK) energetik va burchak bog'liqliklarini aniqlash orqali amalga oshirildi. Ultrabinafsha fotoelektron spektrlari  $h\nu \approx 10,8 \text{ eV}$  energiyali fotonlar yordamida qayd etildi. Fotonlar manbai sifatida standart gaz razryadli vodorod lampasidan foydalanildi, bu esa o'lchovlarning barqaror va ishonchli bo'lishini ta'minladi.

**Tahlil va natijalar.** 1-rasmda GaP hamda uning yuzasida hosil qilingan  $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$  va  $Ga_{0,6}In_{0,4}P$  plyonkalari uchun olingan Oje-spektrlarning boshlang'ich qismi keltirilgan. Tahlil shuni ko'rsatadiki, yangi uch komponentli birikmalar hosil bo'lishi jarayonida galliyga (Ga) tegishli Oje-piklar ( $E = 54$  va  $59 \text{ eV}$ ) o'zgaradi, shu bilan birga fosfor (P) ga mos keluvchi pik ( $E = 121 \text{ eV}$ ) ning intensivligi va energetik holati deyarli o'zgarmay qoladi.



1-rasm. Oje-spektrlar: 1 - GaP(111); 2 -  $Ga_{0,6}Al_{0,4}P/GaP(111)$ ; 3 -  $Ga_{0,6}In_{0,4}P/GaP(111)$ . Oje-spektrlar  $E_p = 2000 \text{ eV}$  energiyada qayd etilgan.

Bundan tashqari, uch komponentli plyonkalarga xos bo'lgan yangi piklar paydo bo'lishi kuzatiladi. Xususan,  $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$  holatida  $E \approx 50, 62, 71$  va  $81 \text{ eV}$  qiymatlarida yangi piklar aniqlangan bo'lsa,  $Ga_{0,6}In_{0,4}P$  plyonkasi uchun esa 48, 80 va  $105 \text{ eV}$  atrofida joylashgan piklar qayd etilgan.



2-rasm.  $E_0 = 1$  keV energiyali  $In^+$  ionlari bilan  $D = 10^{17} \text{ sm}^{-2}$  doza ostida implantatsiya qilingan GaP namunasi 950 K da qizdirilgandan so'ng, In atomlari konsentratsiyasining taqsimoti.

Ko'rsatilgan piklarning intensivligi ma'lum bir chuqurlikkacha deyarli o'zgarmasdan saqlanib qoladi. Oje-elektronlarning to'liq spektrini tahlil qilish natijalari shuni ko'rsatadiki,  $Ga_{0,6}In_{0,4}P$  plyonkasining qalinligi taxminan 40-50 Å ni,  $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$  plyonkasini esa 30-35 Å ni tashkil etadi. Bundan tashqari, plyonka bilan taglik orasida qalinligi 50-60 Å ga teng bo'lgan o'tish qatlamining mavjudligi aniqlangan 2-rasm.

3-rasmda  $h\nu = 10,8$  eV energiyada olingan GaP(111) hamda uning yuzasida hosil qilingan  $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$  va  $Ga_{0,6}In_{0,4}P$  plyonkalari uchun fotoelektron spektrlari keltirilgan. Ushbu plyonkalarining qalinligi mos ravishda taxminan 35-40 Å va 40-50 Å ni tashkil etadi. Toza GaP(111) uchun fotoelektronlarning energetik taqsimoti egri chizig'ida  $E_{sv} \approx -0,8; -2,2$  va  $-4$  eV bog'lanish energiyalariga mos keluvchi maksimumlar kuzatiladi. Shu bilan birga, uch komponentli yupqa plyonkalarda elektron holatlar zichligi hamda energetik parametrlar GaP ga xos qiymatlardan sezilarli darajada farq qilishi aniqlangan. Tadqiq etilgan namunalar spektrlarida kuzatilgan piklarning yuzaga kelish sabablari tahlili, ularning zona parametrlari, shuningdek emissiya va optik xususiyatlari 1-jadvalda keltirilgan.

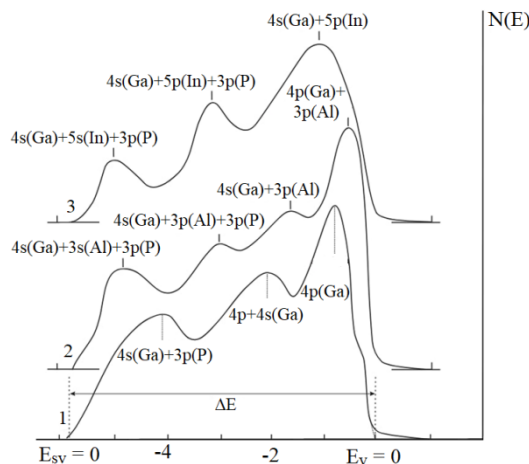
Elektron energiyasining keV diapazoniga mos keluvchi piklarning joylashuvi, ularning shakllanish sabablari, shuningdek zona-energetik va emissiya parametrlarining tavsifi.

1-jadval

Obyekt	Plyonka qalinligi, Å	$E_{sv}$ , eV	Interpretatsiya (fizik mohiyati)	$\Phi$ , eV	$\kappa$ , eV	$E_g$ , eV	$\sigma_m$	K ( $h\nu = 10,8$ eV)
GaP (111)	Mono-kristall	- 0,8 - 2,2 - 4,1	4p(Ga) 4p+4s(Ga) 4s(Ga)+3p(P)	6,1	3,74	2,36	2,36	$6 \cdot 10^{-3}$
GaAlP/ GaP(111)	35-40	- 0,6 - 1,7 - 3,1 - 4,8	4p(Ga)+3p(Al) 4s(Ga)+3p(Al) 4s(Ga)+3p(Al)+3p(P) 4s(Ga)+3s(Al)+3p(P)	6,1	3,72	2,38	2,38	$4,8 \cdot 10^{-3}$
GaInP/ GaP	40-50	-1,2 -3,3 -5,6	4s(Ga)+5p(In) 4s(Ga)+5p(In)+3p(P) 4s(Ga)+5s(In)+3p(P)	5,5	3,65	1,85	1,85	$4 \cdot 10^{-3}$

bu yerda  $\Phi$  - fotoelektron ish chiqish funksiyasi bo'lib, u quyidagi formula orqali aniqlanadi:  $\Phi = h\nu - \Delta E$ , bu yerda  $\Delta E$  - fotoelektronlar spektrining kengligi.  $\kappa$  - elektronlarga moyillik bo'lib,  $\kappa = \Phi - E_g$  munosabat bilan ifodalanadi.  $\sigma_m$  - ikkilamchi elektron emissiyasi koeffitsientining maksimal qiymati, K esa  $h\nu = 10,8$  eV da o'lchangan fotoelektronlarning kvant chiqishi hisoblanadi.

3-rasm va jadval ma'lumotlaridan ko'rinadiki, uch komponentli plyonkalarining fotoelektron spektridagi asosiy maksimumlar GaP valent elektronlari sathlari hamda kiritilgan Al va In atomlari sathlarining gibridlanishi natijasida yuzaga keladi. Buning natijasida GaP ning zona-energetik parametrlari ham sezilarli darajada o'zgaradi. Xususan, GaAlP holatida taqiqlangan zona kengligi  $E_g$  biroz ortishi kuzatilsa, GaInP tizimida esa bu kattalik ancha kamayadi.



3-rasm. Fotoelektron spektrlari: 1 - GaP(111); 2 - Ga<sub>0,6</sub>Al<sub>0,4</sub>P/GaP(111);  
3 - Ga<sub>0,6</sub>In<sub>0,4</sub>P/GaP(111), hv ≈ 10,8 eV energiyada olingan.

**Xulosa va takliflar.** Mazkur ishda GaP(111) yuzasiga Al<sup>+</sup> va In<sup>+</sup> ionlarini implantatsiya qilish hamda termik tavlash natijasida Ga<sub>0,6</sub>Al<sub>0,4</sub>P va Ga<sub>0,6</sub>In<sub>0,4</sub>P nanoplyonkalari hosil qilindi. Oje va fotoelektron spektroskopiyasi natijalari asosida ularning zona-energetik parametrlari aniqlanib, dastlabki GaP ga nisbatan sezilarli o'zgarishlar kuzatildi. Plyonkalarining epitaksial tarzda o'sishi va kristallografik mosligi tasdiqlandi. Kelgusida ion implantatsiya parametrlarining ta'sirini chuqurroq o'rganish hamda hosil qilingan tuzilmalarni optoelektron qurilmalarda qo'llash imkoniyatlarini tadqiq etish maqsadga muvofiqdir.

#### ADABIYOTLAR

1. Vurgaftman I., Kane M.H., Meyer J.R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys: GaInP, GaAs and related materials. // *Journal of Applied Physics* 117, 2015, pp. 1-25.
2. Jain S.C., Willander M., Narayan J. III-nitrides and III-V semiconductor alloys: properties and device applications of GaInP and AlGaP systems. // *Journal of Applied Physics* 118, 2016, pp. 1-18.
3. Zhang X., Mi Z. Semiconductor III-V alloys for optoelectronic applications: bandgap engineering in GaInP and AlGaP materials. // *Progress in Quantum Electronics* 55, 2017, pp. 1-30.
4. Li Y., Chen K., Wang Z. Ion implantation and annealing effects in GaP-based III-V heterostructures. // *Materials Science in Semiconductor Processing* 104, 2020, pp. 104-112.
5. Xu J.F., Liu S.W., Xiao M., Thibado P.M. Electrical and optical studies of GaMnAs/GaAs (001) thin films grown by molecular beam epitaxy. // 2015, pp. 1-10.
6. Gardner G.C., Fallahi S., Watson J.D., Manfra M.J. Modified MBE techniques for ultra-high mobility AlGaAs/GaAs quantum wells. // 2016, pp. 1-12.
7. Benyahia D., Kubiszyn L., Michalczewski K. et al. Molecular beam epitaxial growth and characterization of III-V semiconductor heterostructures on GaAs substrates. // *Optical and Quantum Electronics* 48, 2016, pp. 1-15.
8. Khvostikova O., Vlasov A., Khvostikov V. Properties of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As grown from mixed melts for optoelectronic applications. // *Scientific Reports* 14, 2024, pp. 1-12.
9. Wang T., Song H., He K. Structural design and MBE growth of GaAs-based heterostructures for high mobility 2DEG systems. // *Quantum Frontiers* 3, 2024, pp. 1-18.
10. Minehisa K., Murakami R., Tsutsumi R. et al. Wafer-scale integration of GaAs/AlGaAs core-shell nanowires by molecular beam epitaxy. // *Nanoscale Advances* 5, 2023, pp. 1651-1663.
11. Kim J., Zhou W., Lee S. Carrier confinement and transport limitations in Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>P wide bandgap semiconductor alloys. // *Journal of Applied Physics* 121, 2017, pp. 1-12.
12. Wang Y., Liu H., Sun Y. Optical and electronic properties of GaInP-based heterostructures: carrier confinement effects. // *Semiconductor Science and Technology* 33, 2018, pp. 1-10.
13. Park J., Choi H., Kim D. Simplified modeling of luminescence efficiency in direct and indirect band transition III-V semiconductor alloys. // *Optical Materials Express* 9, 2019, pp. 1-14.
14. Sato K., Takahashi M., Yamamoto T. Tellurium ion doping in Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>P thin films: concentration-dependent electrical properties. // *Materials Science in Semiconductor Processing* 142, 2022, pp. 106-114.
15. Skorupa W., Schmidt B., Helm M. Ion beam synthesis and modification of semiconductor nanostructures by low-energy ion implantation. // *Applied Physics Reviews* 2, 2015, pp. 1-25.
16. Andersson J.Y., Holst G.V. Low-energy ion implantation and annealing effects in III-V semiconductor thin films. // *Materials Science in Semiconductor Processing* 63, 2017, pp. 1-10.
17. Zhang Y., Zhao L., Wang X. Formation of nanoscale surface layers in semiconductors by ion implantation and thermal annealing. // *Journal of Applied Physics* 123, 2018, pp. 1-12.
18. Kumar A., Singh R., Patel K. Photoluminescence behavior of ion-implanted GaP and related III-V nanostructures. // *Journal of Luminescence* 210, 2019, pp. 189-198.
19. Li X., Chen J., Huang Y. Low-energy ion implantation induced structural modification and optical properties in semiconductor thin films. // *Surface and Coatings Technology* 409, 2021, pp. 1-11.