

## INDIY MODDASI SIRTIDA LAZER NURI TA'SIRIDA HOSIL QILINGAN PLAZMANING OPTIK XUSUSIYATLARI

**M.E. Vapayev**

Urganch davlat universiteti

**I.Yu Davletov**

Urganch davlat universiteti

**G.S Boltaev**

U.A. Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7063611>

**Annotatsiya.** Ushbu ishda normal atmosfera bosimida indiy yuzasiga to'liq uzunligi 1064 nm, impuls davomiyligi 10 ns bo'lgan Nd: YAG lazer nurlanishi ta'sirida hosil bo'lgan plazma spektroskopik usul yordamida o'rganildi. Indiy sirtida hosil qilingan lazer plazmasini asosiy optik xususiyati elektron zichligi Shtark kengayish usuli yordamida va elektron temperaturasi Boltsman taqsimot grafigi usuli yordamida aniqlandi.

**Kalit so'zlar:** spektroskopiya, lazer plazmasi, elektron zichlik, elektron temperaturasi, Shtark kengayish usuli, Gauss profile.

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ ИНДИЕВОГО МАТЕРИАЛА

**Аннотация.** В настоящей работе спектроскопическим методом исследована плазма, образующаяся под действием излучения Nd:YAG-лазера с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 10 нс на поверхности индия при нормальном атмосферном давлении. Основные оптические свойства лазерной плазмы, формирующейся на поверхности индия, определялись по плотности электронов методом штарковского разложения и температуре электронов методом графика распределения Больцмана.

**Ключевые слова:** спектроскопия, лазерная плазма, электронная плотность, электронная температура, метод Штарка, профиль Гаусса.

## OPTICAL PROPERTIES OF THE PLASMA GENERATED UNDER THE INFLUENCE OF LASER LIGHT ON THE SURFACE OF INDIUM MATERIAL

**Abstract.** In this work, the plasma formed under the influence of Nd: YAG laser radiation with a wavelength of 1064 nm and a pulse duration of 10 ns on the indium surface at normal atmospheric pressure was studied using a spectroscopic method. The main optical properties of the laser plasma formed on the indium surface were determined by the electron density using the Stark expansion method and the electron temperature using the Boltzmann distribution graph method.

**Keywords:** spectroscopy, laser plasma, electron density, electron temperature, Stark method, Gaussian profile.

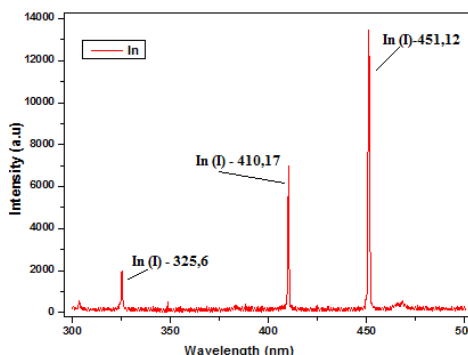
## KIRISH

Hozirgi kunda lazer bilan ta'sir qilish orqali elementlarni optik xususiyatlarini o'rganish, elementlarda yuqori temperaturali plazma olish va spektral tahlil qilishga keng imkoniyatlar yaratilgan. Tarkibida indiy va boshqa nodir yer elementlari bo'lgan moddalarni elementlar bo'yicha tez va sifatli tahlil qilish dolzarb masalalardan biri xisoblanadi. Bunda lazer nuri bilan elementlarni plazma spektrini olish usullari, qisqa vaqtda tahlil qilinishi va iqtisodiy kam xarajatliligi bilan qulay usullardan biri hisoblanadi. Indiy elementi yuqori texnologiyali display

qurilmalarining asosiy qismni tashkil qiladi. Indiy elementini qayta ishlash va qayta tiklashga ehtiyoj juda katta [1]. Bugungi kunga kelib lazer nurlanishi ta'sirida indiy elementi sirtida vaakumda va turli muhitlarda plazma hosil qilish va tadqiq qilish bo'yicha ko'plab tajribalar amalga oshirilgan. Vodorod, argon va kichik bosimli atmosfera muhitida lazer nurlanishi ta'sirida indiy sirtida hosil qilingan plazmasi tadqiq qilgan. Aniqlanishicha, indiyning ablatsiyasi vodorod va kichik bosimli atmosferada kuchliroq bo'lib, natijada fazoviy gradientlar paydo bo'ladi. Argon atmosferali muhitda indiy plazmasini yashash vaqti uzun bo'ladi [2].

### TADQIQOT MATERIALLARI VA METODOLOGIYASI

Ushbu ishda normal atmosfera sharoitida qattiq agregat holatidagi (In) indiy elementini to'liq uzunligi 1064 nm va impuls davomiyligi 10 ns bo'lgan Nd:YAG lazeri bilan nurlantirildi va hosil bo'lgan plazmaning emission parametrlarini nur tolali optik spektrometr (Ocean Optics HR4000) yordamida tahlil qilindi. Spektral qurilma plazma spektrini to'liq uzunligi 200 nm dan 1100 nm oraliqlarida tahlil qilish imkonini beradi. Olingan plazma spektri, uning tarkibida (In) elementining (I) bir zaryadli ionlardan hosil bo'ladigan ion o'tishlari mavjudligini ko'rsatdi. 1-rasmda indiy elementi sirtida olingan plazmaning emission spektri keltirilgan. Plazma spektrlarida mos (In) ionlari uchun to'liq uzunliklar va mazkur o'tish liniyalarining kengliklari aniqlanib bu kattaliklar Shtark kengayish usuli yordamida plazma tarkibidagi erkin elektronlar konsentrasiyalarini aniqlash imkonini berdi.



**1-rasm.** Indiy plazmasini emission spektri.

Shtark effekti bu tashqi maydonning mavjudligi sababli atomlar va molekularlarning spektral chiziqlarining siljishi va bo'linishidir. Shtark effekti plazmadagi zaryadlangan zarralar bilan spektral chiziqlarning o'zgarishlarini fizik jihatdan asoslovchi fizik effekt hisoblanadi. Spektrning keskin kengayishi plazma spektridagi chiziqlar zaryadlangan zarralarni to'qnashuvidan kelib chiqadi. Elektron zichligi va FWHM (full widths at half maximum) spektr yarim kengligi orasidagi farqi ko'rsatilganidek, Shtark kengaytirilgan chiziqi formulasi quyidagicha bo'ladi:

$$\Delta\lambda_{\frac{1}{2}} = \left[ 2W \left( \frac{n_e}{10^{16}} \right) + 3,5A \left( \frac{n_e}{10^{16}} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left( 1 - \frac{3}{4} N_D^{-\frac{1}{3}} \right) W \left( \frac{n_e}{10^{16}} \right) \right]^0 A \quad (1)$$

bu yerda  $N_D$  - Debay sferasidagi zarralar soni,  $A$ -ionlarni o'zaro ta'sir parametri,  $W$  - elektron ta'sir parametri. Tenglama o'ng tomonidagi birinchi had elektronlarni o'zaro ta'siridan kengayishni va ikkinchi had elektron va ionlarni o'zaro ta'sir parametri koeffitsienti. Vodorodsimon bo'lmagan ionlar uchun Shtark kengayishi elektron ta'siri, ionlarni o'zaro

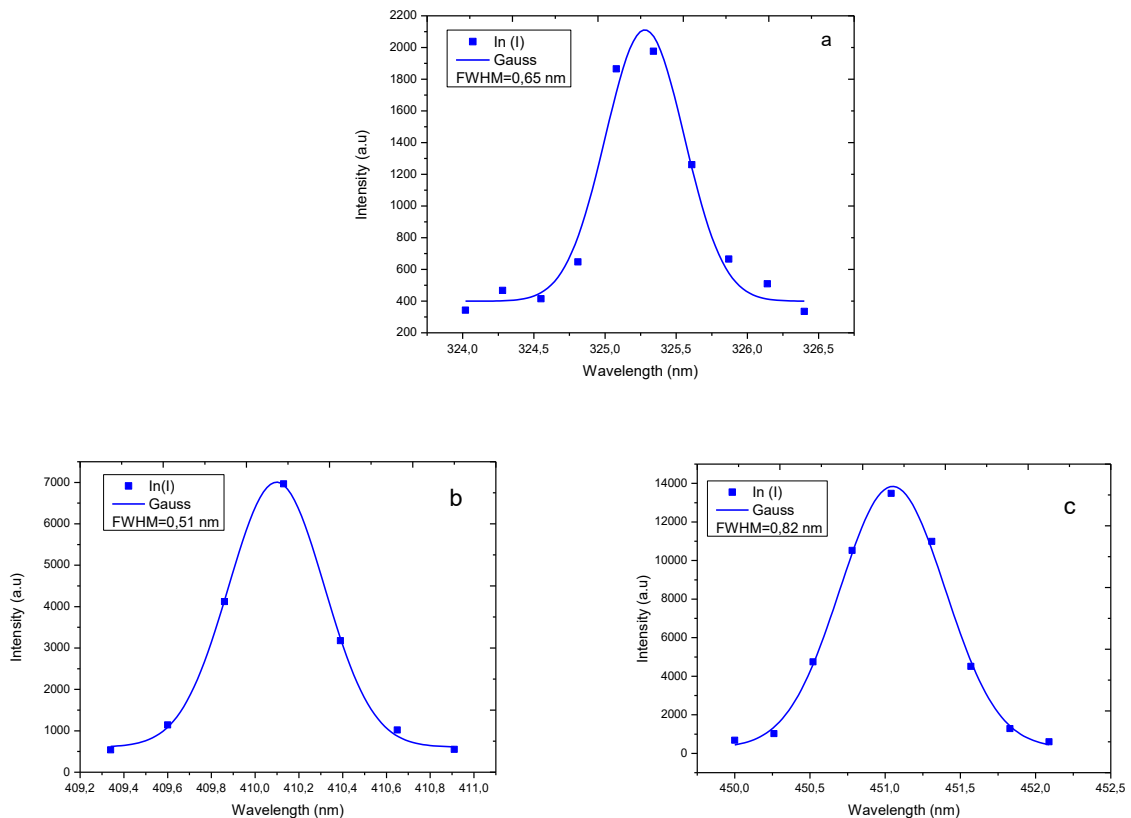
ta'siridan ustunlik qiladi va ionlarni o'zaro ta'sir koeffitsienti ahamiyatsiz [3-5]. Natijada Shtark kengayishi quyidagicha keltirilishi mumkin:

$$\Delta\lambda_{\frac{1}{2}} = 2W \left( \frac{n_e}{10^{16}} \right)^0 \text{Å.} \quad (2)$$

$\Delta\lambda_{\frac{1}{2}}$  = FWHM (full widths at half maximum) spektral o'tish chiziqining yarim kengligi,  $W$  - elektron ta'sir parametri.

### TADQIQOT NATIJALARI

Mazrur ishda Shtark kengayish usulidan foydalanib In(I)  $\lambda=4101.7 \text{ Å}$  va  $\lambda=4511.2 \text{ Å}$  shkalalardagi spektrini elektron zichligi aniqlandi. Bunda spektr kengligini yarmi (FWHM) Gauss impulsi bilan moslashtirilgan holda aniqlandi (2-rasm). Moslashtirishdan shkalasi bir-biriga juda yaqin bo'lgan ion o'tishlar ajratildi va alohida xisoblandi. Elektronlarning o'zaro ta'sir parametri  $W$  ni son qiymatini shkalalarga mos keluvchi turli temperaturaga bog'liq o'zgaruvchi qiymatlaridan foydalanildi [6]. Hisoblangan natijalar quyidagi (1-jadval) da keltirilgan.



**2-rasm.** Indiy In(I) elementini a)  $\lambda=3256.0 \text{ Å}$ , b)  $\lambda=4101.7 \text{ Å}$ , c)  $\lambda=4511.2 \text{ Å}$  shkalalardagi spektrlarini Gauss impulsi bilan moslashtirish.

1-jadval

<b>In (I), <math>\lambda=4101.7 \text{ Å}</math></b>						
$T (K)$		2500	5000	10000	20000	40000
1	$W \text{ Å}$	0,0047	0,0062	0,0084	0,00108	0,00124
	$n_e, (10^{18})cm^{-3}$	5,42	4,1	3	23,6	20

<i>In (I), λ=4511.2 Å</i>						
2	W Å	0,0047	0,0062	0,0084	0,00108	0,00124
	$n_e, (10^{18})cm^{-3}$	8,72	6,6	4,8	37,9	33

Indiy elementi plazmasini elektron temperaturasini aniqlashda, hosil bo'lgan plazmani yupqa plazma deb qarab lokal termodinamik muvozanat sharti qabul qilinadi. Lokal termodinamik muvozanatdagi plazma uchun zarrachalar guruhining (uyg'ongan holatlar) energetik sathi Boltsmanning taqsimot qonuni bilan quydagicha ifodalangan [7]:

$$\frac{n_{k,Z}}{n_Z} = \frac{g_{k,Z}}{P_Z} \exp\left(-\frac{E_{k,Z}}{k_B T}\right) \quad (1)$$

Bu yerda Z ionlanish bosqichidagi zarrachalar soni (ionlar soni) (Z = 0 va 1 mos ravishda neytral va yakka ionlangan atomlarga mos keladi),  $k_B$  - Boltzman doimiysi, T - plazma temperaturasi,  $n_{k,Z}$ ,  $E_{k,Z}$  va  $g_{k,Z}$  - mos ravishda zarrachalarning soni, energiya va bir xil yuqori energiyali sathning darajasi k,  $n_Z$  - elektron zichligi va  $P_Z$  - Z ionlanish bosqichidagi zarrachaning termodinamik funktsiyasi. Optik jihatdan yupqa plazma, yani juda kam nurlanish yutiladigan plazmadagi ionlanish darajasi Z bo'lgan zarrachalarning yuqori energetik va quyi energetik sathlari orasida hosil bo'lgan spectral chiziqning to'la intensivligi  $I_Z$  quyidagicha ifodalanadi.

$$I_Z = \frac{hc}{4\pi\lambda_{ki,Z}} A_{ki,Z} n_{k,Z} L \quad (2)$$

Bu yerda h - Plank doimiysi, c - yorug'lik tezligi, L - plazmaning xarakteristik uzunligi,  $A_{ki,Z}$  - o'tish ehtimoli va  $\lambda_{ki,Z}$  - o'tish chizig'i to'lqin uzunligi. Tenglamalar (1) va (2) dan quydagi tenglama kelib chiqadi.

$$I_Z = \frac{hc}{4\pi\lambda_{ki,Z}} A_{ki,Z} L \frac{n_Z}{P_Z} g_{k,Z} \exp\left(-\frac{E_{k,Z}}{k_B T}\right) \quad (3)$$

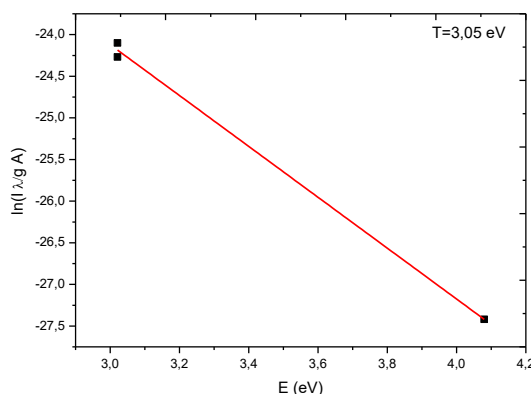
(3) tenglamadan natural logorifim olsak

$$\ln\left(\frac{I_Z \lambda_{ki,Z}}{g_{k,Z} A_{ki,Z}}\right) = -\frac{1}{k_B T} E_{k,Z} + \ln\left(\frac{hc L n_Z}{4\pi P_Z}\right) \quad (4)$$

Agar bu chiziqli tenglamaning (Boltzman tenglamasi deb ataladi) chap tomoni  $\ln\left(\frac{I_Z \lambda_{ki,Z}}{g_{k,Z} A_{ki,Z}}\right)$  yuqori satxda bir necha qayta o'tishlar uchun Z ionlanish bosqichidagi zarrachalarning energiyasini ifodalasa u holda o'rnatilgan qiyalik  $-\frac{1}{k_B T}$  ga teng bo'ladi, bu esa temperaturani aniqlaydi. T ning qiymati Boltzman tenglamasining darajalovchisi o'zgaruvchisi deb hulosa qilinadi. Termodinamik muvozanat holatida va plazma optik jihatdan yupqa deb faraz qilinganda (4)-tenglamaga ega bo'linadi.

(2-jadval)

<i>Atom/ion</i>	<i>To'lqin uzunligi</i> $\lambda_{ki,Z}, (nm)$	<i>Yuqori sath energiyasi</i> $E_k, (sm^{-1})$	<i>Quyi sath energiyasi</i> $E_i, (sm^{-1})$	<i>Yuqori sath energiya darajasi</i> $g_k$	<i>O'tish extimoligi</i> $A_{ki}, (s^{-1})$
In I	325,6	32915,539	2212,599	4	$1,3 \times 10^8$
In I	410,17	24372,957	0	2	$4,96 \times 10^7$
In I	451,12	24372,957	2212,599	2	$8,93 \times 10^7$



**3-rasm.** Indiy In (I) ion o'tishlarda Boltzman taqsimot grafigi.

### MUHOKAMA

Bir nechta emissiya liniyalarini hisobga olgan holda Boltzman usuli indiy plazma elektron temperaturasini, aniqroq o'lchash imkoniyatini yaratadi. Bir xil ion o'tishli emissiya liniyalari qancha ko'p bo'lsa elektron temperaturasini o'lchash aniqligi ortadi. Bunda biz indiy plazma elektron temperaturasini aniqroq o'lchash uchun (4) tenglamadan, In (I) uchun 3ta ion o'tish emissiya liniyalaridan (In (I) 325,6; 410,17; 451,12) va boshqa doimiylardan (2-jadval [8]) foydalangan holda Boltzman chiziqli grafigi hosil qilindi (3-rasm). Grafikda qiyalik plazma elektron temperaturasini bildirib qiymati In (I) ion o'tishlar uchun  $T=3,05$  eV ga teng ekanligi aniqlandi. Lazer energiyasi ortishi bilan elektronlar temperaturasi va elektron zichligi ortadi. Lazer nurlanishining oshishi bilan plazmadagi ushbu parametrlarning oshishi plazma chastotasiga bog'liq bo'lib lazer nurlanishini plazma tomonidan yutilishi yoki qaytishi bilan bog'liq [9]. Biz tajribada foydalangan Nd: YAG lazeriga (1064 nm) mos keladigan chastota  $2,8 \times 10^{14}$  Hz ni tashkil qiladi. Plazma chastotasi quydagicha [10,11]:

$$\nu_p = 8,9 \times 10^3 n_e^{0,5}$$

bu yerda  $n_e$  - elektron sonining zichligi. Bizning tajribamizda plazma chastotasi  $3,44 \times 10^{13}$  Hz deb baholandi, bu lazer chastotasidan kamroq. Shuning uchun plazmadan lazer nurlanishini qaytishi tufayli energiya yo'qotilishi ahamiyatsiz.

### XULOSA

Xulosa o'rnida shuni aytish mumkinki, olingan natijalar (In) elementi sirtida hosil qilingan lazer plazmasining parametrlarini aniqlash imkonini berdi. Mazkur usul yordamida tarkibida indiy va noma'lum elementlar bo'lgan moddalarning tarkiblarini sifat jihatdan tez aniqlash imkonini beradi. Indiy sirtida hosil qilingan lazer plazmasini asosiy xususiyati elektron zichligi Shtark kengayish usuli yordamida va elektron temperaturasi Boltzman taqsimot grafigi usuli yordamida aniqlandi.

## REFERENCES

1. M.S. Rabasovic, B.P. Marinkovic “Time-resolved analysis of pure indium sample and LCD displays”*Opt Quant Electron*(2018) <https://doi.org/10.1007/s11082-018-1506-0>
2. Miloš Burgera, Miloš Skočić, Milan Ljubisavljević, Zoran Nikolić, and Stevan Djenižić “Spectroscopic study of the laser-induced indium plazma”. *Eur. Phys. J. D* (2014) 68: 223.
3. H. R. Griem, *Plazma Spectroscopy* (McGraw-Hill, New York, 1964).
4. M. N’Dollo, M. Fabry. Shtark broadening of neutral and singly ionized gallium and indium lines. *Journal de Physique*,1987,48(5), pp.703-707. 10.1051 /jphys: 019870048 05070300.
5. B. Verhoff, S. S. Harilal, “Dynamics of femto- and nanosecond laser ablation plumes investigated using optical emission spectroscopy” *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 112, 093303 (2012)
6. Qizi, A. K. S. (2022). Texnik oliy ta’limda matematikaning mutaxassislik fanlari bilan integratsiyasini ta’minlash vositalari. *Science and innovation*, 1(1), 446-459.
7. А. П. Шевелько. Новый метод сравнения для измерения температуры электронов по... *Квантовая электроника* 41 №8 (2011)
8. [H R Griem, *Principles of plasma spectroscopy* (Cambridge University Press, Cambridge, 1997)
9. NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov>
10. M. Hanif, M. Salik, and M. A. Baig “Spectroscopic studies of indium plazma produced by fundamental (1,064 nm) and second (532 nm) harmonics of an nd:yag laser” *Journal of Russian Laser Research*, Volume 39, Number 1, January, (2018). DOI 10.1007/s10946-018-9687-3
11. G. S. Boltaev , M. Iqbal, S. R. Kamalov, M. Vapaev, I. Davletov, A. S. Alnaser Impact of plasma conditions on the shape of femtosecond laser-induced surface structures of Ti and Ni. *Applied Physics A* (2022) 128:488
12. М.Э. Вапаев, Г.С. Болтаев, И. Ю. Давлетов ва б.қ “Лазер нури таъсирида (In) моддаси сиртида ҳосил қилинган плазманинг спектрал таҳлили” Ёш олимлар ва физик талабаларнинг I Республика илмий анжумани (ЁОФТРИА-I) Тош.(2021)