



ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის
სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა
ფაკულტეტი

ეკოლოგიის მიმართულება

ბუბა ბაღდომვილი

საბაკალავრო ნაშრომი

ლაზერები, სახიფათო და საზიანო ფაქტორები ლაზერების კლასებთან
დამოკიდებულებაში

ხელმძღვანელი: ნუგზარ გუბაძე
ფიზიკის აკადემიური დოქტორი,
ბირთვული ფიზიკის სასწავლო-სამეცნიერო
ლაბორატორიის გამგე

თ ბ ი ლ ი ს ი
2014

ს ა რ ჩ ე ვ ი

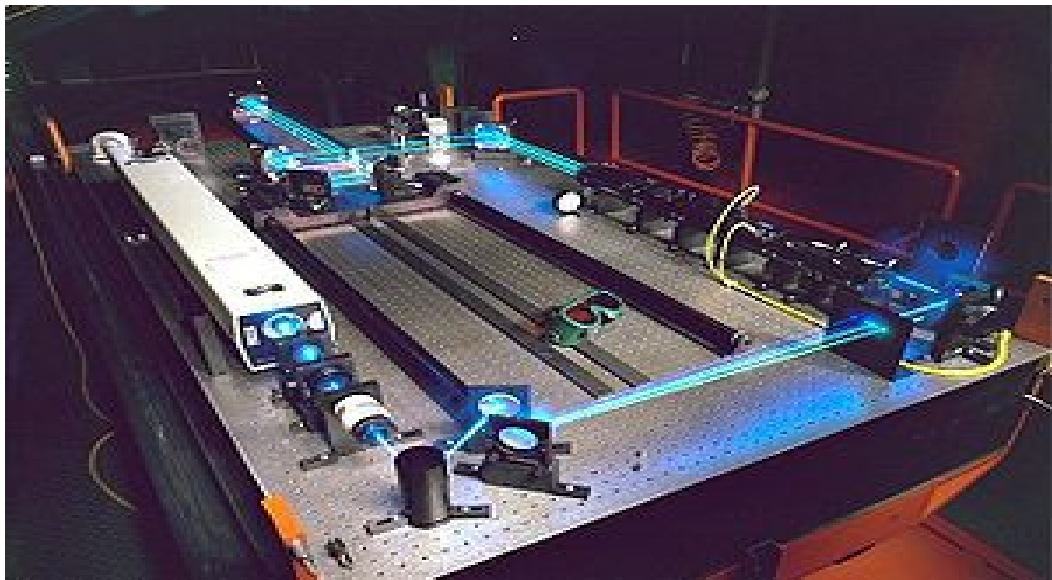
შესავალი3

1. ლაზერების აღმოჩენისა და განვითარების ისტორია.....	5
2. ლაზერის მოწყობილობა და მუშაობის საფუძვლები	6
3. ლაზერების კლასიფიკაცია.....	14
4. ლაზერების გამოყენების სფერო.....	16
5. ლაზერული ეკოლოგია, ლაზერული გამოსხივების ზემოქმედება ბიოლოგიურ ობიექტებზე.....	18
დასკვნა.....	21
ლიტერატურა.....	22

შესავალი

ლაზერი (ინგლისურად laser, შემოკლებულად Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – სინათლის გაძლიერება იძულებითი გამოსხივების ხარჯზე) ოპტიკური კვანტური გენერატორი, რომელშიც დაჭირხვნის ენერგია (სინათლის, ელექტრული, სითბური, ქიმიური და სხვა) გარდაიქმნება კოჰერენტული, მონოქრომატული, პოლარიზებული და მიმართული ვიწრო კონად ფორმირებული გამოსხივების ნაკადის ენერგიად. ლაზერის მუშაობის ფიზიკურ საფუძველს წარმოადგენს იძულებითი (ინდუცირებული) გამოსხივების კვანტურმექანიკური მოვლენა. ლაზერის გამოსხივება შესაძლოა იყოს უწყვეტი მუდმივი სიმძლავრით ან იმპულსური, რომელიც აღწევს ექსტრემალურად მაღალ პიკურ სიმძლავრეებს. ზოგიერთ სქემებში ლაზერის მუშა ელემენტი გამოიყენება როგორც გამოსხივების ოპტიკური გამაძლიერებელი სხვა წყაროდან. არსებობს ლაზერის სხვადასხვა სახეები, რომლებშიც სამუშაო გარემოდ გამოიყენება სხვადასხვა სახის ნივთიერებები სხვადასხვა აგრეგატულ მდგომარეობებში.

ლაზერების გაბარიტები შესაძლოა იყოს დაწყებული მიკროსკოპული ზომებიდან (რიგი ნახევარგამტარული ლაზერებისა) დამთავრებული ფეხბურთის მოედნის ზომის ნეოდიმის მინის ზოგიერთი ლაზერებით.



ლაზერი NASAს ლაბორატორიაში

ლაზერის გამოსხივების უნიკალურმა თვისებებმა შესაძლებელი გახადა მათი გამოყენება მეცნიერებისა და ტექნიკის სხვადასხვა დარგებში, ასევე ყოფაცხოვრებაში, დაწყებული კომპაქტ-დისკების ჩაწერა-წაკითხვით და დამთავრებული მართვადი თერმობირთვული სინთეზის კვლევებით.

უდიდესია ლაზერების როლი მედიცინაში: კოსმეტიკური ქირურგია, მხედველობის კორექცია, ქირურგია (გინეკოლოგია, უროლოგია, ლაპაროსკოპია), სტომატოლოგია, დაავადების დიაგნოსტიკა, სიმსივნეების მოცილება (განსაკუთრებით ზურგის ტვინის) და სხვა. ასევე, ლაზერებმა დიდი გამოყენება კრიმინალისტიკასა და სასამართლო ექსპერტიზაში, სამხედრო და თავდაცვით ობიექტებში. მაგრამ, არ შეიძლება უყურადღებოდ დავტოვოთ მისი უარყოფითი როლი ცოცხალ ობიექტებზე ზემოქმედების დროს.

ადამიანის ორგანიზმზე ლაზერის სხივის ზემოქმედება რთული სახისაა და განისაზღვრება როგორც უშუალო ზემოქმედებით ცოცხალ ორგანიზმზე, ასევე მეორადი ქმედებებით, რაც აისახება ლაზერის სხივის ზემოქმედების შედეგად ორგანიზმში მიმდინარე ცვლილებებში.

1. ლაზერების აღმოჩენისა და განვითარების ისტორია

ლაზერების აღმოჩენისა და განვითარების ისტორია ასეთია:

1916 წელი: აინშტაინმა იწინასწარმეტყველა იძულებითი გამოსხივების მოვლენის არსებობა – ნებისმიერი ლაზერის მუშაობის ფიზიკური საფუძველი.

ამ მოვლენის მკაცრი თეორიული დასაბუთება კვანტური მექანიკის ფარგლებში აისახა პ.დირაკის ნაშრომებში 1927-1930წწ.

1928 წელი: რ.ლანდბერგისა და გ.კოპფერმანის მიერ იძულებითი გამოსხივების არსებობის ექსპერიმენტული დასაბუთება. 1940 წელს ვ.ფაბრიკანტმა და ფ.ბუტაევმა იწინასწარმეტყველეს დასახლებულობების ინვერსიის მქონე გარემოს იძულებითი გამოსხივების გამოყენების შესაძლებლობა ელექტრომაგნიტური გამოსხივების გასაძლიერებლად.

1950 წელი: ა.კასტლერის (ნობელის პრემია ფიზიკის დარგში 1966წ) მიერ შემოთავაზებულ იქნა გარემოს ოპტიკური დაჭირხნის მეთოდი მასში ინვერსიული დასახლებულობის შესაქმნელად. პრაქტიკაში რეალიზებულია 1952 წელს ბროსელის, კასტლერის და ვინტერის მიერ. კვანტური გენერატორის შექმნამდე რჩებოდა ერთი ნაბიჯი: დადებითი უკუკავშირის შეტანა გარემოში, ანუ ამ გარემოს მოთავსება რეზონატორში.

1954 წელი: პირველი მიკროტალღური გენერატორი – მაზერი ამიაკზე (ჩ.ტაუნსი – ნობელის პრემია ფიზიკაში 1964წ, ჯ.გორდონი, გ.ცაიგერი). უკუკავშირის როლს ასრულებდა მოცულობითი რეზონატორი, რომლის ზომები იყო 12,6 მმ რიგის. მნიშვნელოვანი წილი კვანტური გაძლიერების და გენერაციის პრინციპების შესწავლაში შეიტანეს საბჭოთა ფიზიკოსებმა ა.პროხოროვმა და ნ.ბასოვმა (ნობელის პრემია ფიზიკაში 1964წ). ოპტიკური დიაპაზონის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების გასაძლიერებლად აუცილებელი იყო მოცულობითი რეზონატორის შექმნა, რომლის ზომები მიკრონის რიგის იქნებოდა. ამასთან დაკავშირებული ტექნიკური სიძნელეების გამო იმ პერიოდში მრავალი მეცნიერი თვლიდა, რომ ხილული გამოსხივების გენერატორის შექმნა შეუძლებელია.

1960 წელი: ტ.მეიმანმა მოახდინა პირველი ოპტიკური კვანტური გენერატორის – ლაზერის დემონსტრირება. აქტიურ გარემოდ გამოყენებულ იქნა ლალი (ალუმინის ოქსიდი Al_2O_3

ქრომის მცირე მინარევით), ხოლო მოცულობითი რეზონატორის ნაცვლად გამოყენებულ იქნა ღია ოპტიკური რეზონატორი. აღნიშნული ლაზერი მუშაობდა იმპულსურ რეჟიმში ტალღის სიგრძით 694.3 ნმ. იმავე წლის დეკემბერში შეიქმნა უწყვეტ რეჟიმში მომუშავე ჰელიუმ-ნეონის ლაზერი (ა.ჯავანი, უ.ბენეტი, დ.ჰერიოტი).თავდაპირველად ლაზერი მუშაობდა ინფრაწითელ დიაპაზონში, შემდგომში მოდიფიცირდა ხილულიწითელი სინათლის გამოსასხივებლად.

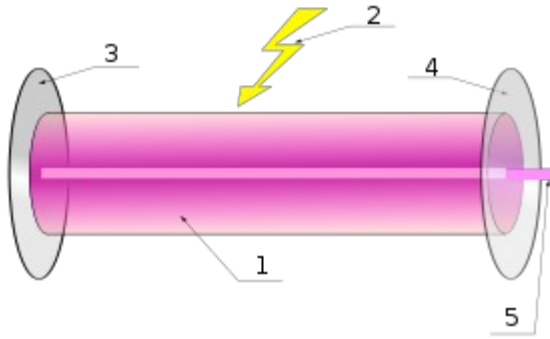
ლაზერების ფიზიკა დღეს-დღეისობითაც ინტენსიურად ვითარდება. ლაზერის აღმოჩენის მომენტიდან თითქმის ყოველ წელს ჩნდებოდა მისი ახალი სახეები, რომლებიც სხვადასხვა მიზნებისთვის იყო მისადაგებული. 1961 წელს შეიქმნა ლაზერი ნეოდიმის მინაზე, ხოლო მომდევნო ხუთი წლის განმავლობაში შემუშავებულ იქნა ლაზერული დიოდები, ლაზერები საღებავებზე, ლაზერები ნახშირორჟანგზე, ქიმიური ლაზერები. 1963 წელს ჟ.ალფიოროვმა და გ.კრემერმა (ნობელის პრემია ფიზიკაში 2000წ.) შეიმუშავეს ნახევარგამტარული გენეროსტრუქტურების თეორია, რომლის საფუძველზეც შეიქმნა მრავალი ლაზერი.

2. ლაზერის მოწყობილობა და მუშაობის საფუძვლები

ყველა ლაზერი შედგება სამი ძირითადი ნაწილისგან:

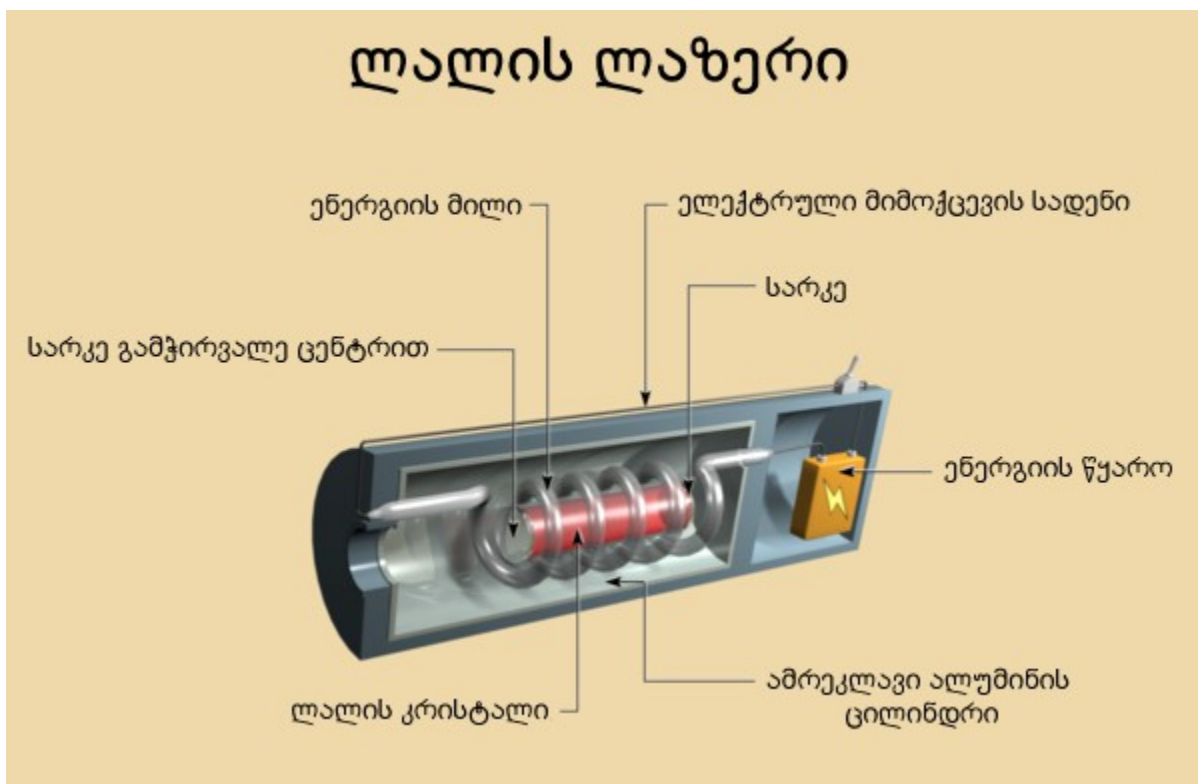
- აქტიური გარემო (მუშა სხეული);
- დაჭირხნის სისტემა (ენერგიის წყარო);
- ოპტიკური რეზონატორი (სარკეების სისტემა)

თითოეული მათგანი ლაზერის მუშაობის პროცესში უზრუნველყოფს თავის განსაზღვრულ ფუნქციებს.



სქემაზე აღნიშნულია: 1 – აქტიური გარემო; 2 – ლაზერის დაჭირხვნის ენერგია; 3 – არაგამჭვირვალე სარკე; 4 – ნახევრად გამჭვირვალე სარკე; 5 – ლაზერის სხივი

აქტიური გარემო (მუშა სხეული) – იგი განსაზღვრავს ემისიის შესაძლო ტალღის სიგრძეს. აქტიური გარემო წარმოადგენს ნივთიერებას, რომელშიც ხდება დასახლებათა ინვერსია. ამჟამად ლაზერის სამუშაო გარემოდ გამოიყენება ნივთიერების ყველა აგრეგატული მდგომარეობა: მყარი, თხევადი, გაზური და პლაზმაც კი.



ლაზერის მუშაობის ფიზიკური საფუძვლების განხილვისათვის გავიხსენოთ ზოგიერთი ფიზიკური დებულება.

სინათლის კვანტური თეორიით ფოტონის ენერგია განისაზღვრება ტოლობით: $E = h\nu$ სადაც, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ ჯწმ პლანკის მუდმივაა, ν სინათლის რხევის სიხშირეა. ფოტონის ენერგია სინათლის გამოსხივების რხევის სიხშირის პროპორციულია. რადგან $c = \lambda\nu$ ამიტომ $E = hc/\lambda$ ე.ი. ფოტონის ენერგია სინათლის გამოსხივების ტალღის სიგრძის უკუპროპორციულია.

ბორის პოსტულატები:

1. ატომური სისტემა შეიძლება იმყოფებოდეს განსაკუთრებულ სტაციონარულ, ანუ კვანტურ მდგომარეობაში, რომელსაც შეესაბამება განსაზღვრული E_n ენერგია.
2. სტაციონარულ მდგომარეობაში ატომი არ ასხივებს.

ატომის მიერ მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ტალღების (ფოტონების) გამოსხივება ხდება ატომის მეტი E_k ენერგიის მქონე სტაციონარული მდგომარეობიდან ნაკლები E_n ენერგიის სტაციონარულ მდგომარეობაში გადასვლის დროს (დიდი ენერგიის კვანტური ორბიტლიდან ელექტრონის მცირე ენერგიის კვანტურ ორბიტლაზე გადასვლის დროს). გამოსხივებული ფოტონის ენერგია ატომის სტაციონარული მდგომარეობების ენერგიების სხვაობის ტოლია:

$$h\nu = E_k - E_n$$

გამოსხივებული ფოტონის რხევის სიხშირე ტოლია: $\nu = (E_k - E_n) / h$

ჩვეულებრივ მდგომარეობაში, აღზნებულ ენერგეტიკულ დონეებზე მყოფი ატომების რიცხვი, განისაზღვრება ბოლცმანის განაწილებით :

$$N = N_0 \exp(-E/kT),$$

სადაც, N არის აღზნებულ მდგომარეობაში მყოფი E ენერგიის მქონე ატომების რიცხვი, N_0 – ძირითად მდგომარეობაში მყოფი ატომების რიცხვი, K – ბოლცმანის მუდმივა ($1,38 \times 10^{-23}$ ჯწმ/K), T – გარემოს ტემპერატურა.

სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ასეთი ატომები ძალიან ცოტაა, ამიტომ, ალბათობა იმისა, რომ ფოტონი გარემოში გავრცელებისას გამოიწვევს იძულებით გამოსხივებას, ასევე ძალიან მცირეა მისი შთანთქმის ალბათობასთან შედარებით. ამიტომ, ელექტრომაგნიტური ტალღა, გაივლის რა გარემოში, ხარჯავს თავის ენერგიას ატომის აღზნებაზე. ამ დროს გამოსხივების ენერგია კლებულობს ბუგერის კანონის მიხედვით:

$$I_l = I_0 \exp(-a_1 l),$$

სადაც, I_0 საწყისი ინტენსიურობაა, I_l – გამოსხივების ინტენსიურობა, რომელმაც გაიარა მანძილი გარემოში, a_1 – ნივთიერების შთანთქმის კოეფიციენტი. რამდენადაც დამოკიდებულება ექსპონენციალურია, გამოსხივება ძალიან სწრაფად შთაინთქმება. იმ შემთხვევაში, როდესაც აღზნებული ატომების რაოდენობა მეტია არა აღზნებულებისაზე (ანუ, დასახლებულობათა ინვერსიის პირობებში), მდგომარეობა სრულიად საწინააღმდეგოა. იძულებითი გამოსხივების აქტები აჭარბებს შთანთქმას და გამოსხივება ძლიერდება კანონით:

$$I_l = I_0 \exp(a_2 l),$$

სადაც, a_2 – კვანტური გაძლიერების კოეფიციენტია.

რეალურად ლაზერებში გაძლიერება მიმდინარეობს მანამ, ვიდრე იძულებითი გამოსხივების ხარჯზე მიღებული ენერგიის სიდიდე არ გაუტოლდება იმ ენერგიას, რომელიც იკარგება რეზონატორში. ეს დანაკარგები დაკავშირებულია სამუშაო გარემოს მეტასტაბილური დონის გაჯერებასთან, რის შემდეგაც დაჭირხნის ენერგია იხარჯება მხოლოდ მის გახურებაზე და ასევე გარემოს არაერთგვაროვნების მრავალ სხვა ფაქტორზე (გაბნევა გარემოს არაერთგვაროვნებებზე, ამრეკლი სარკეების არაიდეალურობა და სხვა).

დაჭირხნის სისტემა – შესაძლოა იყოს ელექტრული დენი, იმპულსური ფეთქანათურა ან ქიმიური რეაქცია, იმისდა მიხედვით, თუ რას ვიყენებთ აქტიურ გარემოდ. აქტიური გარემო კი, როგორც აღვნიშნეთ, შეიძლება იყოს:

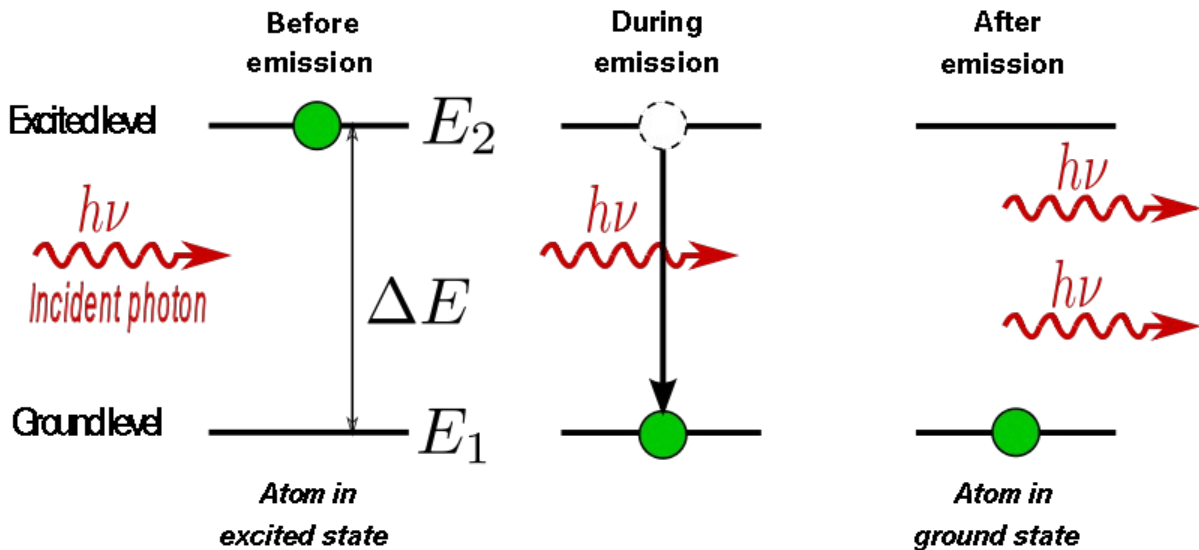
- ⊕ მყარი – ლალის ან ალუმო-ითრიუმის მოწის კრისტალები, მინა ნეოდიმის მინარევით სხვადასხვა ზომის და ფორმის ღეროების სახით.

- ⊙ თხევადი – ანილინის საღებავების ხსნარები ან ნეოდიმის მარილების ხსნარები კიუვეტებში.
- ⊙ გაზური – ჰელიუმისა და ნეონის ნარევი, არგონი, გაზი ნახშირჟანგი, დაბალი წნევის წყლის ორთქლი მინის მილებში.
- ⊙ ასევე, ცივი პლაზმა, ნახევარგამტარული მასალები და ქიმიური რეაქციები იძლევიან ლაზერულ გამოსხივებას.

აქტიური გარემოს სახესხვაობებიდან გამომდინარე ლაზერებს უწოდებენ: ლალის, ჰელიუმ-ნეონის, ლაზერები საღებავებზე და სხვა.

მყარი ტანის ლაზერებში ინვერსია ხორციელდება მძლავრი ფეთქა-ნათურების ხარჯზე, მზის სხივების დაფოკუსირებით (ე.წ. ოპტიკური დაჭირხნა) და სხვა ლაზერების გამოსხივებით (კერძოდ, ნახევარგამტარულებით). ამ დროს მუშაობა შესაძლებელია მხოლოდ იმპულსურ რეჟიმში, რამდენადაც საჭიროა დაჭირხნის ენერგიის ძალიან მაღალი სიმკვრივეები, რაც ხანგრძლივი ზემოქმედების პროცესში იწვევს სამუშაო გარემოს (ღეროს, კრისტალის) ძლიერ გადახურებას და დაშლას.

გაზურ და თხევად ლაზერებში გამოიყენება დაჭირხნა ელექტრული განმუხტვით. ასეთი ლაზერები მუშაობს უწყვეტ რეჟიმში. ქიმიური ლაზერების დაჭირხნა წარმოებს მათ აქტიურ გარემოში მიმდინარე ქიმიური რეაქციების ხარჯზე. ამ დროს დასახლებულობათა ინვერსია ხდება უშუალოდ რეაქციის პროდუქტებში, სპეციალურად შეტანილ მინარევებში, რომელთაც გააჩნიათ ენერგეტიკული დონეების შესაბამისი სტრუქტურა.



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

სამუშაო გარემოს დაჭირხნის კლასიკური სამდონიანი სისტემა გამოიყენება მაგალითად ლალის ლაზერში. ლალი წარმოადგენს Al_2O_3 კორუნდის კრისტალს, რომელიც ლეგირებულია ქრომის Cr^{3+} იონების მცირე რაოდენობით, რომლებიც წარმოადგენენ ლაზერული გამოსხივების წყაროს.

კორუნდის კრისტალური მესერის ელექტრული ველის გავლენის გამო, ქრომის გარე ენერგეტიკული დონე E_2 გახლეჩილია (შტარკის ეფექტი). სწორედ ეს იძლევა არამონოქრომატული გამოსხივების დამჭირხნად გამოყენების შესაძლებლობას. ამ დროს ატომი ძირითადი მდგომარეობიდან ენერგიით E_0 გადადის აღზნებულში - E_2 . ასეთ მდგომარეობაში ატომს შეუძლია იყოს შედარებით ცოტა ხანს (10^{-8} წმ რიგის). თითქმის მაშინათვე მიმდინარეობს არაგამოსხივებადი გადასვლა E_1 დონეზე, რომელზედაც ატომს შეუძლია გაცილებით დიდხანს (10^{-3} წმ-მდე) ყოფნა, ესაა ეგრეთ წოდებული

მეტასტაბილური დონე. წარმოიქმნება ინდუცირებული გამოსხივების შესაძლებლობა სხვა - შემთხვევითი ფოტონების ზემოქმედების ხარჯზე. როგორც კი მეტასტაბილურ მდგომარეობაში მყოფი ატომების რაოდენობა გადააჭარბებს ძირითადში მყოფებს, იწყება გენერაციის პროცესი.

აღსანიშნავია, რომ Cr -ს ატომების დასახლებულობათა ინვერსიის შექმნა დაჭირხნით უშუალოდ E_0 - დან E_1 - ზე შეუძლებელია. ეს დაკავშირებულია იმასთან, რომ თუ შთანთქმა და იძულებითი გამოსხივება წარმოებს ორ დონეს შორის, მაშინ ორივე ეს პროცესი მიმდინარეობს ერთნაირი სიჩქარით. ამიტომ, მოცემულ შემთხვევაში დაჭირხნას შეუძლია ორი დონის დასახლებულობათა მხოლოდ გათანაბრება, რაც არ არის საკმარისი გენერაციის აღსაძრავად.

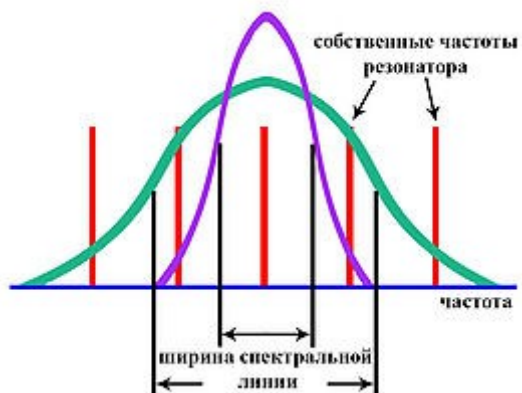
ზოგიერთ ლაზერებში, მაგალითად ნეოდიმის, რომელშიც გამოსხივების გენერაცია წარმოებს ნეოდიმის Nd^{3+} იონებზე, გამოიყენება დაჭირხნის ოთხდონიანი სისტემა. აქ მეტასტაბილურ E_2 და ძირითად E_0 დონეებს შორის არის საშუალებო - სამუშაო E_1 დონე. იძულებითი გამოსხივება ხდება ატომის გადასვლისას E_2 და E_1 დონეებს შორის.

ამ სქემის უპირატესობა გამოიხატება იმაში, რომ მოცემულ შემთხვევაში იოლია ინვერსიულ დასახლებულობათა პირობების შექმნა, რადგანაც ზედა სამუშაო დონის (E_2) სიცოცხლის ხანგრძლივობა რამდენიმე რიგით მეტია ქვედა (E_1) დონის სიცოცხლის ხანგრძლივობაზე. ეს მნიშვნელოვნად ამცირებს მოთხოვნებს დაჭირხნის წყაროებთან. გარდა ამისა, მსგავსი სქემა იძლევა უწყვეტ რეჟიმში მომუშავე მძლავრი ლაზერების შექმნის შესაძლებლობას, რაც ზოგ შემთხვევაში მეტად მნიშვნელოვანია. თუმცა, მსგავს ლაზერებს აქვს მნიშვნელოვანი ნაკლი - კვანტური მ.ქ.კ.-ს დაბალი მნიშვნელობა, რომელიც განისაზღვრება გამოსხივებული ფოტონის ენერჯიის ფარდობით შთანთქმული დაჭირხნის ფოტონის ენერჯიასთან ($\eta_{\text{kvanturo}} = h\nu_{\text{gamosxivebit}}/h\nu_{\text{daWirxnis}}$).

ოპტიკური რეზონატორი - რეზონანსული არე. იგი, როგორც წესი, წარმოადგენს ორსარკიან სისტემას. ოპტიკური რეზონატორები არსებობს ბრტყელი სარკეებით, სფერული სარკეებით, სფერულისა და ბრტყელი სარკეების კომბინაცია და სხვა.

რეზონატორი წარმოადგენს ორი, ერთმანეთის მიმართ მკაცრად პარალელურად განლაგებულ სისტემას, რომელთა შორის განთავსებულია აქტიური გარემო. პირველი სარკე (100%-ანი სარკე, როგორც წესი გამოიყენება სრული შინაგანი არეკვლის პრიზმა),

სრულად აირეკლავს მასზე დაცემულ სინათლეს. მეორე სარკე ნახევრადგამჭვირვალეა. იგი გამოსხივების ნაწილს აბრუნებს გარემოში იძულებითი გამოსხივების შესაქმნელად, ხოლო ნაწილი გამოსხივდება გარეთ ლაზერის სხივის სახით. რეზონატორი ისე შეიძლება აიწყოს, რომ ლაზერი დაიწყებს მხოლოდ ერთი - მკაცრად განსაზღვრული ტიპის (მოდის) გამოსხივების გენერირებას



მწვანე ფერის სპექტრალურ ხაზში რეზონატორის სამი საკუთარი სიხშირეა ჩატეული. ამ შემთხვევაში ლაზერის მიერ გენერირებული გამოსხივება იქნება სამმოდიანი. იისფერი ხაზისათვის გამოსხივება იქნება სუფთა მონოქრომატული. ლაზერის სარკეები არამხოლოდ უზრუნველყოფენ დადებითი უკუკავშირის არსებობას, არამედ მუშაობენ როგორც რეზონატორი. თუ რეზონატორის L ოპტიკურ სიგრძეზე ეტევა ტალღის სიგრძის ნახევრის მთელი n რიცხვი:

$$2L = n\lambda,$$

მაშინ, ასეთი ტალღები, გადიან რა რეზონატორში არ იცვლიან ფაზას და ინტერფერენციის შედეგად აძლიერებენ ერთმანეთს. ამრიგად, ოპტიკური რეზონატორის საკუთარი სიხშირეების სპექტრი განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$\nu_n = \frac{c}{2L}n,$$

სადაც c - სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში.

რეზონატორის მეზობელ სიხშირეებს შორის ინტერვალები ერთნაირია და ტოლია:

$$\Delta \nu_r = \frac{c}{2L}.$$

ხაზებს, გამოსხივების სპექტრში, სხვადასხვა მიზნების გამო (დოპლერის გაფართოება, გარე ელექტრული და მაგნიტური ველები, კვანტურმექანიკური ეფექტები და სხვა), ყოველთვის აქვთ გარკვეული სიგანე $\Delta \nu_l$, ამიტომ, შეიძლება წარმოიშვას სიტუაციები, როდესაც სპექტრალური ხაზის სიგანეზე განთავსდება რეზონატორის რამდენიმე საკუთარი სიხშირე. ასეთ შემთხვევაში ლაზერის გამოსხივება იქნება მრავალ მოდიანი.

ამ მოდების სინქრონიზაცია იძლევა იმის შესაძლებლობას, რომ გამოსხივება წარმოადგენდეს მოკლე და მძლავრი იმპულსების მიმდევრობას. თუკი $\Delta \nu_l < \Delta \nu_r$, მაშინ ლაზერის გამოსხივებაში გვექნება მხოლოდ ერთი სიხშირე, მოცემულ შემთხვევაში სარკეების რეზონანსული თვისებები სუსტად აისახება სპექტრალური ხაზის რეზონანსული თვისებების ფონზე.

უფრო მკაცრი გათვლებისას აუცილებელია გავითვალისწინოთ, რომ ძლიერდება ტალღები, რომლებიც ვრცელდება არა მხოლოდ რეზონატორის ოპტიკური ღერძის გასწვრივ, არამედ მის მიმართ მცირე φ კუთხით დახრილებიც. მაშინ, გაძლიერების პირობა ღებულობს სახეს:

$$2L \cos \varphi = n\lambda.$$

ამას მივყავართ იქამდის, რომ ლაზერის სხივების კონის ინტენსივობა სხვადასხვაა ამ კონის პერპენდიკულარული სიბრტყის სხვადასხვა წერტილში. ასეთი არასასურველი ეფექტების თავიდან ასაცილებლად იყენებენ სხვადასხვა სახის დიაფრაგმებს, განმზნევა მაფებს, ასევე იყენებენ ოპტიკური რეზონატორების სხვადასხვა სქემებს.

3. ლაზერების კლასიფიკაცია

- მყარი ტანის ლაზერები ლუმინისცენციურ მყარ მასალებზე (დიელექტრიკული კრისტალები და მინები). ქტივატორებად, როგორც წესი, გამოიყენება იშვიათმიწა ელემენტების იონები ან რკინის Fe ჯგუფის იონები. თანამედროვე მყარი ტანის ლაზერებს შეუძლია იმუშაოს იმპულსურ, უწყვეტ და კვაზიუწყვეტ რეჟიმში.
- ნახევარგამტარული ლაზერები. ფორმალურად ასევე მყარი ტანისებია, მაგრამ ტრადიციულად გამოიყოფიან ცალკე ჯგუფად, რამდენადაც აქვთ დაჭირხნის სხვაგვარი მექანიზმი: ჭარბი მუხტგადამტანების ინჟექცია p-n ან გეტეროგადასვლით, ელექტრული განმუხტვა ძლიერ ველში, ბომბარდირება ჩქარი ელექტრონებით, ხოლო კვანტური გადასვლები მიმდინარეობს დაშვებულ ენერგეტიკულ დონეებს შორის და არა დისკრეტულ ენერგეტიკულ დონეებს შორის. ნახევარგამტარული ლაზერები ყველაზე მეტად გამოიყენებადია ყოფაცხოვრებაში. ასევე, გამოიყენება სპექტროსკოპიაში, სხვა ლაზერების დაჭირხნის სისტემებში, მედიცინაში (ფოტოდინამიური მედიცინა) და სხვა.
- ლაზერები საღებავებზე. ტიპი ლაზერებისა, რომელშიც აქტიურ გარემოდ გამოიყენება ფლუორესცენტების ხსნარები ორგანული საღებავების ფართო სპექტრის წარმოქმნით. ლაზერული გადასვლები ხორციელდება პირველი აღზნებული და ძირითადი სინგლეტური ელექტრონური მდგომარეობების ცალკეულ რხევითი ქვედონეებს შორის. დაჭირხნა ოპტიკურია, შეუძლიათ მუშაობა უწყვეტ და იმპულსურ რეჟიმში. გამოიყენება სპექტროსკოპულ კვლევებში.
- გაზური ლაზერები – ლაზერები, რომლებშიც აქტიურ გარემოდ გამოიყენება გაზისა და ორთქლის ნარევეები. გამოირჩევიან მაღალი სიმძლავრით, მონოქრომატულობით და ასევე გამოსხივების ვიწრო მიმართული კონით. მუშაობენ იმპულსურ და უწყვეტ რეჟიმში. ლაზერული გადასვლების ტიპების მიხედვით გაზურ ლაზერებს ყოფენ: გაზური ლაზერები ატომურ გადასვლებზე, იონური ლაზერები, მოლეკულური ლაზერები მოლეკულების ელექტრონულ, რხევით და ბრუნვით გადასვლებზე და ექსიმერული ლაზერები.

- გაზოდინამიური ლაზერები – გაზური ლაზერები სითბური დაჭირხნით, რომლებშიც დასახლებულობათა ინვერსია წარმოიქმნება გეტერობირთვული მოლეკულების აღზნებულ მერხე-ბრუნვით დონეებს შორის დიდი სიჩქარით მოძრავი გაზური ნარევის ადიაბატური გაფართოების გზით.
- ექსიმერული ლაზერები – გაზური ლაზერების სახესხვაობა, რომლებიც მუშაობენ ექსიმარული მოლეკულების (კეთილშობილი გაზების დიმერები, ასევე მათი ჰიმიგალოგენები) ენერგეტიკულ გადასვლებზე, რომელთაც აღზნებულ მდგომარეობაში არსებობა შეუძლიათ მხოლოდ გარკვეული დროის განმავლობაში. დაჭირხნა წარმოებს გაზურ ნარევი ელექტრონული კონის გავლით, რომელთა ზემოქმედებით ატომები გადადიან აღზნებულ მდგომარეობაში ექსიმერების წარმოქმნით, რომლებიც ფაქტობრივად წარმოადგენენ დასახლებულობათა ინვერსიის გარემოს. ექსიმერული ლაზერები გამოირჩევიან მაღალი ენერგეტიკული მახასიათებლებით, გენერაციის ტალღის სიგრძის მცირე გადახრით და ფართო დიაპაზონში მისი მდორე გადაწყობის შესაძლებლობით.
- ქიმიური ლაზერები – ლაზერების სახესხვაობა, რომელთა ენერჯის წყაროს წარმოადგენს სამუშაო გარემოს (გაზების ნარევი) კომპონენტებს შორის მიმდინარე ქიმიური რეაქციები. ლაზერული გადასვლები მიმდინარეობს რეაქციის პროდუქტების შემადგენელი მოლეკულების აღზნებულ-მბრუნავ და ძირითად დონეებს შორის. გარემოში ქიმიური რეაქციების განსახორციელებლად აუცილებელია თავისუფალი რადიკალების მუდმივად არსებობა, რისთვისაც გამოიყენება მოლეკულების დისოციაციისათვის მოლეკულებზე ზემოქმედების სხვადასხვა ხერხები. გამოირჩევიან გენერაციის ფართო სპექტრით ახლო ინფრაწითელ არეში, უწყვეტი და იმპულსური გამოსხივების დიდი სიმძლავრით.
- ლაზერები თავისუფალ ელექტრონებზე – ლაზერები, რომელთა აქტიურ გარემოს წარმოადგენს თავისუფალი ელექტრონების ნაკადი, რომლებიც ირხევიან გარე ელექტრომაგნიტურ ველში (რის ხარჯზეც ხორციელდება გამოსხივება) და ვრცელდებიან რელატივისტური სიჩქარით გამოსხივების მიმართულებით. ძირითად თავისებურებას წარმოადგენს გენერაციის სიხშირის მდორე ფართო დიაპაზონური გარდაქმნა. რამდენადაც თითოეული ელექტრონი ასხივებს 108 ფოტონს, ლაზერები თავისუფალ ელექტრონებზე

წარმოადგენენ კლასიკურ ხელსაწყოებს და აღიწერებიან კლასიკური ელექტროდინამიკის კანონებით.

- კვანტური კასკადური ლაზერები – ნახევარგამტარული ლაზერები, რომლებიც ასხივებენ საშუალო და შორეულ ინფრაწითელ დიაპაზონში. განსხვავებით ჩვეულებრივი ნახევარგამტარული ლაზერებისაგან, რომლებიც ასხივებენ ნახევარგამტარის აკრძალული ზონით დაცილებულ დაშვებულ ელექტრონულ და ხვრელურ დონეებს შორის იძულებითი გადასვლების ხარჯზე, კასკადური კვანტური ლაზერების გამოსხივება წარმოიქმნება ელექტრონების გადასვლისას ნახევარგამტარის გენეროსტრუქტურის ფენებს შორის და შედგება ორი ტიპის სხივებისაგან, თანაც მეორად სხივს აქვს ჩვეულებრივისაგან სრულიად განსხვავებული თვისებები და არ მოითხოვს ენერჯის დიდ დანახარჯებს.
- სხვა სახის ლაზერები, რომელთა განვითარების პრინციპები მოცემული მომენტისათვის წარმოადგენს კვლევის პრიორიტეტულ საგანს (რენტგენული ლაზერები, გამა-ლაზერები და სხვა).

4. ლაზერების გამოყენების სფერო

ლაზერმა გამოყენება პოვა სხვადასხვა სფეროში. ლაზერებმა უდიდესი გამოყენება ჰპოვეს მეცნიერების ისეთ დარგებში, როგორცაა: ფიზიკა, ქიმია, ბიოლოგია, მედიცინა, ეკოლოგია, შეიარაღება და სხვა, მხედველობის კორექტირებიდან სატრანსპორტო საშუალებების მართვამდე, კოსმოსური ფრენებიდან თერმობირთვულ სინთეზამდე. ლაზერი XX საუკუნის უმნიშვნელოვანესი აღმოჩენაა.

თანამედროვე ლაზერები იძლევიან პრაქტიკულად ნებისმიერი ტალღის სიგრძის მონოქრომატულ სინათლეს. დასმული ამოცანისდა მიხედვით იგი შეიძლება იყოს როგორც უწყვეტი გამოსხივება საგანგებოდ ვიწრო სპექტრით, ასევე ულტრამოკლე იმპულსები. ამ იმპულსებში მომარაგებული მაღალი ენერჯია გვაძლევს საშუალებას

გამოვიკვლიოთ არაწრფივი ოპტიკის სხვადასხვა ეფექტები. სხვადასხვა სიხშირეზე გადაწყობაზე დახმარებით ხორციელდება ამ ეფექტების სპექტროსკოპული კვლევა. ლაზერების გამოყენებამ მას-სპექტრომეტრიაში (ორმაგი ფოკუსირების და ლაზერული-იონური წყაროს მქონე ენერგო-მას-ანალიზატორები) საშუალება მოგვცა ვაწარმოოთ ერთდროული ელემენტური და იზოტოპური ანალიზი ყველა ელემენტზე (ლითიუმიდან ურანამდე), ვაწარმოოთ გამოკვლევები ბირთვული ასტროფიზიკის, ეკოლოგიის, გეოლოგიის და მეცნიერების სხვა დარგებში მნიშვნელოვანი ამოცანების გადასაჭრელად.

ლაზერმა უდიდესი გამოყენება პოვა მედიცინაში: კოსმეტიკური ქირურგია, მხედველობის კორექცია, ქირურგია (გინეკოლოგია, უროლოგია, ლაპაროსკოპია), სტომატოლოგია, დაავადების დიაგნოსტიკა, სიმსივნეების მოცილება (განსაკუთრებით ზურგის ტვინის) და სხვა.

მეტალების შემდუღებლისთვის კარგადაა ცნობილი, რომ თხელი მეტალის ფურცლებს ჭრისას აუცილებელია ისინი ერთმანეთზე მჭიდროდ იყო მიწყობილი. ხოლო კონტაქტური წერტილოვანი მჭიდრო კონტაქტისთვის საჭიროა დამატებით წნევა.

ეს მეთოდი გამოყენებული იქნა ქირურგიაში პროფესორი ი.ო. სკობელკინის და მისი თანაავტორების მიერ. მათ შემოგვთავაზეს, რომ ქსოვილის შეკავშირებისას მსუბუქად მიეზღინათ ისინი ერთმანეთზე რათა მისი კიდეებიდან უზრუნველყოფილი იქნას სისხლის გამოდევნა. ამ ახალი მეთოდის განხორციელებისთვის შეიქმნა ინსტრუმენტების მთელი ნაკრები, რომელიც გამოიყენება მუცლის ღრუ – ნაწლავის ქირურგიაში.

ამრიგად, შეიძლება ითქვას, რომ ლაზერების გამოყენების სფერო ამოუწურავია. დღეს მას თითოეული ჩვენთაგანი ვიყენებთ ყოფაცხოვრებაში (აუდიო-ვიდეო აპარატურა, მართვის პულტები და სხვა).

5. ლაზერული ეკოლოგია, ლაზერული გამოსხივების ზემოქმედება ბიოლოგიურ ობიექტებზე

ლაზერების ბიოლოგიური მოქმედება განპირობებულია ორი ძირითადი კრიტერიუმით:

1. ლაზერის ფიზიკური მახასიათებლები (გამოსხივების ტალღის სიგრძე, მუშაობის უწყვეტი ან იმპულსური რეჟიმი, იმპულსის გამეორების სიხშირე, კუთრი სიმძლავრე);
2. ქსოვილების აბსორბციული მახასიათებლები. თავად ბიოლოგიური სტრუქტურის თვისებები (შთანთქმისა და არეკვლის უნარი) გავლენას ახდენს ლაზერის ზემოქმედების ეფექტზე.

ლაზერული გამოსხივების განსაკუთრებულობა მდგომარეობს შემდეგში: გამოსხივების მონოქრომატულობა (მკაცრად ერთი ტალღის სიგრძის), გამოსხივების კოჰერენტულობა (გამოსხივების ყველა წყარო ასხივებს ელექტრომაგნიტურ ტალღებს ერთ ფაზაში), მკაცრად მიმართული სხივი (მცირე გაშლა). ეს თვისებები საშუალებას იძლევა ლაზერის დახმარებით შედარებით მცირე ფართზე მივიღოთ ენერგიების განსაკუთრებით მაღალი სიმკვრივეები, რომელთა მნიშვნელობა აღწევს 10^{16} - 10^{17} ვტ/სმ².

ლაზერები, გენერირებული გამოსხივების მიხედვით, იყოფა ორ კლასად – იმპულსური და უწყვეტი ქმედების. ლაზერებში გამოსხივების გენერირება წარმოებს (0,2 – 1000) მკმ ტალღის სიგრძეების დიაპაზონში. ეს დიაპაზონი, ადამიანზე ბიოლოგიური ზემოქმედების თვალსაზრისით, იყოფა ოთხ კატეგორიად: ულტრაიისფერი, ხილული, ახლო ინფრაწითელი და შორეული ინფრაწითელი.

სახიფათო და საზიანო ფაქტორები, რომლებიც წარმოიქმნება ლაზერების მუშაობის პროცესში, იყოფა შემდეგ კატეგორიებად: ფიზიკური, ქიმიური და ფსიქოფიზიოლოგიური.

ფიზიკურ ფაქტორებს განეკუთვნება:

- ლაზერული გამოსხივება (პირდაპირი, გაბნეული, სარკული ან დიფუზიური არეკვლა);
- დაჭირხნის ნათურების ან კვარცის გაზგანმუხტვის მიღების ულტრაიისფერი გამოსხივება;
- ხმაური და ვიბრაციები ლაზერის მუშაობის პროცესში;
- მაიონებელი გამოსხივება;
- მაღალი ძაბვა მკვებავი ნათურების ელექტრულ წრედში, ანთების სისტემაში ან გაზგანმუხტვისას;
- დაჭირხნის გენერატორებიდან მაღალი სიხშირისა და ზემადალი სიხშირის ელექტრომაგნიტურ ველები;

- დაჭირხნის სისტემის ფეთქებად საშიშროება;
- დანადგარისა და გახურებული ზედაპირებიდან ინფრაწითელი გამოსხივება და სითბოგამოყოფა;

ქიმიურ ფაქტორებს მიეკუთვნება:

- სამუშაო ზონაში ჰაერის დამტვერიანება ლაზერის სხივით სამიზნეს ზედაპირზე ზემოქმედების პროდუქტებით და ჰაერის რადიოლიზი (ოზონი, აზოტის ჟანგები და სხვა);
- აგრესიული და ტოქსიკური ნივთიერებები (გაზები, ორთქლი), რომლებიც გამოიყოფა ლაზერული სისტემებიდან;

ფსიქოფიზიოლოგიური ფაქტორები:

- მონოტონია, ემოციური დაძაბვა, ფსიქოლოგიური დისკომფორტი;
- ლოკალური დატვირთვები კუნთებსა და წინა მხრის სახსრებზე, მანკილიზებული ფუნქციების (მხედველობა, სმენა) დაძაბვა ;

ადამიანის ორგანიზმზე ლაზერის სხივის ზემოქმედება რთული სახისაა და განისაზღვრება როგორც უშუალო ზემოქმედებით ცოცხალ ორგანიზმზე, ასევე მეორადი ქმედებებით, რაც აისახება ლაზერის სხივის ზემოქმედების შედეგად ორგანიზმში მიმდინარე ცვლილებებში.

არსებობს ლაზერის ზემოქმედების ორი ტიპი: თერმული და არათერმული. ლაზერის სხივის უარყოფითი ქმედებები დამოკიდებულია მის სიმძლავრეზე (ან გამოსხივებული ენერგიის სიმკვრივეზე), გამოსხივების ტალღის სიგრძეზე, ზემოქმედების დროის ხანგრძლივობაზე, დასხივებული ქსოვილების და ორგანოების ბიოლოგიურ და ფიზიკო – ქიმიურ თვისებებზე. ბიოლოგიურად მეტად აქტიურია ულტრაიისფერი გამოსხივება, რომელიც იწვევს ფოტოქიმიურ რეაქციებს ბიოლოგიურ ობიექტებში.

სითბური ზემოქმედება – ეს არის ცნობილი შედეგი ნივთიერებასთან, მატერიასთან ელექტრომაგნიტური ველის ფიზიკური ურთიერთქმედებისა, რაც მთავრდება ნივთიერებაში სითბოს წარმოქმნით. ადამიანის სხეულის ქსოვილებს აქვს გამტარული და უფრო მეტად დიელექტრიკული თვისებები. მათში, გამტარებლობისა და წანაცვლების დენების ზემოქმედებით წარმოქმნილი ენერგია, საბოლოოდ გარდაიქმნება სითბურში. სითბურ ზემოქმედებას ადგილი აქვს, როდესაც ორგანიზმის თერმორეგულაციის

სისტემას აღარ შესწევს უნარი სხეულში ან მის ცალკეულ ნაწილებში ნორმალური ტემპერატურის შენარჩუნებისა.

სითბური ზემოქმედებისადმი, პირველ რიგში, ყველაზე მგრძობიარეა თვალი, რამდენადაც მას აქვს სინათლის სხივის ფოკუსირების უნარი. თვალის ცალკეული ქსოვილები სხვადასხვანაირად შთაინთქავენ ლაზერულ გამოსხივებას.

ულტრაიისფერი გამოსხივება (0,2-0,4 მკმ) შთაინთქმება მხოლოდ თვალის ზედაპირულ ქსოვილებში, რაც იწვევს მათ დაზიანებას გამოსხივების დიდი ინტენსივობების დროს.

მძლავრი ხილული გამოსხივება (0,4-0,75 მკმ) ურთიერთქმედების გარეშე გადის თვალში, ფოკუსირდება, აღწევს თვალის ფსკერს და შთაინთქმება რა ბადურაში აზიანებს მას.

მოკლეტალღოვანი ინფრაწითელი გამოსხივება (0,75-1,4 მკმ) ნაწილობრივ შქაინთქმება თვალის ოპტიკური სისტემის ქსოვილებში, 40% შთაინთქმება ბადურაში და აღწევს მთავარ ფსკერს, რაც მაღალი ინტენსივობების პირობებში აზიანებს როგორც ერთს, ისე მეორეს.

გრძელტალღოვანი ინფრაწითელი გამოსხივება (მეტი 1,4 მკმ) შთაინთქმება ოპტიკური სისტემის ქსოვილების მიერ და მაღალი ანტენსივობების დროს აზიანებს მათ.

არასითბური ზემოქმედება მჟღავნდება სითბური ეფექტების გამომწვევზე უფრო დაბალი ინტენსივობების დროს. იგი ძირითადად ახდენს ადამიანის ორგანიზმში არსებული სუსპენზიის (მაგალითად, ერიტროციტები სისხლში) ელექტრიზაციას, დიპოლური მოლეკულების (მაგალითად, წყლის) და მაკრომოლეკულების პოლარიზაციას. როდესაც ინტენსივობები დასაშვებ ზღვრულზე მაღალია და ზემოქმედება ხანგრძლივი, შესაძლოა რადიოტალღური დაავადების წარმოქმნა. ასეთი დაავადების სიმპტომებია საწყის სტადიაზე სისხლის წნევის დაწვევა, რომელიც უკანასკნელ – მესამე სტადიაში გადადის ჰიპერტონიაში (სისხლის წნევის აწვევა), ბრადიკარდიაში (პულსის შენელება), ღვიძლისა და კუჭ-ნაწლავის ფუნქციონალური ნორმებიდან გადახრა, თავს იჩენს უძილობა, თავის ტკივილი, ძილის დარღვევა, გაღიზიანებულობა, ტკივილები გულის არეში და სხვა.

უწყვეტი ლაზერული გამოსხივების თერმიულ ზემოქმედებას ბევრი საერთო აქვს ჩვეულებრივ გახურებასთან. კანზე წარმოიქმნება დამწვრობა, ხოლო დიდი ენერგიების

შემთხვევაში, ბიოლოგიური ქსოვილის აორთქლებისა და ნგრევის გამო, წარმოიქმნება კრატერის სახის უბნები. ლაზერული დამწვრობის დამახასიათებელია დაზიანებული უბნის მკვეთრი საზღვრები.

იმპულსური გამოსხივების ზემოქმედება უფრო რთული ხასიათისაა. დასხივებულ ქსოვილებში იმპულსური გამოსხივების ენერგია სწრაფად გარდაიქმნება სითბოში, რაც მყისიერად იწვევს პლაზმის წარმოქმნასა და აორთქლადქცევას და შესაბამისად, ქსოვილის მექანიკურ ნგრევას.

ლაზერული გამოსხივების არათერმული ზემოქმედება განპირობებულია პროცესებით, რომლებიც მიმდინარეობს ბიოლოგიური ქსოვილების მიერ ელექტრომაგნიტური გამოსხივების შერჩევითი შთანთქმით, ასევე ელექტრული და ფოტოელექტრული ეფექტებით.

დასკვნა

ამრიგად, ლაზერი წარმოადგენს სინათლის წყაროს ახალ სახეს. ლაზერის გამოსხივების უნიკალურმა თვისებებმა შესაძლებელი გახადა მათი გამოყენება მეცნიერებისა და ტექნიკის სხვადასხვა დარგებში, კერძოდ უდიდესია ლაზერების როლი მედიცინაში: კოსმეტიკური ქირურგია, მხედველობის კორექცია, ქირურგია (გინეკოლოგია, უროლოგია, ლაპაროსკოპია), სტომატოლოგია, დაავადების დიაგნოსტიკა, სიმსივნეების მოცილება (განსაკუთრებით ზურგის ტვინის) და სხვა. ასევე, ლაზერებმა დიდი გამოყენება კრიმინალისტიკასა და სასამართლო ექსპერტიზაში, სამხედრო და თავდაცვით ობიექტებში.

მაგრამ, არ შეიძლება უყურადღებოდ დავტოვოთ მისი უარყოფითი როლი ცოცხალ ობიექტებზე ზემოქმედების დროს. ადამიანის ორგანიზმზე ლაზერის სხივის ზემოქმედება რთული სახისაა და განისაზღვრება როგორც უშუალო ზემოქმედებით ცოცხალ ორგანიზმზე, ასევე მეორადი ქმედებებით, რაც აისახება ლაზერის სხივის ზემოქმედების

შედეგად ორგანიზმში მიმდინარე ცვლილებებში. ამდენად, დღეს, როდესაც მიმდინარეობს არა მხოლოდ კონკრეტული ლაზერების, არამედ კომპლექსური ლაზერული სისტემების შექმნა, უდიდესი მნიშვნელობა ენიჭება ლაზერული ეკოლოგიის საკითხებს და ბიოლოგიურ ობიექტებზე ლაზერული გამოსხივების ზემოქმედების შესწავლას.

ლიტერატურა

1. [Сивухин Д. В.](#) Общий курс физики. — Издание 2-е. — М.: [Наука](#), 1985. — Т. IV. Оптика. — С. 714-721. — 735 с.
2. [Сивухин Д. В.](#) Общий курс физики. — Издание 2-е. — М.: [Наука](#), 1985. — Т. IV. Оптика. — С. 703-714. — 735 с.
3. *М. Е. Жаботинский* Лазер (оптический квантовый генератор) // под. ред. [А. М. Прохорова](#) Физический энциклопедический словарь. — М.: [«Советская энциклопедия»](#), 1984. — С. 337-340.
4. *И. А. Щербakov* [Твердотельный лазер](#) // под. ред. [А. М. Прохорова](#) [Физическая энциклопедия](#). — М.: [«Советская энциклопедия»](#), 1988. — Т. 5.
5. *В. П. Быков* [Оптический резонатор](#) // под. ред. [А. М. Прохорова](#) [Физическая энциклопедия](#). — М.: [«Советская энциклопедия»](#), 1988. — Т. 3.
6. *Кондиленко И.И., Коротков П.А., Хижняк А.И.* [Физика лазеров](#). — Киев: Вища школа, 1984. — 232 с.