

## რამანის გაბნევა და რამან-სპექტროსკოპია

სერგო გოთოშია

(რ. აგლადის სახელობის არაორგანული ქიმიისა და ელექტროქიმიის  
ინსტიტუტი, 0186, sergotoshia@yahoo.com)

### ანოტაცია:

შრომში მოკლედაა განხილული რამანის გაბნევის ელემენტარული თეორიული საფუძვლები; რამანის გაბნევის განვითარების ისტორია. გადმოცემულია ლაზერული რამან-სპექტროსკოპიის ინსტრუმენტული ტექნიკისა და მეთოდოლოგიის ძირითადი დებულებანი, განხილულია რამან-სპექტროსკოპიის ტექნიკური ევოლუციის პროცესი. შრომაში აღწერილია ჩვენს მიერ საქართველოში პირველად კონსტრუირებული სამი სხვადასხვა ტიპის ლაზერული რამან-სისტემის კონსტრუქცია; მათი მახასიათებელი თვისებები და პარამეტრები.

**საკვანძო სიტყვები:** რამანის გაბნევა, ლაზერული რამან-სპექტროსკოპია

### 1. რამანის გაბნევის მოკლე დებულებები და მისი განვითარების მოკლე ისტორია

როდესაც გამოსხივება გადის გამჭვირვალე ნივთიერებაში, სხივის რაღაც ნაწილი ამ ნივთიერებაში ყველა მიმართულებით განიბნევა. 1928 წელს ინდოელმა ფიზიკოსმა რამანმა [1] აღმოაჩინა, რომ სინათლის ეს გაბნეული ნაწილი განსხვავდება დაცემული სხივისაგან. აღნიშნული ნაწილი შეიცავს გამოსხივებას, რომლის ტალღის სიგრძეები განსხვავდება დაცემული ამგზნები გამოსხივების ტალღის სიგრძისაგან. ტალღის სიგრძეების ეს წანაცვლება დამოკიდებულია გამბნევი მოლეკულის სტრუქტურაზე.

აღნიშნული ეფექტის აღმოჩენისათვის რამანს 1930 წელს ნობელის პრემია მიანიჭეს. სამართლიანობა მოითხოვს, აღინიშნოს, რომ იგივე ეფექტი თითქმის ერთდროულად დააფიქსირეს რუსმა მეცნიერებმა ლ. ი. მანდელშტამმა და გ. ს. ლანდსბერგმა [2], მაგრამ მათი შრომა ოდნავ გვიან გამოქვეყნდა. რუსები რამანის ეფექტს სინათლის კომბინაციურ გაბნევას უწოდებენ.

ამჟამად რამანის გაბნევის (რგ) თეორია სრულადაა ჩამოყალიბებული [3-5] და დადგენილია, რომ რგ-ის დროს წანაცვლებული ტალღის სიგრძეების გამომწვევი მექანიზმი იგივე კვანტური ენერგეტიკული დონეებია, რაც ინფრაწითელი (იწ) შთანთქმის დროს. ე.ი. სხვაობა ამგზნებ ტალღის სიგრძესა და გაბნეული სინათლის ტალღის სიგრძეებს შორის შეესაბამება შუა-იწ უბანს. მართლაც, რომ შევადაროთ ერთიდაიგივე ნივთიერების რგ-ის და იწ-სპექტრები, დავინახავთ დიდ მსგავსებას ან იდენტურობას. მოკლედ, იწ-სპექტროსკოპიაში ის რხევებია აქტიური, რომელთა მოლეკულური დიპოლური მომენტები იცვლება რხევების მიხედვით; რგ-ისას კი ის რხევებია აქტიური (მჟღავნდება სპექტრებში), რომელთა მოლეკულური პოლარიზება იცვლება რხევების

მიხედვით. ამრიგად, რგ და იწ-სპექტროსკოპია ერთმანეთის კონკურენტები კი არა, არამედ ინფორმაციის თვალსაზრისით ერთმანეთის დამატებებია.

გამოყენების თვალსაზრისით ზოგიერთ შემთხვევაში ექსპერიმენტის დროს იწ-სპექტროსკოპიას უნდა მივანიჭოთ უპირატესობა, ზოგჯერ კი რგ შეუცვლელია. ასეა, მაგალითად, როდესაც ვიკვლევთ წყალხსნარებს. რგ-ის ექსპერიმენტებისათვის ვიყენებთ მინის ან კვარცის კიუვეტებს; იწ-სპექტროსკოპიაში კი, როგორც ცნობილია, გამოიყენება ჰიგროსკოპული ტუტეჰალოიდური ნაერთებისაგან დამზადებული კიუვეტები, რომლებიც წყლისა და აგრესიული ხსნარების მიმართ არამდგრადია. გარდა ამისა, იწ-სპექტროსკოპიაში წყლის, როგორც გამხსნელის, გამოყენება მკაცრად შეზღუდულია: მას გააჩნია ძალიან ინტენსიური შთანთქმის სპექტრი სწორედ იმ საანალიზო უბანში, სადაც ძირითადად განლაგებულია ქიმიური და ბიოლოგიური ნაერთების მახასიათებელი ფუნქციონალური ჯგუფების სიხშირეები; რგ-ის დროს კი წყალი ხელისშემშლელი ფაქტორი არ არის, რადგანაც ამ სპექტრალურ უბანში წყლის სპექტრი ძალიან ღარიბია მახასიათებელი პიკებით. აქედან ჩანს, რომ რგ დიდ მნიშვნელობას იძენს ბიოლოგიური და არაორგანული ნაერთებისა და წყლის დამაბინძურებელი ობიექტების გამოკვლევის სფეროში. რგ-ის სხვა უფრო სპეციფიკურ უპირატესობებზე აქ მეტს აღარ ვილაპარაკებთ. აღვნიშნავთ მხოლოდ ერთ გარემოებას, რომელიც ზოგჯერ აფერხებს რგ-ის გამოყენებას. ესაა მინარევებით გამოწვეული ფოტოლუმინესცენცია (ფლ); თუმცა, ზოგჯერ სათანადო ექსპერიმენტული მეთოდის გამოყენებით შესაძლებელია ლუმინესცენციიდან თავის დაღწევა.

რამანის სპექტრის (რს) მისაღებად გამოსაკვლევი ნივთიერება უნდა გავასხივოთ ლაზერის მძლავრი, მონოქრომატული ტალღის სიგრძით სპექტრის ულტრაიისფერ, ხილულ, ან ახლო ინფრაწითელ უბანში. გასხივების განმავლობაში უნდა გამოვიკვლიოთ გაბნეული გამოსხივება შესაბამისი სპექტრომეტრით. დაცემული (ამგზნები) ლაზერის სხივის მიმართ გაბნეული სინათლის მიმართულება, რომელიც სპექტრომეტრის შესასვლელ ხვრელს ეცემა, ექსპერიმენტთა უმრავლეს შემთხვევაში ქმნის ოთხმოცდაათგრადუსიან კუთხეს. ეს კუთხე, ანუ რამანის ექსპერიმენტთა კონფიგურაცია, მრავალნაირია და იგი დამოკიდებულია ამოცანის მიზანზე, გამოსაკვლევი ობიექტის აგრეგატულ მდგომარეობასა და მის ფიზიკა-ქიმიურ თვისებებზე. ოთხმოცდაათგრადუსიან გაბნევას ძირითადად იყენებენ გამჭვირვალე ობიექტების შესასწავლად ყველა აგრეგატულ მდგომარეობაში. 180 - გრადუსიანი გაბნევა გამოყენებულია უფრო მეტად მყარ სხეულებში პოლარიტონების შესასწავლად, ხოლო უკუ, ანუ ნულოვანი კუთხით, გაბნევის კონფიგურაცია გამოიყენება გაუმჭვირვალე მყარი სხეულების რამან-გაბნევით გამოკვლევის დროს. ასეთი კუთხეებით გამოკვლევისას ყველაზე ზუსტადაა დაცული დაცემული და გაბნეული სხივების პოლარიზაციული ვექტორების კომბინაციათა შესაბამისობა სპექტროსკოპული შერჩევის წესებთან. რასაკვირველია, არსებობს გაბნევის კონფიგურაციები შუალედური კუთხეებითაც.

ძირითადად, რამანის ხაზები (სპექტრი) შეადგენს ამგზნები ლაზერის სპექტრალური ხაზის ინტენსიობის 0,001%; შედეგად, რამანის სპექტრის აღმოჩენა და გაზომვა წარმოადგენს რთულ პრობლემას. ეს არ ეხება რეზონანსულ რამანის გაბნევას (რრგ), ზედაპირით გაძლიერებულ რამანის გაბნევას (ზგრგ), ზედაპირით გაძლიერებულ რეზონანსულ რამანის გაბნევას (ზგრრგ) და რამანის გაბნევის სხვა ეფექტებს, რომლებიც

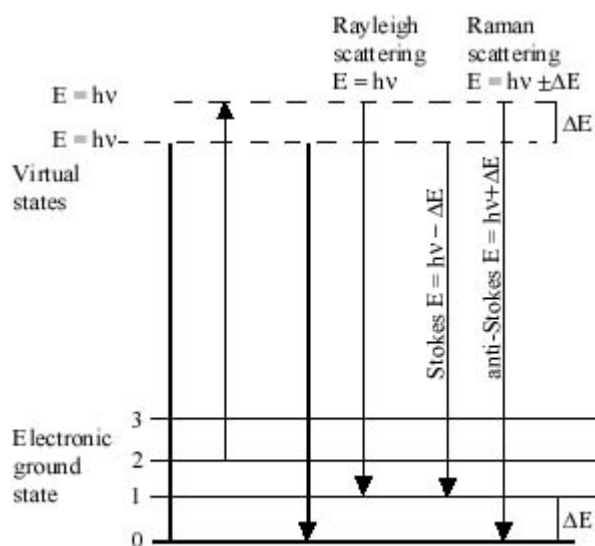
გაცილებით ძლიერი ინტენსიობებით ხასიათდება. საჭიროა ხაზი გაესვას, რომ ზგრრგ ამჟამად ერთერთი უმძლავრესი ანალიზური მეთოდია ბიოლოგებისთვის, ელექტროქიმიკოსებისათვის და ეკოლოგებისათვის.

გაბნეული გამოსხივება შედგება სამი ტიპისაგან, სახელდობრ, სტოქსის, ანტისტოქსისა და რელეის გაბნევისაგან. ამ უკანასკნელის ტალღის სიგრძე ზუსტად იგივეა, რაც ამგზნები ლაზერის ტალღის სიგრძე და მისი ინტენსიობა ბევრად დიდია ორ დანარჩენზე. რამანის სპექტრი წარმოადგენს ამგზნები ლაზერის სპექტრალური ხაზის მარჯვნივ და მარცხნივ სიმეტრიულად განლაგებული სპექტრალური ხაზების ერთობლიობას. ამგზნები ხაზის ტალღურ რიცხვზე უფრო დიდი ტალღური რიცხვით ხასიათდება ანტისტოქსის გამოსხივება, ხოლო სტოქსის გამოსხივებას შეესაბამება პიკები, რომელთა ტალღური რიცხვებიც ამგზნები ლაზერის ტალღურ რიცხვზე მცირეა. საჭიროა აღინიშნოს, რომ რამანის წანაცვლება იდენტურია სტოქსისა და ანტისტოქსის გამოსხივებისათვის. ეს წანაცვლება ასევე ერთიდაიგივე სიდიდისაა მიუხედავად იმისა, თუ რომელი ლაზერის ტალღის სიგრძით ვაწარმოებთ მოცემული ნაერთის რგ-ის სპექტრის აგზნებას.

ანტისტოქსური გამოსხივება ინტენსიობით ნაკლებია სტოქსის გაბნევისათან შედარებით და პრაქტიკაში რგ-ს სპექტრების ჩაწერისას ძირითადად გამოიყენება მხოლოდ სტოქსის გაბნევა. სპექტრის აბსცისაზე კი, რომელზედაც გადაზომილია რამანის წანაცვლებები, ტალღური რიცხვის მაგიერ იწერება უბრალოდ  $\text{cm}^{-1}$ -ები. ასევე არ იწერება ნიშანი მინუსი სტოქსის გაბნევის შემთხვევაში.

ჩვეულებრივი ანუ ნორმალური რამანის სპექტროსკოპიაში გამოსაკვლევი ნივთიერების სპექტრალურად აგზნება წარმოებს ლაზერის გამოსხივების ისეთი ტალღის სიგრძით, რომელიც შორსაა ამ ნივთიერების ნებისმიერი ელექტრონული შთანთქმის პიკისაგან.

ნახ. 1-ზე წარმოდგენილია რელეისა და რამანის (სტოქსის, ანტისტოქსის) გაბნევის მექანიზმის ამსახველი სურათი:



ნახ. 1 რელეისა და რამანის გაბნევის ამსახველი სქემა

პირველი სქელი ისარი ასახავს ენერგიის ცვლილებას მოლეკულაში, დაცემული ლაზერის სხივის ფოტონებთან მისი ურთიერთმოქმედებისას. მოლეკულის ენერგიის ზრდა ტოლია

ფოტონების ენერგიისა  $h\nu$ . მეორე ვიწრო ისარი ასახავს იმ ცვლილებას, რომელსაც ადგილი ექნებოდა იმ შემთხვევაში, თუ მოლეკულა შეხვდებოდა გამოსხივებას მაშინ, როდესაც მოლეკულა იქნებოდა მთავარი ელექტრონული მდგომარეობის პირველ რხევით დონეზე (როგორც წესი, ასეთ მდგომარეობაში მოლეკულების მხოლოდ მცირე ნაწილი იმყოფება). სქემის შუა ნაწილის ორი ისარი ასახავს ცვლილებებს, რომლებიც იწვევს რელეის გაბნევას. ამ შემთხვევაში არავითარ ენერგიის კარგვას არა აქვს ადგილი, რადგანაც რელეის გაბნევისას მოლეკულასა და ფოტონს შორის მიმდინარეობს დრეკადი დაჯახება.

ენერგიის ცვლილება, რომელიც იწვევს სტოქსისა და ანტისტოქსის გამოსხივებას არადრეკადი გაბნევის შედეგად, სქემაზე წარმოდგენილია მარჯვნივ. ეს ორი უკანასკნელი რელეის გაბნევისაგან განსხვავდება სიხშირეებით, რომლებიც შეესაბამება  $+\Delta E$ , ენერგიებს, რომლებიც წარმოადგენს ძირითადი ელექტრონული მდგომარეობის პირველ რხევით დონეს (თუ მოლეკულის კავშირები აქტიურია იწ-უბანში, მაშინ მათ მიერ შთანთქმული ენერგია იქნება  $+\Delta E$ . ამგვარად, რამანის წანაცვლება და იწ-შთანთქმის პიკის სიხშირეები ერთიდაიგივე იქნება).

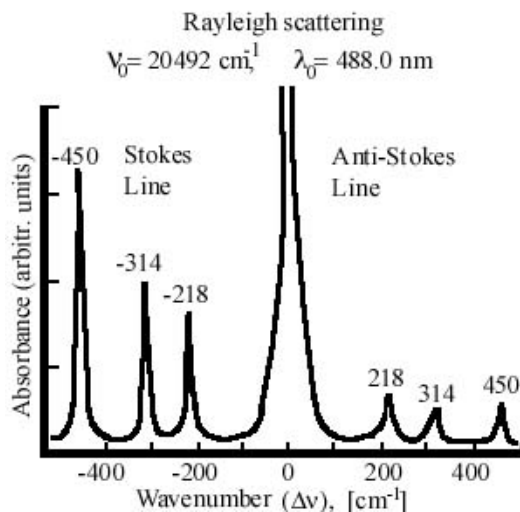
შეფარდებითი დასახლება ამ ორი ენერგეტიკული მდგომარეობისა ისეთია, რომ სტოქსის გაბნევა ჭარბობს ანტისტოქსს. გარდა ამისა, რელეის გაბნევა უფრო ალბათურია, ვიდრე რგ, რადგანაც უფრო ალბათური პროცესია მოლეკულისათვის ენერგიის გადაცემა ძირითად მდგომარეობაში და რეემისია იმავე მოლეკულის ძირითად მდგომარეობაში დაბრუნებით. უნდა აღინიშნოს, რომ ოთახის ტემპერატურაზე ანტისტოქსის სპექტრალური ხაზების ინტენსიობა უფრო სუსტია, ვიდრე სტოქსისა. ამის მიზეზია ის, რომ ამ პირობებში მოლეკულების მხოლოდ მცირე ნაწილი იმყოფება პირველ აგზნებულ რხევით მდგომარეობაში. სტოქსისა და ანტისტოქსის სპექტრალური ხაზების ინტენსიობათა ფარდობა ნაერთის ტემპერატურის ფუნქციაა და იზრდება ტემპერატურასთან ერთად.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ჩვეულებრივი რამანის ეფექტი მეტად სუსტი ეფექტია და მისი ანალიტიკური თვალსაზრისით გამოყენება დიდ ხელოვნებას მოითხოვს. ეს ეფექტი შეიძლება გავაძლიეროთ  $10^5$  ფაქტორით, თუ გამოვიყენებთ რრგ. ასეთი გაძლიერება მიიღწევა იმ შემთხვევაში, როდესაც გამოსაკვლევ ნივთიერებას აღვავზნებთ ლაზერის სხივით, რომლის ტალღის სიგრძე თანხვდება ამ ნაერთის რომელიმე ელექტრონულ გადასვლას. ნორმალური რგ და რრგ ძალიან ხშირად გადაიფარება ფოტოლუმინესცენციით, რომელიც  $10^7$ -ჯერ ინტენსიურია, ვიდრე რგ. მაგალითად, ამას ადგილი აქვს, როდესაც არომატულ ნაერთებს აღვავზნებთ ხილული ან ულტრაიისფერი ლაზერებით.

ნახ. 2-ზე მოყვანილია ორგანული გამხსნელის  $CCl_4$ -ის რამანის გაბნევის სპექტრი ოთახის ტემპერატურაზე; ამგზნებ წყაროდ გამოყენებულია არგონის ლაზერის  $488.0$  ნმ ტალღის სიგრძე.

1965 წელს, როდესაც შექმნილი იყო მუდმივი მოქმედების გაზური ლაზერი ჰელიუმ-ნეონის ნარევი გაზზე, ამერიკელმა მეცნიერმა პორტომ პირველად გამოიყენა ეს ლაზერი ნივთიერებათა, კერძოდ, მყარი სხეულების, რამან სპექტრების მისაღებად [6]. ამ პერიოდიდან იწყება, შეიძლება ითქვას, “დავიწყებული” მძლავრი ფიზიკა-ქიმიური კვლევის მეთოდის რენესანსი.

დაახლოებით 1968 წელს რუსეთში, მოსკოვის ლებედევის სახელობის ფიზიკის ინსტიტუტის ლანდსბერგის სახელობის ოპტიკის ლაბორატორიაში პროფესორ მ. მ. სუმჩინსკისა და დოქტორ ვ. ს. გორელიკის ხელმძღვანელობით ჩამოყალიბდა ყოფილ საბჭოთა კავშირში ერთერთი პირველი ჯგუფი, რომელმაც დაიწყო ლაზერული რამან სპექტროსკოპიის მიმართულების განვითარება. ანალოგიური ჯგუფი ცოტა მოგვიანებით, ალბათ, 1970 წელს, შეიქმნა ამავე ინსტიტუტის აკადემიკოს ბ. მ. ვულის ნახევარგამტარების ლაბორატორიის ვ. ს. ვავილოვის რადიაციულ სექტორში დოქტორ ლ. კ. ვოდოპიანოვის ხელმძღვანელობით.



ნახ. 2  $\text{CCl}_4$  რამან-სპექტრი

ამ შრომის ავტორი აქტიურად იყო ჩართული ორივე ჯგუფის სამეცნიერო თემატიკაში ლაზერული რამან-სპექტროსკოპიის მიმართულებით სამუშაოდ. აქ შეიქმნა ორი სხვადასხვა ტიპის ლაზერული რამან-სპექტრომეტრი. ამათგან ერთერთი, ინფრაწითელი ლაზერული რამან-სპექტრომეტრი პირველი იყო ყოფილ საბჭოთა კავშირში. ამ სპექტრომეტრებზე შესრულდა სხვადასხვა ნახევარგამტარული მასალის ოპტიკური თვისებების ფუნდამენტური სამეცნიერო კვლევები ლაზერული რამან-სპექტროსკოპიის მეთოდით.

1976 წელს თბილისის არაორგანული ქიმიისა და ელექტროქიმიის ინსტიტუტში, საქართველოში, პირველად შეიქმნა სამი სხვადასხვა ტიპის ლაზერული რამან სპექტრომეტრი, მათ შორის ინფრაწითელიც. კონსტრუირებული რამან-სპექტრომეტრების საშუალებით საქართველოში პირველად დავიწყეთ ნახევარგამტარების, დიელექტრიკების, მაღალტემპერატურული ზეგამტარების, ბუნებრივი მინერალების, ფსვნილების, ამორფული სხეულების, ზედაპირების, ნანომასალების, ბიოლოგიური ნაერთების, ორგანული და არაორგანული შენაერთების ფიზიკა-ქიმიური თვისებების როგორც ფუნდამენტური კვლევების შესრულება, ასევე ამ ნივთიერებათა ხარისხობრივი და რაოდენობრივი ანალიზების ჩატარება ლაზერული რამან-სპექტროსკოპიის საშუალებით. ამგვარად, ლაზერული რამან-სპექტროსკოპია მსოფლიოს მოწინავე ქვეყნებში განვითარდა დაახლოებით 1965 წლიდან, რუსეთში 1968 წლიდან, ხოლო საქართველოში 1976 წლიდან.

## 2. რამან-სპექტროსკოპიის ტექნიკის განვითარების მოკლე ისტორია

პირველ რამან-სპექტრომეტრებში დისპერსიულ ელემენტად გამოიყენებოდა მაღალი დისპერსიის მქონე პრიზმები. შემდეგში იგი შეცვალა მექანიკური წესით დამზადებულმა დიფრაქციულმა მესერმა. სულ ბოლოს კი ფართოდ გამოიყენება ჰოლოგრაფიული დიფრაქციული მესერი. ეს უკანასკნელი იძლევა კარგი ხარისხის სპექტრებს, როლებიც თავისუფალია პარაზიტულად გაბნეული სინათლისაგან, ე.წ. "სულელებისაგან". სულელების მოშორება ჩვეულებრივი, მექანიკურად დაჭრილი დიფრაქციული მესრებისაგან შეუძლებელია, ამიტომ ისინი ხშირად უშლიან ხელს ექსპერიმენტატორს. სპექტრომეტრების პროგრესი ასეთი სახით წარიმართებოდა: პირველად გამოიყენებოდა პრიზმული სპექტრომეტრები; შემდეგ იგი შეცვალა ორმაგმა დიფრაქციულმა სპექტრომეტრებმა; მომდევნო პერიოდში რამანის სპექტრების ჩასაწერად გამოიყენებოდა ორმაგი სპექტრომეტრები ჰოლოგრაფიული დიფრაქციული მესრებით. ასეთ სპექტრომეტრებში პარაზიტულად გაბნეული სინათლე მონიმუდამდეა დაყვანილი. მცირე პერიოდის შემდეგ კი შეიქმნა სამმაგი რამან-სპექტრომეტრები, რომლებიც იდეალურ სპექტრებს იძლევა.

აღსანიშნავია რომ რამან-სპექტრომეტრების პროგრესი ამით არ დამთავრებულა და ამჟამადაც გრძელდება: ამუშავებენ რამან-სპექტრომეტრებს ადამარის გარდაქმნით და ზოგიერთმა ფირმებმა უკვე გამოუშვეს რამან-სპექტრომეტრები ფურიეს გარდაქმნით.

ბოლო პერიოდში რამან-სპექტრომეტრების ტექნიკაში გაჩნდა მიმართულება უფრო მარტივი და იაფი სპექტრომეტრების კონსტრუირებისა, ვიდრე ძვირფასი და რთული ორმაგი და სამმაგი სპექტრომეტრებია. ეს არის დიდი სინათლის ძალის მქონე ერთმაგი დიფრაქციული სპექტრომეტრისა და ე.წ. ჰოლოგრაფიული ნოტჩ-ფილტრების ერთობლიობა. აქ იდეა მდგომარეობს იმაში, რომ ერთმაგი სპექტრომეტრის ხარჯზე გაიზარდოს სპექტრომეტრში შესული სასარგებლო გაბნეული სინათლის რაოდენობა და ნოტჩ-ფილტრმა შეასრულოს მეორე მონოქრომატორის მისია – გაასუფთაოს სპექტრი პარაზიტულად გაბნეული სინათლისაგან. ასეთი სისტემის გამოყენება მიზანშეწონილია მაშინ, როდესაც ფუნდამენტური მეცნიერული ამოცანისათვის ან ანალიტიკური სამუშაოსთვის არაა აუცილებელი ლაზერულ ამგზნებ ტალღის სიგრძესთან ძალიან ახლოს მისვლა, ე.ი. რამანის მცირე სიხშირეების მიღება, ან არ არის ძალიან მაღალი გარჩევისუნარიანობის მიღების მოთხოვნილება. აქ გასათვალისწინებელია აგრეთვე ლაზერული რამან-სისტემების ფასებიც. მსოფლიოში ცნობილი ფირმები აწარმოებენ სხვადასხვა კონსტრუქციის ლაზერულ რამან-სისტემებს. საორიენტაციო ღირებულება ასეთია: ერთმაგი მონოქრომატორის ბაზაზე აგებული სისტემა ღირს 25 000 -150 000 Eu; ორმაგი მონოქრომატორის ბაზაზე კონსტრუირებული ლაზერული რამან-სისტემა ღირს 80 000 – 200 000 Eu; სამმაგი მონოქრომატორის ბაზაზე აგებული ლაზერული რამან-სისტემა კი ღირს 150 000 – 500 000 Eu. ფასები იცვლება დიდ ინტერვალში. ეს დამოკიდებულია სპექტრომეტრის ფოკუსური მანძილის სიდიდეზე, დიფრაქციული მესერების კომპლექტაციაზე, სინათლის მიმღებების ტიპსა და რაოდენობაზე; ამგზნები ლაზერების ტიპზე, სიმძლავრესა და რაოდენობაზე; უამრავი სხვადასხვა დანიშნულებისა და პარამეტრის აქსესუარების კომპლექტაციაზე.

ასე რომ, ამჟამად რამან სპექტროსკოპია ტექნიკის თვალსაზრისით შეგვიძლია დავყოთ ორ ძირითად ნაწილად: ჩვეულებრივ, ანუ დისპერსიულ რამან სპექტროსკოპიად და ფურიეს გარდაქმნით სპექტროსკოპიად. დისპერსიული სპექტროსკოპია კი იყოფა სამ ნაწილად: ერთმაგი სპექტრომეტრი და ჰოლოგრაფიული ნოტჩ-ფილტრების სისტემა, ორმაგი მონოქრომატორიანი სპექტრომეტრი და სამმაგი მონოქრომატორიანი რამან სპექტრომეტრი. უნდა აღვნიშნო, რომ ჰოლოგრაფიული დიფრაქციული მესერის გამოყენება ნებისმიერი ტიპის დისპერსიულ სისტემაშია შესაძლებელი, რაც უფრო ხარისხიანი რამან სპექტრების მიღების გარანტიაა. გარდა ამისა, სპექტრომეტრების ამ გრადაციას უნდა დაემატოს და ცალკე გამოიყოს ე.წ. მიკრო რამან-სპექტროსკოპია, რომელშიც რამან-სპექტრომეტრთან შეუღლებულია დიდი გარჩევისუნარიანობის მქონე ოპტიკური მიკროსკოპი (უკანასკნელ პერიოდში ელექტრონულიც), რაც საშუალებას იძლევა მივიღოთ რამან სპექტრები მყარი სხეულის ზედაპირზე ლაზერის სხივის სკანირებით, რამდენიმე მიკრონის სივრცითი გარჩევისუნარიანობით. თითოეული ზემოთმოყვანილი სპექტრომეტრის გამოყენების არეალს განსაზღვრავს დასმული ამოცანა და ფინანსური შესაძლებლობა.

უდიდესი პროგრესი განიცადა რამანის სიგნალის მიმღებებმა და სპექტრების რეგისტრაციის სისტემებმა. რამანის ეფექტის აღმოჩენის პირველ ეტაპზე სიგნალის დეტექტორად გამოიყენებოდა ფოტოფირფიტა და სუსტი ინტენსიობის გაზნეული სინათლის რეგისტრაციისათვის საჭირო იყო ექსპოზიცია, რომელიც საათებით განისაზღვრებოდა. გარდა ამისა, ფირის ხარისხი არ იძლეოდა მეტად სუსტი ხაზების დაფიქსირების საშუალებას, მათ ინტენსიობებს გადაფარავდა ფირის შავი ფონი. პირველი პროგრესი მდგომარეობდა ფოტორეგისტრაციის ფოტოელექტრულით შეცვლაში. ამ შემთხვევაში სიგნალის მიმღებად გამოიყენებული იქნა ფოტოელექტრონული გამამამრავლებელი ფეგ-ი. შეიქმნა მრავალი სხვადასხვა ტიპის ფეგ-ი. რომელთა ფოტოკათოდები მგრძნობიარეა სპექტრის სხვადასხვა უბანში. რამან სპექტროსკოპიაში ძირითადად დამკვიდრდა ორი ტიპის ფოტოკათოდი: მრავალტუტემეტალიანი და ჟანგბად-ცეზიუმიანი ფოტოკათოდები. აქედან პირველი შეუცვლელია რამანის სიგნალის დასაფიქსირებლად სპექტრის ახლო ულტრაიისფერსა და ხილულ არეში, ხოლო მეორე, ცეზიუმიანი ფოტოკათოდით ვაფიქსირებთ რამანის სიგნალს ღრმა წითელიდან ახლო ინფრაწითელ უბანში. როდესაც ვლაპარაკობთ, რომ ვაფიქსირებთ სიგნალს სპექტრის გარკვეულ ინტერვალში, რამან სპექტროსკოპიაში ეს ნიშნავს, რომ რამანის სპექტრების აგზნება წარმოებს ლაზერებით, რომელთა გამოსხივების ტალღის სიგრძეები ამ უბნებშია მოთავსებული; რეალურად კი რამანის სპექტრი, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, წარმოადგენს ამგზნები ლაზერისა და დაფიქსირებული სპექტრალური პიკის სიხშირეთა სხვაობას. ეს სხვაობა ინფრაწითელი კვანტების ენერჯის ტოლია. ე.ი. რამან-სპექტროსკოპიის საშუალებით ხილული ოპტიკური სპექტროსკოპიის ტექნიკით ვაფიქსირებთ ინფრაწითელ სპექტრალურ უბანს. ამჟამად მსოფლიოში არსებული ფეგ-ები სპექტრალურად მგრძნობიარენი არიან 300-12000 ნმ ინტერვალში. 1,2 მმკ-ის ზევით უფრო დიდი, ინფრაწითელი ტალღებისაკენ არც ერთ მეტალს ან მათ შენადნობებს არ გააჩნია ელექტრონებისათვის ისეთი დაბალი გამოსვლის მუშაობის სიდიდე, რომ მათ იგრძნონ უფრო გრძელტალღიანი გამოსხივება. 1,2 მმკ-ის ზევით უკვე გამოიყენება დაბალ ტემპერატურებზე მომუშავე ნახევარგამტარული ფოტოწინააღმდეგობები, მაგრამ მათი

პარამეტრები ვერ შეედრება ფეგ-ებისას. დიდად პერსპექტიულია ნახევარგამტარული ზვავისმაგვარი ფოტოელემენტები, რომლებიც ფაქტიურად წარმოადგენს მყარსხეულოვან ფეგ-ებს. სამწუხაროდ, მათმა ტექნოლოგიამ ჯერჯერობით ვერ მიაღწია ისეთ დონეს, რომ ისინი მასიურად გამოვიყენოთ. ამჟამად ყველაზე პერსპექტიული და საუკეთესოა ფეგ-ები, რომელთა კათოდები და დინოდებიც დამზადებულია ნახევარგამტარული მასალებისაგან. ეს მასალებია ძირითადად  $A^3B^5$  ტიპის ნახევარგამტარები GaAs, GaP, InP და მათ საფუძველზე სინთეზირებული შერეული კრისტალები GaAsP, GaInP და სხვა. ასეთი ფეგ-ების უპირატესობა მდგომარეობს იმაში, რომ ჯერ ერთი, მათი ფოტოკათოდების კვანტური ეფექტურობა, ე.ი. ელექტრონების გამოსავალი, ათეულობით აღემატება ჩვეულებრივ მეტალკათოდისაგან; მეორე, არანაკლები უპირატესობა იმაშია, რომ ნახევარგამტარული კათოდებიანი და დინოდებიანი ფეგ-ების სპექტრალური მგრძობიარობა თანაბარია სპექტრის საკმაოდ დიდ ინტერვალში, ე.ი. ეს მრუდი ხასიათდება ე.წ. ფართო პლატოთი. პოტენციალურად შესაძლებელია ასეთი ფეგ-ების დამზადება უფრო გრძელტალღოვანი ინფრაწითელი გამოსხივების რეგისტრაციისათვისაც (უკვე ამზადებენ), მაგრამ ასეთი ფეგ-ები მსოფლიო ბაზარზე ძალიან ძვირია ჩვეულებრივთან შედარებით. თანამედროვე ფეგ-ებს შეუძლიათ იგრძნონ ცალკეული ფოტონები და მოახდინონ მათი რეგისტრაცია ფოტოელექტრონების დათვლის მეთოდით.

რამან სპექტრომეტრი, რომელიც აღჭურვილია მგრძობიარე, სპეციალურად შერჩეული ფეგ-ით, ითვლება ერთარხიან ხელსაწყოდ და მის მიერ რეგისტრირებული მინიმალური სიგნალი შემოსაზღვრულია ფეგ-ის მგრძობიარობით. გარდა ამისა, ასეთ რამან-სისტემებში სპექტრების ჩაწერა წარმოებს დიფრაქციული მესერის სკანირებით დროში. თუ ექსპერიმენტის ამოცანა მოითხოვს სპექტრის დიდი მონაკვეთის ჩაწერას, ბუნებრივია, სკანირების დრო იზრდება და ექსპერიმენტს დიდი დრო ჭირდება.

ამჟამად რამან სპექტრების რეგისტრაციისათვის გამოიყენება უკვე ახალი ტიპის, მრავალარხიანი მიმღებები, რომელთაგან ყველაზე საუკეთესო და პოპულარულია CCD დეტექტორები. აღნიშნული დეტექტორი აწარმოებს სპექტრის დიდი ინტერვალის ერთდროულ რეგისტრაციას დიდი მგრძობიარობით დროის მცირე მონაკვეთში. CCD წარმოადგენს ნახევარგამტარულ ხელსაწყოს, სადაც ზედაპირის ფართზე განლაგებულია მიკროელექტრონიკული ტექნოლოგიით დამზადებული სილიციუმის პატარა დეტექტორები, რომელთა რიცხვი სხვადასხვაა და მაღალი კლასის CCD-ებში იგი ტოლია  $1026 \times 256$ , ზოგიერთში კი უფრო მეტიცაა. ესაა ამ დეტექტორის ძალიან ზოგადი წარმოდგენა. ფაქტიურად, იგი წარმოადგენს სიგნალის დამგროვებელს; ისეთი წარმოდგენა იქმნება, თითქოს ერთის მაგიერ მრავალი ფეგ-ი აფიქსირებს ერთდროულად სიგნალს ექსპოზიციის პერიოდში. ამიტომ, ბუნებრივია, მისი მგრძობიარობა დიდადაა გაზრდილი. გარდა ამისა, შესაძლებელია რამან-სპექტრის დიდი უბნის ერთდროული რეგისტრაცია წამებისა და წუთების განმავლობაში.

როდესაც რამან-სისტემები აგებულია CCD დეტექტორების გამოყენებით, უკვე საჭიროა არა სპექტრომეტრები, საჭიროა სპექტროგრაფი. ყოველ შემთხვევაში, სისტემის ბოლო საფეხური უნდა იყოს სპექტროგრაფი, რათა CCD-ს მგრძობიარე ზედაპირს გამოსხივება დაეცეს არა სპექტრომეტრის ვიწრო გამოსასვლელი ხვრელიდან, არამედ სპექტროგრაფის ფართო პორტიდან. ამჟამად რამან-სისტემები, რომლებიც შედგება სხვადასხვა ტალღის სიგრძის გამოსხივების ამგზავნი ლაზერებისაგან, ერთმაგი, ორმაგი,



ან სამმაგი სპექტროგრაფის, ძლიერი ოპტიკური მიკროსკოპის, კრიოგენული ტექნიკის, CCD დეტექტორისა და კომპიუტერისაგან, რომლითაც მთელი სისტემა პროგრამულად იმართება, ყველაზე თანამედროვე და დიდი შესაძლებლობების მქონე რამან-სისტემებია. ასეთ სპექტრომეტრებს აწარმოებენ აშშ, საფრანგეთი, ინგლისი, იაპონია, და ეს სისტემები ასეულ ათასობით დოლარი ღირს.

რაც შეეხება ამგზნებ ლაზერებს, მათ მიმართ მოთხოვნები, ვფიქრობ, შეიცვალა. ადრე, ლაზერული რამან-სპექტროსკოპიის განვითარების პირველ ეტაპზე, ყველა ექსპერიმენტატორი ცდილობდა ჰქონოდა რაც შეიძლება მაღალი სიმძლავრის ლაზერები, რათა მის ხარჯზე გაეზარდა სისტემის მგრძობიარობა, მიეღო დამაკმაყოფილებელი რამან-სპექტრები და აღმოეჩინა ნივთიერებათა მინიმალური კონცენტრაცია ხსნარებში ან მცირე რაოდენობის მინარევები კრისტალებში. თანამედროვე ეტაპზე, თუ რამან-სისტემა შეიარაღებულია CCD-თი და ოპტომიზირებული სპექტრომეტრით, სრულიად არაა საჭირო ერთი ვატის ან მეტი სიმძლავრის მონოქრომატული ლაზერით ააგზნო სპექტრი. ამ შემთხვევაში უკვე რამდენიმე მილივატის სიმძლავრის გამოსხივებაც კი საკმარისია დაბალი კონცენტრაციის ხსნარების კარგი ხარისხის რამან-სპექტრების მისაღებად.

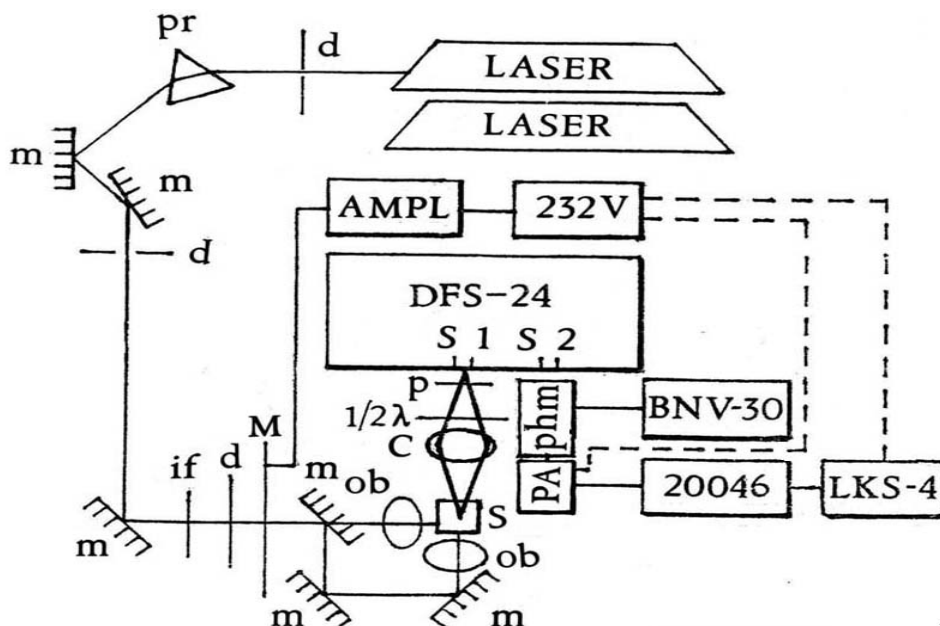
### 3. ექსპერიმენტული მასალა

ნებისმიერი ლაზერული რამან-სისტემა, ლაზერული რამან-სპექტრომეტრი, ძირითადად შემდეგი მთავარი ნაწილისაგან შედგება: ამგზნები ლაზერი; ერთმაგი, ორმაგი ან სამმაგი სპექტრომეტრი; სიგნალის მგრძობიარე მიმღები; გამაძლიერებელი და რეგისტრაციის სისტემა. ამ კომპლექსს უნდა დავუმატოთ გამოსაკვლევი ნიმუშის მოსათავსებელი მოწყობილობა, რომელიც საშუალებას მოგვცემს შევისწავლოთ გამოსაკვლევი ნიმუში რამანის გაბნევის სხვადასხვა კონფიგურაციული სქემებით. რამანის-სპექტრომეტრი გარდა ამ ძირითადი ბლოკებისა, შეიცავს კიდევ მრავალ სხვა აქსესუარს: ოპტიკურ, მექანიკურ, კრიოგენულ და სხვა ბლოკებსა თუ დეტალებს.

#### 3.1 ლაბორატორიული ტიპის ლაზერული რამან-სისტემის კონსტრუქცია

ნახ. 3-ზე წარმოდგენილია ჩვენს მიერ კონსტრუირებული ლაზერული რამან სისტემის სქემა. ამგზნებ წყაროდ გამოიყენება არგონის, კრიპტონის, ჰელიუმ-ნეონის, ჰელიუმ-კადმიუმის, სპილენძის ლაზერები. ის ტალღის სიგრძეები, რომლებითაც ხასიათდება ზემოთჩამოთვლილი ლაზერების გამოსხივებები და რომელთაც ვიყენებთ რამან-სპექტრების ასაგზნებად, მოყვანილია ცხრილში 1. ეს ლაზერები ძირითადად სტანდარტული, ქარხნული წარმოებისაა. ამასთან ერთად, გაგვაჩნია აგრეთვე თვითნაკეთი, ლაბორატორიული ტიპის ლაზერებიც. ესენია კრიპტონისა და არგონის ლაზერები. ჩვენს მიერ კონსტრუირებულ არგონისა და კრიპტონის ლაზერებს შემდეგი პარამეტრები აქვს: კრიპტონის ლაზერის გამოსხივება არის ერთმოდიანი, ტალღის სიგრძეებით 530.9, 568.2, 647.15ნმ, ინტეგრალური სიმძლავრე დაახლოებით ერთი ვატი, ვერტიკალური პოლარიზაციის გამოსხივებით. არგონის ლაზერი ხასიათდება შემდეგი პარამეტრებით: ერთმოდიანი, გამოსხივების ტალღის სიგრძეებით 457.9, 476.5, 488.0, 496.5, 501.7, 514.5 ნმ, ინტეგრალური სიმძლავრე დაახლოებით სამი ვატი, ვერტიკალურად პოლარიზებული გამოსხივება. კონსტრუირებული ლაბორატორიული ტიპის არგონისა და კრიპტონის

იონური ლაზერები ექსპერიმენტული პირობების უფრო ფართო ვარირების საშუალებას გვაძლევს.



ნახ. 3 ჩვენს მიერ საქართველოში პირველად კონსტრუირებული ლაზერული რამან-სისტემის ზოგადი სქემა

**ცხრილი 1.** რამან-სპექტრების ასაგზნებად ჩვენს მიერ გამოყენებული ლაზერების ტალღის სიგრძეები

Lasers	Laser Type	Wavelength (nm)	Energy (eV)
He-Ne	Gas	632.8	1.958
Argon ion	Gas	514.5	2.408
		501.7	2.469
		496.5	2.495
		488.0	2.539
		476.5	2.600
		457.9	2.705
Cripton ion	Gas	647.1	1.914
		568.2	2.180
		530.9	2.33
		520.8	2.379
		476.2	2.601
He-Cd	Gas	441.7	2.805
Copper	metal vapour	510.6	2.428
		578.2	2.144
YAG:Nd	Solid	1064.0	1.17
Die	solution	540.0-690.0	2.296-1.797

რამან-სპექტრების მისაღებად ვიყენებთ ორმაგ დიფრაქციულ სპექტრომეტრებს DFS-12 და DFS-24, დიფრაქციული რეპლიკებით 300 შტ/მმ, 600 შტ/მმ და 1200შტ/მმ. ამ

მესრებისთვის სინათლის მაქსიმალური კონცენტრაცია დაახლოებით მოდის სპექტრის ახლო ინფრაწითელ, წითელ-ყვითელ, იისფერ-ლურჯ უბნებზე შესაბამისად. რამან-სპექტრების ჩაწერისას ყველა ლაზერის ამგზნები ტალღის სიგრძისათვის ოპტიმალური პირობების შექმნის მიზნით კონსტრუირებულია სამი სხვადასხვა ტიპის რამან სპექტრომეტრი. სპექტრომეტრები ერთმანეთისაგან განსხვავდება დიფრაქციული მესერის მონაცემებით. ეს იწვევს სპექტრომეტრის სპექტრალური დიაპაზონის, გარჩევისუნარიანობის და სინათლის მაქსიმალური კონცენტრაციის ოპტიმიზაციას დასმული ამოცანის შესაბამისად. ეს საშუალებას გვაძლევს შევქმნათ რამან-სპექტრების აგზნებისა და რეგისტრაციის ოპტიმალური რეჟიმები.

ლაზერიდან გამოსული გამოსხივება დიაფრაგმების (d), პრიზმის (pr), ინტერფერენციული ფილტრის (if), სარკეების (s) და ობიექტივის (ob) საშუალებებით იწმინდება ლაზერის გამოსხივების ფონისაგან, პლაზმური გამოსხივების ვიწრო სპექტრალური ზოლებისაგან; ფორმირდება მკაცრად კოლიმირებული მონოქრომატული გამოსხივება სასურველი მიმართულებით, გაზნვის დაგეგმილი კონფიგურაციის შესაბამისად და ფოკუსირდება გამოსაკვლევ ნიმუშზე (n). ნიმუშში გაზნული გამოსხივება შეიკრიბება კონდენსორის (k) საშუალებით და პოლარიზატორის (p) გავლით ეცემა ორმაგი მონოქრომატორის შესასვლელ ხვრელს (ხვ.1). ფოტოლუმინესცენციის ან რამანის გაზნვის სიგნალი გამოსასვლელი ხვრელიდან ეცემა ფოტოგამამრავლებლის (ფგ) კათოდს და სიგნალის გაძლიერებისა და დახარისხების შემდეგ წარმოებს ფლ-ის ან რგ-ის სპექტრების რეგისტრაცია თვითჩამწერით LKS-004. რგ-ის სუსტი ინტენსიობის სიგნალების აღმოჩენა და გაძლიერება წარმოებს ორი მეთოდით: სინქრონული დეტექტირების მეთოდით, მოდულატორის (მ) და ვიწროზოლიანი გამაძლიერებლის (Lock-in-amplifier Uniphon 232B)-ის საშუალებით; ანდა ცალკეული ფოტონის დათვლის მეთოდით, რომლისთვისაც ვიყენებთ გერმანული წარმოების რადიომეტრს 20046. სპექტრის ხილულ უბანში ვმუშაობთ ზედმიწევნით კარგად შერჩეული პარამეტრებიანი ფეგ-ით FEU-79 ან FEU-136. საჭიროების შემთხვევაში FEU-79 კათოდს ვაცივებთ დაახლოებით  $-100^{\circ}\text{C}$ -ზე, რისთვისაც ავაგეთ სამი სხვადასხვა ტიპის, განსხვავებულ პრინციპებზე მოქმედი დაბალტემპერატურული კრიოსტატი. ასეთ კრიოსტატებში FEU-79 კათოდის გაცივებით მივაღწიეთ სიგნალთან ხმაურის შეფარდების გაზრდას დაახლოებით რვამდე, რასაც დიდი მნიშვნელობა აქვს რამან-სპექტრების რეგისტრაციის დროს.

გარდა ზემოთაღწერილი ლაზერული რამან-სპექტრომეტრისა, ავაგეთ სხვადასხვა ტიპისა და კონსტრუქციის დაბალტემპერატურული კრიოსტატები, რომლებიც საშუალებას გვაძლევს ნახევარგამტარების ფლ-ის და რამან-სპექტრები გამოვიკვლიოთ აზოტისა და ჰელიუმის ტემპერატურებზე, როგორც ფიქსირებულ, ასევე ტემპერატურის ცვლილების რეჟიმში. ეს ოპტიკური, კომპაქტური კრიოსტატები სპეციალურად შევქმენით რამან-სპექტროსკოპული გამოკვლევებისათვის იმ მომენტის გათვალისწინებით, რომ რგ-ის გაზომვების დროს ამგზნები ლაზერის სხივის მიმართულება, გამოსაკვლევი ნიმუშის – ნახევარგამტარის კრიოსტალოგრაფიული ღერძები და გაზნული გამოსხივების შეკრების კუთხე გაზომვის სხვადასხვა სქემებში ქმნიან განსხვავებულ კონფიგურაციებს.

ნახევარგამტარების რამან-სპექტრებსა და ფლ-ზე ერთმხრივ მიმართული წნევის გავლენის შესწავლის მიზნით ჩვენი რამან-სისტემებისათვის შევქმენით სპეციალური კრიოსტატი, რომელიც მუშაობს აზოტის ტემპერატურაზე.

გარდა დაბალტემპერატურული კრიოსტატებისა, ავადგეთ აგრეთვე მაღალტემპერატურული კრიოსტატიც, რომელიც საშუალებას გვაძლევს შევისწავლოთ ნახევარგამტარები  $18^{\circ}\text{C}$ -იდან  $600^{\circ}\text{C}$ -მდე.

ამგვარად, ჩვენს მიერ შექმნილი ლაზერული რამან-სისტემა საშუალებას იძლევა ჩავატაროთ მყარი სხეულების (კრისტალური, შერეული მყარი ხსნარები, ამორფული, მინისებური, ფხვნილები, წვრილკრისტალური, ნანოკრისტალური) ფართომასშტაბიანი ფუნდამენტური კვლევები და ანალიზური სამუშაოები სპექტრალური აგზნების უაღრესად ფართო დიაპაზონში, ერთმხრივმიმართული დაძაბულობის გავლენით და ტემპერატურულ ინტერვალში  $10^{\circ}\text{K}$ -იდან  $600^{\circ}\text{C}$ -მდე. ეს გამოკვლევები შესაძლებელია ჩატარდეს როგორც მოცულობით გამჭვირვალე კრისტალებზე, ასევე თხელ ფირებზეც.

აღწერილი სისტემა საშუალებას იძლევა შევასრულოთ კვლევები და ანალიზური სამუშაოები რამან-სპექტროსკოპიაში სითხეებზეც, რომლითაც უმეტესად დაინტერესებულნი არიან ქიმიკოსები, ბიოლოგები, ფარმაცევტები, მედიკოსები, სოფლის მეურნობის მუშაკები, ეკოლოგები და სხვა დარგის მუშაკები.

### 3.2 რამანის გაზნვის მეთოდოლოგია

რამანის გაზნვის მეთოდოლოგიის ძირითადი კანონია რამანის ინტენსიობის აგზნები ტალღის სიგრძის მეოთხე ხარისხთან უკუპროპორციულობა. ე. ი. დიდი ინტენსიობის რამანის გაზნვის მისაღებად ექსპერიმენტატორი უნდა ცდილობდეს გამოიყენოს რაც შეიძლება მოკლეტალღოვანი აგზნება. ამ ძირითადი კანონის პრაქტიკაში განხორციელება მხოლოდ სურვილზე არაა დამყარებული. სურვილი შემოსაზღვრულია გამოსაკვლევი ობიექტის ფიზიკა-ქიმიური თვისებებით, დასმული ამოცანითა და მატერიალური რესურსებით (განსაკუთრებით ლაზერული ტექნიკის მომხმარებლებისათვის მატერიალური რესურსები ყოველთვის გასათვალისწინებელია).

როდესაც გამოსაკვლევი ობიექტი სუფთაა, მინარევების გარეშე, რომლებიც არ იწვევს ლუმინესცენციას, აკრძალული ზონის სიგანე ძალიან დიდია ან კრისტალი ძალიან გამჭვირვალეა სტრუქტურული დეფექტების ნაკლებობის გამო, მაშინ უნდა ვეცადოთ, რომ ლაზერის გამოსხივების აგზნები კვანტები რაც შეიძლება დიდი ენერჯის იყოს და მათი ენერჯია აკრძალული ზონის ნახევარზე მეტს უახლოვდებოდეს. იმ შემთხვევაში, თუ მინარევების ან დეფექტების გამო მოკლე ტალღები იწვევს ლუმინესცენციას, მაშინ იძულებულნი ვართ, მოკლეტალღოვანი აგზნება შევცვალოთ უფრო გრძელი ტალღების აგზნებით. ამ შემთხვევაში რამანის გაზნვის ინტენსიობა ტალღის სიგრძის მეოთხე ხარისხის კანონით ეცემა, მაგრამ სამაგიეროდ მეტნაკლებად ან აბსოლუტურად ვთავისუფლდებით ხელისშემშლელი ლუმინესცენციის ფონისაგან და ვიღებთ სუფთა რამანის სპექტრს. ასეთი იყო აქამდე რამანის სპექტრების ჩაწერის კლასიკური მეთოდოლოგიური მიდგომა. ამჟამად უკანასკნელ ოცწლეულში მკაფიოდ ჩამოყალიბდა შემდეგი მეთოდოლოგია, რომელიც მყარადაა დაკავშირებული ლაზერული რამან-სპექტრომეტრების თანამედროვე დაყოფასთან: პირველი, ესაა რამანის სპექტრების მიღება ხილული სპექტრის უბანში მოთავსებული ტალღის სიგრძეების აგზნებით; მეორე, ახლო იწ-ტალღის სიგრძეებით აგზნებით; ბოლო დროს დიდი ყურადღება მიიპყრო ულტრაიისფერი უბნის ტალღის სიგრძეებით რამანის გაზნვის სპექტრების აგზნებამ. აქაც

იდეა მდგომარეობს ლუმინესცენციის უზნიდან თავის დაღწევაში. ნათქვამიდან გამომდინარეობს შედეგი, რომ რამანსა და ლუმინესცენციაში მომუშავე ექსპერიმენტატორმა გონივრულად უნდა დაგეგმოს თავისი ამოცანის შესატყვისი ექსპერიმენტი და გამოიყენოს ექსპერიმენტული საშუალებების ის არსენალი, რომელიც მოცემულ მომენტში ყველაზე მეტად მომგებიანია.

რითი განსხვავდება ჩვენს მიერ კონსტრუირებული იწ-ლაზერული რამან-სისტემა ადრე აღწერილი ხილული რამან-სისტემისაგან. სწორი წარმოდგენისათვის მინდა განვმარტო, რომ ჩვენს მიერ კონსტრუირებულია სამი რამან-სისტემა: ორი ხილული და ერთი ინფრაწითელი. ხილული ორი სისტემა ერთმანეთისაგან მონოქრომატორებზე დაყენებული დიფრაქციული მესრებით განსხვავდება: თითოეულ მონოქრომატორზე ისეთი ოპტიკური პარამეტრების დიფრაქციული მესრებია დაყენებული, რომლებიც თავიანთი სპექტრალური დიაპაზონითა და სინათლის მაქსიმალური კონცენტრაციით ოპტიმალურია ამგზნები ლაზერების ტალღის სიგრძეების მიმართ. განვმარტოთ ეს ფორმულირება. მაგალითად, როდესაც გვაქვს რომელიმე ორმაგი სპექტრომეტრი, მას გააჩნია ტალღის სიგრძეთა ცვლის გარკვეული სპექტრალური ინტერვალი, რომელსაც განაპირობებს მასზე დაყენებული ორი დიფრაქციული მესერის ერთობლიობა. გარდა ამ პარამეტრისა, დიფრაქციული მესერის შტრიხის პროფილი განსაზღვრავს სპექტრალური უზნის იმ ინტერვალს, სადაც მაქსიმალურია დიფრაგირებული სინათლის ინტენსიობა. რამანის სპექტრი წარმოადგენს ამგზნები ლაზერის სიხშირისა და სტოქსის ან ანტისტოქსის სატელიტების სხვაობათა ერთობლიობებს. ეს სხვაობები ინფრაწითელი სიხშირეებია, რომლებიც ქიმიური ნივთიერების შემადგენელი მოლეკულების რხევათა დინამიკას ახასიათებს; კერძოდ, ისინი მიეკუთვნება გარკვეულ ქიმიურ ფუნქციონალურ ჯგუფს და მათი იდენტიფიკაციისათვის გამოდგება. ყველაზე მაღალი სიხშირე, დაახლოებით,  $3800 \text{ სმ}^{-1}$  გააჩნია O-H ფუნქციონალურ ჯგუფს. სხვა ძირითადი ფუნქციონალური ჯგუფების სიხშირეები, მაგალითად, C-H, N-H, C=S, S-H, C-O, C-C და ა. შ., უფრო დაბალ სიხშირეებზე ფიქსირდება. ამიტომ ყველა ქიმიური ფუნქციონალური ჯგუფის რეგისტრაციისათვის ისეთი დიფრაქციული მესერი უნდა დავაყენოთ ორმაგ სპექტრომეტრზე, რომ სპექტრალურმა უზანმა გადაფაროს დიაპაზონი  $-4000 \text{ სმ}^{-1}$ -იდან  $+4000 \text{ სმ}^{-1}$ -მდე. ასეთ შემთხვევაში დავაფიქსირებთ ყველა ფუნქციონალური ჯგუფის როგორც სტოქსის რამანის სატელიტებს, ასევე ანტისტოქსისასაც. პრაქტიკაში წერენ ძირითადად მხოლოდ სტოქსის სპექტრებს. ე. ი. გვჭირდება დიაპაზონი 0-იდან  $4000 \text{ სმ}^{-1}$ -მდე.  $4000 \text{ სმ}^{-1}$  საკმაოდ დიდი ინტერვალია და თუ გვინდა ამგზნებ წყაროდ რამდენიმე სხვადასხვა ტალღის სიგრძის ლაზერის გამოყენება, ერთი მესერით ამ დიაპაზონის გადაფარვა ძნელია; შტრიხის პროფილი ამის საშუალებას არ იძლევა: დიფრაქციული მესერის ერთი პროფილის შტრიხით გაბნეული სინათლის მაქსიმალური კონცენტრაცია საკმაოდ ვიწრო სპექტრალურ უზანში ხდება. სპექტროსკოპიაში მიღებულია, რომ არეკლვითი დიფრაქციული მესერის არეკლვის კოეფიციენტის მაქსიმუმი 80%-ზე მეტი ვერ იქნება (ალუმინის დანაფარის შემთხვევაში), თუგინდ მისი ზედაპირი სპეციალური ტექნოლოგიით იყოს დამუშავებული; ასეთი მესერის არეკლვის კოეფიციენტი სპექტრის ორივე მხარეს (სტოქსი, ანტისტოქსი) არ უნდა იყოს 30%-ზე ნაკლები მაინც, რათა ასეთი სპექტრომეტრი გამოვიყენოთ ლაზერულ რამან-სპექტროსკოპიაში ნორმალური ინტენსიობის რამან-სპექტრების ჩასაწერად.

ზემოთ მოყვანილ სპექტროსკოპულ თეორიულ დებულებათა საფუძველზე, იმისათვის, რომ ეფექტურად გამოვიყენოთ ჩვენს მიერ რამან-სპექტრების ასაგზნებად გამოიზნული ყველა ლაზერის გამოსხივების სხვადასხვა ტალღის სიგრძეები, (ცხრილი 1), ავაგეთ სამი სხვადასხვა ოპტიკური მახასიათებლის მქონე ლაზერული რამან-სისტემა. თითოეული ეს სისტემა გამოიზნულია გარკვეული ჯგუფის ლაზერებთან ერთობლიობაში სამუშაოდ ისე, რომ არ შეეცვალოთ ორმაგი მონოქრომატორების დიფრაქციულ მესერთა ბლოკები. ასეთი მეთოდი, რასაკვირველია, უფრო ძვირი სიამოვნებაა და შრომატევადია, მაგრამ სამაგიეროდ ლაზერული სისტემის პარამეტრები უფრო სტაბილურია და თავად სისტემა უფრო ფართო დიაპაზონის ექსპერიმენტულ სამუშაოებს გვაძლევს. სპექტრალური დიაპაზონის ეფექტურად ვარიება სხვა მეთოდითაცაა შესაძლებელი, მაგალითად, ერთ სპექტრომეტრში დიფრაქციული მესრების ბლოკების ცვლილებით. ეს გაცილებით იაფია, განსაკუთრებით, ძვირადღირებული საღვარგარეთის ფირმების მიერ წარმოებული სტანდარტული რამან-სისტემებისათვის, მაგრამ არაა ისეთი რადიკალური, როგორც შესაძლებელია ჩვენი ლაზორატორიული ტიპის რამან-სისტემების გამოყენებით.

### 3.3 იწ-დისპერსიული ლაზერული რამან-სპექტრომეტრი

სპექტროსკოპიული მეთოდოლოგიის მოთხოვნები განსაკუთრებით მკაცრია ინფრაწითელი რამან-სპექტრომეტრებისათვის. როგორც ვიცით (ამაზე ადრეც გვქონდა ყურადღება გამახვილებული), რამანის გაზნევა ინტენსიობით მეტად სუსტი ეფექტია. ამიტომ, მისი რეგისტრირებისათვის, განსაკუთრებით, იწ ალგზნებით, აუცილებელია სისტემის ყველა ბლოკის ოპტიმიზაცია.

იწ-სპექტრომეტრი ავაგეთ შემდეგი ბლოკებით: ერთმოდინანი იწ-სპექტროსკოპიული ლაზერით  $YAG:Nd^{+}$ , რომლის გამოსხივებაა 1.06 მკმ, და სიმძლავრე 15 ვატი; ორმაგი სპექტრომეტრით DFS-12, დიფრაქციული მესერით 300 შტ/მმ. ამ მესერის შტრიხების პროფილი ისეა მოჭრილი, რომ მათ მიერ კონცენტრირებული გაზნეული სინათლის ინტენსიობის მაქსიმუმი მოთავსებულია დაახლოებით 2 მკმ-ის მახლობლობაში. ეს შესანიშნავი პირობაა  $YAG:Nd^{+}$  ლაზერის გამოსხივებით სტოქსის რამან-გაზნევის სპექტრების ჩასაწერად. მხოლოდ დიფრაქციული მესერის ოპტიმიზაცია არაა საკმარისი იწ-რამანის სპექტრომეტრის ფუნქციონირებისათვის. ადრე ჩვენ რამდენიმეჯერ გავუსვით ხაზი რამანის გაზნევის მთავარ პრინციპს – გაზნევის ინტენსიობის ამგზნები სიხშირის მე-4 ხარისხთან პროპორციულობას. ეს პრინციპი გვაძლავდებულებს გამოვიყენოთ ამგზნები იწ-ლაზერის დიდი სიმძლავრეები (რასაც ჩვენს მიერ კონსტრუირებული იწ-ლაზერი მთლიანად უზრუნველყოფს); სუსტი სიგნალის დასაფიქსირებლად გამოვიყენეთ ახლო ინფრაწითელი უბნის, 1.06 მკმ მახლობლობაში მაქსიმალურად მგრძნობიარე დეტექტორი, FEU-83. დეტექტორის პრობლემა იწ-რამან-სპექტრომეტრისათვის ყველაზე მთავარი და გადამწყვეტია. ამიტომ ეს საკითხი უფრო დაწვრილებით განვიხილოთ.

ახლო იწ-უბანი 1-2.5 მკმ სუსტი სიგნალების დაფიქსირების თვალსაზრისით რთულია. ეს განპირობებულია იმ მიზეზით, რომ 1..2 მკმ-ის შემდეგ ყველაზე მგრძნობიარე დეტექტორების, ფოტოგამამრავლებლების მგრძნობიარობა მკვეთრად ეცემა და მათი კლასიკური, მეტალის კათოდები ამ სპექტრალურ უბანში ოთახის ტემპერატურაზე თითქმის ვეღარ აფიქსირებს სუსტ ოპტიკურ სიგნალებს. რაც შეეხება სხვა ტიპის,

ნახევარგამტარულ (ფოტოწინააღმდეგობები, ფოტოდოდები) დეტექტორებს, ისინი ნაკლებეფექტურია. ამ პრობლემის გადაჭრა რაღაც დონეზე შეიძლება მხოლოდ ფეგ-ს კათოდის გაციებით. ოპტიმალური გაციებისას მკვეთრად მცირდება ფეგ-ს ხმაურის მთავარი კომპონენტი, სიბნელის დენი. ამიტომ ამ რეჟიმში ფეგ-ს შეუძლია იმ რამდენ-სიგნალების დაფიქსირება, რომლებსაც ოთახის ტემპერატურაზე ვერ გრძნობს. ამ მიზნით ავაგეთ სამი კრიოგენული, სპეციალური კონსტრუქციის კრიოსტატი, რომლებიც ერთმანეთისაგან განსხვავდება ფეგ-ს კათოდის გაციების სხვადასხვა პრინციპით.

პირველი კრიოსტატის მოქმედების პრინციპია ფეგ-ის კათოდის მჭიდრო კონტაქტი კრიოსტატის სიცივის გამტარ სპილენძის ბლოკთან. სპილენძის ბლოკსა და ფეგ-ის კათოდის მინის კოლბის ნაწილს შორის სიცივის გადატანის გასაძლიერებლად ვიყენებთ ვაკუუმურ საცხს. კრიოსტატის მოცულობაში მაღალი ვაკუუმის  $10^{-5}$  მმ ვ. წ. ს. დამყარების შემდეგ, აზოტის პერანგში ვასხამთ თხევად აზოტს და გარკვეული დროის შემდეგ სპეციალური კონსტრუქციის სპილენძის გაცივების გამტარი ბლოკი იძენს სტაბილურ დაბალ ტემპერატურას. ეს ტემპერატურა ვაკუუმური საცხის წყალობით სწრაფად გადაეცემა ფეგ-ის კათოდს. ის გარემოება, რომ ფეგ მუშაობს მაღალი ძაბვის გამყოფი ბლოკის მეშვეობით და ძაბვის გამყოფი ბლოკის წინააღმდეგობები ფეგ-ის კოლბასთან ახლოსაა, ქმნის გარკვეულ სირთულეებს. ჩვენი ერთერთი კონსტრუქციით, ფეგ-ი მთლიანად, ძაბვის გამყოფი ბლოკიანად მოთავსებულია კრიოსტატის მოცულობაში და იმყოფება მაღალი ვაკუუმის პირობებში. ასეთი კონსტრუქციის კრიოსტატის გამოყენებისას საჭიროა მაღალი ვაკუუმის მუდმივად კრიტიკულ საზღვრებში შენარჩუნება. თუ ვაკუუმის ნებისმიერი მიზეზის გამო ოდნავ მაინც ამ კრიტიკულ ზღვარს დაბლა დაეცა, მოქმედებას იწყებს მაღალი ძაბვის განმუხტვისას მომქმედი გაზური იონიზაციის კანონები და ფეგ-ის მუშაობა მკვეთრად არასტაბილური ხდება. ამ შემთხვევაში სწრაფად უნდა გავაუმჯობესოთ მაღალი ვაკუუმი. ამ სიძნელეებისა და კაპრიზების მოსახსნელად ჩვენ შევქმენით ფეგ-ის კათოდის აზოტით გაცივების იგივე პრინციპზე მომუშავე, მაგრამ კონსტრუქციულად განსხვავებული კრიოსტატი, რომელშიც მაღალ ვაკუუმში იმყოფება ფეგ-ის კოლბის მხოლოდ კათოდური და დინოდური მცირე ნაწილი. კოლბის ის ნაწილი, სადაც მაღალი ძაბვის გამყოფი ბლოკის შემადგენელი წინააღმდეგობები, კონდენსატორები და ანოდური დატვირთვის წინააღმდეგობაა დამონტაჟებული, ვაკუუმის გარეთაა, ატმოსფერული წნევის პირობებში. კონსტრუქციულად ეს ორკამერიანი გაყოფა გადაწყვეტილია კოაქსიალური, მძლავრი, ერთიანი, სპეციალური რეზინის ვაკუუმური მანჟეტით. პრაქტიკამ გვაჩვენა, რომ ასეთი კონსტრუქციისას დიდი მნიშვნელობა აქვს ფეგ-ის კოლბის კათოდური ნაწილის მჭიდრო, მაგრამ მოზომილ კონტაქტს სპილენძის მეტალის გაცივების გადამტან ბლოკთან. ეს პრობლემა გადავწყვიტეთ სპეციალური ზამბარული ფიქსატორების საშუალებებით. ფეგ-ის გაციების ეს სისტემა, ალბათ, უფრო პროგრესულია. ამასთან, ჩვენ შევქმენით ისეთი კონსტრუქცია, რომ კათოდი რაც შეიძლება ახლოს იყოს კრიოსტატის ოპტიკური კვარცის ფანჯარასთან, საიდანაც ფეგ-ის კათოდს სპექტრომეტრის გამოსასვლელი ხვრელიდან გამოსხივების სიგნალი ეცემა. ასეთი კონსტრუქცია არ ქმნის გამოსასვლელი ხვრელიდან უკვე მცირე მანძილზე მყოფი ფეგ-ის კათოდზე სუსტი სიგნალის დამატებითი ლინზით ფოკუსირების საჭიროებას, რაც სიგნალის დანაკარგების კიდევ ერთი წყაროა. რადგანაც ცივი კათოდი კრიოსტატის კვარცის ფანჯარასთან (საიდანაც სიგნალი კათოდს ეცემა) ძალიან ახლოსაა, მაღალი

ვაკუუმის შემთხვევაშიც კი, რადიაციულ თბოგადაცემის ხარჯზე კრიოსტატის კვარცის ფანჯარაზე კონდენსირდება ატმოსფეროს თბილი ჰაერი, რაც სიგნალის ინტენსიობას მკვეთრად ამცირებს. ამის გამო გარედან კრიოსტატის კვარცის ამ ფანჯარას სპეციალური მოწყობილობიდან ვუბერავთ თბილ ჰაერს და ფანჯარა მუდმივად სუფთა და გამჭვირვალეა. მიინდა აღვნიშნო, რომ, როდესაც მე ეს კონსტრუქცია შევქმენი, ანალოგიურ პრინციპებზე მომუშავე ფეგ-ის გამაცივებელი კრიოსტატები მსოფლიო ლიტერატურაში არ შემხვედრია. მაშინაც და ახლაც უფრო გავრცელებულია შედარებით უფრო მარტივი კრიოსტატები, რომლებიც მუშაობს თხევადი აზოტის ორთქლის შებერვის ციკლით.

ჩვენ ავაგეთ თხევადი აზოტის ორთქლის შებერვის ციკლზე მომუშავე ფეგ-ის გაციების კრიოსტატიც. ამ კონსტრუქციის კრიოსტატის ზოგადი პრინციპები ცნობილია, ჩვენ მხოლოდ ერთი სიახლე შემოვიტანეთ. ესაა ატმოსფეროდან ფეგ-ის ცივი კათოდის ისეთი კონსტრუქციით იზოლაცია, რომელიც კათოდს დიდი მანძილით არ დააშორებდა სპექტრომეტრის გამოსასვლელ ხვრელს. ესაა კვარცის მინისაგან დამზადებული ორმაგი კედლებიანი სპეციალური ჭიქა, თერმოსტატი. ამ ჭიქის ძირი შექმნილია ორი ოპტიკური კვარცის 80 მმ დიამეტრისა და 2.5 მმ სისქის ფანჯრისგან. ეს ორი ფანჯარა მკაცრად პარალელურად, ერთმანეთისაგან მცირე მანძილის დაშორებით, დაახლოებით 5-8 მმ, შედუღებულია კვარცის მილებთან ისე, რომ მთლიანობაში ქმნის ორმაგ კედლიან ჭიქას. სანამ საბოლოოდ შედუღდება, ჭიქის კედლებს შორის სივრცე ევაკუირებულია ჰაერისაგან და მასში დამყარებულია მაღალი,  $10^{-5}$  მმ ვ. წ. ს. ვაკუუმი. ეს თერმოსტატი-ჭიქა ძალიან მჭიდროდ ჩაპრესილია პენოპლასტის სექციონირებულ გარსში, რომელსაც თავის მხრივ მჭიდროდ ეკვრის გარეთა მეტალის გარსი, ფეგ-ის ეკრანი. ფეგ-ი თავისი მაღალი ძაბვის გამყოფი ბლოკით მოთავსებულია ამ ჰერმეტიკულ გარსთა ერთობლიობაში. გარსის შიგნითა სივრცეში მილით, გარკვეული დოზირებით, მიეწოდება თხევადი აზოტის ორთქლი აზოტის დიუარიდან. მეორე მილის საშუალებით კრიოსტატიდან ჯერ ჰაერი, და შემდეგ აზოტის ნახშირი ორთქლი, გამოიღვენება ატმოსფეროში. ასეთი ციკლით ცივდება როგორც ფეგ-ის კათოდი, ასევე მისი ძაბვის გამყოფი. თერმოსტატი-ჭიქის ჩვენეული კონსტრუქციის წყალობით კათოდი ახლოსაა სპექტრომეტრის გამოსასვლელ ხვრელთან და ამიტომ დამატებითი ლინზის დაყენება არაა საჭირო. ერთადერთი, რასაც კონსტრუქცია საჭიროებს, ესაა შესასვლელი კვარცის ფანჯრების შებერვა თბილი ჰაერით, კონდენსაციის თავიდან ასაცილებლად. კონდენსაციის პრობლემას გავრცელებულ მსგავს კონსტრუქციებში აგვარებენ ფანჯარასთან დამონტაჟებული მინი-ლუმელებით, მაგრამ ჩვენი აზრით თბილი ჰაერით შებერვა უფრო მოხერხებულია, კონსტრუქციაც არაა გადატვირთული.

ჩვენს იწ-რამან-სპექტრომეტრზე სიგნალის ჩასაწერად ვიყენებთ იწ-ფეგს FEU-83. მისი გაციებით ჩვენი კრიოსტატების საშუალებით მივაღწიეთ სიბნელის დენის შემცირებას სამი რიგით. პარალელურად, ღრმა გაციებისას, დაახლოებით სამჯერ ეცემა სასარგებლო სიგნალის ინტენსიობაც. ე. ი. ჩვენს მიერ კონსტრუირებული კრიოსტატების წყალობით FEU-83 სიგნალთან ხმაურის შეფარდება გავაუმჯობესეთ დაახლოებით 300-ჯერ. ასეთი კონსტრუქციის იწ-რამან სპექტრომეტრზე დამონტაჟებამ რამანის გაბნევის სპექტრების დაფიქსირების საშუალება მოგვცა. სხვა შემთხვევაში, ფეგ-ის კათოდის გაცივების გარეშე ეს შეუძლებელია.



მესამე ბლოკი, რომელიც ჩვენს მიერ კონსტრუირებულ იწ-რამან-სპექტრომეტრს ხილულისაგან განასხვავებს, გაბნეული სინათლის შემკრები ოპტიკაა. ამ კონსტრუქციის სპექტრომეტრში იგი მხოლოდ კვარცისაა, მაშინ, როდესაც ხილულ სპექტრომეტრში მინის ოპტიკაც შეგვიძლია გამოვიყენოთ. შემკრები ოპტიკის გარდა კვარცისაა აგრეთვე ყველა სახის კრიოგენული კრიოსტატის ფანჯარაც.

ამჟამად მსოფლიოში ლაზერულ რამან-სპექტროსკოპიაში რამან- სპექტრების ასაგზნებად ფართოდ იყენებენ ინჟექციურ ნახევარგამტარულ დიოდურ ლაზერებს. ამ ლაზერების პარამეტრები ახლა სრულიად აკმაყოფილებს კარგი ხარისხის რამან-სპექტრების ჩაწერის მოთხოვნებს. ეს მიმართულება ერთერთი ყველაზე საჭირო და გავრცელებული მიმართულებაა. ასეთი ლაზერული ტექნოლოგიებით ამჟამად ეფექტურად იკვლევენ სამედიცინო, ბიოლოგიური, ფარმაცევტული, ეკოლოგიური ობიექტების, კვების პროდუქტებისა თუ ხელოვნების ნიმუშების რამან-სპექტრებს.

ცნობილია, რომ ფირმები აწარმოებენ და ყიდიან ახლო იწ-უბანში საკმაოდ მგრძობიარე ნახევარგამტარულ დეტექტორებს; მათგან CCD ყველაზე ძვირია. გარდა ამისა, იწ-რამან-სისტემებში დისპერსიული ბლოკის ფუნქციას ძირითადად ასრულებს ინტერფერომეტრები და სპექტრები იწერება ფურიე-გარდაქმნის პრინციპით.

მე ამ შრომაში აღვწერე ჩვენს მიერ აგებული ისეთი ლაზერული ლაბორატორიული რამან-სისტემები, რომელთა შექმნა გაცილებით იაფი, მარტივი და ხელმისაწვდომია ამ მეთოდით დაინტერესებული მეცნიერთათვის. გარდა ამისა, ჩვენი კონსტრუქციის იწ-ლაზერული რამან-სისტემა გარკვეული ამოცანებისათვის უფრო ეფექტურია, რადგანაც იგი აგებულია დისპერსიული ოპტიკის საფუძველზე; ეს სისტემის მგრძობიარობას უფრო ზრდის. ამგზნები წყაროსა და სიგნალის დეტექტორების მცირე მოდიფიკაციის შემდეგ ჩვენი კონსტრუქციის იწ-ლაზერული რამან-სისტემა კიდევ უფრო ეფექტური გახდება.

## დასკვნა

მოკლედაა განხილული რამანის გაბნევის აღმოჩენისა და განვითარების ისტორია, ძირითადი თეორიული დებულებანი, ტექნიკისა და მეთოდოლოგიის განვითარების ეტაპები.

დეტალურადაა აღწერილი ჩვენს მიერ საქართველოში პირველად აგებული სამი სხვადასხვა ლაბორატორიული ტიპის ლაზერული რამან-სისტემის კონსტრუქცია და მათი დანიშნულება.

პირველი ლაზერული რამან-სისტემა აგებულია ორმაგი მონოქრომატორის DFS-12 ბაზაზე. ამ მონოქრომატორში დამონტაჟებულია ორი დიფრაქციული მესერი შემდეგი პარამეტრებით: 600 შტ/მმ; შტრიხების პროფილი განაპირობებს სინათლის მაქსიმალურ კონცენტრაციას სპექტრის ყვითელ-წითელ უბანში; მესერი მუშაობს დიფრაქციის პირველ რიგში და სპექტრალური დიაპაზონი განისაზღვრება ინტერვალით, დაახლოებით 350 – 1200 ნმ, დისპერსია ტოლია 1 ნმ/მმ. სიგნალის მიმღებად ვიყენებთ ფეგ-ს მრავალტუტემეტალიანი კათოდით FEU-79. ამგზნები ლაზერების გამოსხივება ხილულ არეშია.

მეორე ლაზერული რამან-სისტემა აგებულია ორმაგი მონოქრომატორის DFS-24 ბაზაზე. ამ მონოქრომატორის დიფრაქციული მესრების პარამეტრებია: 1200 შტ/მმ,

სინათლის მაქსიმალური კონცენტრაცია სპექტრის იისფერ-ლურჯ უბანში, მუშაობს სპექტრის პირველ რიგში, სპექტრალური დიაპაზონია 300 - 850 ნმ, დისპერსია 0.45 ნმ/მმ. სიგნალის მიმღებად ვიყენებთ ფეგ-ს მრავალტუტემეტალიანი კათოდით FEU-79. ამგზნები ლაზერების გამოსხივება ხილულ არეშია განლაგებული.

მესამე, ინფრაწითელი ლაზერული რამან-სისტემა აგებულია ორმაგი მონოქრომატორის DFS-12 ბაზაზე მესრების შემდეგი პარამეტრებით: 300 შტ/მმ, სინათლის მაქსიმალური კონცენტრაცია სპექტრის ახლო ინფრაწითელ 2 მმკ უბანში, მუშაობს სპექტრის პირველ რიგში, სპექტრალური დიაპაზონია 1 - 3 მმკ და დისპერსია დაახლოებით 1.5 ნმ/მმ ტოლია. სიგნალის მიმღებად ვიყენებთ ფეგ-ს ცეზიუმ-ჟანგადის კათოდით FEU-83. ამგზნები ლაზერის გამოსხივება ინფრაწითელ არეშია 1.06 მმკ და ვიყენებთ YAG:Nd<sup>+</sup> ძოწის ჩვენი კონსტრუქციის ლაზერს.

### ლიტერატურა

1. Raman C. V., Krishnan K. S.. A New Type of Secondary Radiation, Nature, (1928), **121**, 501-502
2. Мандельштам Л. И.б Ландсберг Г. С., Новое явление при рассеянии света, ЖРФХО, (1928), **60**. 335-336,
3. Рассеяние света в твердых телах, под редакцией М, Кардона, Москва, "Мир", 1979
4. M.Cardona, in Light Scattering in Solids II, edited by M. Cardona (Springer, Heidelberg, 1982)
5. А.Пуле, Ж.П.Матье Колебательные спектры и симметрия кристаллов. М., Мир, 1973
6. С.А.Argurillo, D.L.Rousseau, and S.P.S.Porto, First-Order Raman Effect in Wurtzite-Type Crystals, Physical Review, (1966), **181**, 1351-1363

---

**Article received: 2009-12-23**