OPTİK MÜHİLƏRDƏ OPTO-AKUSTİK EFFEKTLƏR

M.A. MUSAYEV

Azərbaycan Dövlət Neft Akademiyası, AZ-1010, Bakı, Azadlıq pr., 20

Göstərilmişdir ki, optoakustik mikroskopun konfokal sxemi mikron tərtibində yüksək ayırdetmə qabiliyyətinə malikdir və texniki əldə oluna bilən v $\approx 10^5 \div 10^7$ Hs səs tezliyində buna nail olmaq mümkündür. Müəyyən olunmuşdur ki, konfokal optoakustik mikroskopda dərinliyə görə yüksək ayırdetmə əldə etmək üçün siqnalın biləvasitə qeydindən istifadə etmək, optik bircinsliliyi ayırmaq üçün isə siqnalın birbaşa qeydindən faydalanmaq yararlıdır. İki qeyd olunma sxeminin birgə işlənməsi obyektin istilik xassələrinin qeyri-bircinsliyini və işığın optik udulma əmsalını təyin etməyə imkan verir. Birbaşa eksperimental tədqiqatlarla müəyyən olunmuşdur ki, optik udulma əmsalının yayılması akustik siqnalın formasını müəyyən edir.

Lazerlərin kəşf olunma anından şüalanmanın maddə ilə qarşılıqlı əlaqəsi müasir fizikanın ən çox öyrənilən və mühüm problemlərindən biridir. İntensiv şüalanmanın maddə ilə qarşılıqlı əlaqəsi hadisələrinə əsasən öz təbiətinə və tədqiqat metoduna görə fərqlənən bir çox müxtəlif effektlər aiddir. Bu cür hadisələr arasında ən aktualı qeyri-xətti optik və optoakustik hadisələrdir.

Akustik dalğalar dəyişən xarici təsirə mühitin təbii reaksiyasıdır. Ümumi səkildə söylənilən bu qaydanın təzahürlərindən biri opto-akustik effekti - mühitdə səs həyəcanlanması effektidir ki, bu zaman mühit dəyişən işıq selinin təsirinə məruz qalır. Lazer şüalanmasının mühitə təsiri zamanı səs həyəcanlanması müxtəlif mexanizmlər hesabına ola bilər. İşığın udulması hesabına mühitin qızması prossesi, həmçinin akustik dalğaların generasiyası və yayılması həlledici şəkildə termoelastik və digər fiziki xarakteristikalardan asılıdır. Opto-akustik siqnalı qeyd edərək nümunənin bu xarakteristikalarını, o cümlədən səsin sürətini, elastikliyini, sıxlığını, qalınlığını, xüsusi istilik tutumunu ölçmək, həmçinin onun dispersliyi, krisstallığı, faza halı kimi xassələrini tədqiq etmək olar. Müxtəlif aqreqat hallarında yerləşən maddələrin fiziki xassələrinin qeyri-dağıdıcı metodlarla tədqiqi müasir fizikanın aktual istiqamətlərindən biridir. Opto-akustik effektlərə əsaslanan metodlar bir çox kondensə olunmuş mühitlərin tədqiqində spektroskopik və mikroskopik məsələlərin həlli zamanı böyük üstünlüyə malikdir. Əsas etibari ilə bu opto-akustik effektlərə əsaslanan metodların geniş spektral diapazonda yüksək həssaslığı, analiz olunacaq maddənin zəruri miqdarının az olması, istənilən aqreqat halda tədqiqata yararlılığı və dərinliyə görə mühitin xarakteristikalarının geyri-dağıdıcı üsulla analizinin aparılması ilə səciyyələnir.

Bu işdə məqsəd qeyri-bircins mühitdə opto-akustik siqnalın formalaşması prosesinin öyrənilməsi, optik mühitlərdə səth təbəqələrinin qeyri-bircinsliyinin diaqnostikası və tədqiqi olmuşdur.

Mühitin opto-akustik xassələrinin tədqiqi sxemi şəkil 1-də göstərilən qurğuda aparılmışdır. Optik şüalanma mənbəyi timsalında 1,06mkm dalğa uzunluğunda işləyən impulslu neodim lazeri və ya impulslu CO₂ lazeri olmuşdur.

Həyəcanlanma Nd^{3+} ionlarını ${}^{4}I_{9/2}$ - əsas halından

yuxarı səviyyə rolunu oynayan, nisbətən dar zolağa keçirir. Zolağlar biri-birini örtən həyəcanlanmış halların yaxınlığında yaranır. Həyəcanlanmış zolaqdan ${}^{4}F_{3/2}$ -metastabil səviyyəsinə həyəcanlanma enerjisinin sürətli ötürülməsi baş verir. Şüşədə bu səviyyənin yaşama müddəti 0,7msan təşkil edir. ${}^{4}F_{3/2} \rightarrow {}^{4}I_{11/2}$ ($\lambda \approx 1,06$ mkm) lazer keçidi ən böyük ehtimala malikdir. ${}^{4}I_{11/2}$ və ${}^{4}I_{9/2}$ halları arasındakı təxminən 2000 sm⁻¹-ə

bərabər olan energetik aralıq neodim lazerin dördsəviyyəli xarakterini təmin edir [1].



Şəkil 1. Mühitin opto-akustik xassələrinin tədqiqi üçün eksperimental qurğunun sxemi.

Neodim lazeri impulsunun davam etmə müddəti və enerjisi uyğun olaraq ~20 nsan və ~5 mC təşkil edir. Yarımşəffaf lövhənin 2 köməyi ilə şüalanmanın bir hissəsi (şəkil 1) C9-8 növlü 5 – yadda saxlayan ossilloqrafin işə salınması üçün xidmət edən 6 – fotoqəbuledicisinə istiqamətlənir. Şüalanmanın digər bir hissəsi isə tədqiq olunan mühitlə dolu olan 4 küveytinə yönəldilir.

Ölçülən kəmiyyətlərin temperatur asılılığının tədqiqi üçün sxemi şəkil 2-də göstərilən xüsusi bir küveyt işlənib hazırlanmışdır. Küveyt latundan hazırlanmışdır. Xarici səthdə termostatlaşdırma üçün nəzərdə tutulmuş köynəklərin birləşdirilməsindən ötrü 1 sıxacları vardır. Termostatlaşdırıcı köynəklə küveytin xarici və daxili səthləri arasındakı məsafə 15mm-ə bərabərdir ki, bu da temperaturun cəld şəkildə bərabərləşməsini təmin edir. Küveytin dibindəki pəncərəyə akustik signalın gəbuledicisi rolunda çıxış edən niobat-litium əsasında 3 dempfer lövhəsi yapışdırılmışdır. Akustik gəbuledicinin rezonans tezliyi ~39MHs təskil edir. Praktik olaraq lazer şüalanması udulmayan və mühitin özündə akustik dalğaların generasiyası baş verməyən, neodim şüalanması üçün şəffaf mühitdə səs sürətinin ölçülməsi üçün mühitlər səthində xlorlu mis sulu məhlulunun 4 nazik təbəqəsi yerləşdirilir. Qalınlığı ~1,5mm-dən çox olmayan bu təbəqə 5 tədqiq olunan mühitlə yaxşı akustik kontaktda yerləşir və akustik generator rolunu oynayır. Onları nazik 6 teflon təbəqəsi ayırır.

Xlorlu mis məhlulu təbəqəsinin üzərinə lazer şüalanması üçün şəffaf olan şüşə təbəqə qoyulmuşdur. Ölçmələr göstərmişdir ki, CuCl₂ məhlulunda lazer şüalanmasının udulma əmsalı ~50sm⁻¹ təşkil edir. Lazer şüalanması xlorlu mis məhlulunda praktik olaraq təmamilə udulur və akustik dalğa yaradır, hansı ki, sonradan tədqiq olunan mühitdə yayılır.

Bizim eksperimentdə [2] üzərində müxtəlif qalınlığa malik silisium oksidi təbəqələri olan silisium nümunələri tədqiq olunmuşdur. Silisium tərəfdən işığın yüksək udulma əmsalına malik olmaq üçün Nd-YAG-lazerin şüalanmasında ikinci harmonika impulslarından istifadə olunmuşdur.

İlkin olaraq SiO₂ şəffaf təbəqəli silisium üçün spektral funksiyanın bəzi qiymətləndirilməsini aparaq. Silisium üçün işığın udulma əmsalı $\alpha \sim (10^4 \div 10^5)$ sm⁻¹ təşkil edir, pyezoqəbuledicinin tipik rezonans tezliyi isə f=0,54 MHs. Xarakterik ω , ω_a , ω_T tezlikləri qiymətləndirək.

$$\omega = 2\pi f = 3,39 \cdot 10^6 \text{ Hs}$$
$$\omega_a = \alpha c_\ell = (10^{10} \div 10^{11}) \text{ Hs}$$
$$\omega_m = \alpha^2 \chi \sim (10^8 \div 10^{10}) \text{ Hs}$$

 ω_{a} , $\omega_{T} >> \omega$ olduğundan siqnal əsasən istilikkeçiriciliklə təyin olunacaqdır. Lazer impulsunun təsiri altında həyəcan-

lanan istilik dalğasının uzunluğu
$$L_m = \sqrt{\frac{\chi}{\pi f}} \approx 10^{-3}$$
 sm-ə

bərabərdir. İstilik genişlənməsinin bu tezlikdə spektral funksiyaya tövhəsi ümumi siqnalda 20%-i aşmır. Spektral funksiya aşağıdakı görünüşü alır:

$$K(f = 0.54 \text{ MHs}) \approx \frac{\beta}{\rho_2 c_{p_2} (1 + \rho_2 c_{\ell_2} / \rho_1 c_{\ell_1})} \sqrt{\frac{\chi_1}{\chi_2}}$$
(1)

(1) tənliyini analiz edərək, belə bir nəticəyə gəlirik ki, siqnalın amplitudu λ -istilikkeçiriciliyindən asılıdır.



Şəkil 2. Səs sürətinin temperaturdan asılılığını tədqiq etmək üçün işlənib hazırlanmış küveytin sxemi.

Silisiumun səthi üzərində SiO₂ təbəqəsinin maksimal qalınlığı h=0,2mkm-ə bərabərdir. $k_2h\sim0.421$ olduğundan termik nazik və termik qalın təbəqələr arasında aralıq halına baxırıq:

$$\frac{|k_3|}{k_{30}} = \frac{1 + b_{13} - i n_{2l} k_{\ell_2} h + n_{3l} \sqrt{i\omega / \omega_{03}}}{n_{3l}} (1 + i \frac{n_{2l}}{n_{3l}} k_{\ell_2} h)$$
(2)

$$k_{30} = \frac{\beta_3^*}{\rho_3 c_{p3}}$$

Eksperimental qurğunun sxemi şəkil 3-də təsvir olunmuşdur [2, 3]. 1 generatorun impulsu 2 tezlik ikiləşdiricisinə istiqamətlənmişdir, əsas tezliyin ondan keçən şüalanması SZS-22 şüşəsindən ibarət 3 filtiri tərəfindən qarşısı alınır, ikinci harmonika impulsu isə tədqiq olunan 4 nümunəsinə istiqamətləndirilmişdir. Nümunənin arxa tərəfi 5 pyezoelementin üz tərəfi ilə akustik kontaktda yerləşir. Pyezoelementdən alınan siqnal V6-1 tipli 6 selektiv voltmetrin girişinə verilir ki, o da öz növbəsində bizim halda pyezoelementin 540kHs təşkil etdiyi rezonans tezliyinə köklənmişdir. Harmonikanın amplitudu 7 ossilloqrafi ilə qeyd olunmuşdur. Şərh olunan qurğunun köməyi ilə səs impulslarının səth həyəcanlanması hasil olunmuş və hər bir impulsun nisbətən aşağı tezlikli tərkib hissəsi qeyd edilmişdir. 1 generatoru bir eninə modalı rejimdə işləyir və 6 - 8% səviyyədə enerji stabilliyinə malik olmuşdur. İkinci harmoniyanın enerjisi 5 - 10 mC təşkil etmişdir (müxtəlif seriyalarda). Şüalanma nümunəyə fokuslanmamış və ləkənin diametri 3mm olmuşdur. Siqnalın ortalaması 10 - 20 atəşlə aparılmış və onların qiymətlərində kənara çıxmalar lazer enerjisinin qeyri-stabilliyini aşmamışdır. Buna görə çıxış siqnalı seriyada orta impuls enerjisinə normalizə olunmuşdur.



Şəkil 3. Udulma mühiti səthində nazik optik şəffaf təbəqələrin OA-tədqiqi üçün eksperimental qurğunun sxemi:
1- Nd-YAG-lazer, 2 - tezlik ikiləşdirici, 3 - SZS-22 filtiri, 4 - tədqiq olunan nümunə, 5 - pyezoelement,
6 - selektiv gücləndirici V6-1, 7 - ossilloqraf.

Üzərinə 0,084mkm-dən 0,210mkm-ə qədər müxtəlif qalınlıqlı silisium oksid təbəqələri çəkilmiş silisium nümunələri tədqiq olunmuşdur. OA- siqnalın təbəqənin qalınlığından asılılığı şəkil 4-də verilmişdir. Bu qalınlıq diapazonunda təbəqələri termik nazik hesab etmək olmaz, belə ki, $k_2h = \sqrt{\omega/2\chi_2}h = 1.4 \cdot 10^4 \text{ sm}^{-1}h$ -in qiyməti 0,11dən 0,29-ə qədər arasında dəyişir. Lakin, istilik selinin təbəqəyə və havaya verilən nisbətən azlığından (M_{12}, M_{23}, M_{13} <-(1) istifadə edərək, (2) formulunu kifayət qədər sadələşdirmək olar

$$k_{3} = \frac{I_{3}\beta_{3}^{*}}{\rho_{3}c_{p_{3}}} \frac{b_{13}(1 - in_{21}k_{\ell_{2}}h) + n_{31}\sqrt{-i\omega/\omega_{03}}}{n_{31} - in_{21}k_{\ell_{2}}h}$$
(3)

Sabit ədədləri və tezliyin qiymətlərini yerinə qoyaraq, ötürücü funksiyanın modulunu taparaq, siqnalın amplitudunu təbəqənin qalınlığından gozlənilən asılılığını müəyyən etmək çətin deyil

$$A_n \sim (1 - 0, 43qh + 0, 66(qh)^2)^{1/2} \, sm^{-1},$$
 (4)

burada $q = n_{2l} k_{\ell_2} = 1, 7 \cdot 10^5 \text{ sm}^{-1}$.

Şəkil 4-də (4) formuluna uyğun olaraq eksperimental ölçülən qiymətlərə uyğun nöqtələri approksimə edən OAsiqnalın amplitudunun nəzəri asılılığı verilmişdir (bütöv xətt). Göründüyü kimi qrafikdə eksperiment xətaları tərtibində üstüstə düşmə qənaətbəxşdir.

(4) formulundan belə çıxır ki, təbəqənin kiçik
$$\frac{hn_{21}\omega}{c_{\ell_2}} < 1$$

qalınlığında siqnalın amplitudu onun qiymətindən asılı deyil, böyük qiymətlərində isə – praktik olaraq onunla mütənasibdir. Bu nisbi səth impendansının azalması ilə güclü udulma mühitində OA – siqnalın artması ilə bağlıdır. Bu metoddan istifadə imkanları onunla bağlıdır ki, siqnal təbəqənin qalınlığının akustik dalğanın uzunluğuna nisbətindən deyil, udulan mühitin nisbi impedansına hasilindən asılıdır. Beləliklə, nisbətən aşağı ultrasəs tezliklərində kifayət qədər nazik təbəqələri diaqnostika etmək imkanları yaranır.

Aydındır ki, siqnalın təbəqə qalınlığına qeyri-həssaslıq oblastını azaltmaq üçün qeyd olunan siqnalın tezliyini artırmaq zəruridir.

Beləliklə, yarımkeçirici səthində şəffaf təbəqələrin tədqiqi, xüsusən onun qalınlığının ölçülməsində yeni OA-tədqiqat metodu təklif olunur. Silisiumda OA-siqnalın amplitudunun səth üzərindəki silisium oksidin qalınlığından asılılığı tədqiq olunmuşdur, hansı ki, keyfiyyət etibari ilə nəzəri alınmış qiymətlərlə üst-üstə düşür [4, 3, 5].



Şəkil 4. Silisium səthi üzərində OA-siqnalın SiO₂ nazik təbəqəsinin qalınlığından asılılığı [2, 3]. Bütöv xətt – nəzəridir [4].

İşıqudulan bircinsliliyin opto-akustik diaqnostikası. Temperatur və işıqudulan bircinsliliklər akustik siqnalın formasını təyin etdiyindən, əks məsələni həll etmək ideyası yaranır – bu bircinsliliklərin diaqnostikası [6]. Bunun üçün istilik mənbələrinin ani şəkildə yayılması (udulan işığın sürəti müqayisə olunmaz dərəcədə səsin sürətindən böyükdür) ilə formalaşan sıxılma cəbhəsindən istifadə etmək məqsədəuyğundur. Sıxılma cəbhəsinin ardınca seyrəlmə cəbhəsi gəlir ki, bu zaman maye təbəqəsi səthinin əyilmələri ola bildiyindən, lazer impulsunun böyük sıxlıqlarında isə - istilik qeyri-xəttiliyi və səthdə buxar əmələ gəldiyindən udulma prosesi həmişə dəqiqliklə xarakterizə olunmur.

Fiksə olunmuş sərhədlərdə səs təzyiqinin zamandan asılılığı aşağıdakı kimi olacaqdır

$$p(\tau) = \frac{\beta I_0 c_0}{2\pi c_p} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \frac{\omega^2}{c_0^2}} \widetilde{f}(\omega) e^{-i\omega\tau} d\omega \quad (5)$$

Burada z – işığın nüfuzetmə dərinliyidir. Lazer şüalanması intensivliyi spektri bu cür ifadə olunacaqdır

$$\widetilde{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} f(t) dt , \qquad (6)$$

burada f(t) – lazer selinin intensivliyinin zamandan asılı olaraq dəyişməsini şərh edən bir funksiyadır.

(6) tənliyini (5)-də yerinə qoyaraq, $p(\tau)$ üçün aşağıdakı ifadəni almış oluruq

$$p(\tau) = \frac{\alpha c_0^2 \beta I_0}{2c_p} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp[-\alpha c_0 |\tau - t|] dt$$
(7)

Səsin qısa lazer impulsu $\alpha c_0 \tau <<1$ ilə həyəcanlanması zamanı işığın intensivliyinin spektral diapazonu ötürücü funksiyanın diapazonundan kifayət qədər geniş olur. Buna görə effektiv səs həyəcanlanması baş verən bütün tezliklər oblastında işığın intensivlik spektrini sabit hesab etmək olar. Bu halda sərbəst sərhəd üçün həyəcanlanan akustik dalğa bu formula ilə şərh olunur

$$p(\tau) = \frac{\alpha c_0^2 \beta \varepsilon_0}{2c_p} \cdot \begin{cases} \frac{1-N}{1+N} \cdot exp[\alpha(z-c_0 t)], \ z < c_0 t\\ exp[-\alpha(z-c_0 t)], \ z > c_0 t \end{cases}$$
(8)

 $(t=0 \text{ ant lazer impulsunun gəlməsinə uyğun gəlir). Burada$ $<math>\varepsilon_0 = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt$ şüalanma enerjisinin sıxlığıdır, $N = \frac{\rho_0 c_0}{\rho^{in} c_0^{in}}$ - akustik impedansların nisbətidir.

Bircins udulma (α =const) mühiti üçün $p(\tau)$ asılılığı universal xarakter daşıyır $p(\tau)$ ~exp($\alpha c_0 \tau$). Opto-akustik siqnalın profili şəkil 5-də göstərilən şəkildə olur. Bu ifadələrdən belə çıxır ki, dalğa opto-akustik mənbələrdən yayılaraq, istilik ayrılan oblastlarda mühitin teplofiziki parametrləri haqqında məlumat daşıyır. Akustik siqnalın formasını işığın udulması və temperaturun qeyri-bircinsliyi təyin edir. Buna görə də, əks məsələni həll edərək, akustik impulsun formasına görə bu udulma qeyri-bircinsliliyinin diaqnostikasını aparmaq mümkündür.



Şəkil 5. Bircins udulma mühiti üçün opto-akustik siqnalın profili

Kifayət qədər qısa lazer impulslarından istifadə edərkən, yəni $f(\omega)$ spektri ötürücü funksiyanın diapazonundan geniş olduqda, akustik impulsun cəbhə forması mənbəyin yayılmasını təkrarlayır

$$P(z) = A\alpha(z) \exp\left(-\int_{0}^{z} \alpha(\xi) d\xi\right), \quad (9)$$

burada $A = \frac{\beta c_0^2}{2c_p} \varepsilon_0$.

(9) tənliyi aşağıdakı kimi ifadə oluna bilər

$$P(z) = -A \frac{d}{dz} \left[exp \left(-\int_{0}^{z} \alpha(\xi) d\xi \right) \right]$$
(10)

Nəzərə alsaq ki, $P(\infty)=0$, (10)-dan alarıq

$$\int_{z}^{\infty} P(\xi) d\xi = A \exp\left(-\int_{0}^{z} \alpha(\xi) d\xi\right).$$
(11)

Sonuncu tənlikdən belə çıxır ki,

$$\alpha(z) = \frac{P(z)}{\int_{z}^{\infty} P(\xi) d\xi}.$$
 (12)

Beləliklə, bircinslilik halında və həcmi genişlənmə əmsalının $\beta(z)$ =const temperaturdan asılı olmadığı halında udulma əmsalının işığın nüfuzetmə dərinliyindən asılılığı (12) formulu ilə təyin olunur. Akustik siqnalın formasına görə udulma əmsalının işığın nüfuzetmə dərinliyindən asılılığının səpilməsini təyin etmək və qeyri-bircinsliliyin diaqnostikasını aparmaq. Qısa impulslar üçün bu metod istifadə baxımından spektrlərin analizinə nəzərən sa-dədir [7, 6, 8].

Şəkil 6-da əlavə olunmuş yağın səth sıxlıqlarının m

 $\rho_s = \frac{m}{S}$ müxtəlif qiymətlərində akustik siqnal cəbhəsinin

xarakterik ossilloqrammaları göstərilmişdir, burada m – yagın kütləsi, S – suyun sərbəst səthinin sahəsidir. Göründüyü kimi, ρ_s -in qiymətinin artması ilə akustik siqnalın cəbhəsi uzanır və təzyiqin artma formasının xarakteri eksponensial qanuna yaxınlaşır. Akustik siqnal cəbhəsinin formasının ρ_s – dən bu cür asılılığı, çox güman ki, onunla izah olunur ki, yağın kiçik konsentrasiyalarında səs generasiyası prosesində əsas rolu təmiz suda şüalanmanın udulması oynayır. Bizim eksperimentdə $\alpha c_0 \tau >> 1$ olduğundan, akustik siqnalın forması lazer impulsu əyrisinin törəməsi ilə təyin olunur və lazer impulsu ilə müqayisəli uzunluğa və kəskin cəbhəyə malikdir, yağın sonradan əlavə olunması səth ətrafi təbəqələrdə suyun həcmi tərkibinin azalmasına gətirir. Nəticədə lazer şüalanmasının α_{eff} effektiv udulma əmsalı və termooptik çevrilmə təbəqəsinin ötürücü funksiyası maksimuma malik olan $\omega_0 = \alpha_{eff} c_0$ tezliyi azalır.

Uyğun olaraq, bu akustik siqnalın ön cəbhəsinin tədricən uzanmasına gətirib çıxarmalıdır. Nəhayət, səthdə $\ell \geq \alpha_{yag}^{-l}$ qalınlığına malik yağ təbəqəsi yarandığı zaman, akustik siqnal cəbhəsində təzyiqin artım xarakteri eksponensial xarakter daşıyır ki, bu da yağda səsin generasiyasına uyğun gəlir.



Şəkil 6. Müxtəlif ρ_s - (q/sm²) –də akustik siqnal cəbhələrinin xarakterik ossilloqramları: ρ_s - (q/sm²): 1 – 0,006, 2 – 0,021, 3 – 0,033, 4 – 0,087.

Şəkil 7-də uyğun ossilloqramların işlənməsindən alınmış udulma əmsalının $\alpha(x)$ asılılığı göstərilmişdur. Bütün əyrilər üçün xarakterik cəhət odur ki, dərinliyin artması ilə $\alpha(x)$ artır. Bu zaman $\alpha(x)$ -in ən kiçik qiyməti bilavasitə səth yaxınlığında müşahidə olunur. ρ_s -in qiymətinin artması ilə $\alpha(x)$ in artımı daha axımlı olur.



Şəkil 7-dən belə alınır ki, $\rho_s \ge \rho_s^k \sim 0.03 \text{ q/sm}^2$ qiymətlərində elə bir dərinlik mövcuddur ki, bu zaman $\alpha(x)$ praktik olaraq dəyişmir və uyğun $\alpha \sim 60 \text{ sm}^{-1}$ qiyməti təmiz yağda α -ın qiyməti ilə üst-üstə düşür. Güman olunur ki, bu cür hallarda suyun səthində yağ təbəqəsi yaranmağa başlayır ki, praktik olaraq bütün lazer şüasını udur və səsin generasiyası başlayır. $\rho_s \le \rho_s^k$ olduqda sabit $\alpha(x)$ oblastı olmur. Bu səthi təbəqənin qeyri-bircinsliliyinə, yəni yağ emulsiyasının olmasına dəlalət edir ki, yağ konsentrasiyasının dərinliyinə görə dəyişir.

Qeyd etmək lazımdır ki, ρ_s parametri birmənalı olaraq səthin halını xarakterizə edir. Eksperimentlər göstərmişdir ki, $\alpha(z)$ -in z-dən asılılığı eyni ρ_s -də müxtəlif en kəsikli küveytlərdə identikdir.

CO₂ lazer şüalanmasının dalğa uzunluğunda işiğin yağda $\alpha \sim 60 \text{ sm}^{-1}$ udulma əmsalı təmiz suda $\alpha_s \sim 870 \text{ sm}^{-1}$ olduğuna nəzərən kifayət qədər kiçik olduğundan, onda birinci yaxınlaşmada işiğin udulma əmsalı suyun $v_{su}(z)$ həcmi tərkibi ilə müəyyən olunacaqdır. Udulma əmsalı üçün bu münasibət doğru olacaqdır $\alpha(z) = v_{su}(z)\alpha_{su}$

Nəzərə alsaq ki, $v_{su}(z) + v_{yag}(z) = l$, yağın həcmi tərkibi üçün bunu alarıq

$$v_{yag}(z) = \frac{\alpha_{su} - \alpha(z)}{\alpha_{su}}$$

Beləliklə, alınmış nəticələr dərinlik üzrə dispers fazasının yayılmasını – verilmiş halda yağın həcmi konsentrasiyasını təyin etməyə imkan verir.

Konfokal opto-akustik mikroskop. OA-mikroskopiya - OA-detektə etmənin qeyri-spektroskopik tətbiqində ən mühümlərindən biridir, belə ki, o səthi təbəqə altında istənilən qeyri-nizamlılığın, defektlərin, səth altı aşqarların konsentrasiyası və i.a. haqqında məlumat almaq üçün unikal metoddur. İlk dəfə [9] işində göstərilmişdir ki, alüminium silindrin səthi təbəqəsinin altında yerləşən boşluqlar, pyezoelekrtik sensorla detektə olunan impuls OA-siqnala təsir göstərə bilər. [10] işin müəllifləri ilk dəfə olaraq bərk maddələrin səth strukturlarının OA-xəyalının alınması haqqında xəbər vermişlər. Onlar şüasının tezliyi 50-dən 2000Hs-ə qədər diapazonda döyünən arqon lazerindən istifadə etmişlər ki, bu zaman onlar sənayedə turbin pərlərinin istehsalında tətbiq olunduğu kimi anaoloji olaraq keramik silisium karbid nümunəsindən kecən fokuslanmış şüanın skanə olunmasını təmin etmişdilər. Onlar müşahidə etdilər ki, OA metodla həm səthin görünən mikrostrukturunu gevd etmək mümkündür, həm də səthin gevribircinslilivini adi mikroskopun köməvi ilə mümkün olmavan tədqiqini yerinə yetirməyə imkan yaranır. [11] işində müəlliflər göstərmişdir ki, optik qalın təbəqə olduqda (onların 4880 və 5145A° dalğa uzunluqlarında həyəcanlanan SiC və Si₃N₄dən olan nümunələri üçün olduğu kimi) OA-mikroskopiyanın dərinlik üzrə qeydiyyatı təxminən nümunədəki istilik diffuziyası uzunluğuna uyğun gəlir, hansı ki, onların işində təxminən 100Hs tezlikdə 100mkm tərtibində qiymətə malikdir.

OA-mikroskopiya metodunun iş prinsipi şəkil 8-də verilmişdir. OA-mikroskopiya üçün ən yaxşı həyəcanlanma mənbəyi – bu nümunə tərəfindən yaxşı udulan dalğa uzunluğunda (yəni, udan təbəqənin qalınlığı diffuziya uzunluğundan kiçikdir) güclü şəkildə kollimasiya olunmuş (kiçik ləkə şəklində fokuslanmış) lazer şüalanması selidir. Əgər nümunə tərəfindən şüalanma bu şəkildə güclü udulmazsa, onda OA-siqnalının qiyməti kiçik olardı və fəza ayırdetməsi çox pis olardı. Qeyd etmək lazımdır ki, həyəcanlanmada digər növ şüalanmalar üçün elektron selindən də istifadə etmək olar.



Şəkil 8. OA- mikroskopiya metodunun prinsipi.
1 – modulə olunmuş lazer seli, 2 – fokuslayıcı optika,
3 – ləkənin yerdəyişmə istiqaməti, 4 – işıq udulan
V_{ud} həcmi, 5 – istilik diffuziya olunan V_{istilik} həcmi,
6 – mikrofon, 7 – OA-siqnal, 8 – akustik rabitə üçün material, 9 – pyezosensor, 10 – OA-siqnal.

Şəkil 8-də göstərildiyi kimi, istiliyin diffuziya olunduğu $V_{istilik}$ həcmini təyin edən səth işığın udulması baş verən $V_{ud.}$ həcmi ilə məhdudlaşan səthin arxasında yerləşir. Bu iki səth arasındakı μ_{s} - məsafə χ - istilik əmsalına malik nümunədə diffuziya əmsalına bərabərdir. Əgər ω tezliyi ilə modulyasiya olunmuş lazer şüasından istifadə edilərsə

$$\mu_s = \left(\frac{\chi}{\pi\omega}\right)^2, \qquad (13)$$

onda τ müddətli lazer impulsundan istifadə edilərkən, alarıq

$$\mu_s = (4\chi\tau)^{l/2} . \tag{14}$$

 $V_{istilik}$ - həcmi (təxmini olaraq μ_s radiusun yarımsferası) OAmikroskopiya metodunda ayırdetməni təyin edir. Al, Au və ya Si kimi yaxşı istilikkeçirici materialların olduğu halda $\omega = 10kHs$ tezliyində $\mu_s \approx 50mkm$ alarıq. Zəif istilikkeçirici materiallar olduğu halda, məsələn Al₂O₃ kimi, eyni döyünmə tezliyində $\mu_s \approx 15mkm$ olar. Rozensveyq göstərdiyi kimi [12] OA xəyalların yaranmasında üç səbəb mövcuddur: a) $V_{istilik}$ həcmində yerləşən yad birləşmələr və ya zolaqlar lokal istilik xassələrinin dəyişməsinə gətirir, OA-siqnalın amplitudunu dəyişir; b) V_{ud} həcmində yerləşən yad birləşmələr və ya zolaqlar işiğin udulmasının dəyişməsinə səbəb olur və bu da OA-siqnalın amplitudunu dəyişir; c) əgər pyezosensor istifadə olunursa, nümunədə generasiya olunan ultrasəs sahəsi sensora çatmamış yad birləşmələr və ya zolaqlarda səpilə bilərlər.

OA- mikroskopiyasının impuls variantının prinsipial üstünlüyü ondan ibarətdir ki, temperaturun geniş tezlik spektri dalğası həyəcanlanır və onun vasitəsi ilə udulmada qeyri-bircinsliliyin səpilmə spektrinin və ya dərinliyə görə səpilmənin təyini mümkündür. Əslində isə, ω tezliyində siqnal $3(2\chi/\omega)^{1/2}$ qalınlıqlı təbəqədə yerləşən istilik mənbəyi formalaşdırdığından, onda tezliyinin artması ilə mühitin dərinliyində yerləşən mənbələr siqnala təsir etmir. Beləliklə, qeyri-bircinsliliyin ikiölçülü deyil, üç ölçülü mənzərəsini analiz etmək imkanı yaranır. Mikroskopiyanın impuls variantı üşün temperaturun dəyişməsini yüksək zaman ayırdlığı ilə qeyd etmək lazımdır. Ən çox modulyasiyanın geniş tezlik zolağında – 10MHs-ə qədər olmaqla – "fotodefleksion spektroskopiya" metodunda qeyd etmək olur [13].

"Fotodefleksion spektroskopiya" metodunun məğzi ondan ibarətdir ki, udulma mühitinin deformasiya olunmuş səthində qeyri-bircins lazer qızması ilə yaranan şüalanmanın səpilməsi baş verir. Onun əsas münasibliyi həyəcanlanmada tam kontaktsız olmaqla siqnalın qeyd olunmasıdır. Çətinlik şüalanmanın stabilləşməsi və onun şüalanan ləkənin epimərkəzi ilə üst-üstə düşməsi ilə bağlıdır. Bu metotda tezlik xarakteristikaları analiz olunmamışdır, o praktik olaraq həmişə kəsilməz rejimdə tətbiq olunmuşdur. Həyəcanlanan və nümunəvi şüanın kollinear həndəsəsini, bu və ya digər şüaların kəskin fokuslaşmasını və onların zəif dağılmasını (fokal ləkə tərtibində) istifadə edərək, 10MHs zolaq əldə etmək olur [11]. İmpuls rejimində geniş tezlik spektrli siqnal həyəcanlanır və onun gücü artır. Bu cür eksperimentin prinsipial sxemi şəkil 9-da göstərilmişdir.



 Şəkil 9. İmpuls fotodefleksion spektroskopiya qurğusunun sxemi: 1- impuls Nd–YAG lazeri, 2 - He–Ne lazer, 3-tədqiq olunan nümunə, 4-bıçaq, 5-interferensiya filtiri, 6-fotodiod, 7-analoq-rəqəm çevirici

İmpuls rejimin fərqləndirici cəhəti odur ki, bu zaman sistemin lazer impulsu ilə zərbə həyəcanlanmasına cavabını yazmağa imkan verən sürətli analoq-rəqəm çeviricilərə zərurət vardır.

Güclü şəkildə udan mühitin səthi tədqiq olunduğundan təqdim olunan siqnal təmiz istilik xarakterinə malikdir. Siqnalın artım sürətinə görə qeyd olunan tezlik zolağı müəyyən oluna bilər. Verilmiş qurğuda o (1÷2) MHs tezliklə məhdudlaşdırılmışdır.

Kəsilməz rejimdə üç modulyasiya rejimindən istifadə edərək bərk maddənin səthində təbəqənin qalınlığı ölçülmüşdür. İstilik dalğalarında OA-mikroskopiyasının digər mühüm tətbiqi səthi qeyri-bircinsliliyin kontaktsız defektoskopiyasıdır. Nümunə timsalında işığı güclü şəkildə udan altlıq üzərində yerləşən nazik təbəqəyə baxaq. Bu halda təbəqələşmə oblastında mühitin temperaturkeçiriciliyinin qeyrbircinsliliyi ilə hesablaşmaq olar, belə ki, istilik dalğası təbəqə-altlıq və təbəqə - vakuum sərhəddindən müxtəlif cür əks olunur. OA-mikroskopiyada bu oblastlar daha parlaq görünəcəkdir, çünki istilik altlığa keçmir və təbəqə güclü şəkildə qızır. Aydındır ki, OA-siqnalın tezlik xarakteristikasını analiz edərək həm də təbəqənin qalınlığını ölçmək olar, belə ki, yüksək $(\omega/\chi)^{1/2}z>3$ tezliklərdə istilik dalğası altlığı "hiss etmir", aşağı $(\omega/\chi)^{1/2}z<<1$ tezliklərdə isə əksinə, səthi təbəqə praktik olaraq istilik dalğasına təsir etmir.

Bu problemlərə kifayət qədər çoxlu işlər həsr edilmişdir, lakin onların bəzilərini qeyd edək [14, 15, 16]. Metal olduqda ən çox işığın əks olma əmsalı temperaturdan asılıdır (oksid təbəqəsinin artımı səbəbindən). İşığın udulması səth xarakterli olduğundan bu effekt əsasən dalğanın amlitudunun dəyişməsinə gətirib çıxarır. [15] işində termoelastik effekt əsasında pyezoelektrik detektə olunma ilə bərk maddələrdə fotoakustik siqnalların generasiyasının nəzəri modeli təqdim olunmuşdur. Hesabatlar şüalanmanın kəsilməz modulyasiyası üçün və siqnalın sinxron detektə olunma rejimi üçün aparılır. Əsas informasiya modulyasiya siqnalının fazasına nisbətən optoakustik siqnalın fazasında qərarlaşmışdır. Həm də fazanın dəyişməsi müxtəlif dərinliklərə nüfuz etmiş mənbələrə nəzərən siqnalın nisbi həssaslığının dəyişməsinə imkan verir.

Bu cür üçölçülü zondlaşma şüalanmanın modulyasiya tezliyinin dəyişməsi zamanı mümkündür. Bu nöqteyi nəzərdən OA-siqnalın genişzolaqlı impuls lazer şüalanması vasitəsilə həyəcanlanması perspektivli görünür. Lakin, sərbəst sərhəd və güclü udulmada səsin həyəcanlanması az effektivlidir [17] və elementin mexaniki rezonans tezliyində OA-siqnalın qeyd olunması daha perspektivlidir (əvvəllər bu sxemdən səthin udduğu enerjinin ölçülməsi üçün istifadə olunmuşdur).

Lakin, göstərmək lazımdır ki, OA-mikroskopiyanın əsas çətinliyi hər iki növ qeyri-bircinslilik olduqda işığın udulma əmsalı və istilikkeçirmə əmsalı qeyri-bircinsliliklərinin verdiyi tövhələrin ayrılmasıdır. Burada təkcə amplitud deyil, həm də faza şəklinin alınmasına mühüm yer ayrılır. Bir qayda olaraq, OA-siqnalın faza kontrastı amplitud kontrastından çoxdur. İstilik dalğalarında OA-mikroskopiyaya birbaşa olaraq qazomikrofonlu qeyd etmə ilə OA-mikroskopiya daha yaxındır. Analiz göstərdiyi kimi, qazomikrofon qeyd etmədə dərinliyə görə ayırdetmə $(\omega/\chi)^{1/2}$ səviyyəsində məhdudlaşır. Lakin, dolayı akustik qeydetmə ilə OA-mikroskopiyasının rahat işlənməsi və sadəliyi baxımından o geniş yayılmışdır [18, 19].

OA-mikroskopiyasının ənənəvi sxemində lazer şüası periodik qanunla modulyasiya olunaraq tədqiq olunan obyektin üzərinə fokuslaşır, onun planar şəkildə ayırdetməsi isə mikron qimətlərinə çata və optik şüalanmanın fokuslaşması ilə təyin olunur. Zondlaşma dərinliyi və dərinliyə görə ayırdetmə şüalanmanın modulyasiya tezliyi ilə təyin olunur və mikronun hissələri qədər ola bilər. Bu hallarda səthin istənilən nöqtəsinin rəqsləri siqnala öz tövhəsini verə bilər və buna görə də fon böyük ola bilər. Optik və akustik sistemlərin fokusları üst-üstə düşən şəkildə yerləşən fokuslayıcı səs qəbuledicisinin istifadə ediləməsi daha optimal görünür. Bu cür sxem [20] işində havada fokuslayıcı pyezoqəbuledici ilə bilavasitə üsulla siqnalın qeyd olunmasında reallaşmışdır. Sonrakı səhifələrdə OA-mikroskopunun konfokal sxemi və həm bilavasitə, həm də birbaşa qeyd olunma ilə hədd ayırdetmə qabiliyyəti nəzəri analiz olunur [21].

Konfokal opto-akustik mikroskopun müxtəlif qeydetmə rejimlərində hədd ayırdetmə qabiliyyəti. Müxtəlif tezliklərdə səthin maksimal qızmasının qiymətləndirilməsi zamanı alırıq [21]:

$$\widetilde{T}_{max} = \frac{W_0 \widetilde{f}(\omega)}{2\pi k_2 a} \quad \omega \ll \chi_2 / a^2 \text{ olduqda}]$$

$$\widetilde{T}_{max} = \frac{W_0 \widetilde{f}(\omega)}{2\sqrt{\pi} k_2 a} \sqrt{4k_2(-i\omega\pi a^2)} \quad \frac{\chi_2}{a^2} \ll \omega \ll \chi_2 \alpha^2 \text{ olduqda}$$

$$\widetilde{T}_{max} = \frac{W_0 \widetilde{f}(\omega) \alpha}{k_2 \pi a^2 i \omega / \chi_2} \quad \chi_2 \alpha^2 \ll \omega \text{ olduqda}$$

Qızma aşağı tezliklərdə maksimaldır, udulan gücün dəyişən tərkibi onun orta qiymətini aşmadığından isə, $\omega \rightarrow 0$ olduqda orta dərəcəli qızma isə səthin maksimal temperaturunu təyin edəcəkdir. Hesab edərək $\tilde{f}(\omega = 0) = 1$, tapırıq

$$\widetilde{T}_{max} = \frac{W_0}{2\sqrt{\pi}k_2 a} \tag{15}$$

(15)-dən belə alınır ki, tədqiq olunan səthin termik dağılmadan qorunması üçün qızdıran şüalanmanın $W_0 = \pi \alpha^2 I_s(1-R)$ gücünü azaltmaq lazımdır. Bu isə öz növbəsində opto-akustik siqnalın amplitudunu azaldır. Buna görə "siqnal-küy" nisbətinin yol verilə bilən minimal qiymətini verərək, a_{min} - mümkün hədd ayırdetməsini qiymətləndirmək olar.

Biləvasitə qeydetmə. α =const qəbul edərək və (15)-i nəzərə alaraq, "siqnal-küy" nisbəti üçün ifadə almış oluruq:

$$(S/N) = \rho_1 \beta_1 T_{max} \sqrt{2\pi \chi_1 \chi_2} \sqrt{\nu/\Delta \nu} \sqrt{2k_p^2 \pi \varepsilon_0 \varepsilon/k_e Th} / k_N \times \pi C_{\ell_1} F(2\pi a \nu/C_{\ell_1}) [1 - i\sqrt{i\nu/\nu_t}]^{-1},$$
(16)

burada $F(x) = exp(-x^2) \int_{0}^{x} exp(\xi^2) d\xi$ - Doson integralıdır ki, o öz maksimumuna x=0,92; x<<1 və F(x)=x olduqda çatır.

(16) –da şüalanma diaqramına uyğun olaraq qəbuledicinin səthi üzrə inteqrallaşma aparılmışdır və bu işarələnmələr daxil edilmişdir $v_t = \omega/2 \pi = \alpha^2 \chi/2\pi$, v- işçi tezlik, Δv - qeyd edilən tezlik zolağı, $C = 2\pi\varepsilon_0 \varepsilon/h$ - mikrofonun elektrik tutumu, k_p - onun həssaslığı, k_B - Bolsman sabitidir, k_N - qəbuledicinin girişinə verilən siqnalda gücləndiricinin küy əmsalıdır ($k_N \approx 3$ qəbul edək). Hesabatlar bu cür hallarda ən çox yararlı olan tutumlu mikrofonlar üçün aparılmışdır, $Q = v/\Delta v$ kəmiyyətini sabit hesab edək və təxmini olaraq $10^4 \div 10^6$ qiymətinə bərabər olduğunu qəbul edək.

"Siqnal-küy" nisbətinin maksimumu $v_m = C_{\ell_1}/2\pi a$ olduqda əldə olunur. Yaxşı ayırdetmə əldə etmək üçün kifayət qədər yüksək tezliklərdən istifadə etmək lazımdır; belə ki, a=1mkm fokuslama $v_m \approx 10^8$ Hs-ə uyğun gəlir. Belə tezliklər mikrofonlarla effektiv şəkildə qeyd edilə bilməz. Buna görə qeydetmə üçün münasib $v_m \approx 200$ kHs tezliyində ən yaxşı a_{min} ayırdetməni qiymətləndirək. Bu zaman minimal yol verilən $(S/N)_{min}=10$ nisbəti ilə məhdudlaşaq. Belə ki, bu zaman $v \ll v_a = \alpha C_{\ell_1}/2\pi$, onda

$$(S/N) = \rho_1 \beta_1 T_{max} \sqrt{4\pi \chi_1 \chi_2} \sqrt{2k_p^2 \pi \varepsilon_0 \varepsilon Q / (k_s Tha \upsilon / 2k_N)}$$
(17)

 $T_{max}=1$ °C verərək və $\rho \approx 1.3 kq/m^3$, $\chi_1 \approx 10^{-5} \div 10^{-4} m^2/san$, $\beta_1 \approx 3.4 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$, $k_p = 10^{-2} \text{V/Pa}$, $\epsilon \approx 12$, $h \approx 10^{-5} \text{m}$ qəbul edərək, (15)-dən $a_{min}=0.6 \div 6 \text{mkm}$ alınır.

Beləliklə, bilavasitə qeydetmədə və yol verilə bilən modulyasiya tezliyində konfokal opto-akustik mikroskopun ayırdetməsi mikronun hissələri qədər ola bilər. Əgər səthin minimal qızmasında tələblər yüngülləşdirilsə, onda qızdıran şüalanmanın yalnız iti fokuslaşması ilə məhdudlaşdırılan yüksək ayırdetmə əldə etmək mümkündür. **Birbaşa qeydetmə.** Tutaq ki, ideal şəkildə mühitlə uyğunlaşan (akustik) və qalınlıq rezonansı ($h = C_{\ell_3} / 2\nu$,

burada $C_{\ell 3}$ - pyezoelement materialında səsin sürətidir, *h*qalınlıqdır) tezliyində sərbəst gediş rejimində işləyən pyezomaterialdan hazırlanmış sferik seqment şəkilli qəbulediciyə malikik. (15) formulundan çıxış edərək, (14) –ü nəzərə alaraq, α =const hesab edərək və çeviricilərin küy səviyyələri üçün ifadədən istifadə edərək [22], "siqnal-küy" nisbəti bu şəkildə ifadə oluna bilər:

$$(S/N) = \beta_{2}^{*} \chi_{2} T_{max} h_{33} (k_{N} C_{\ell_{2}})^{-l} \sqrt{2\pi \varepsilon_{0} \varepsilon_{33}} / (k_{e} T tg \delta C_{\ell_{3}} \Delta v \times$$

$$\times < [(1 + iv \cos \theta / v_{a})^{-l} - V(\theta)(1 - iv \cos \theta / v_{a})^{-l}] \times , \qquad (18)$$

$$\times av \exp[-(2\pi av \sin \theta / C_{\ell_{2}})^{2}] >$$

burada $V_a = \frac{\omega_a}{2\pi} = \frac{\alpha C_{\ell_2}}{2\pi}, h_{33}$ - pyezomodul, $tg\delta$ -pyezo-

çeviricinin tam itkilərinin bucaq tangensidir, \mathcal{E}_{33} - pyezoele-

ment materialının dielektrik nüfuzluluğudur, $< \cdots >$ isə çeviricinin aperturasına görə ortalamadır.

Modulyasiyanın aşağı tezliklərində $v < v_a$ (18) ifadəsi kifayət qədər sadələşir:

$$(S/N) = \beta_2^* \chi_2 T_{max} h_{33} (k_N C_{\ell_2})^{-l} \sqrt{2\pi\varepsilon_0 \varepsilon_{33}} / (k_s T tg \delta C_{\ell_3} \Delta \nu \times (19) \times (19)$$

$$\times < [1 - V(\theta) > a\nu$$

yəni "siqnal-küy" nisbəti tezlik artıqca xətti olaraq artır. $v >> v_a$ şərti zamanı (18) "siqnal-küy" nisbəti tezlikdən asılı olaraq v^{l} -ə nəzərən daha sürətli azalır. Beləliklə, (18) –də "siqnalküy" nisbəti asılılığı maksimuma malik olur və bu $v_m \approx v_a$ yaxınlığında əldə olunur.

Biləvasitə qeydedilmədə olduğu kimi, bu tezliklər çox yüksəkdir və bizi daha kiçik tezliklər maraqlandırır ki, onlar qeydolunma üçün daha münasibdir və yayılan zaman zəif sönürlər. v=5MHs işçi tezliyinə görə a_{min} -u qiymətləndirək. Bu zaman $v << v_a$, buna görə (19) ifadəsindən istifadə etmək olar. $T_{max}=1$ °C və (S/N)=10 verərək və $<[1-V(\theta)>\approx0,3]$, $\varepsilon_{33} = 10^3$, $C_{\ell 3} \approx 4 \cdot 10^3 m / san$, $\Delta v \approx 1$ Hs, tg $\delta \approx 10^{-1}$, $k_N \approx 3$, $\chi_2 \approx 10^{-4} \text{m}^2/\text{san}$, $C_{\ell_2} \approx 5 \cdot 10^3 \text{ m}/\text{san}$, $\beta_2 \approx 10^{-5} \text{K}^{-1}$ qəbul edərək, (18)-dən $a_{\min} = 0,5$ mkm alınır.

Beləliklə, optimal tezlikdən kənarda mikronluq ayıretmə əldə etmək mümkündür ki, bu da qızdırıcı şüalanmanın fokuslama itiliyi ilə məhdudlaşır.

Birbaşa qeydetmədə dərinliyə görə qeyri-bircinsliliyin ayırdlılığı (19) – da

$$[\hat{g}(i\omega\cos\theta/C_{\ell_2}) - V(\theta)\hat{g}(-i\omega\cos\theta/C_{\ell_2})]$$

vuruğu, yəni akustik dalğanın uzunluğu ilə təyin olunur və buna görə qeydetmənin bu sxemində yüksək ayıretmənin əldə olunması mümkün olmur. Bu halda daha məqsədəuyğunu bilavasitə qeydetmədən istifadə etməkdir; dərinliyə görə ayırdetmə istilik dalğasının uzunluğu ilə təyin olunacaqdır $(\hat{g}(-i\sqrt{i\omega/\chi_2})$ vuruğu) və həm də praktik əldə olunan modulyasiya tezliyi üçün mikronun hissələri tərtibində ola bilər. Ümumi şəkildə desək o, qızdırıcı şüalanmanın fokuslama itiliyi ilə məhdudlanmır.

Beləliklə, özündə optik və akustik mikroskopların üstünlüklərini (mikronun hissələri tərtibində yüksək ayırdetmə qabiliyyəti və texniki əldə olunan v $\approx 10^5 \div 10^7$ Hs ultrasəs tezliklərində onun fəth olunma imkanları) birləşdirən, opto-akustik mikroskopun konfokal sxemi təklif olunmuşdur və nəzəri şəkildə analiz olunmuşdur [21]. Konfokal optoakustik mikroskopun xəyalı biləvasitə qeydetmə zamanı əsasən, səthdəki istilik mübadiləsi ilə müəyyən olunur, birbaşa qeydetmədə də – tədqiq olunan mühitin istilik genişlənməsi ilə təyin olunur. Konfokal opto-akustik mikroskopun səthin qızması ilə məhdudlaşan hədd ayıretməsi həm biləvasitə qeydetmədə, həm də birbaşa qetdetmədə mikronun hissələri qədər ola bilər. Dərinliyə görə yüksək ayırdetmə əldə etmək üçün siqnalın biləvasitə qeyd olunmasından istifadə etmək yararlıdır; optik qeyri-bircinsliliyin seçimliliyi üçün – siqnalın birbaşa qeyd olunmasından istifadə etmək lazımdır. Birbaşa və biləvasitə qeyd olunmanın birgə işlənməsi obyektin istilik qeyri-bircinsliliyinin və işığın optik udulma əmsalının verdiyi tövhələri fərqləndirməyə imkan verir. Biləvasitə qeydetmədə modulyasiya tezliyinin dəyişməsi səthi qeyri-bircinsliyin üçölçülü tomoqrafiyasını çıxarmağa imkan yaradır.

Alınmış nəticələr konfokal opto-akustik mikroskop haqqında onu deməyə imkan verir ki, o materialların xassələrinin diaqnozu və ona dağıtmadan nəzarət baxımından perspektivli bir vəsaitdir.

- [1] O.Zvetlo. Fizika lazerov. Perevod s ang. pod red. T.A.Shamanova. M.: Mir, 1979, 373. (Rusca).
- [2] *V.V.Raqulskiy, F.S. Fayzulov* Prostoy metod izmereniya pasxodimosti lazernoqo izlucheniya. Optika i spektroskopiya, 1969, t.27, 707. (Rusca).
- [3] *M.A.Musaev* Mexanizmi nelineynoqo vzaimodeystviya lazernoqo izlucheniya v infrakrasnoy oblasti spektra. Baku, "Elm", 2004, 164. (Rusca).
- [4] V.P.Zelenniy, A.A.Karabutov, M.A.Musaev, S.F.Osmanov Formirovanie fotoakusticheskoqo siqnala v poqloshayushey srede pri nalichii na poverxnosti prozrachnoy plenki. Akusticheskiy jurnal 38, 1992, 53. (Rusca).
- [5] M.A. Musayev Mikrokanalniy lavinniy fotopriemnik na osnove strukturi Si-SiO₂. Pisma v JTF ,2002, t. 28, 57. (Rusca).
- [6] *M.A. Musayev* Analiz maslyanix emulsii na poverxnosti void lazernim optiko-akusticheskim metodom. Fizika, 2000, 1, 43. (Rusca).
- [7] A.A.Karabutov, I.A.Kudinov, M.A. Musayev, V.T.Plotonenko Optiko-akusticheskie issledovaniya maslyanix emulsify na poverxnosti vodi. Tezisi dokladov Vsesoyuznoy shkoli-seminar "Fotoakusticheskaya spektroskopiya I mikroskopiya" Dushanbe: 1989, 70. (Rusca).
- [8] *M.A. Musayev* Analysis of liquid surface oil emulsions by pulsed laser opto-acoustic method. First International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering. Baku : 2002, 445.
- [9] *R.I. Von-Gutfed, R.L. Melcher* Ultrasonic experiments with picosecond time resolution. Appl.Phys. Lett., 1979, v.30, 257.
- [10] Y.H. Wong, R.L.Thomas, G.F. Hawkins Laser generation convergent acoustic waves for materials inspecttion. Appl. Phys. Lett., 1978, v.32, 538.
- [11] W. Jackson, N.M. Amer Piezoelectric photoacoustic detection ;theory and experiment. J. Appl. Phys., 1980, v. 51,3343.

- [12] A.Rosencwaig, I.Opsal, W.LSmith., D.L. Willenborq. Detection of thermal waves through optical reflectance. J. Appl. Phys. Lett., 1985, v. 46, 1013.
- [13] *C.Korner, A.Mandel* Photodeflection spectroscopy. Appl. Phys A., 1985, v.38, 19.
- [14] M.Hangyo, S.Nakashima, S.Sugimoto, T.Yamaguchi, A.Mitsuishu Study of edge effect in photoacoustic microscopy. Japanee Journ. Appl. Phys., 1986, 3, 376.
- [15] Shu-yi Jhang, di Chen. Photoacoustic microscopy (PAM) and detection of subsurface features of semiconductor devices. Ed. by A.Mandelis. Photoacoustic and Phototermal Sciences Laboratory. University of Toronto.Canada., 1987 by Elsevier science Publishing Go., Inc.
- [16] C.C. Williams. High resolution phototermal lazer probe. Appl. Phys. Lett, 1984, 12, 1115.
- [17] *J.P. Monchalin* Optical detection of ultrasound at a distance using a confocal Fabry-Perot interferometer. Appl. Phys. Lett., 1985, 14.
- [18] D.A.Hutchins, F. Nadean Non-contact ultrasonic waveforms in metals using laser generation and interferometric detection. in Proc. 1983 I.E.E.E. Ultrason. Symp., p.1175.
- [19] *A.C. Tam* Pulsed laser generation of ultrashort acoustic pulse. Appl. Phys. Lett., 1984, 510.
- [20] *Khury-Yakub, G.Kino* Real confocal microscopy. Appl. Phys A., 1988, 78, 191.
- [21] A.A.Karabutov, V.V.Klevichkiy, M.A.Musaev, S.F. Osmanov. K teorii confocal optiko-akusticheskoqo mikroskopa. Vestnik MQU, ser., Fizika-Astronomiya, 1994, 5 46. (Rusca).
- [22] *B.S. Aronov* Elektromexanicheskie preobrazovateli na pyezoelektricheskoy keramike. L.: Energoatomizdat, 1990, 320. (Rusca).

M.A. Musaev

OPTICAL-ACOUSTIC EFFECTS IN OPTICAL ENVIRONMENTS

It is shown, that the confocal circuit of optical-acoustic microscope has the high resolution in shares micron and it is possible to achieve it on technically accessible frequencies of a sound $v\approx 10^5 - 10^7$ Hz. It is established, that indirect signal registration is useful for obtaining of high resolution on depth in confocal opto-acoustic microscope and direct signal registration is useful for emphasizing of optical heterogeneities. The combination of two registration circuits will allow us to define the heterogeneities of object thermal properties and

OPTİK MÜHİTLƏRDƏ OPTO-AKUSTİK EFFEKTLƏR

optical light absorption factor. On the base of these investigations the diagnostics possibilities of light-absorbing heterogeneities of liquid near surface layer is shown.

М.А. Мусаев

ОПТО-АКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ОПТИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Показано, что конфокальная схема оптоакустического микроскопа имеет высокую разрешающую способность в доли микрон и можно этого достичь на технически доступных частотах звука и≈10⁵-10⁷ Гц. Установлено, что для получения высокого разрешения по глубине в конфокальном опто-акустическом микроскопе выгоднее использовать косвенную регистрацию сигнала, для выделения оптических неоднородностей - непосредственную регистрацию сигнала. Сочетание двух схем регистрации позволит определить неоднородности тепловых свойств объекта и коэффициент оптического поглощения света. Прямыми экспериментальными исследованиями установлено, что распределение коэффициента оптического поглощения определяет форму акустического сигнала. На основе этих исследований показана возможность диагностики светопоглощающих неоднородностей приповерхностного слоя жидкостей.

Received: 15.04.09