

Національний університет “Києво-Могилянська академія”

Факультет природничих наук

Кафедра фізико-математичних наук

« Модифікація монокристалічного GaAs у криоген-
ному середовищі шляхом УЗ кавітації »

Виконав студент 4 року навчання

спеціальності 104 Фізика та астрономія

Лембік Ярослав Олегович

Керівник: к.ф.-м.н. Смірнов Олексій Борисович,

ст.наук.сп. Інституту фізики напівпровідників

ім. В.Є.Лашкарьова НАН України

Рецензент к.ф.-м.н. Р.К.Савкіна

Кваліфікаційна робота захищена

з оцінкою 70 "задовільно"

Секретар ЕК Г.В.Оводенко

2 червня 2021 р.

Київ – 2021

Зміст

Анотація	3
Оглядова частина	4
Фізичні основи дії УЗ кавітації на конденсоване середовище	7
УЗ кавітація у металевих паяльних розплавах	12
Синтезування у вигляді сонохімічних реакцій	17
Електрокінетичні явища	21
Вплив електричного струму сумісно с дією УЗ коливань у розплаві припою	22
Роль локальних теплових ефектів	26
УЗ в терапії раку	27
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА РОБОТИ	30
Модифікація напівпровідника на прикладі монокристалічного GaAs у криогенному середовищі шляхом УЗ кавітації	30
Висновки	35
Література	36

Список термінів та скорочень

УЗ- ультразвук;

ПОЦ – припой;

f — частота коливань;

λ — довжина хвилі;

k — хвильове число;

ρ — щільність навколишнього середовища;

P_r - тиск газу;

σ — величина поверхневого натягу⁴

V – швидкість;

t – час;

γ - показник політропи;

v - рухливість (мобільність) частинок;

J - потік ;;

B_I — рухливість іону

C_1 — концентрація ;

Анотація

У наш час ультразвукова технологія широко застосовується в машинобудуванні, очисній промисловості та діагностиці здоров'я. Крім того, ультразвук виявився корисною методикою для створення нових матеріалів. Хімічний ефект ультразвуку виникає внаслідок акустичної кавітації, яка є основним процесом утворення та колапсу бульбашок у рідині, що зазнає сильного звуку. Цей процес супроводжує значне місцеве опалення та високий тиск. Температура бульбашки досягає тисяч градусів за Кельвіном під час колапсу, тиск дорівнює декільком сотням МПа, а швидкість нагрівання та охолодження перевищує 10^{10} К / с. Слід також зазначити, що в кавітаційній рідині можливе утворення плазми. Ці екстремальні умови використовуються для одержання аморфних металів, карбідів, оксидів та сульфідів з розчинених попередників розчину.

У цій роботі наведено існуючі УЗ технології та як приклад наукового застосування УЗ - результати модифікації, яка відбувається на поверхні напівпровідникового з'єднання GaAs (арсенід галію), підданий УЗ кавітаційній обробці у рідкому азоті ($T \sim 78$ °К).

Мета роботи

Метою цієї роботи було показати, на прикладі GaAs, що обробка напівпровідникових кристалів ультразвуком має потужний технологічний потенціал.

Предмет роботи:

зразки напівпровідникового з'єднання GaAs (арсенід галію).

Оглядова частина

До числа потужних електрофізичних чинників, які різко інтенсифікують технології виробництва, відносяться електронні, іонно-плазмові, лазерне опромінення, електромагнітне поле та ультразвук [1-33]. З аналізу літературних джерел [1-2, 7] з цього випливає, що електронне, іоно-плазмове, лазерне випромінювання мають обмежені технологічні можливості, що визначаються тепловим ефектом. Наприклад, електромагнітний вплив характеризується тепловим ефектом за рахунок вихрових струмів, або ефектом взаємодії пондеромоторних сил, що виникають у струмопровідних матеріалах (металах) [4]. Технологічні можливості які в основному використовують для металів, а саме, електрохімічна, електроерозійна та електрогідративна обробка матеріалів мають також ряд обмежень [3, 5, 6].

Найбільш широкими технологічними можливостями володіє ультразвук (УЗ). Ультразвукова обробка однаково ефективна, як для провідників, напівпровідників так і діелектриків. Ультразвукова обробка проводиться, як у вакуумному так і в повітряному та рідкому середовищах. Залежно від технологічної необхідності УЗ обробка матеріалів може проводитися при нормальних, високих або криогенних температурах. Головною перевагою УЗ технології є її некритичність до масштабного фактору, а саме, як великомасштабні так і особливо мікромініатюрні зразки можуть бути оброблені УЗ дією однаково успішно. Технологічні можливості різних електрофізичних чинників, згідно з даними [1- 37] наведено у **Табл. 1 та Табл.2**.

З недоліків слід зазначити таке, через можливе пошкодження і руйнування найменш міцних мікроелементів в процесі УЗ обробки, а саме, у випадку мікромініатюрних зразків, використання УЗ все ж вважається неефективним.

Више наведене визначає *актуальність* і *мету* даної роботи. Вимагає нових теоретичних та експериментальних досліджень для виявлення та усунення причин та негативних наслідків УЗ обробок сучасних матеріалів. Наведено типові ультразвукові технологічні процеси та робочі середовища відповідно до [8-27] які систематизовані у вигляді Таблиць.

Таблиця 1 Технологічні можливості різних електрофізичних та електрохімічних ефектів

Технічне використання	Вид взаємодії									
	Електрохім.	Електролізоване	Іонно-плазмове	Лазерн	Електрохвильов	Мігнотімпульсн	ТВЧ	Електрогидравлічн	Інфрачервоне випр.	Ультразвукове
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Формоутворення за рахунок окремого локального об'єму	+		+			+		+		+
Формоутворення плавленням			+	+	+				+	
Пластичне формоутворення						+		+		+
Металізація	+		+	+	+				+	+
Луження	+		+	+	+				+	+
Пайка			+	+	+		+		+	+
Сварка			+	+	+		+		+	+
Склеювання										+
Мокра чистка										+

Слід відзначити, що УЗ має значний вплив на багато фізико-механічних властивостей конденсованої речовини [8-37].

Таблиця 2 Типові ультразвукові технологічні процеси [8-37]

Агрегатний стан обробленої середовища	Типовий ультразвуковий технологічний процес		
		Використання у виготовленні ІЕТ	Перспективний у виготовленні ІЕТ
1	2	3	4
Газ	Горіння в ультразвуковому полі		
Комплекс: "рідина-газ"	Отримання аерозолей	+	
	Коагуляція аерозолей	+	
	Дегазація рідин	+	

Рідина	Отримання емульсій	+	+
	Обробка розплавів металів	+	
Комплекс : "тверде тіло - рідина-газ"	Отримання золей		
	Акустична (низькотемпературна сушка) Коагуляція золей		+
Комплекс: "тверде тіло-рідина" (гель)	Прицизіозна очистка виробів в мікромініатюрному виконанні	+	+
	Пропитка лаками та компаундами	+	
	Хімічна обробка	+	+
	Електрохім. обробка	+	
	Хім.-термічна обробка		
	Термічна обробка	+	
	Кристалізація	+	
	Металізація	+	
	Безфлюсова пайка	+	+
	Ультразвукове різання (розмірне)	+	+
	Склеювання		+
	Суспензування		
	Диспергування	+	+
	Гідроабризівана обробка	+	+
	Гідрометалургія	+	+
	Зняття зусинець	+	+
	Отримання псевдосплавів типу метолосуспензій	+	
	Тверде тіло	Інтенсифікація традиційних методів сварки	+
Інтенсифікація традиційних процесів обробки тиском		+	
Окремо-зміцнюювача обробка		+	
Інтенсифікація традиційних способів окремо-зміцнюючих обробок		+	+
Інтенсифікація традиційних процесів різання			
Вдосконалення фізико-механічних властивостей металів та сплавів		+	
Ультразвукова сварка			
Ультразвукове мікропластичне деформування		+	
Ультразвукове різання			+

Фізичні основи дії УЗ кавітації на конденсоване середовище

Вплив потужного ультразвуку на рідкі середовища викликає ряд відомих фізичних ефектів, а саме:

- акустична кавітація [1], що пов'язана із пульсаціями та із схлопуванням кавітаційної бульбашки;
- ультразвуковий капілярний ефект [2];
- сонолюмінесценція [3];
- явища вихору у вигляді мікро-і макро- потоків [4];
- прискорення процесів дифузії [5]

Фізичні явища, що супроводжують дію УЗ високої інтенсивності на рідину схематично наведено у тексті на Рис.1.

При інтенсивностях УЗ, більше за 10^5 Вт/м кінетична енергія колапсуючих бульбашок перетворюється частково в імпульс потужності у вигляді струменю і частково у теплову енергію. У рідких середовищах вплив УЗ коливань відбувається через дію на електрокінетичні явища, що викликані із направленим рухом заряджених частинок, які складають (впливають) дифузійні процеси у рідині [6]. У рідких середовищах, які мають механічну характеристику у вигляді тільки пружності об'єму, поширюються відповідно тільки поздовжні УЗ хвилі, тобто частинки навколишнього середовища зміщуються у напрямку поширення акустичної хвилі. Отже, для плоскої поздовжньої хвильової хвилі рівняння руху виглядає так (1) [7]:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$P_g = P_s + (P_0 + 2\sigma/R)(R_0/R)$$

де y — зміщення частинок; c — швидкість поширення хвилі; x - координата.

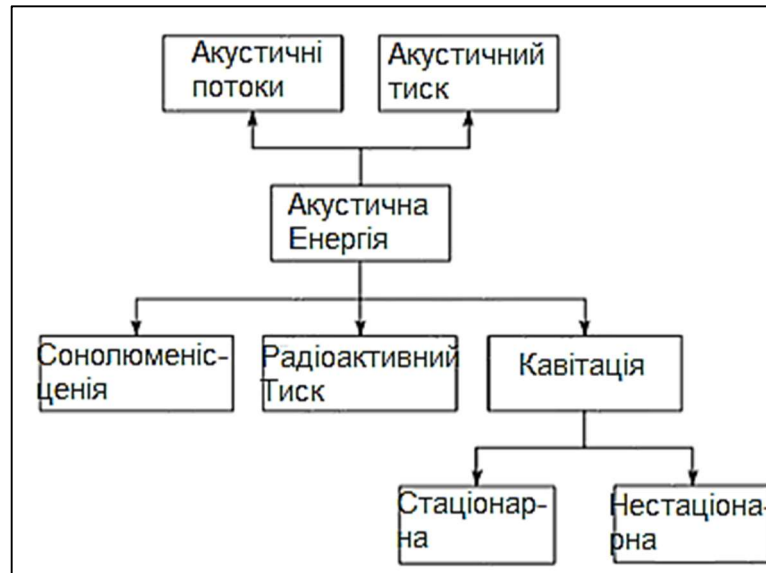


Рис. 1 Фізичні явища, що супроводжують дію УЗ високої інтенсивності на рідину

Розв'язок рівняння (1) для біжучої хвилі має вигляд рівняння (2):

$$y = A \cos[\omega t \pm (2\pi f/c)x] = A \cos[\omega t \pm (2\pi f/\lambda)x] = A \cos[\omega t \pm kx] \quad (2)$$

де A — амплітуда; f — частота коливань; λ — довжина хвилі; k — хвильове число. Акустичне поле, при розповсюдженні акустичної хвилі у пружному середовищі, характеризується змінним звуковим тиском P в кожній точці з інтенсивністю A . Періодична компресія/розширення кожного шару рідкого середовища, в якому відбувається розповсюдження пружної хвилі, можна визначити як результат змінного тиску, амплітуда якого P дорівнює (3):

$$P = \rho c A \omega = \rho c V_m, \quad (3)$$

де ρ — щільність навколишнього середовища; V_m — амплітуда швидкості коливальних частинок під дією акустичної хвилі.

Порівняння розрахунку імпульсу газової бульбашки за рівнянням Релея-Плессета (сплошна лінія) і експерименту по світлорозсіюванню Мі [7] наведено на Рис.2.

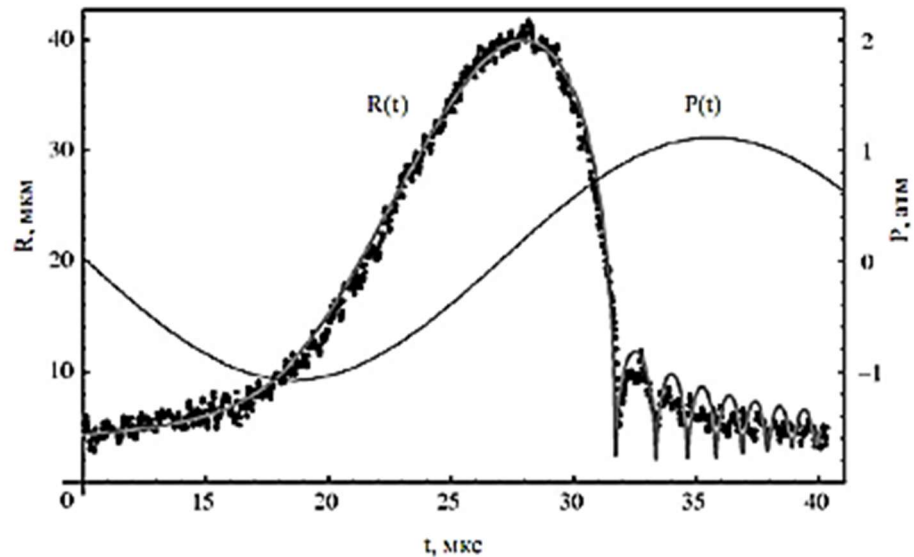


Рис. 2 Порівняння розрахунку імпульсу газової бульбашки за рівнянням Релея-Плессета (сплошна лінія) і експерименту по світлорозсіюванню Мі [7].

Поява явища акустичної кавітації пов'язано з наявністю зародків кавітації у рідкому середовищі, а саме, мікроскопічних газових бульбашок. У рідкому середовищі при інтенсивності УЗ $(8-10)10^3$ Вт/м² виникають невеликі бульбашки, які пульсують з частотою УЗ - коливань, розширюються, а потім колапсують, створюючи потужні ударні хвилі, які впливають на об'єкти, що знаходяться поряд із значним тиском.

Зародки кавітації можуть утворитися також на твердих частинках, які не змочуються рідиною та мають тріщини, які заповнені нерозчинним газом. У тріщині за рахунок пухирця газу утворюється опуклий меніск із радіусом R_0 . Отже, виходячи з умови рівноваги на границі розділу, тиск у такому варіанті (4):

$$P_r = P_0 + \frac{2\sigma}{R_0}, \quad (4)$$

де P_r - тиск газу в бульбашці; P_0 - зовнішній тиск. Значення кута змочування, коли зародок росте на дисперсному радіусі твердих частинок ($10^{-6} - 10^{-7}$) м складає значення $(100-175)^\circ$. Отже, тверда частинка з дефектом у вигляді

конічної або сферичної западини виступає в якості центра утворення зародків кавітації. Тому введення до рідкого середовища твердих мікророзмірних частинок значно збільшує кількість зародків акустичної кавітації. Амплітуда УЗ тиску, яка є необхідною для розширення радіусу зародка кавітації з радіусу R_0 до резонансного радіусу R_p , визначається за виразом [4] (5):

$$P_A^{(1)} = P_0 - P_s + \frac{4\sigma}{3\sqrt{3}R_0} \frac{1}{\sqrt{1 + (P_0 + P_s) \frac{R_0}{2\sigma}}}. \quad (5)$$

Резонансний радіус кавітаційної порожнини дорівнює (6):

$$R_p = \frac{4\sigma}{3(P_A - P_0 + P_s)}, \quad (6)$$

де σ — величина поверхневого натягу. Резонансна частота порожнини f_p залежить як від фізичних властивостей рідини, а саме, поверхневого натягу, так і від її щільності самої рідини (7):

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_p} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_p} \right)}. \quad (7)$$

На Рис.3, Рис.4, Рис.5 та Рис.6 зображено процеси еволюції, а саме, зародження, стадії розвитку та колапсу бульбашки.

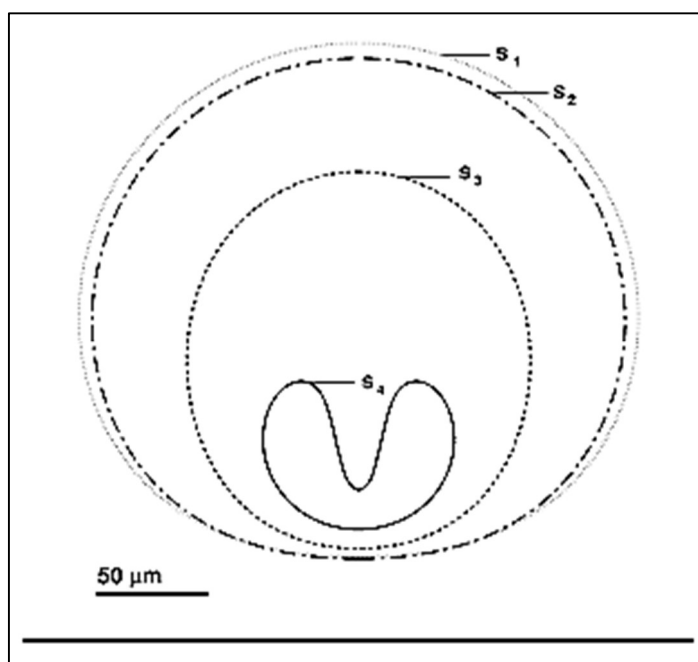


Рис. 3 Чотири фази еволюції форми бульбашки $S_1 \rightarrow S_4$ у часі при зміні тиску P у часі: 26 мкс; 30 мкс; 36 мкс; 38,5 мкс. (лінія відображає тверду поверхню).

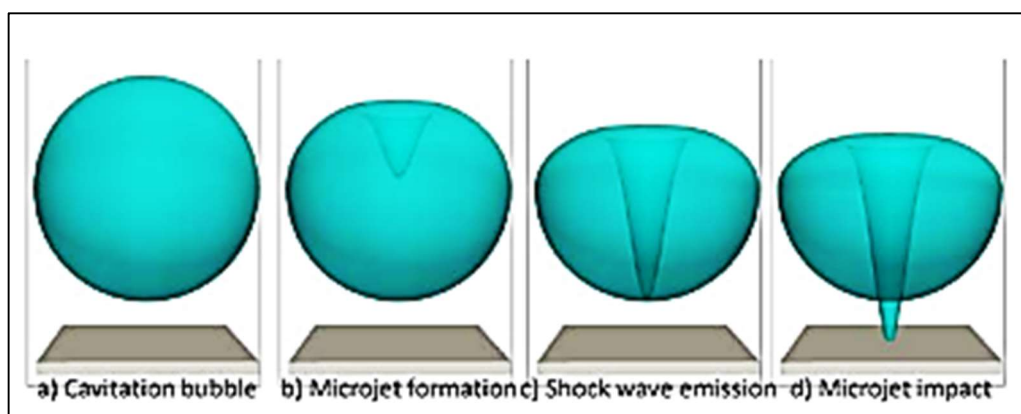


Рис. 4 Загальна динаміка кавітуючої бульбашки, яка колапсує близ твердого інтерфейсу: а.) бульбашка, б.) формування мікроджету, с.) емісія ударної хвилі, д.) ударна дія мікроджету на поверхню твердого тіла.

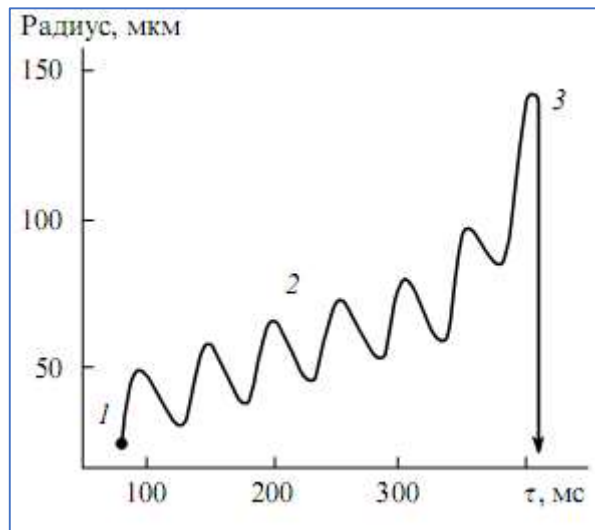


Рис. 5 Схема еволюції розмірів форми кавітаційної бульбашки у часі: 1- утворення зародка, 2- ріст та осциляції, 3- колапс бульбашки.

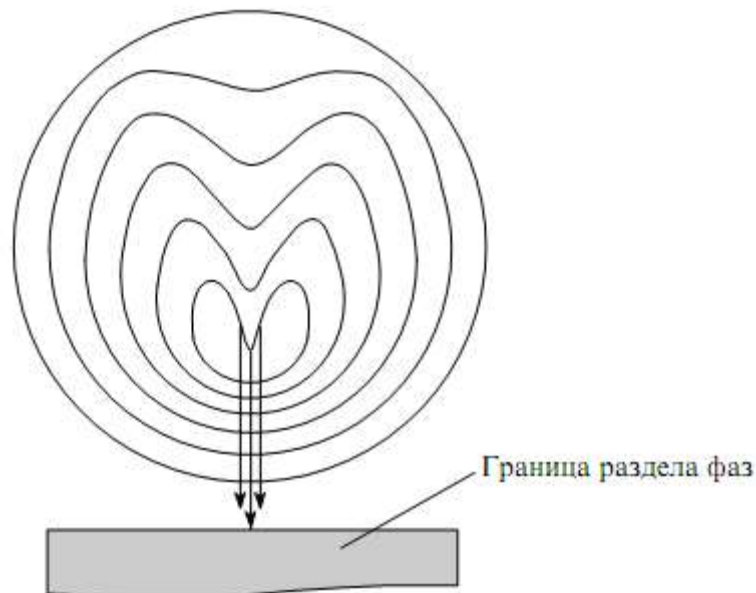


Рис. 6 Схема колапсу кавітаційної бульбашки поблизу інтерфейсу рідина- твєрде тіло. Вказано напрямок струменю рідини в момент колапсу бульбашки.

УЗ кавітація у металевих паяльних розплавах

Для розплавів металів інтервал R_p складає проміжок ($4 \times 10^{-6} - 6 \times 10^{-5}$) м, потім починається вибуховий ріст газових бульбашок. Згідно до теорії акустичної кавітації, зародки кавітації, які потрапляють в область негативного тиску, втрачають стійкість, ростуть за півперіод розтягування і швидко колапсують

за періоді стискання. Бульбашки з великими радіусами збільшуються за рахунок дифузії газу і пульсують у УЗ полі. Для паяльних розплавів, що використовуються для УЗ паяння та металізації є особливості, а саме, вони мають набагато більшу щільність і в'язкість у порівнянні із водою (H₂O) (близько порядку за величиною). Виникає необхідність врахування гідростатичного тиску розплаву припою, а також відмінності у початкових розмірах порожнини-зародку кавітації. Гідростатичний тиск P_0 з врахуванням тиску розплаву висотою h визначається як (8):

$$P_0 = P_{\text{атм}} + h\rho g. \quad (8)$$

Динаміка акустостимульованих порожнин в розплавах описується рівнянням, фізичне значення якого полягає в тому, що сума тисків яка діє на елементарний об'єм розплаву (гідростатичного, УЗ -го та газового всередині порожнини) дорівнює нулю, тобто порожнина знаходиться в стані динамічної рівноваги в будь-який проміжок часу. З огляду на в'язкість розплаву η рівняння динаміки УЗ кавітації має вигляд [5] (9):

$$\left(R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 + 4\eta \frac{\partial R}{\partial t} \right) \rho + P_0 - P_s \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} - P_s - \left(P_0 - P_s + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} = 0. \quad (9)$$

Розв'язання нелінійного диференціального рівняння (9) за методом Рунге-Кутта-Мерсона для розплаву олов'яно-цинкового припою із в'язкістю 0,85 (Па·с) та з начальними розмірами кавітаційних порожнин від 1мкм до 50 мкм та с параметрами УЗ тиском від (0,5x10⁵ до 2x10⁵) Па із частотою УЗ-коливань (22; 44; 66) кГц показало, що порожнини із розмірами до 5 мкм пульсують без зхлопування. У міру збільшення початкового розміру порожнини до

(10-50) мкм зростає і амплітуда пульсацій порожнин і відбувається їх колапсування за час (0,05-0,1) сек.

При тиску УЗ до 0,1 МПа кавітаційні порожнини пульсують, а при збільшенні тиску до 0,15 МПа збільшується резонансний розмір порожнин і відбувається їх зхлопування (Див. Рис. 7а).

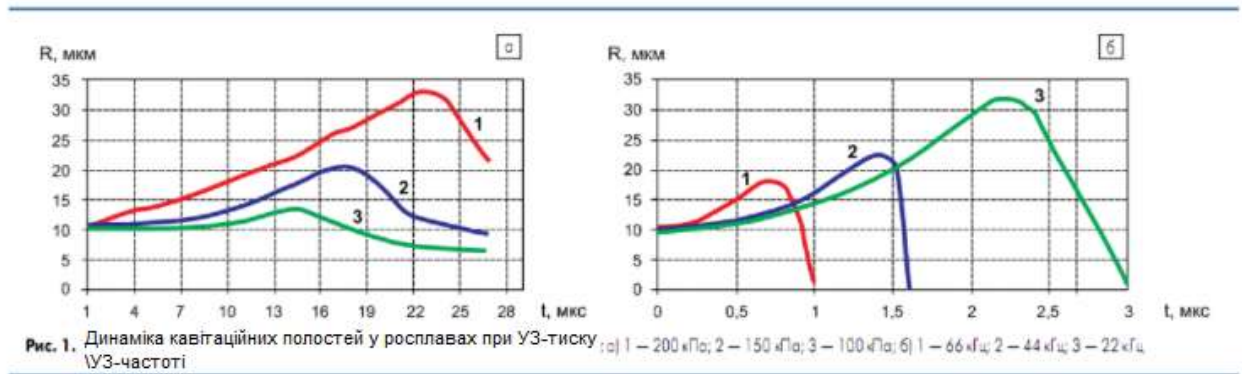


Рис. 7 Динаміка кавітаційних полостей у розплавах при УЗ-тиску.

У разі збільшення частоти з 22 кГц до 66 кГц розмір порожнин зменшується в середньому наполовину, що призводить до зниження інтенсивності кавітації (Див. Рис. 7б). Для підвищення ефективності кавітації використовується насичення газом розплаву, коли бульбашки газу у розплаві не перевищують розмірів зародків кавітації, тобто $(10-50) \times 10^{-6}$ м. Збільшення розмірів бульбашок призводить до їх передчасного зхлопування, а дуже невеликі розміри ускладнюють їх зростання в УЗ полі. Коли бульбашка колапсує її кінетична енергія, яка зосереджена у незначному об'ємі, перетворюється частково у силовий імпульс і частково у теплову енергію, а з центру зхлопування бульбашки формується ударна сферична хвиля, максимальний тиск в якій, згідно до Релля, на відстані, рівній 1587 радіусу центру бульбашки, буде (10):

$$P = P_0 \frac{R_0^3}{6,35 R^3}. \quad (10)$$

При $R = 1/10 R_0$ значення тиску біля поверхні бульбашки у 1575 разів більше тиску всередині порожнини. Динамічні параметри, радіальна

швидкість - V та час - t зхлопування бульбашок залежить від співвідношення гідростатичного тиску P і щільності навколишнього середовища ρ (11):

$$V = \sqrt{\frac{3P_0}{2\rho} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - 1 \right]};$$

$$t = 0,915R_0 \sqrt{\frac{\rho}{R_0}}. \quad (11)$$

Час зхлопування газової бульбашки діаметрі 10^{-4} м у розплавах паяльних припоїв на основі олова складає величину (30–35) мкс. Високошвидкісні відеоматеріали цифровою камерою показали, що швидкість колапсування порожнин на частоті 22,8 кГц та при УЗ-тиску 132 кПа досягає 0,2 м/с. Такі мікроудари знищують оксидні плівки і забруднення на поверхнях, що піддаються паянню, які за рахунок чого добре змочуються припоєм.

Спеціально відобразимо діаграму виникнення бульбашки під дією УЗ у воді. Крім високих локальних тисків, які виникають при зхлопуванні порожнин, можуть бути отримані локальні теплові мікроскопічні поля, низькотемпературну плазму і світлове випромінювання (Див. Рис. 8).

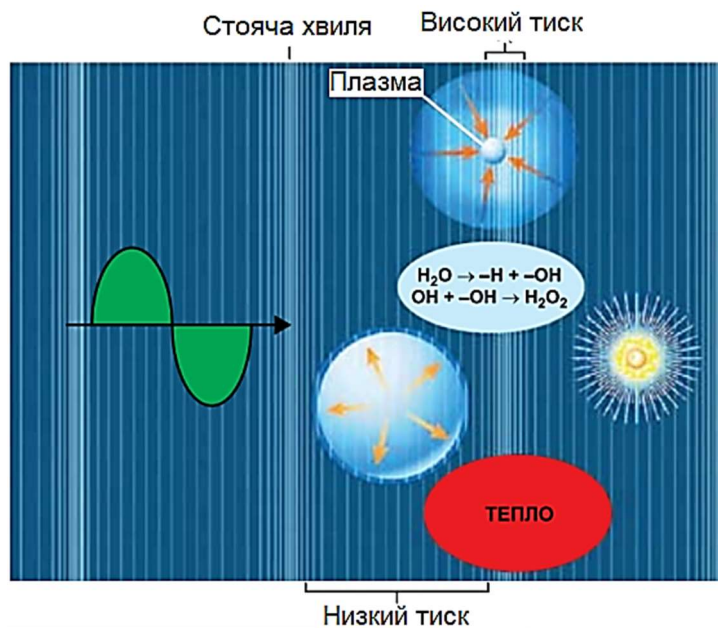


Рис. 8 Енергетична діаграма еволюції бульбашки у воді.

При адіабатному стисненні об'єму газу – V температура - T підвищується, чим більше значення показник політропи - γ для цього газу. Рівняння, що використовується для оцінки температури всередині кавітаційної газової бульбашки на будь-якому етапі її стиснення в адіабатичних умовах [3] має вигляд (12):

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3(\gamma-1)} . \quad (12)$$

Вважаючи, що $\gamma = 4/3$ і температура розплаву (+250...+300)°C, і з огляду на те, що R може сильно відрізнятись від R_0 у бік зменшення, ми отримуємо порядок температури (+2600... +3000) °C. Інші автори наводять розрахунок +1000 °C та висче [5]. На Рис. 9 та Рис. 10 зображено експериментально отримані фотографії за допомогою високошвидкісної фотозйомки моменти зхлопування кавітаційної порожнини.

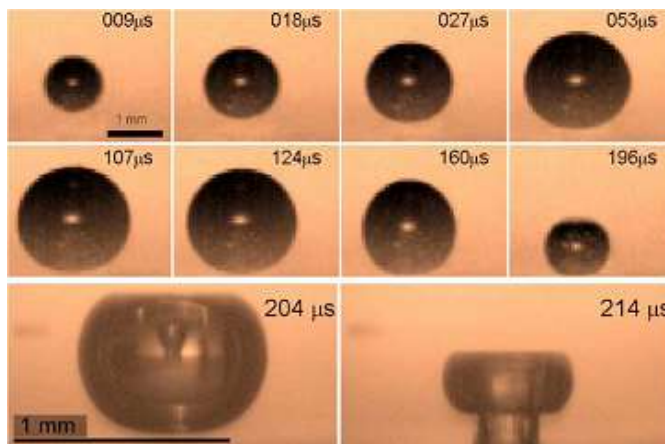


Рис. 9 Експериментальні фотографії динаміки бульбашки біля твердої поверхні при показнику політропи $\gamma = 1$. Три рядки відповідають трьом стадіям, а саме, ріст бульбашки, зхлопування бульбашки і мікроджетування.

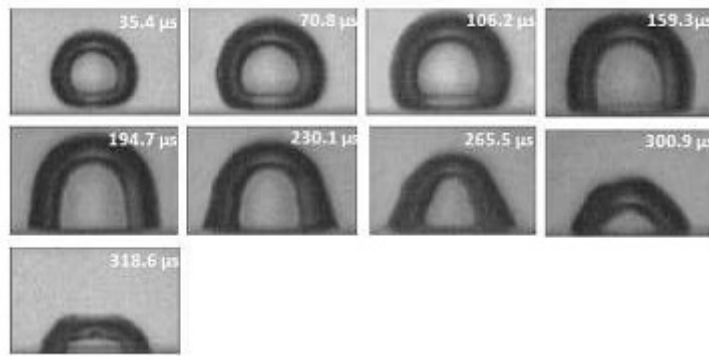


Рис. 10 Експериментальні фотографії динаміки бульбашки біля твердої поверхні при показнику політропи $\gamma = 0,6$. Три рядки відповідають трьом стадіям, а саме, ріст бульбашки, зхлопування бульбашки і мікроджетування.

Висока температура, що виникає у пульсуючих кавітаційних бульбашках близька до температури плазми і може викликати сонолюмінесценцію у рідкому середовищі, значно підвищує хімічну активність рідкого середовища і обробляємих зразків (матеріалів) та прискорює процеси хімічної взаємодії між ними (Рис. 11).

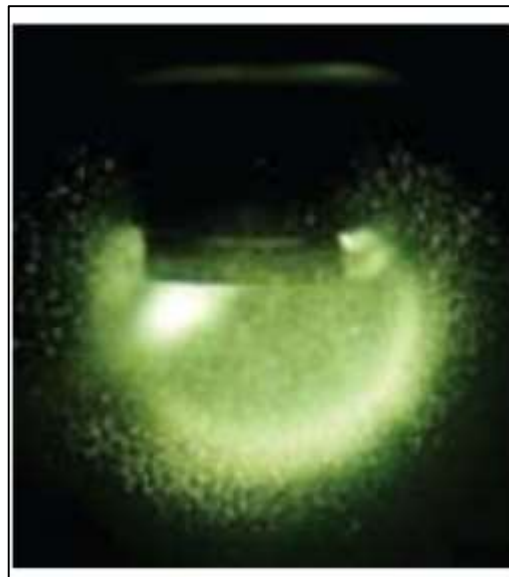


Рис. 11 Сонолюмінесценція кавітуючої порожнини

()

Синтезування у вигляді сонохімічних реакцій

Слід відзначити, що на сьогодні енергія УЗ поля використовується для хімічного синтезу з метою отримання сучасних наноструктурованих матеріалів. Ця актуальна тенденція, відома як сонохімія і заснована на виникненні та

розвитку в рідких хімічних середовищах кавітаційного процесу і супроводження його у вигляді сонохімічних реакцій. Для випадку води у інтенсивних кавітаційних полях в результаті градієнту високої температури T і тиску P молекули води розкладаються з утворенням активних радикалів і окиснювачів: H_2O_2 , O_3 та інш. [8]. На сьогодні сонохімічні методи використовуються для виробництва наноструктурних та наноструктурованих аморфних матеріалів, для включення наночасток до мезопористих матеріалів, осадження та маніпуляції напівпровідникових наночасток на поверхню полімерних і керамічних матеріалів, для виготовлення білкових мікро- і наносфер, тощо.

Для оцінки теплового ефекту кавітації оптично вивчали ділянки проплавленої поверхні на неметалевому прозорому субстраті (Рис. 12).

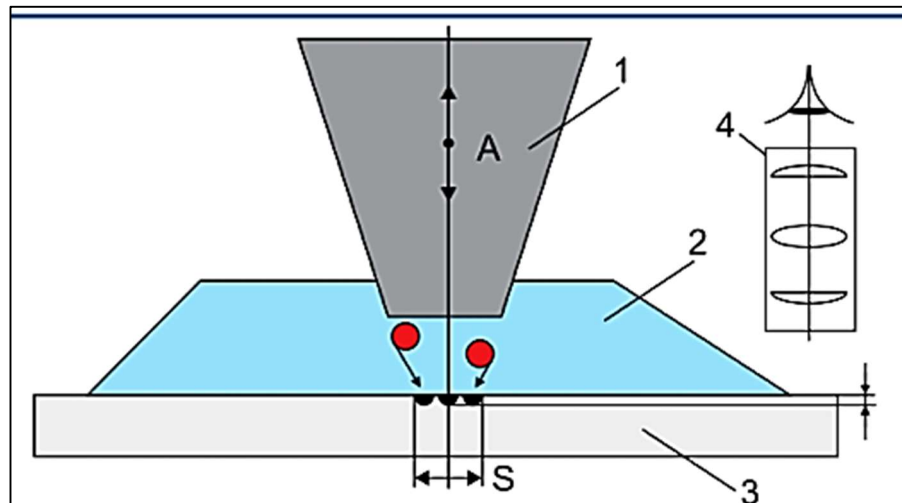


Рис. 12 Схема дослідження теплового ефекту кавітації: 1-хвилевід, 2- рідке середовище, 3- -скло, 4- мікроскоп.

Для оцінки та визначення кількісної оцінки дії УЗ кавітації в рідке середовище (гліцерин) помістили плоский зразок скла марки К8 і коливання УЗ були введені до обмеженої зони тривалістю (30–50) сек. Місця плавлення скла (Рис. 13) безпосередньо у зоні впливу УЗ коливань були розглянуті з використанням мікроскопу Planar micro200 зі збільшенням у (500–1000) крат.

Глибина ділянок проплавлення і їх кратерна природа вказують на те, що температура локального теплового поля під час інтенсивної УЗ кавітації

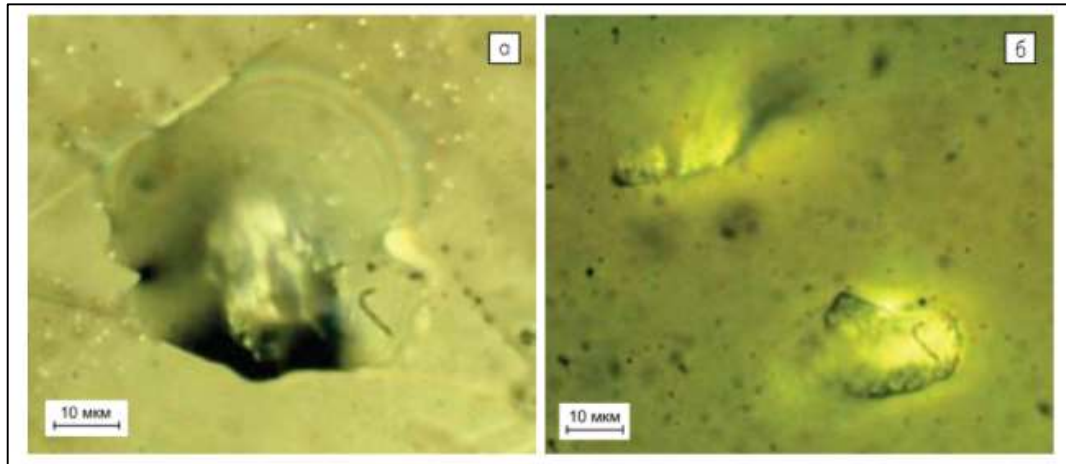


Рис. 13 ділянки проплавлення на склі: а) 1 мкм; б) 0,35 мкм.

значно перевищує температуру фазового переходу скла К8 (+575 °С). Одночасно біля поверхні інструменту, разом із УЗ кавітацією, виникають мікро- та макро-потоки (Див. Рис.14), які сприяють видаленню оксидної плівки та значному прискоренню процесу змочування поверхні металевим припоєм (Дивись раніше по тексту).

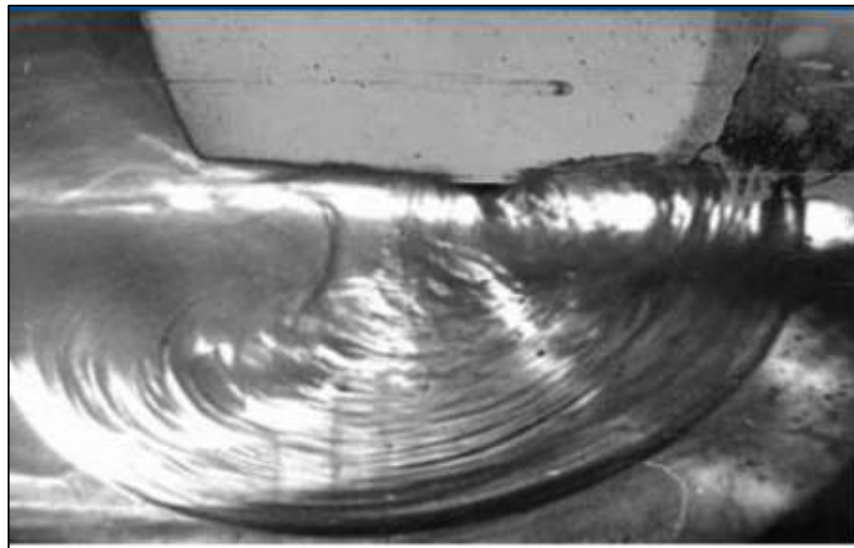


Рис. 14 Макро-потоки у в'язкій рідині.

При застосуванні УЗ високої інтенсивності у розплаві виникають такі інші явища, а саме: змінний звуковий тиск, «звуковий вітер», кумулятивна течія. Ці явища нелінійні, тобто супроводжуються виникненням розривів у безперервному рідкому середовищі, а ступінь їх появи в рідкому середовищі визначається співвідношенням швидкості УЗ-коливань v до швидкості звуку у рідкому середовищі c (тобто акустичним числом Маха) (13):

$$M = \frac{2\pi f A}{c} \geq 1 \times 10^{-4}. \quad (13)$$

Нелінійні ефекти виникають і у розплавах металу (припоях) при амплітуді коливань на частоті 22 кГц більших за (5–6) мкм, а на частоті 44 кГц при амплітудах УЗ - 3 мкм. Пульсація і зхлопування порожнин викликає появу в прилеглих до УЗ випромінювача ділянках, мікро та макро- потоків, які мають різний напрямок, що визначається формою поверхні випромінювача, амплітудою його коливань, перешкодами щодо розповсюдження УЗ коливань тощо. Масштаби мікро-потоків спів мірні з максимальними розмірами порожнин, а масштаб макро-потоків набагато більше максимального розміру кавітаційних порожнин.

Залежно від лінійного коефіцієнта розміру вихору струменя L п відношенню до довжини звукової хвилі λ розрізняють три типи струменів: великомасштабні, коли $L > \lambda$, середньомасштабні (релеєвські) коли $L \approx \lambda$ і дрібномасштабні (шлихтінговські) коли $L < \lambda$ [7].

Інтенсивні мікрострумені у рідких середовищах можуть сприяти утворенню твердих наносупензій [9]. Кращі умови для прискорення процесів масового і фізичного обміну, хімічних реакцій матеріалів і пайки створюють сформовані макро-потоки, які мають орієнтований напрямок спрямований від УЗ випромінювачів до робочої поверхні, що оброблюється і вони стаціонарні у часі. При цьому забезпечується масо переніс мікро-об'ємів припою на поверхню, що піддається паянню, і при цьому прискорюються реакції хімічної взаємодії компонентів припою з робочим матеріалом. Швидкість макро-потoku у в'язкій рідині при амплітуді УЗ коливань (15–20) мкм є (0,01–0,03) м/с, а зона дії складає (10–15) мм (Рис. 14) [10].

Електрокінетичні явища

Електрокінетичні явища у рідких середовищах викликані збільшенням рухливості носіїв заряду і появою їх спрямованого масопереносу у напрямку УЗ випромінювача під впливом тиску УЗ-хвилі. При явищі зхлопування додатковими носіями можуть виступати самі від'ємні заряджені кавітаційні бульбашки, які також беруть участь у явищі масо переносу. Явище масо переносу у рідині при її УЗ активації відбуваються, як за рахунок конвективного руху у вигляді макро- і мікро-потоків, так і за рахунок явища дифузії [3]. Вплив енергії УЗ поля проявляється у збільшенні коефіцієнту дифузії D , що є позитивним фактором та активізує утворення зародків кавітації (14):

$$D' = D_0 e^{-\frac{E-\Delta E}{RT}}, \quad (14)$$

де D_0 – пред експоненційний множник; E - енергія активації дифузії; D' - зміна енергії активації дифузії у УЗ полі; R - газова константа. При наявності УЗ поля на дифундуючі частинки діє сила F , і під її впливом частинки речовини будуть рухатися у середовищі зі швидкістю: $\mathbf{U} = v \mathbf{F}$, где v - рухливість (мобільність) частинок. При активації потоку дифузії УЗ полем додатково додається потік частинок, що рухається під впливом сили F . Отже, повний потік J дорівнює (15):

$$J = -D' \frac{\partial C}{\partial x} + UC_1 \cos \beta, \quad (15)$$

де C_1 — концентрація рухомих частинок; b - кут між векторами сили F (від УЗ поля) і дифузійного потоку J . Сила УЗ-поля F , що впливає на потік J частино залежить від частоти ω и амплітуди коливань A (16):

$$F = \rho c \omega A S. \quad (16)$$

Підставляю вирази (14) до (15), отримаємо (17):

$$J = -D' \frac{\partial C}{\partial x} + \nu \rho c \omega A S C_1 \cos \beta. \quad (17)$$

Вплив електричного струму сумісно с дією УЗ коливань у розплаві припою

Вплив електричного поля у вигляді імпульсів електричного струму I , що проходять через розплав металу з амплітудою $I_a = (3-5) I$ стимулює диффузію реакційно-активних компонентів у зоні активації [4]. Одночасна дія макропотоків (тобто дія УЗ) у розплаві припою і імпульсів потужного струму посилює спрямовану електро-дифузію компонентів у розплаві (Див. Рис.15). Загальний потік іонів реакційно - активних компонентів дорівнює [5] (19):

$$J_{\text{зв}} = B_a \rho \frac{I_a}{\tau} C_u \cos \alpha, \quad (19)$$

де I_a — амплітуда імпульсів струму; ρ — питомий електричний опір компонента; B_a — рухливість іону; t — тривалість імпульсу струму; C_1 — концентрація реакційно активних іонів у розплаві припою; α — кут між векторами електричного поля - E та потоком дифузії - J . Загальний потік частинок при спільній активації, а саме, з урахуванням теплового ефекту, що супроводжує дію УЗ, та електричних полів, що супроводжує проходження імпульсів електричного струму, загальний потік частинок дорівнює (19):

$$J = -D' \frac{\partial C}{\partial x} + B_a \rho \frac{I_a}{\tau} C_u \cos \alpha + \nu \rho c \omega A S C_1 \cos \beta. \quad (19)$$

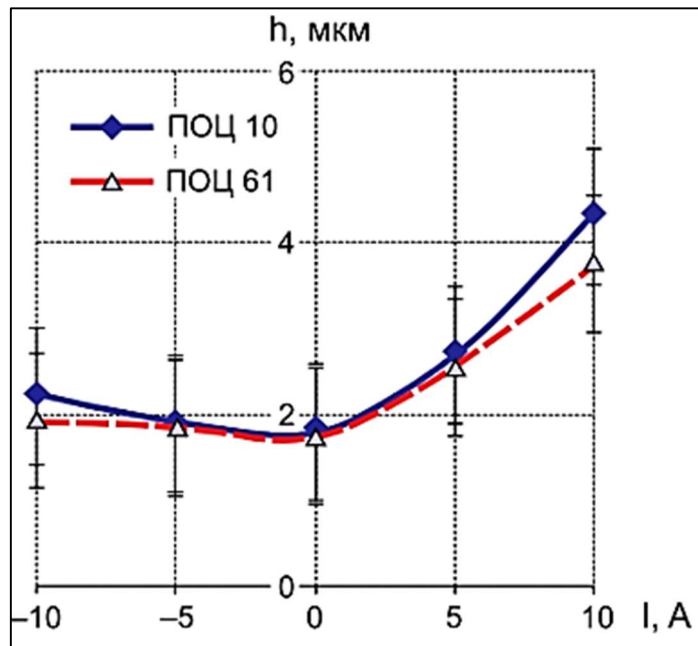


Рис. 15 Залежність ширини перехідної зони від напрямлення та величини імпульсів потоку.

З цього випливає, що механізм активації потужністю УЗ поля призводить до збільшення саме коефіцієнту дифузії, а компонента електричного поля до збільшення сумарного потоку реакційно-активних іонів металу у зоні взаємодії. Тобто, при сумісній дії УЗ та імпульсів електричного струму на розплави металів виникає явище електродифузії за рахунок співвідношенню сил, що діють на термічно збуджені іони металу. Через екрануючий вплив електронів вплив електричного поля невеликий, тому потужність «електронного вітру» є домінуючою, що збільшується зі збільшенням щільності струму. Як наслідок, збуджені іони, швидше за все, перемістяться на вакансію по напрямку руху електронів, ніж проти їх руху. Таким чином, вакансії зміщуються на негативний полюс (катоду), а іони металу до позитивного (анода), тим самим збільшуючи ширину зони дифузії.

Спрямована дифузія хімічних компонентів припою за рахунок явища електро-міграції при щільності струмів більше за (1–1,5) А/мм² за рахунок явища збільшення ширини ділянки дифузії призводить до підвищення міцності паяного з'єднання [11] (20):

$$J = -D_0 e^{-\frac{E-\Delta E}{RT}} C^{T_0} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x-(h/2)}{2\sqrt{D_0 e^{-\frac{E-\Delta E}{RT}} t}} \right) \right] + B_{\nu} \rho \frac{I_0}{\tau} C_{\parallel} \cos \alpha + \nu \rho c \omega \Delta S C_1 \cos \beta. \quad (20)$$

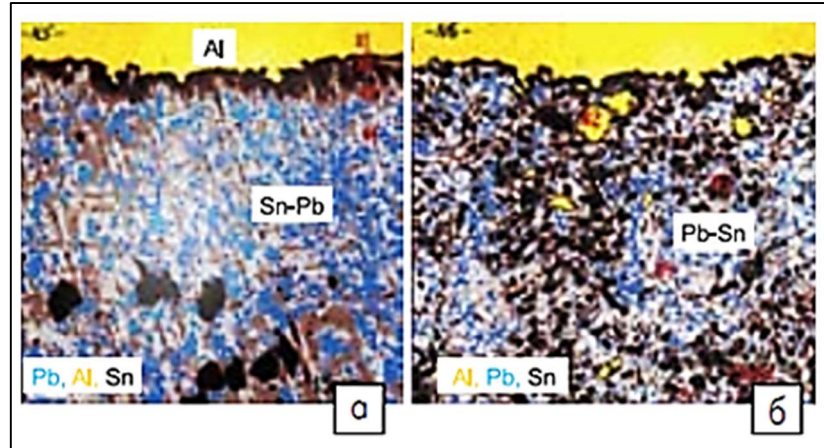
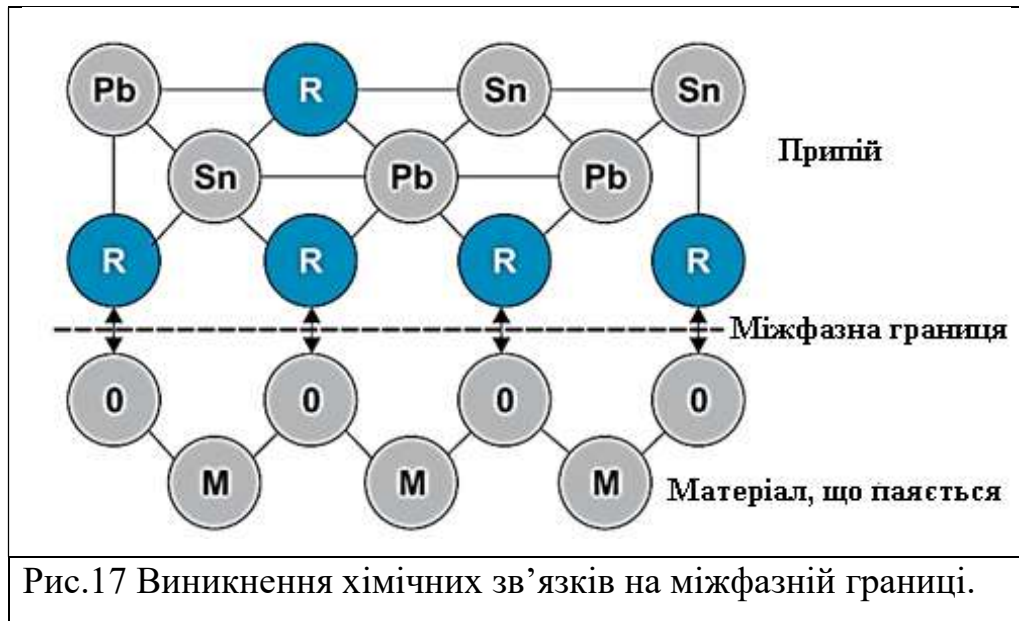


Рис.16 Мікроструктура паяних з'єднань Al-(Sn-Pb): а) в УЗ полі;
б) в УЗ із електричним полем.

Експериментальним шляхом було визначено ширину зони дифузії, яка була виміряна растровим електронним мікроскопом і становила (4–5) мкм для припою марки ПОЦ 10 та (2–3) мкм для припою марки ПОС 61 (Рис. 16). Для олов'яно цинкового припою ПОЦ 10 область дифузії була дещо більшою через наявність у розплаві електромобільного цинку, який мігрував до міжфазної границі і далі у глибину алюмінію (що піддавався операції паяння), збільшуючи при цьому ширину зони дифузії. Слід зазначити, що ширина перехідної зони зростає до (6–8) мкм за рахунок збільшення дифузійної взаємодії за рахунок явища електричної імміграції алюмінію до розплаву припою (Рис. 16а) у порівнянні з 1,5 мкм при УЗ- активації (Рис. 16б). Металеві домішки у припої такі як, цинк, алюміній, берилій, титан мають сильну спорідненість по відношенню до кисню і утворюють оксиди - *R*. При УЗ активації розплаву металів ці оксиди утворюють стабільні хімічні сполуки з оксидами - *O*, які присутні на



поверхнях металів, скла та кераміки (Рис. 17) [12]. Таким чином, без застосування флюсів, в такий спосіб утворюється з'єднання шляхом паяння між матеріалами, які відрізняються за хімічним складом.

За допомогою лазерного випромінювання УЗ коливання можуть вводитися до твердого або рідкого середовища безконтактним методом. Паяльні кульки діаметром 1 мм на мідних контактних ділянках плат розплавляли неодимовим лазером потужністю 14 Вт (Рис.18).

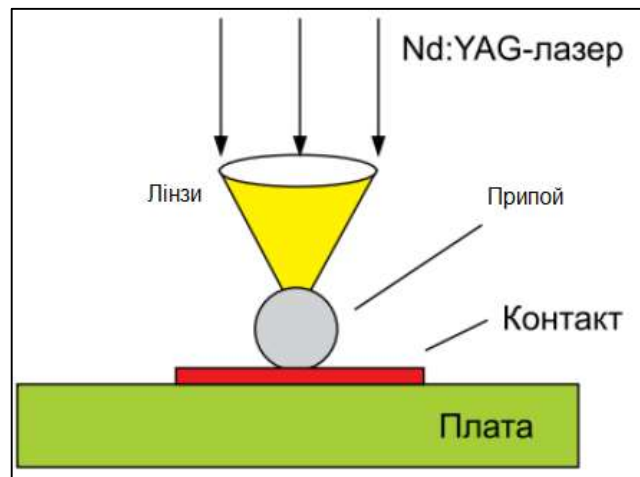


Рис. 18 Для модульованого лазерного променя (змочування припоєм контактної площадки).

Лазерний промінь модулюється із частотою 20 кГц і сфокусований до діаметру 0,7 мм на частках припою (Рис. 18). Змочування поверхні контактної зони відбувалося з застосуванням УЗ коливань з амплітудою 0,6 мкм,

збуджених у припою. Плавлення припою спостерігалось за час (250–300) мкс [13]. В результаті УЗ активації припою він розтікався по контактній зоні з кутом змочування 25°. Новий метод безфлюсової УЗ-пайки модульованим лазерним випромінюванням є актуальним для випадку складання електронних модулів високої щільності монтажу.

Аналіз процесів впливу потужного УЗ на рідкі середовища показує, що найбільша кількість вторинних фізичних ефектів створює саме процес кавітації (Див. Рис.19).

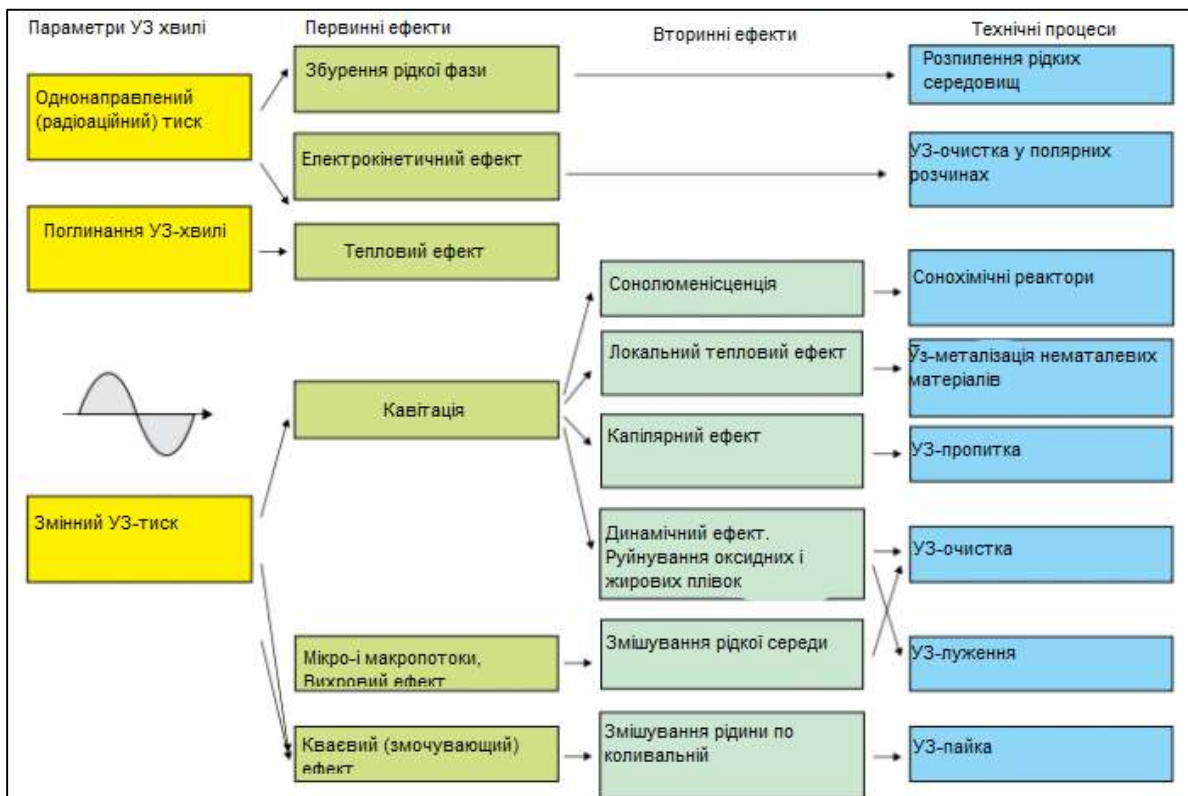


Рис. 19. УЗ-ефекти у рідких середовищах та їх застосування [39-56].

Роль локальних теплових ефектів

Локальні теплові ефекти використовуються в технології металізації неметалічних матеріалів: кераміки, скла кераміки, феритів та інш. [14, 15] за рахунок створювання умов формування хімічних зв'язків між оксидами на міжфазних границях. Динамічні ефекти видаляють жирові забруднення та оксидні плівки з поверхонь матеріалу, що є фізичною основою процесів УЗ-очищення в рідких середовищах [16-17] та УЗ-пайці не спаюємих матеріалів [10, 18].

Деякі основні ефекти, такі як електрокінетичний і крайовий (змочувальний) ще широко не використовуються у технологіях з обмеженнями, що пов'язані із можливостями їх впровадження. Безсумнівні перспективи мають безконтактні способи введення ультразвуку у рідкі середовища: модуляція високочастотного електромагнітного випромінювання [19] та лазерного випромінювання УЗ-частотами.

Такий підхід дозволяє використовувати фізичні ефекти взаємодії полів різної природи, для прецизійного та високо регулятивного впливу енергії на мікро- та нано-об'єми речовини, прискорення процесів змочування, розтікання та хімічної взаємодії різних за природою матеріалів.

УЗ в терапії раку

Гіпертермія вважається однією з найпопулярніших і добре вивчених модальностей лікування в терапії раку [57]. Це неіонізуюче лікування засноване на температурному зростанні пухлини, що робить ракові клітини більш сприйнятливими до радіо- і хіміотерапії за рахунок індукованих теплом хемосенсибілізації [58] і оксигенації пухлинної тканини. Крім того, деякі специфічні білки забезпечують здорові і злоякісні клітини з різною гіпертермальною чутливістю, що призводить до селективного руйнування пухлини [59].

Існує кілька методів виробництва гіпертермії, але загальна мета полягає в тому, щоб генерувати гіпертермію локально із використанням зовнішнього електромагнітного випромінювання або ультразвукового джерела. УЗ широко використовуються в сучасній медицині він є одним з найбільш перспективних і ефективних зовнішніх джерел для місцевої гіпертермії. Це пов'язано з його численними перевагами перед лазерними або електромагнітними джерелами хвиль: низькою інвазивністю, точним фокусуванням і відмінною глибиною проникнення. Ці особливості мають вирішальне значення для місцевої термоабляції як доброякісних, так і злоякісних пухлин глибоко всередині організму, не завдаючи серйозної шкоди шкірі або прилеглим здоровим тканинам. Наразі доступно УЗ-методика лікування високої інтенсивності де використовують

джерело ультразвуку високої інтенсивності (**HIFU**), які дозволяють відносно високий ступінь точності та ефективності.

Однак використання HIFU має кілька недоліків. Необхідним є точне і дороге фокусувальне обладнання для досягнення контрасту між нормальними тканинами і ділянками ураження. Вплив HIFU обмежується у зв'язку з тим що об'єм тканини піддається тривалому часу абляції і це може призвести до небажаних теплових травм і мутації ДНК в навколишніх здорових тканинах через УЗ хвилі, відбиті від інтерфейсів. Спеціальні мікро- та наноагенти, іноді називають соносенсибілізаторами, було запропоновано для подолання обмеження HIFU абляції.

Соносенсибілізатори можуть значно підвищити терапевтичну ефективність за рахунок зниження інтенсивності та тривалості УЗ, необхідної для терапевтичного ефекту. Останні досягнення в нанобіотехнології та наномедицині направили дослідників на створення різних типів соносенсибілізаторів. Наприклад, золото, магнітні, і кремній NPs, а також високотермопровідні наночастинки оксиду графену, є хорошими медіаторами для стимульованої УЗ гіпертермії через значне вивільнення енергії через УЗ поглинання. Мезопористий кремній-на базі NPs посилює УЗ кавітаційний ефект, що призводить до додаткового нагрівання навколишнього середовища та ініціювання сонохімічних реакцій та сонолюмінесценції.

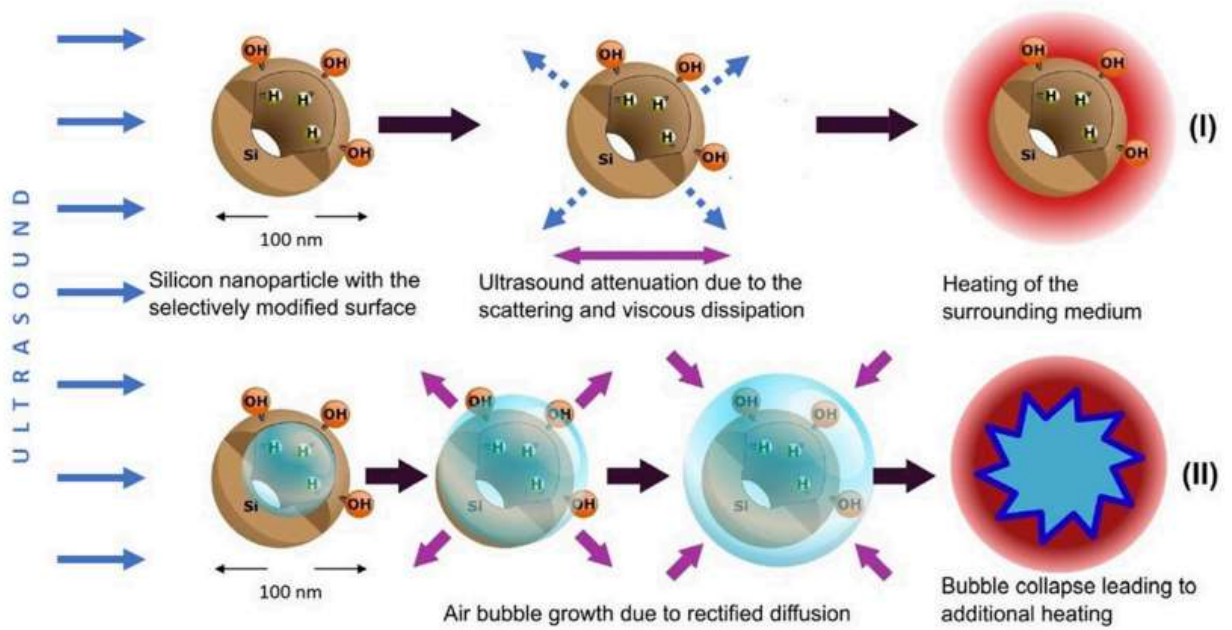


FIGURE 8 | Two mechanisms of the dissipation of US energy in aqueous suspensions of O-PSi NPs and J-PSi NPs: (I) enhanced scattering of US waves and viscous dissipation of the US energy, which takes place for both types of the suspensions; (II) acoustic cavitation leading to the high-energy bubble collapse and additional heating, which is most pronounced in case of J-PSi NPs with hydrophobic inner walls. Blue solid arrows indicate energy flow vectors of the incident ultrasound beam, dashed arrows correspond to the waves scattered by PSi NPs. Violet arrows depict the process of viscous friction and air bubble dynamics.

Рис. 20 Нагрівання наночасток кремнію УЗ кавітацією.

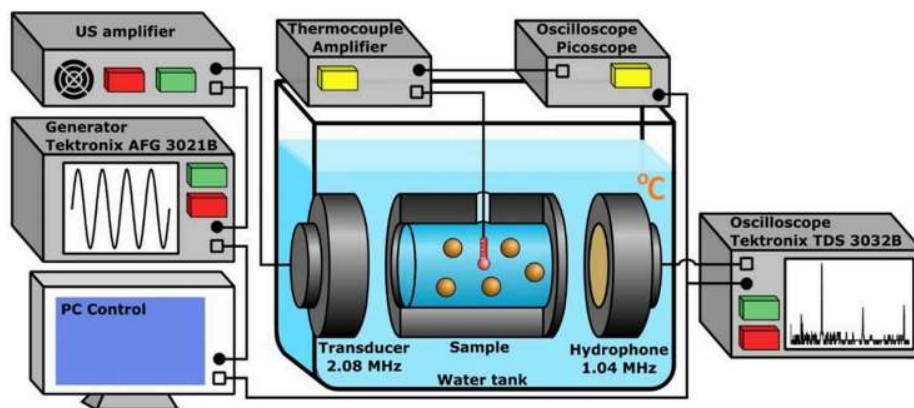


FIGURE 2 | The experimental setup used for the heating measurement and cavitation detection in aqueous suspensions of PSi NPs. The cuvette, US transducer, and hydrophone are immersed into the water tank. The amplified sinusoidal signal from the generator is irradiated by the transducer, the oscilloscope collects data from the hydrophone and performs FFT. The E-type thermocouple measures the heating. The PC reads data from the oscilloscopes and controls the generator.

Рис. 21 Типова установка нагрівання та контролю УЗ дії на зразки у водному середовищі.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА РОБОТИ

Модифікація напівпровідника на прикладі монокристалічного GaAs у криогенному середовищі шляхом УЗ кавітації

Застосування явища кавітації є новим форматом використання енергії акустичних коливань для синтезу та наноструктурування поверхні напівпровідників. При цьому GaAs набуває нових властивостей, які розширюють функціональні можливості та область застосування напівпровідника.

Для зразків монокристалічного миш'яку галію, виставлених УЗ обробці в криогенній рідині для модифікації нас, отримані наступні результати:

- 1.) Результати оптичної мікроскопії.
- 2.) Спектри фото- е.р.с. чутливості досліджувалися на автоматизованій установці за методом синхронного детектування на базі дзеркального монохроматора SPM2. Блок-схему вимірювань зображено на Рис. 22

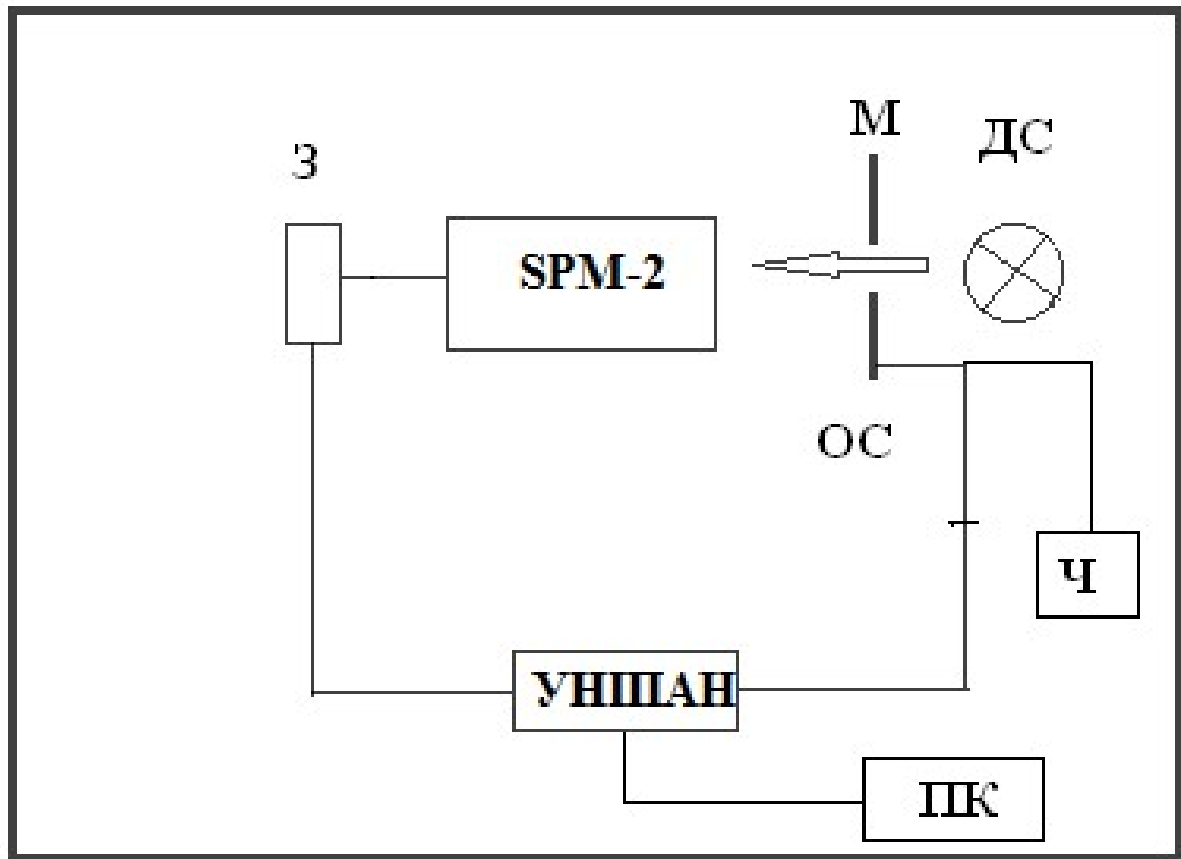


Рис. 22 Блок-схеми дзеркального монохроматора SPM2.

де ПК -комп'ютер, Ч- частотометр, УНИПАН – вольтметр-детектор, М- механічний модулятор світлового променя, ДС- джерело світла (ІЧ), З – зразок.

Джерелом азоту в нашій роботі була криогенна рідина (азот) біля точки кипіння (78 К). Відомо, що дисоціація азотного газу пов'язана зі значними труднощами, викликаними достатньо великою енергією зв'язку молекули N₂. Як зазначалося раніше, при адіабатному колапсі кавітаційної бульбашки теоретично всередині неї може розвинути температура порядку 10⁴К [74].

У порівнянні з водою тиск насичених парів рідкого азоту перевищує на порядок величину значення водяної пари, а в'язкість рідкої фази в 3-4 рази менше для азоту, що дає можливість очікувати великих обсягів тиску і температури в колапсуючих парових бульбашках. У Таблиці 3 наведено фізичні параметри різних рідин у порівнянні із рідким азотом.

Таблиця 3 Деякі криогенні рідини в порівнянні з водою

Вещество	Specific heat (J/Kg.K)	Liquid density (kg/m ³)	Liquid/Vapor density	Thermal conductivity (W/mK)	Vaporization heat (KJ/Kg)
Вода	4200	958	1603	681	2257
H ₂	9816	71	53	100	446
N ₂	2046	809	175	135	199
O ₂	1699	1141	255	152	213

Отже, кавітація УЗ в криогенній рідині здатна створювати термодинамічні умови всередині кавітаційної бульбашки для первинної активації молекул N₂що може призвести до модифікації поверхні GaAs [60].

Мабуть, ми спостерігаємо результати впливу плазмових кавітаційних бульбашок азоту на арсенід галію в криогенній рідині під дією УЗ, яка може мати радіаційний, тепловий і хімічний характер.

Ультразвукова обробка зразків напівпровідника GaAs проводилася у спеціальному низькотемпературному реакторі [60], конструкція якого забезпечувала введення енергії УЗ коливань в криогенну рідину. Схематично УЗ реактор для обробки напівпровідника у рідкому азоті зображено на Рис. 23

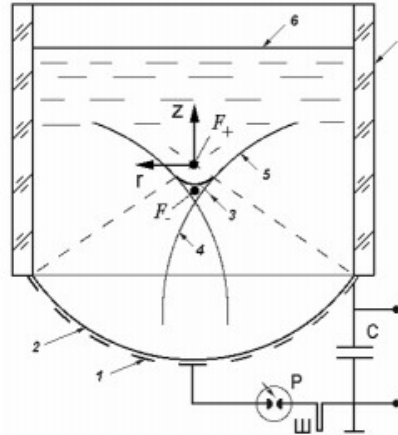


Рис. 23 Зображення УЗ реактора для обробки напівпровідників у криогенній рідині.

Вихідна інтенсивність акустичної енергії складала 1 Вт/см^2 . Для підвищення УЗ потужності була застосована система фокусування параболічною мідною лінзою із коефіцієнтом підсилення ~ 60 . Узгодження акустичної системи (перетворювач-лінза) складало 98%, проте при переході до рідкого середовища відбувалася часткова втрата потужності. З і всіма урахуваннями (тобто врахування акустичних втрат) максимальна УЗ потужність у фокусі криогенного реактора складала 15 Вт/см^2 .

Для зразків GaAs у вихідному стані та після УЗ обробки були досліджені спектральні ($\lambda = (0.5-2) \text{ мкм}$) залежності фоточутливості в режимі фото-ЕРС (Див. Рис. 24). Вимірювання проводилися при слабкому рівні збудження на частоті модуляції світлового променя $= 300 \text{ Гц}$ за допомогою селективного підсилювача із синхронним вольметром-детектором. Було зафіксовано факт, що у вихідному стані зразки GaAs досліджуваних монокристалів були практично не фоточутливі. Енергетичне положення піків фоточутливості наведено у Таблиці 4.

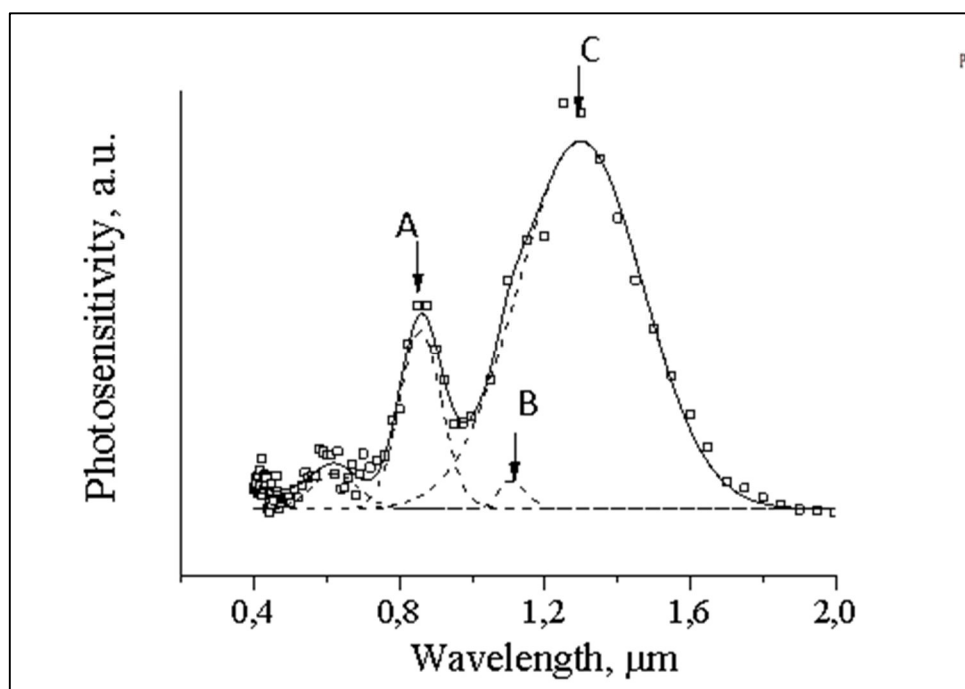


Рис. 24 Спектральні залежності фоточутливості типових досліджених зразків GaAs, отримані в режимі фото-ЕРС після кавітаційної обробки в рідкому азоті при частоті УЗЗ МГц.

Таблиця 4 Енергетичне положення піків спектрів фото-ЕРС, показаних на Рис. 24.

Положення піка	A	B	C
GaAs, після 30 хв. обробки	1.44 eV	1.12 eV	0.96 eV

Обробка зразків GaAs у рідкому азоті привела до появи сигналу фото-ЕРС в широкому спектральному діапазоні λ - від 0.5 мкм до 2 мкм. Для визначення положення та інтенсивності компонент, які складають спектр фотovoltaїчної чутливості, була застосована процедура підгонки з використанням функції Лоренца (підгонка із використанням функції Гауса незадовільна). Отримані спектри мають складну форму та можуть бути описані трьома лоренціанами (A, B і C, відповідно). Енергія, визначена для кожного із лоренціанів, представлена в Таблиці 4. Як видно з даних Таблиці 4, енергетичні положення піка **A** для GaAs близькі за значенням до величини ширини забороненої зони E_g (GaAs) = 1.42 eV. Розширення діапазону фотovoltaїчної чутливості арсеніду галію (пікі **B** і **C**, відповідно) – у довгохвильову $E < E_g$ (GaAs) область.

Для пояснення отриманого ефекту розширення діапазону фотовольтаїчної чутливості напівпровідникових монокристалів GaAs, як результату їх обробки в кавітуючій рідині, були залучені результати додаткових досліджень.

Було встановлено, що УЗ обробка зразків мінімальної тривалості 5-10 хвилин (при 1-3 МГц) приводила до появи точкових хаотично розташованих заглиблень на поверхні. При підвищенні тривалості обробки до 30 хвилин при тій же частоті та максимальній потужності спостерігалось утворення субмікронного рельєфу – хвилеподібних структур з невеликими округлими опуклостями. Зафіксовані окремо розташовані концентричні структури з діаметром до 10 мкм. (Рис. 25)

При підвищенні УЗ частоти до 6 МГц характер впливу кавітаційної обробки на поверхню досліджуваних матеріалів змінюється. Спостерігається утворення окремо розташованих, великого діаметру (від 100 до 1000 мкм), кратероподібних об'єктів.

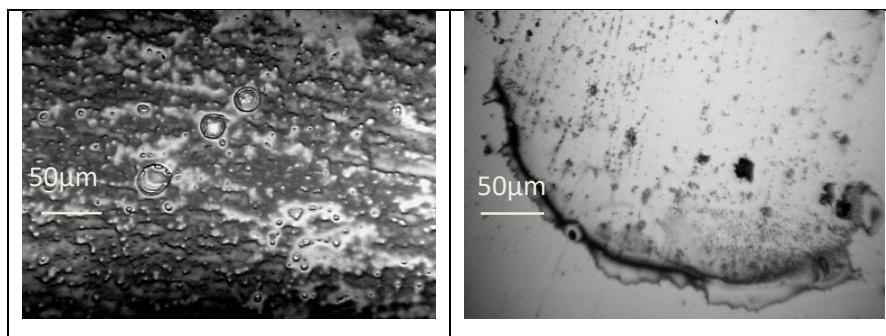


Рис.25. Оптичні мікрофотографії зразка GaAs, що піддаються акустичній кавітації в рідкому азоті при частоті 3 МГц протягом 50 хв (а) та при 6 МГц протягом 15 хв (b).

Таким чином у роботі досліджено процес кавітаційної обробки зразків напівпровідникового з'єднання монокристалічного GaAs у рідкому азоті. Розглянуті особливості формування наноструктур на поверхні напівпровідника. С практичної точки зору це надає можливість отримувати складного потрібного зєднання GaAsN так і текстурованого GaAs для задач оптоелектроніки.

Результати Роботи дозволяють стверджувати, що вони набувають нових властивостей, які наочно розширюють уяву про функціональні можливості та область застосування УЗ у нанотехнологіях.

ВИСНОВКИ

1. Було продемонстровано, що кавітаційний вплив, ініційований фокусуванням високочастотної акустичної хвилі в рідкий азот на частоті від 3 МГц до 6 МГц, привів до модифікації поверхні GaAs, аж до формування мікромасштабу на поверхні напівпровідника, а також зміни його хімічного складу (утворення в обробляемому напівпровіднику зв'язку Ga-N, тобто нової сполуки – нітриду арсеніду галію GaAsN).
2. Обробка зразків GaAs у рідкому азоті привела до появи сигналу фото-ЕРС в широкому спектральному діапазоні λ - від 0.5 мкм до 2 мкм.

Літэратура

1. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., И.В. и др. Лазерная и электроннолучевая обработка материалов М.: Машиностроение, 1985. 495 с.
2. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники В 3 т. Т.1 / А.П.Достанко, С.П.Кундас, С.В Бордусов и др. Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. Мн.: ФУА информ, 2000. 424 с.
3. Чачин В.Н. Электрогидравлическая обработка машиностроительных материалов. Мн.: Наука и техника, 1978. 183 с.
4. Дудин А.А. Магнито-импульсная сварка металлов. М.: Metallurgy, 1979. 128 с.
5. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. 302 с.
6. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1980. 184 с.
7. Шилиев А.С. Ультразвуковая обработка расплавов при производстве и восстановлении деталей машин. Мн.: Наука и техника, 1992. 175 с.
8. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П. Голяминой М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
9. Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1970. 688 с.
10. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната. М.: Metallurgy, 1974. 504 с.
11. Абрамов О.В. Воздействие мощного ультразвука на жидкие и твердые металлы. М.: Наука, 2000. 311 с.
12. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.В. Обработка металлов давлением с ультразвуком. Мн.: Наука и техника, 1973. 286 с.
13. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.В. Ультразвук и пластичность. Мн.: Наука и техника, 1976. 448 с.
14. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.В. Ультразвуковая обработка материалов. Мн.: Наука и техника, 1981. 295 с.

15. Асташев В.К., Смирнов В.К. О влиянии высокочастотной вибрации на процессы пластического деформирования. // *Машиноведение*, 1983. № 2. С.3-12.
16. Волосевич П.Ю., Козлов А.В., Мордюк Н.С. и др. Пластическая деформация стали в ультразвуковом поле // *Металлофизика*, 1983. Т.У, № 6. С.101-106.
17. Коновалов Е.Г., Игнашев Е.П. Плющение круглой проволоки в микроленты вибрацией ультразвуковой частоты // *Докл. АН БССР*. 1971. Т.ХУ. № 12. С.985-987.
18. Кундас С.П., Вышинский Н.В., Тявловский М.Д. Ультразвуковое плющение лент из тугоплавких металлов, применяемых в электронной технике и приборостроении / Под ред. А.П. Достанко. Мн.: Бестпринт, 2001. 296 с.
19. Никифоров Б.А., Каюков А.С., Королев Н.А. Геометрические параметры лент, полученных методом ультразвуковойковки. *Изв. вузов. Черная металлургия*, 1978. № 4. С.63-20.
20. Никифоров Б.А., Каюков А.С., Королев Н.А. Энергосиловые параметры процесса ультразвуковойковки лент микронных сечений *Изв. вузов. Черная металлургия*, 1978. № 6. С.60-62.
21. Кудрин Ю.А., Рейхельсон Ю.А. Ультразвуковое плющение прецизионной ленты для периодических структур ЭВП спирального типа. // *Обзоры по электронной технике. Сер. 7. Технология, организация, производство и оборудование*. М.: ЦНИИ Электроника, 1981. Вып.6 (781). 61 с.
22. Киселев М.Г., Минченя В.Т., Ибрагимов В.И. Ультразвук в поверхностной обработке материалов. Мн.: Тесей, 2001. 344 с.
23. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1980. 240 с.
24. Муханов И.И. Импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом. М.: Машиностроение, 1978. 44 с.
25. Прохоренко П.П., Пугачев С.И., Семенова Н.Г. Ультразвуковая металлизация материалов. Мн.: Наука и техника, 1987. 270 с.

26. Бреславец А.В., Хуторненко В.Д. Ультразвуковая чистка радиоаппаратуры. М.: Сов. радио, 1974. 80 с.
27. Келлер О.К., Кратыш Г.С., Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. Л.: Машиностроение, 1977. 184 с.
28. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике: Пер. с нем. / Под ред. В.С. Григорьева и Л.Д. Розенберга. Изд. 2-е. М.: Изд. иностр. лит., 1957. 726 с.
29. Труэлл Р., Эдъбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела М.: Мир, 1972. 308 с.
30. Физическая акустика // Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1969. т.1-4.
31. Кулемин А.В. Ультразвук и диффузия в металлах. М.: Metallurgy, 1978. 200 с.
32. Скучик К. Основы акустики: Пер. с англ. / Под ред. Д.М. Лямшева. М.: Мир, Т.2. 1976. 543 с.
33. Гершгал Д.А., Фридман В.М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. М.: Энергия, изд. 3-е, перераб. и доп. 1976. 319 с.
34. Усталостная прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения // Докл. I Всесоюзн. семинара. Киев.: Наукова думка, 1977. 250 с.
35. Тяпунина Н.А., Наими Е.К., Зеленкова Г.М. Действие ультразвука на кристаллы с дефектами М.: Изд-во Московск. ун-та, 1999. 237 с.
36. Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения // Докл. III Всесоюзн. семинара. Киев: Наукова думка, 1983. 348 с.
37. Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения // Тез. докл. Междунар. симпозиума Киев: Наукова думка, 1984. 212 с.
38. Махнач В.И. Моделирование и оптимизация в САПР технологических процессов кузнечно-штампового производства: Дис. д-ра техн. наук. АН Беларуси. Ин-т. техн. кибернетики. Минск, 1994. 225 с.

39. Leighton T. G. The Acoustic Bubble. London: Academic Press, 1994.
40. Прохоренко П. П., Дежкунов Н. В., Коновалов Г. Е. Ультразвуковой капиллярный эффект. Минск: Наука и техника, 1981.
41. Margulis M. A. Sonochemistry and Cavitation. London: Gordon & Breach, 1996.
42. Mason T. J., Lorimer J. P. Applied Sonochemistry: Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing. N. Y.: Wiley&Sons, 2002.
43. Румак Н. В., Бондарик В. М., Ланин В. Л. Электрические эффекты в жидкостях и расплавах под воздействием ультразвуковых колебаний // Доклады АН Беларуси. 1994. № 38 (2).
44. Ensminger D., Bond L. J. Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2012.
45. Gedanken A. Using Sonochemistry for the Fabrication of Nanomaterials // Ultrasonic Sonochemistry. 2003. № 10.
46. Lanin V. L., Dezhkunov N. V., Kotukhov A. V. Application of Ultrasonic Effects in Liquid Media for Fabrication of Nanomaterials // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2010. No. 3.
47. Кундас С. П., Ланин В. Л., Тявловский М. Д., Достанко А. П. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. Минск: Бестпринт. 2002.
48. Lanin V. L. Activation of Soldered Connections in the Process of Formation Using the Energy of Ultrasonic and Electric Fields // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2008. No. 3.
49. Sprovieri J. Soldering the Unsolderable/ Assembly. 2008. No. 4.
50. Li M. Y., Wang C. Q., Bang H. S., Kim Y. R. Development of Flux-Less Soldering Method by Ultrasonic Modulated Laser // J. of Materials Processing Technology. 2005. No. 168.
51. Ланин В. Л. Ультразвуковая толсто пленочная металлизация неметаллических материалов в производстве изделий электронной техники // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 3.

52. Kolenak R. Solderability of Metal and Ceramic Materials by Active Solders. Dresden: Forschungszentrum Dresden, 2008.
53. Ланин В. Л., Томаль В. С. Технология и оборудование ультразвуковой очистки изделий электроники // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 8.
54. Savage T. Ultrasonic cleaning in industry // Wire Industry. 2005. No. 6.
55. Ланин В. Л. Бесфлюсовая ультразвуковая пайка в электронике // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 4.
56. Ланин В. Л. Бесконтактные вибрации в процессах высокочастотного электромагнитного нагрева // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 2.
57. Wust, P., Hildebrandt, B., Sreenivasa, G., Rau, B., Gellermann, J., Riess, H., & Schlag, P. M. (2002). Hyperthermia in combined treatment of cancer. *The lancet oncology*, 3(8), 487-497.
58. Issels, R. D. (2008). Hyperthermia adds to chemotherapy. *European journal of cancer*, 44(17), 2546-2554.
59. Reis, C. R., Van Der Sloot, A. M., Natoni, A., Szegezdi, E., Setroikromo, R., Meijer, M., & Quax, W. J. (2010). Rapid and efficient cancer cell killing mediated by high-affinity death receptor homotrimerizing TRAIL variants. *Cell death & disease*, 1(10), e83-e83.
60. Brenner M. P., Hilgenfeldt S. and Lohse D.(2002). Single-bubble sonoluminescence // Rev. Mod. Phys.- 2002. - V. 74. - P.425–483.
61. Ефект наноструктурування Si та GaAs шляхом кавітаційної обробки в рідкому азоті / Р.К. Савкіна, О.Б. Смірнов // Доповіді Національної академії наук України. — 2015. — № 7. — С. 70-78. — Бібліогр.: 14 назв. — укр.