ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 14, № 4 (2013) С. 904-911

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 14, № 4 (2013) P. 904-911

УДК 621.315.592

ISSN 1729-4428

Р.І. Никируй

Технологія наноструктур ZnS: осадженя із газодинамічного потоку пари

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, e-mail: rostyslavn@ukr.net

Наведено аналітичні вирази для розрахунку основних параметрів газодинамічного потоку пари у циліндричній камері та розраховано їх профілі для сульфіду цинку у залежності від геометричних розмірів камери, градієнта температури, вздовж її стінок, природи матеріалу та температури його випарування.

Ключові слова: газодинамічний потік, сульфід цинку, параметри пари.

Стаття поступила до редакції 05.07.2013; прийнята до друку 15.09.2013.

Вступ

Плівки сульфіду цинку останнім часом привертають підвищену увагу дослідників через їх широке використання у приладових структурах сучасної електроніки [1-2]. Найбільш цікавими є тонкоплівкові напівпровідникові наноструктури цих матеріалів, що проявляють особливі властивості, пов'язані із поведінкою густини станів та оптичними відгуками. Виникнення впорядкованих структур на поверхні та в епітаксійних напівпровідникових плівках охоплює широкий спектр явищ у фізиці твердого тіла й в напівпровідниковій технології [3-8]. Створення 0D (квантових точок) і 1D (ниткоподібних нанокристалів) нанооб'єктів є актуальним як для фундаментальної фізики, так і для потенційних застосувань в електронних та оптоелектронних приладах. Широкий спектр фізичних властивостей нанокристалічних плівок ZnS знайшов відображення у масовому їх використанні при виготовленні акустоелектричних приладів (підсилювачів і детекторів ультразвуку, тензодатчиків), світлодіодів, адресних комутаторів в оптичних запам'ятовуючих пристроях, електролюмінесцентних екранів, електрооптичних елементів і т.д. [9]. Тому розробка методів синтезу і вивчення механізмів осадження нанокристалічних плівок ZnS являє науковий і прикладний інтерес.

Враховуючи значну кількість теоретичних робіт, важливе практичне значення мають методи отримання нанокристалічних матеріалів, які б забезпечили добре відтворення та високу ступінь керування властивостями у процесі вирощування.

Найбільшого поширення для отримання плівок сполук II-VI отримали вакуумні методи напилення (включаючи молекулярно-променеву епітаксію [3, 4]), газофазне осадження з парової фази [5, 6]. Різні методи вирощування зумовлюють різну структуру та властивості отриманих матеріалів [7].

Для плівок ZnS, вирощених *термічним вакуумним напилюванням* при температурах конденсації від 470 К до 620 К оптимальна температура підкладки складала 573 К. Плівки, вирощені при даній температурі, близькі до стехіометричного складу і складаються з нанорозмірних зерен (~ 40 нм) із кубічної модифікацією. Показано [7], що плівки ZnS володіють прямозонним переходом із енергією забороненої зони 3,61 еВ.

Плівки сульфіду цинку, отримані *методом надзвукового розпилення розчину*, досліджували в [8]. Оригінальний склад суміші становив 0,1 молекулярної ваги хлориду цинку в якості джерела Zn і 0,05 молекулярної ваги тіосечовини в якості джерела S. Температура скляної підкладки була в діапазоні (523 – 673) К. Рентгеноструктурні дослідження показали, що плівки ZnS мають гексагональну структуру із переважною орієнтацією (002) та розміром зерен від 20 нм до 50 нм. Розмір зерна збільшувався з підвищенням температури підкладки. Плівки складалися з сульфіду та оксиду цинку в різній пропорції. Стехіометричному складу відповідали плівки, отримані при температурі конденсації 673 К.

Вплив температури осадження на механізм росту тонких плівок ZnS вивчали у [9]. Плівки отримували *хімічним методом* в діапазоні температур (300 – 350) К. Характерними для них були нанокристалічна структура, а також прояви квантово-розмірних

ефектів. Спостерігали «блакитний» зсув в оптичних спектрах. Цей зсув пов'язано зі зменшенням кристалічних розмірів зерен. Автори [9] запропонували механізм росту, який включає два етапи:

1) гомогенне утворення зародків ZnS в розчині,

2) осадження та міграція зародків з утворенням суцільної плівки ZnS.

При вирощуванні *методом хімічного осадженням* на скляну підкладку, покриту SnO_2, використовували водний розчин, що містить цинковий сульфат і тіосечовину [10]. Морфологія плівок складала волокнисту структуру, сформовану частинками ZnS. Рентгеноструктурні дослідження виявили середній розмір частинок у межах (3 – 4) нм.

Властивості нанодротів сульфіду цинку досліджували в роботі [11]. Синтез являв собою *термічне випаровування* порошку ZnS із наступним осадженням на кремнієву підкладку, покриту шаром золота товщиною близько 40 нм. Кремнієву пластину попередньо очищали у водному розчині суміші 30% H_2O_2 і 20% H_2SO_4 з наступним промиванням у деіонізованій воді. Вирощування нанодротів здійснювали при температурі 1173 К в потоці аргону протягом 2 годин. Після охолодження системи на кремнієвій підкладці був виявлений продукт губчастої структури, який складався з нанодротин сульфіду цинку. Х-променеві структурні дослідження на гексагональну структуру в'юрциту з параметрами гратки a = 3,825 Å і c = 6,270 Å. Діаметр нанодротів варіювався в діапазоні (30 – 60) нм, довжина сягала кількох десятків мікрон. На кінцях окремих нанотрубок були окремі частинки діаметром від 100 нм до 200 нм, склад яких, за даними Х-променевого мікроаналізу, являв собою суміш Au, Zn і S. Дослідження на фотолюмінесценцію отриманих зразків при кімнатній температурі показало наявність двох смуг з максимумами при 480 нм і 520 нм. Перший пік був приписаний до поверхневих станів, другий автори пояснили наявністю сплаву Au-Zn-S [11].

Аналогічним є й процес синтезу ультратонких нанодротин ZnS, описаний у роботі X.M. Meng et al [12]. Нанокристали діаметром (10 – 20) нм та довжиною в кілька мікрометрів мали кубічну структуру сфалериту. Експерименти проводили в кварцовому реакторі діаметром 42 мм і довжиною 80 мм. В якості підкладки використовували кремнієві пластини розміром ~ (40 × 10) мм. На поверхню кремнію напилювали шар золота товщиною 3 нм. Тигель із завантаженим сульфідом цинку встановлювали в реакторі на відстані 30 мм від кремнієвих підкладок. Синтез проводили в проточній атмосфері суміші двох газів: 95% аргону і 5% водню. Швидкість потоку газу складала 50 мл/хв. Реактор нагрівали до температури 1073 К в області тигля із швидкістю 25 К/хв. й тримали при цій температурі протягом 30 хв. Потім температуру підвищували до 1373 К і тримали протягом 3 год. Поверхня підкладок мала температуру 1123 К. В результаті експерименту кремнієві підкладки були однорідно покриті нанодротами сульфіду цинку із сферичними частинками на кінці.

У роботі H.J. Yuan et al. [13] здійснено синтез нанострічок, нанодротин і наночастинок ZnS *методом термічного випаровування* порошку сульфіду цинку на мезопористу кремнієву підкладку при наявності золотого каталізатора. Авторами виявлено, що температура підкладки і концентрація пари ZnS були критичними параметрами, які впливають на різну морфологію утворюються наноструктур. Скануюча і просвічуюча електронна мікроскопія показали, що діаметр нанодротин дорівнював (30 – 70) нм. На кінцях нанодротин виявлені наночастинки діаметром 100 нм. Ультрафіолетова емісія при 374 нм відноситься до екситонної емісії, тоді як при 443 нм викликана, головним чином, наявністю різних поверхневих станів.

Особливої уваги заслуговують *методи отримання ZnS у квазізамкнутому об'ємі* (КЗО). Важливою перевагою синтезу плівок у методі КЗО є високий тиск пари халькогеніду в процесі конденсації, який значно перевищує тиск залишкових газів у зовнішньому робочому об`ємі установки на величину, приблизно на 10^3 Па [14]. Це призводить до зменшення забруднення шарів сульфіду цинку неконтрольованими домішками із залишкової газової атмосфери, що в свою чергу, запобігає утворенню у забороненій зоні матеріалу домішкових локалізованих станів.

I. Елементи теорії газодинамічного потоку

Для визначення оптимальних умов вирощування наноконденсатів у методі газодинамічного потоку пари вибирають зведені параметри процесу препарування (геометричні розміри камери, температура випаровування і градієнт температури вздовж стінок камери) та знаходять профілі вздовж стінок камери. На основі їх аналізу можна визначити ділянку камери, у якій властивості конденсатів найбільш повно задовольняють представленим до них вимог.

Профілі газодинамічних змінних розраховуються у вигляді функції від безрозмірної координати ξ. Для циліндричної камери довжиною l і діаметром D $\xi = (x-x_{кр})/(L-x_{кр})$. Нормування параметрів пари проводиться по їх значенням у початковому газодинамічному перерізі або, що те ж саме, за їх значеннями в критичному перерізі конденсації ($x = x_{кр}$). В інтервалі $x_0 \le x \le x_{кр}$ параметри пари, яка рухається в циліндрі не змінюється.

Газодинамічні змінні однозначно можна виразити через число Маха (М). З цією метою знаходять залежність М від безрозмірної координати ξ. Рівняння M = M(ξ) має різний вигляд для двох областей: із врахуванням ревипаровування пари зі стінок камери (підкладки) і без врахування ревипаровування [15]. Згідно [15-18], коефіцієнт конденсації (α), нормовані значення густини (ρ/ρ_1),

температури (T/T_1), витрати (G/G_1), швидкості потоку (u/u_1) пари, результуючої швидкості конденсації ($\omega^* = \omega/\omega_1$), ступеня пересичення парової фази (ψ) визначаються як [15]:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{1+0,2M^2}{1,2}\right)^3 \exp\left(-\frac{6,88\xi}{1-0,242\xi}\right);$$

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \left(\frac{1,2}{1+0,2M^2}\right)^{2,5};$$

$$\frac{p}{p_1} = \left(\frac{1,2}{1+0,2M^2}\right)^{3,5};$$

$$\frac{T}{T_1} = \frac{1,2}{1+0,2M^2};$$

$$\frac{G}{G_1} = M\left(\frac{1,2}{1+0,2M^2}\right)^3;$$

$$\frac{u}{u_1} = M\sqrt{\frac{1,2}{1+0,2M^2}};$$

$$\omega^* = \frac{\omega}{\omega_1} = 1,6\left[\left(\frac{1,2}{1+0,2M^2}\right) - \exp\left(-\frac{6,68}{1-0,242\xi}\right)\right];$$

$$\psi = \frac{\rho(T)}{\rho_H(T_C)}.$$

Тут індекс „1” вказує на значення відповідного параметру у початковому перерізі, ρ_H – густина насиченої пари при температурі стінки камери в цьому ж перерізі.

Нормуючий параметр ω_1 являє собою потік частинок пари в початковому газодинамічному перерізі.

Значення тиску (p_1), витрати пари (G_1) і швидкості потоку (u_1) в початковому газодинамічному перерізі:

$$p_1 = \rho_1\left(RT_1/m\right),$$

$$u_1\sqrt{\gamma RT_1/m},$$

$$G_1 = \rho_1 u_1\left(\pi D^2/4\right).$$

Для двохатомного сульфіду цинку ($\gamma = Cp/Cv = 7/5$). Густина пари в початковому перерізі $\rho_1 = 0,33\rho_н(T_c)$. Густину насиченої пари знайдене з рівняння стану ідеального газу $\rho_н(T) = mp_н(T_s)/RT$. Коефіцієнти A і B в рівнянні $\ln p_н = \frac{B}{T} + A$ температурної залежності пружності парів сульфіду цинку наводяться в ряді робіт, наприклад [19, 20]: A = 11,92, B = 13390 град.

При лінійній зміні температури вздовж камери положення критичного перерізу конденсації для двохатомної пари визначається із виразу

$$x_{кр} \approx [T_S(1-\eta) + (1,3RT_S^2/E_S)/(dT_C/dx)].$$

Тут E_S – енергія випаровування сполуки, параметр η являє собою відношення енергій випаровування тонкої плівки і масивного матеріалу.

II. Параметри газодинамічного потоку пари сульфіду цинку

Аналіз технологічних процесів осадження пари зручно проводити на основі залежностей коефіцієнта конденсації (α), швидкості результуючої конденсації (ω^*), ступеня пересичення парової фази ($\ln\psi$) та інших згідно (1)-(3) від безрозмірної координати (ξ), розмірів камери (діаметра d та довжини L), градієнта температури вздовж стінок в камері $\frac{dT_C}{dx}$ та температури випаровування Ts.

Розрахунки параметрів пари проведено для двох областей: із врахуванням та без врахування процесів ревипаровування зі стінок камери. Отримано, що при $0,1 \le \xi \le 0,2$ значення числа Маха приблизно одинакові для обох областей і плавно переходять одна в одну. Із врахуванням цього, на рис. 2-5 побудовано сумарні криві, які до значення $\xi \le 0,15$ враховують процеси ревипаровування і не враховують їх для вищих значень безрозмірної координати.

2.1. Профілі параметрів. Параметри газодинамічного потоку, які пов’язані із процесами масопереносу визначаються розміщенням підкладки, на якій відбувається конденсація. У зв’язку із цим, на рис. 1 наведено залежності основних параметрів пари від безрозмірної координати (ξ) для сульфіду цинку.

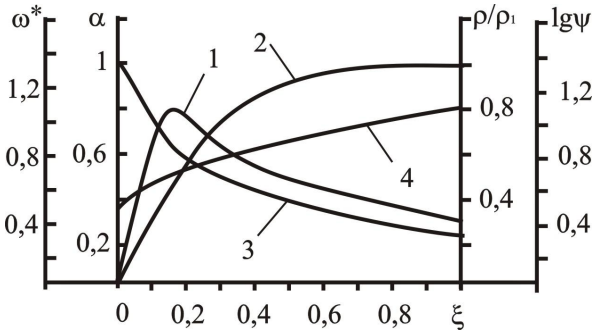

Рис. 1. Профілі параметрів газодинамічного потоку пари ZnS: результуючої швидкості конденсації ω^* (1), коефіцієнта конденсації α (2), нормованих значень густини потоку пари ρ/ρ_1 (3) та ступеня пересичення парової фази ψ (4).
Температура випаровування T_s = 923 К, градієнт температури вздовж стінок камери dT_C/dx = -3·10^{-3} К/м, довжина камери L = 0,08 м, діаметр d = 0,05 м.

Видно (рис. 1 – крива 1), що при зростанні ξ внесок ревипарування швидко зменшується і при $\xi \ge 0,6$ коефіцієнт конденсації стає близьким до одиниці. Тому на ділянці камери $\xi \ge 0,15$ рух пари досить точно можна описати функцією M(ξ), що не враховує ревипарування зі стінок камери. При цьому можна вважати, що кожна молекула пари, що потрапила на стінку камери, конденсується на ній.

Залежність розрахованих значень результуючої швидкості конденсації ω* від безрозмірної

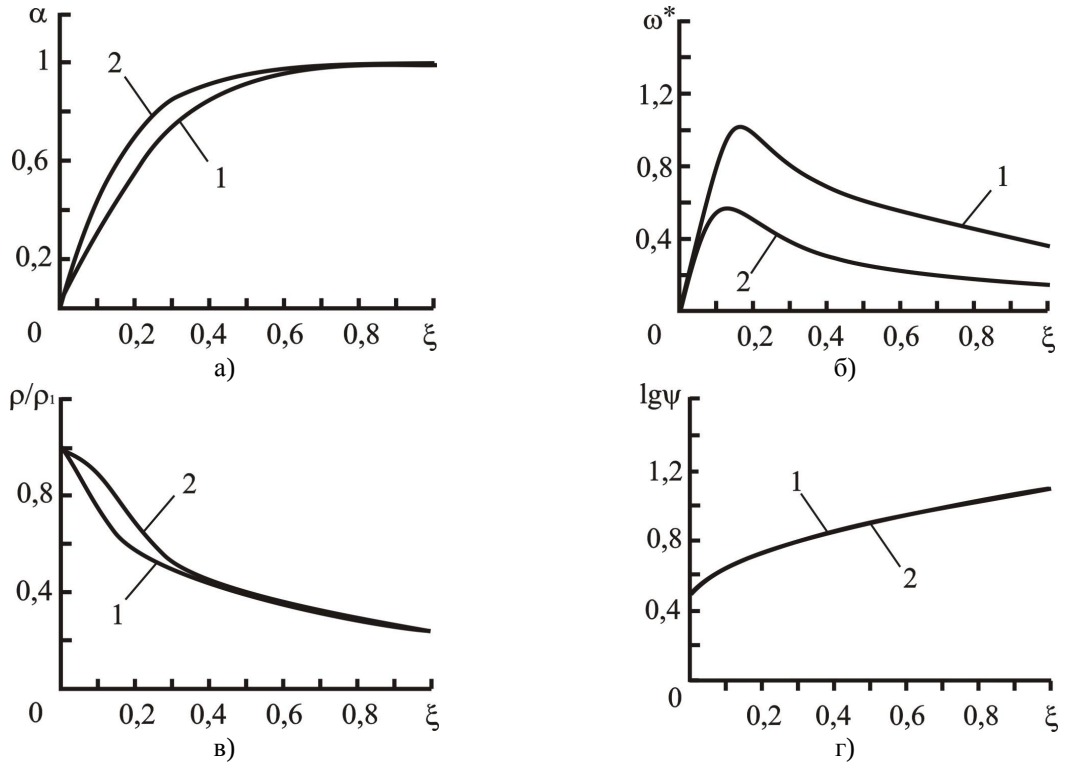

Рис. 2. Залежності коефіцієнта конденсації α (а), результуючої швидкості конденсації ω* (б), нормованих значень густини потоку пари ρ/ρ_1 (в), ступеня пересичення парової фази ln ψ (г) для телуриду свинцю, отриманого осадженням із газодинамічного потоку пари. Довжина камери L, м: 0,08 (1), 0,04 (2); T_S = 923 К та $dT_c / dx = -3 \cdot 10^{-3}$ К / м , d = 0,052 м.

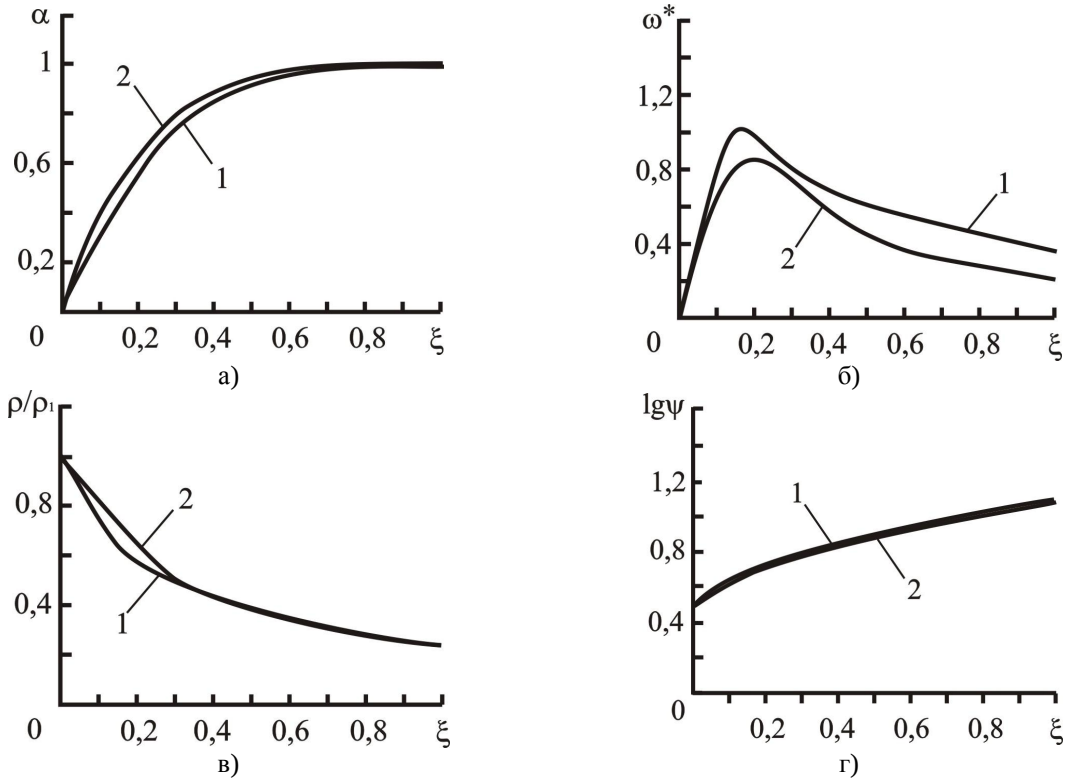

Рис. 3. Профілі коефіцієнта конденсації α (а), результуючої швидкості конденсації ω* (б), нормованих значень густини потоку пари ρ/ρ_1 (в), ступеня пересичення парової фази ln ψ (г) для сульфіду цинку, отриманого осадженням із газодинамічного потоку пари. Діаметр камери d, м: $5{,}2 \cdot 10^{-2}$ (1), $8 \cdot 10^{-2}$ (2); $L = 8 \cdot 10^{-2}$ м , $dT_c / dx = -3 \cdot 10^{-3}$ К / м , T_S = 923 К.

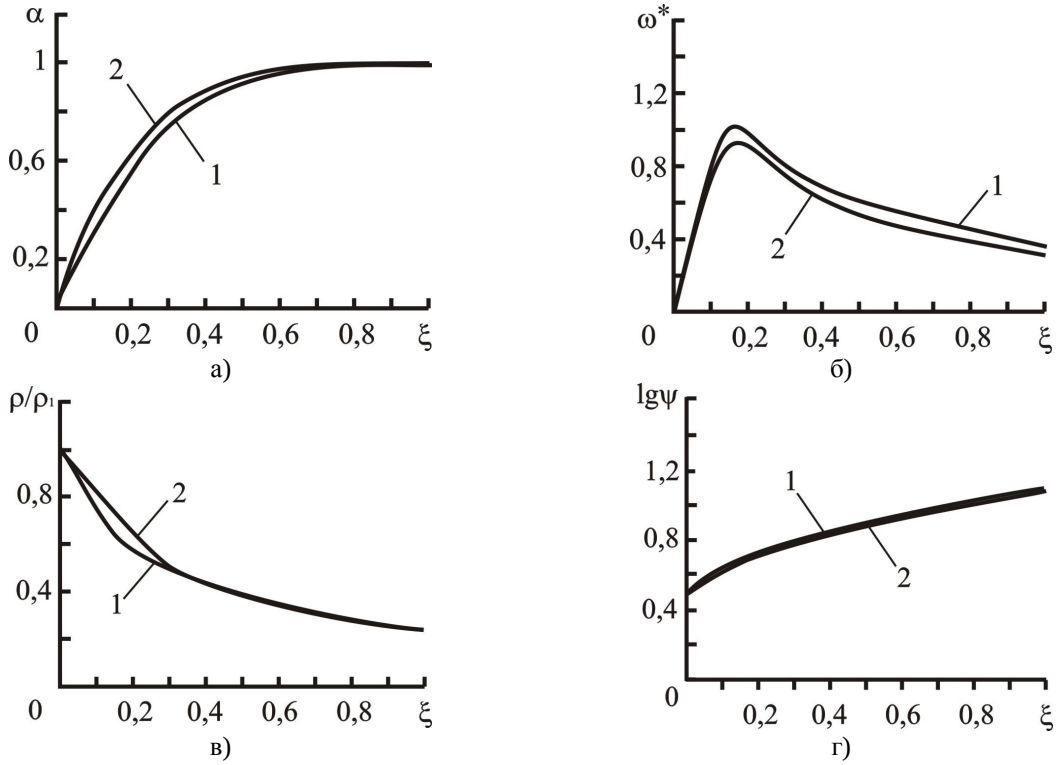

Рис. 4. Профілі коефіцієнта конденсації α (а), результуючої швидкості конденсації ω* (б), нормованих значень густини потоку пари ρ/ρ_1 (в), ступеня пересичення парової фази $\ln \psi$ (г) для сульфіду цинку, отриманого осадженням із газодинамічного потоку пари. Градієнт температури вздовж стінок камери dT_c / dx, К / м : $-2 \cdot 10^3$ (1), $-3 \cdot 10^3$ (2); T_s = 923 К, L = 0,08 м, d = 0,052 м.

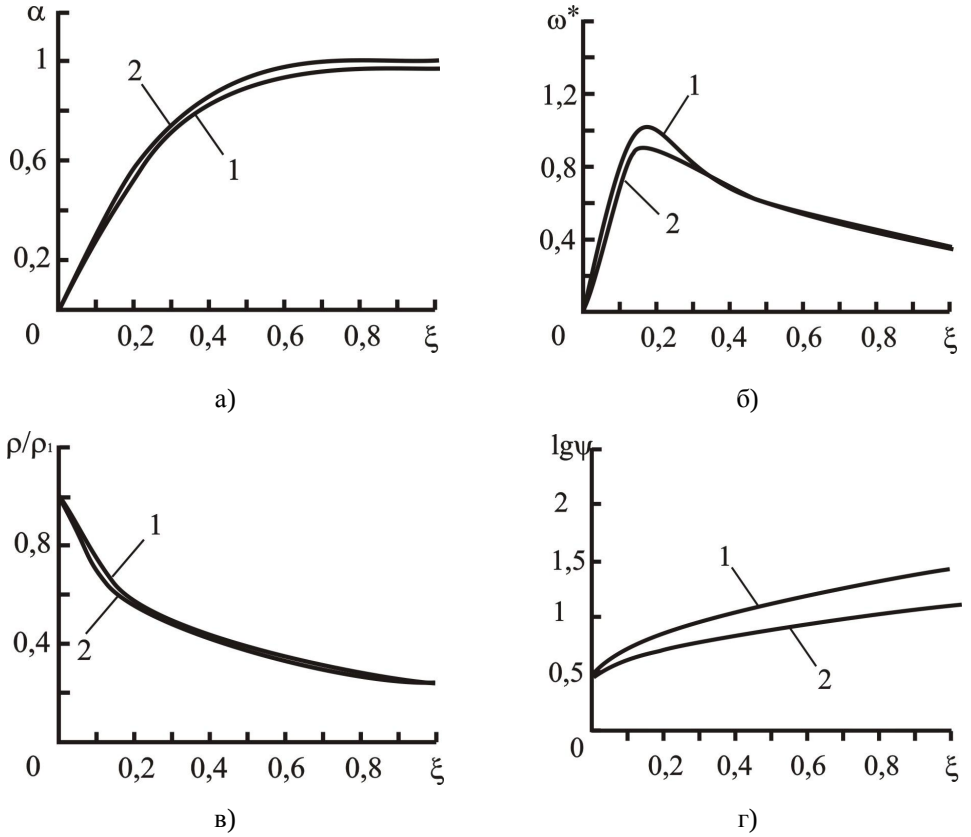

Рис. 5. Профілі коефіцієнта конденсації α (а), результуючої швидкості конденсації ω* (б), нормованих значень густини потоку пари ρ/ρ_1 (в), ступеня пересичення парової фази $\ln \psi$ (г) для телуриду свинцю, отриманого осадженням із газодинамічного потоку пари. Температура випаровування T_s, К: 923 (1), 823 (2), $dT_c / dx = -3 \cdot 10^{-3}$ К / м , L = 0,08 м, d = 0,052 м.

Таблиця 1

Основні характеристики для розрахунку параметрів газодинамічного потоку пари сполук ZnS

Енергія випаровування сполук 1-го моля речовини при 0 К: E_s, Дж·моль$^{-1}$	289800
Молекулярна маса речовини m, кг	0,0975
Відношення енергій випаровування плівки до масивного матеріалу η	1
Температура пари в початковому перерізі T_1, К	646
Тиск насиченої пари $p_н$, Па	13,2
Густина насиченої пари $\rho_н$, кг/м^3	$1{,}68\cdot10^{-4}$
Густина пари в початковому перерізі ρ_1, кг/м^3	$5{,}53\cdot10^{-5}$
Тиск пари в початковому перерізі p_1, Па	3,05
Швидкість пари u_1, м/с	277,72
Витратна дія в початковому перерізі G_1, кг/с	$3{,}1\cdot10^{-5}$
Критичний переріз $x_{кр}$, м.	0,011

координати ξ (рис. 1 – крива 2) вказує на те, що при $\xi \approx 0{,}35$ (що відповідає максимуму ω*) отримуємо плівки найбільшої товщини. При $\xi \approx 0{,}6$ крива швидкості конденсації зазнає зламу, що теж, як і у випадку з α свідчить про переважаючий вплив процесів конденсації над процесами ревипаровування в області високих значень ξ.

Відносна ж густина пари характеризується максимальним значенням у точці початку конденсації ($x = x_{кр}$, $\xi = 0$) (рис. 1 – крива 3). Зменшення ρ/ρ_1 із зростанням ξ можна пояснити тим, що за наявності у камері витратної дії (конденсації) тиск пари по мірі віддалення його від поверхні випаровування зменшується, що призводить до зростання довжини вільного пробігу молекули тавідповідного зменшення густини. За відповідних умов пара може розрідитися настільки, що довжина вільного пробігу λ стане спів розмірною із розмірами самої камери, що спричинить перетворення газодинамічного потоку в молекулярний. Аналогічним чином можна пояснити і зростання ступеня пересичення парової фази біля конденсації на підкладки (рис. 1 – крива 4).

2.2. Геометричні розміри камери. Вплив геометричних розмірів камери (довжина L, діаметр d) досліджено при фіксованих температурних параметрах (T_s = 923К, $\frac{dT_c}{dx} = -3\cdot10^{-3}$ К/м) (рис. 2, 3). Отримано що із зміною діаметру чи довжини камери положення максимуму швидкості конденсації практично не зміщується відносно значень безрозмірної координати і залишається $\xi \approx 0{,}18$ (рис. 2,б, 3,б). Однак збільшення діаметру камери (d) обумовлює більш різке збільшення результуючої швидкості конденсації (рис. 3,б – крива 2), що має певний технологічний зміст. Аналогічне зменшення ω* спостерігається і при зменшенні довжини камери L (рис. 2,б – крива 2). Це пов'язано із тим, що збіднення ж потоку за рахунок конденсації при цьому зменшується, оскільки рухомий потік пари зростає пропорційно d^2, а конденсація пари стінками – пропорційно збільшенню поверхні стінок, тобто пропорційно d. Різке ж зменшення швидкості конденсації при $\xi \geq 0{,}2$ (рис. 2,б і 3,б) відповідає зменшенню густини пари в камері (рис. 2,в і 3,в).

Таблиця 2

Оптимальні параметри газодинамічного потоку пари (коефіцієнта конденсації α, результуючої швидкості конденсації ω*, ступеня пересичення парової фази ψ, нормованих значень густини пари ρ/ρ_1 та безрозмірної координати ξ) для плівок та наноструктур сульфіду цинку при $\frac{dT_C}{dx} = 3\cdot10^3$ К/м, T_s = 923 К, L = 0,08 м, d = 0,05 м: 1 – за умови утворення плівок найбільшої товщини; 2 – в області критичного перерізу (можливість формування наноструктур)

	ZnS	
	1	2
α	0,42	*
ω*	1,06	*
lnψ	0,7	0,5
ρ/ρ_1	0,6	0,98
x, м	0,02	0,011
ξ	0,15	0

* – числові значення параметрів відповідають початку конденсації пари.

При цьому як збільшення діаметра камери d, так і зменшення її довжини L призводять до більш плавної зміни ступеня пересичення пари (рис. 2,г і 3,г – криві 2) і різкішого росту коефіцієнта конденсації, особливо для області $0{,}0 \leq \xi \leq 0{,}4$ (рис. 2,а і 3,а – криві 2).

За відсутності ревипаровування вплив геометричного чинника визначається тільки відношенням L/d. Проте врахування ревипаровування показує, що зміна довжини камери

L при фіксованих T_S, $\frac{dT_c}{dx}$ створює на параметри пари більш сильну дію, ніж зміна діаметру, оскільки L входить також і в експоненціальний множник ($\exp\left(-\frac{6,68}{1-0,242\xi}\right)$, де $\xi = (x-x_{кр})/(L-x_{кр})$). Тобто при зменшенні довжини камери, для забезпечення постійної градієнта температури $\frac{dT_c}{dx}$, доводиться збільшувати температуру кришки камери, що призводить до розширення зони ефективного ревипаровування.

2.3. Температурні фактори. Аналіз залежностей параметрів пари ZnS від температурних факторів – температури випаровування (T_S) і градієнта температури вздовж стінки циліндричної камери (dT_c/dx) – проведено за умови сталих значень L = 0,08 м, d = 0,052 м (рис. 4, 5). Так, із рис. 5,г слідує, що при постійному градієнті температури вздовж стінок камери ступінь пересичення зростає із зменшенням T_s. Коефіцієнт конденсації α, навпаки, зростає при збільшенні температури випаровування T_s.(рис. 5,а – крива 1)

Дослідження впливу градієнта температури на параметри пари проводилося експериментально при фіксованій температурі випаровування T_S = 923 К (рис. 4, 5). Видно, що зменшення за модулем $\frac{dT_c}{dx}$ зміщує криві α(ξ) в область малих значень ξ (рис. 4,а і 5,б). Це призводить, до відповідного зсуву ξ_{max}, що відповідає максимуму величини ω^*_{max} (рис. 4,а і 5,б). Таким чином зменшення $\frac{dT_c}{dx}$ діє на параметри подібно збільшенню T_s.

Довжина ділянки підкладки, на якій відсутній шар конденсату $x_{кр}$ зростає із збільшенням температури випаровування T_s та зменшенням градієнта температури (рис. 6,а). Причому, більш різкому зростанню $x_{кр}$ сприяє насамперед зменшення градієнта $\frac{dT_c}{dx}$, ніж зростання температури T_s. У розглядуваному інтервалі градієнта температури вздовж стінок камери спостерігається $x_{кр} < L$, що свідчить про те, що конденсація відбувається у межах випарної камери.

Оптимальним фізико-технічним умовам росту плівок відповідають максимальні значення ω*(ξ) і низькі значення ступеня пересичення (рис.6,б,г), які напряму пов'язані із густиною потоку пари (рис. 6, б, г). Для плівок ZnS таким умовам відповідають значення безрозмірної координати ξ = 0,15 та x = 0,02 м. (табл. 2).

Висновки

1. Наведено вирази для розрахунку параметрів газодинамічного потоку пари сульфіду цинку у випадку розхідної дії у циліндричній камері.
2. Виконано огляд методів отримання тонких плівок та наноструктур ZnS.
3. Розраховано залежності параметрів пари від безрозмірної координати.
4. Досліджено вплив геометричних розмірів циліндричної камери, градієнта температури вздовж стінок, температури випаровування на профілі параметрів газодинамічного потоку.
5. Визначено оптимальні умови осадження пари, що забезпечують формування конденсату із наперед заданими характеристиками.

Никируй Р.І. **–** кандидат фізико-математичних наук.

[1] S.Ricolleau, L.Audinet, M.Gandais, T.Gacoin, J.P.Boilot, Journal of Crystal Growth, **203**, 486 (1999).
[2] Физика и химия соединений AIIBVI: Пер. с англ. / Под ред. С.А. Медведева (Мир, М. 1970).
[3] S.K. Lok, G. Wang, Y. Cai, N. Wang, Y.C. Zhong, K.S. Wong, I.K. Sou, Journal of Crystal Growth, 311 (9), 2630 (2009).
[4] Chia-Wei Huang, Hsuan-Mei Weng, Yeu-Long Jiang, Herng-Yih Ueng, Thin Solid Films, **517**, 3667 (2009).
[5] Zhengbang Pi, Xiaolu Su, Chao Yang, Xike Tian, Fang Pei, Suxin Zhang, Jianhua Zheng, Materials Research Bulletin, **43**, 1966 (2008).
[6] Chongfeng Guo, C.H. Choy, Dexiu Huang, Yueping Fang, Preparation of 3D ZnSe novel structure // Journal of Physics and Chemistry of Solids, **67**(4), pp. 818-821 (2006).
[7] Y.P. Venkata Subbaiah, P. Prathap, K.T. Ramakrishna Reddy, Applied Surface Science, **253**, 2409 (2006).
[8] W. Daranfed, M.S. Aida, A. Hafdallah, H. Lekiket, Solid Films, **518**, 1082 (2009).
[9] R. Sahraei, G. Motedayen Aval, A. Baghizadeh, M. Lamehi-Rachti, A. Goudarzi, M.H. Majles Ara, Materials Letters, **62**, 4345 (2009).
[10] Hyun Joo Lee and Soo U Lee, Applied Physics, **7**, 193 (2007).
[11] Y.Wang, L.Zhang, C.Liang, G.Wang, X.Peng, Chemical Physics Letters, **357**, 314 (2002).
[12] X.M.Meng, J.Liu, Y.Jiang, W.W.Chen, C.S.Lee, I.Bello, S.T.Lee, Chemical Physics Letters, **382**, 434 (2003).
[13] H.J. Yuan, S.S. Xie, D. F.Liu, X. Q.Yan, Z. P.Zhou, L. J.Ci, J. X.Wang, Y.Gao, L.Song, L. F.Liu, W. Y.Zhou, G.Wang, Journal of Crystal Growth, **258**, 225 (2003).
[14] И.П. Калинкин. Эпитаксиальные пленки соединений A^2B^6 / И.П.Калинкин, В.Б. Алесковский (Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1978).
[15] Ю.З.Бубнов, М.С.Лурье, Ф.Г.Старос, Г.А.Филаретов. Вакуумное нанесение пленок в квазизамкнутом объеме. (Л., 1975).

[16] Д.М. Фреїк, М.А. Лоп'янка, А.К. Школьний, Р.І. Никируй, Фізика і хімія твердого тіла **6**(1), 28 (2005).
[17] М.А. Лоп'янко, Р.І. Никируй, І.В. Калитчук. Фізика і хімія твердого тіла **7**(2), 235 (2006).
[18] Д.М. Фреїк, М.А. Лоп'янка, А.К. Школьний, Р.І. Никируй, Фізика і хімія твердого тіла, **8**(3), 451 (2007).
[19] V.J. Silvestri, V.I. Lyons, J.Electr.Soc., **19**, 963 (1962).
[20] Термодинамические свойства неорганических веществ. Справочник. (Энергия, М. 1967).

R.I. Nykyruy

Technology of ZnS Nanostructures: Deposition from Gas-Dynamic Stream of Steam

Vasyl Stefanyk Precarpathian national University,
57, Shechenko Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine e-mail: freik@pu.if.ua

There are the analytical expressions for the basic parameters of gas-dynamic stream of steam into the cylindrical chamber and calculated their profiles for zinc sulfide, depending on the geometrical dimensions of the camera temperature gradient along its walls, the nature of the material and its temperature evaporation.