

УДК 535.327
 PACS 78.20.Ci
 DOI 10.24144/2415-8038.2019.46.30-39

І.Й. Росола, О.І. Чобаль, В.М. Різак

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Підгірна, 46,
 e-mail: vrizak@uzhnu.edu.ua

Вплив температури на дисперсію показника заломлення стекол As_XS_{1-X}

Досліджено дисперсію показника заломлення $n(\lambda)$ стекол As_XS_{1-X} в області концентрацій від $X = 0,20$ до $X = 0,40$ п'яти складів у температурному інтервалі від 80 до 370 К. Експериментальні результати $n(\lambda)$ стекол As_XS_{1-X} описано за допомогою одноосциляторної моделі Вемпле і Ді Доменіко. На основі експериментальних результатів розраховано атомні рефракції та коефіцієнт поляризованості стекол системи As_XS_{1-X} , а також пояснено їх температурну поведінку та концентраційну залежність. Одержано, що основний вклад у температурну поведінку показника заломлення дає теплове розширення матеріалу.

Ключові слова: склоподібний, синтез, рефракція, показник заломлення, одноосциляторна модель, енергія електронного осцилятора, дисперсійна енергія, коефіцієнт поляризованості.

Вступ

Халькогенідні склоподібні напівпровідники (ХСН) відрізняються від оксидних матеріалів своїм положенням на діаграмі Аббе: вони мають відносно великий показник заломлення і малий коефіцієнт дисперсії. На відміну від оксидних стекол, область прозорості ХСН простягається від видимої до середньої інфрачервоної області спектру. Поряд зі спектральними дослідженнями, в останні роки спостерігається підвищення інтересу до рефрактометричних методів дослідження. Знаючи показник заломлення світла і густину речовини, можна знайти її молекулярну (атомну) рефракцію, тобто електронну поляризованість [1]. За допомогою вимірювання і розрахунку рефракції можна розв'язувати такі задачі, як визначення координації атомів, природи хімічного зв'язку, тощо [1–3].

На думку автора [1], головною проблемою рефрактометрії залишається покращення точності обчислення мольних (атомних) рефракцій речовин, а також необхідності врахування дисперсії рефракцій [3]. Інтерес до вивчення фізико-хімічних і оптичних властивостей стекол системи As-S можна пояснити існуванням на її основі ряду більш

складних халькогенідних склоподібних напівпровідників, які мають практичне значення для оптоелектроніки та інших областей приладобудування [4–11].

Оскільки стекла As_XS_{1-X} можуть бути одержані у широкій області складів ($0,10 \leq X \leq 0,44$), то вивчення їх властивостей можна проводити як в області складів, збагачених миш'яком, так і в області складів, збагачених сіркою по відношенню до стехіометричного As_2S_3 . Крім того, велика різниця атомних мас миш'яку і сірки дозволяє розрізнити коливні зв'язки As-As, As-S, і S-S у спектрах комбінаційного розсіювання світла та інфрачервоного поглинання [2]. Це вигідно відрізняє систему As-S від інших склоутворюючих систем (наприклад, As-Se і Ge-Se), у яких майже рівні атомні маси елементних компонент не дозволяють однозначно інтерпретувати результати структурних досліджень, одержаних методами коливної спектроскопії.

У даній роботі проведено дослідження впливу температури на дисперсію показника заломлення $n(\lambda)$ стекол As_XS_{1-X} для п'яти складів в області концентрацій від $X = 0,20$ до $X = 0,40$.

Методика експерименту

Синтез досліджуваних матеріалів проводили по методиці, описаній у [8, 10]. З метою видалення залишкових напруг, які виникають внаслідок загартування, всі зразки відпалювали. Дисперсію показника заломлення досліджували по методиці, описаній в [12]. Заломлюючий кут призми визначали гоніометром ГС-1,5 з точністю до 2". Величину показника заломлення розраховували за формулою [13]:

$$n = \frac{\sin(\varphi + \delta)}{\sin(\varphi)}, \quad (1)$$

де δ — кут відхилення променя, який пройшов через призму, φ — кут призми. Оскільки використовувався метод нормального падіння променя, то величина кута призми не перевищувала $\arcsin(0,8/n)$ [14]. Точність визначення показника заломлення була не гірше 0,001. Крім того, для інтерпретації одержаних експериментальних результатів використано значення густини і коефіцієнта теплового розширення матеріалів [2, 10].

Результати та їх обговорення

Халькогенідні стекла, що використовуються у наших дослідженнях, займають чільне місце серед матеріалів, що задовольняють жорсткі вимоги сучасної техніки. Особливе значення мають дослідження впливу зовнішніх факторів на оптичні властивості ХСН, їх обов'язково потрібно передбачувати, прогнозувати та враховувати кількісно, якщо йдеться про практичне застосування ХСН у функціональній електроніці [15–17].

Із аналізу експериментальних і теоретичних даних мольної рефракції показано, що знаючи значення ширини забороненої зони E_g , густини d , молекулярної ваги μ достатньо виміряти значення показника заломлення n у якійсь лазерній точці, то це дасть можливість із точністю $\sim 3\%$ в діапазоні від 1 до 4,5 мкм та з точністю $\sim 2\%$ в діапазоні 4,5 до 12 мкм розрахувати значення показника заломлення n в області прозорості склоподібного As_2S_3 . Із збільшенням концентрації сірки ці значення покращуються. Для склоподібного $\text{As}_{0,10}\text{S}_{0,90}$ у діапа-

зоні довжин хвиль від 1 до 4 мкм значення експериментальних та розрахованих рефракцій співпадають з точністю $\sim 1\%$, а в діапазоні від 4 до 10 мкм — з точністю $\sim 0,5\%$ [3]. Звідси видно, що точність розрахунку рефракції доведена до рівня, при якому необхідно враховувати дисперсію, хоча у сучасній структурній рефрактометрії [1] дисперсія фактично не враховується.

На рис. 1 наведено результати дослідження дисперсії показника заломлення стекол $\text{As}_x\text{S}_{1-x}$ при 80, 300 та 370 К. Одержано, що для досліджуваних матеріалів показник заломлення n на фіксованій довжині хвилі із зростанням температури зменшується. У досліджуваній області спектру дисперсія показника заломлення має нормальний хід. У короткохвильовій області спектру різке зростання n зв'язано з краєм власного поглинання. Оскільки температурні вимірювання дисперсії n проводили у кріостаті [12] в діапазоні довжин хвиль 0,8–4,0 мкм, то для описання $n = f(\lambda)$ замість двоосциляторної моделі Вемпле і Ді Доменіко [18], що добре описує цю залежність в області прозорості матеріалів та враховує енергії електронного і фононного осциляторів, використано одноосциляторну модель, що добре описує дисперсію n в області фундаментального поглинання і враховує лише вклад електронного осцилятора [18, 19]:

$$(n^2 - 1)^{-1} = \frac{E_0}{E_d} - \frac{E^2}{E_d \cdot E_0}, \quad (2)$$

де E_0 — енергія власних коливань електронного осцилятора, яка приблизно відповідає піку в дисперсії уявної частини діелектричної проникності і може бути ідентифікована зі середньою енергією переходів із валентної зони в стани зони провідності; E_d — дисперсійна енергія, яка відображає структуру і хімічний склад речовини; $F = E_d \cdot E_0$ — сила електронного осцилятора; E — енергія, що відповідає тій частоті, на якій вимірюється показник заломлення.

Побудувавши залежність $(n^2 - 1)^{-1} = f(E^2)$ для досліджуваних матеріалів, одержано прямі лінії, тангенс нахилу яких відповідає значенню $1/(E_d \cdot E_0)$, а точка перетину з віссю ординат — E_0/E_d .

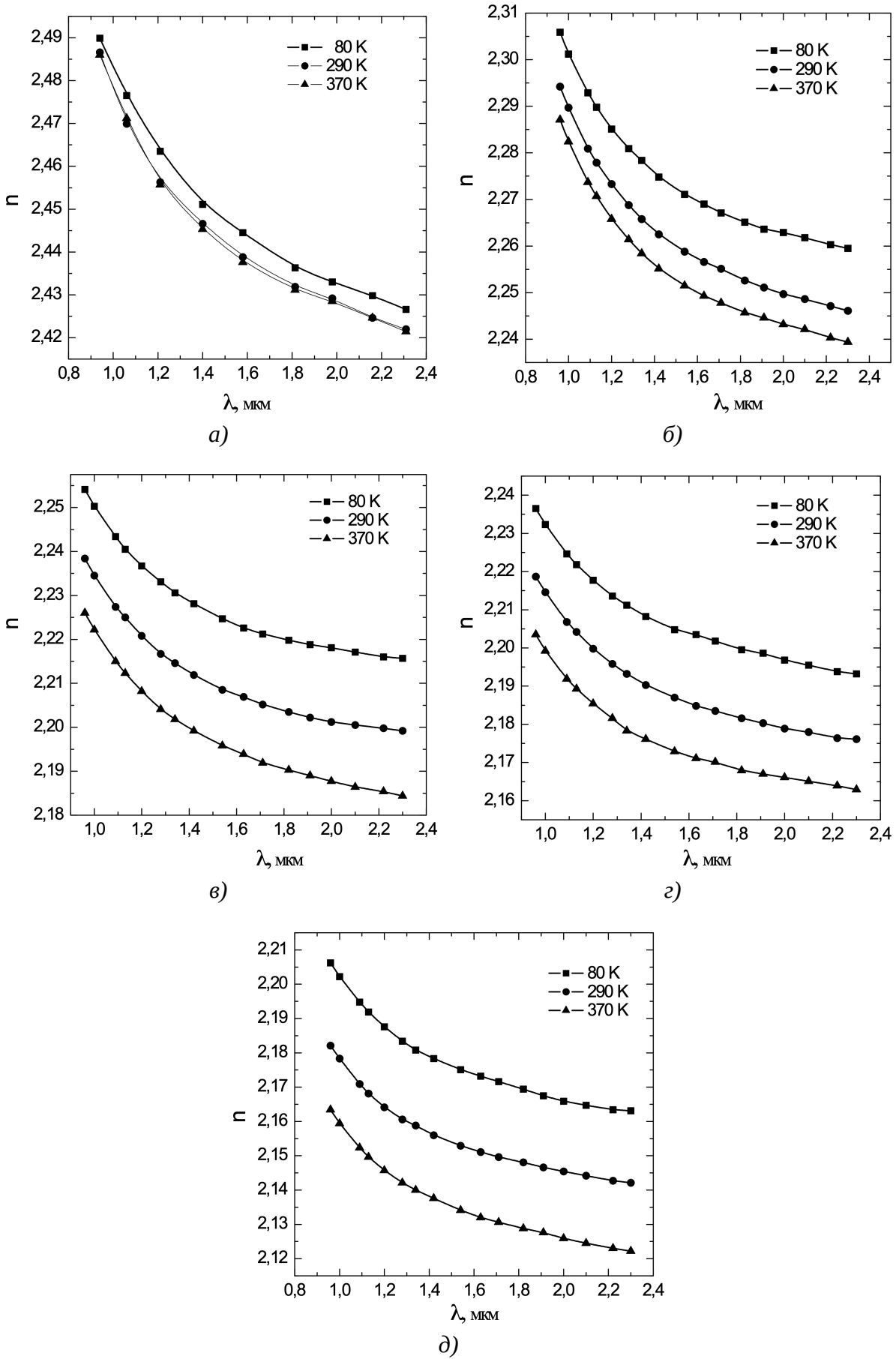


Рис. 1: Дисперсія показника заломлення стекол $\text{As}_X\text{S}_{1-X}$: а) — As_2S_3 , б) — $\text{As}_{0,30}\text{S}_{0,70}$, в) — As_2S_5 , г) — $\text{As}_{0,25}\text{S}_{0,75}$, д) — $\text{As}_{0,20}\text{S}_{0,80}$

На рис. 2 наведено залежності $(n^2 - 1)^{-1} = f(E^2)$ для досліджуваних халькогенідних стекел складу As_2S_3 , As_2S_5 та $As_{0,20}S_{0,80}$. Екстраполяцією прямої лінії до перетину з віссю ординат визначено статичний показник заломлення для всіх досліджуваних складів ХСН (табл. 1). Із аналізу

експериментальних даних випливає, що зі збільшенням сірки в стеклах As_xS_{1-x} відносно стехіометричного As_2S_3 енергія електронного осцилятора E_0 збільшується, а статичний показник заломлення n_∞ , дисперсійна енергія E_d — зменшуються, що зв'язано зі зміною структури стекел.

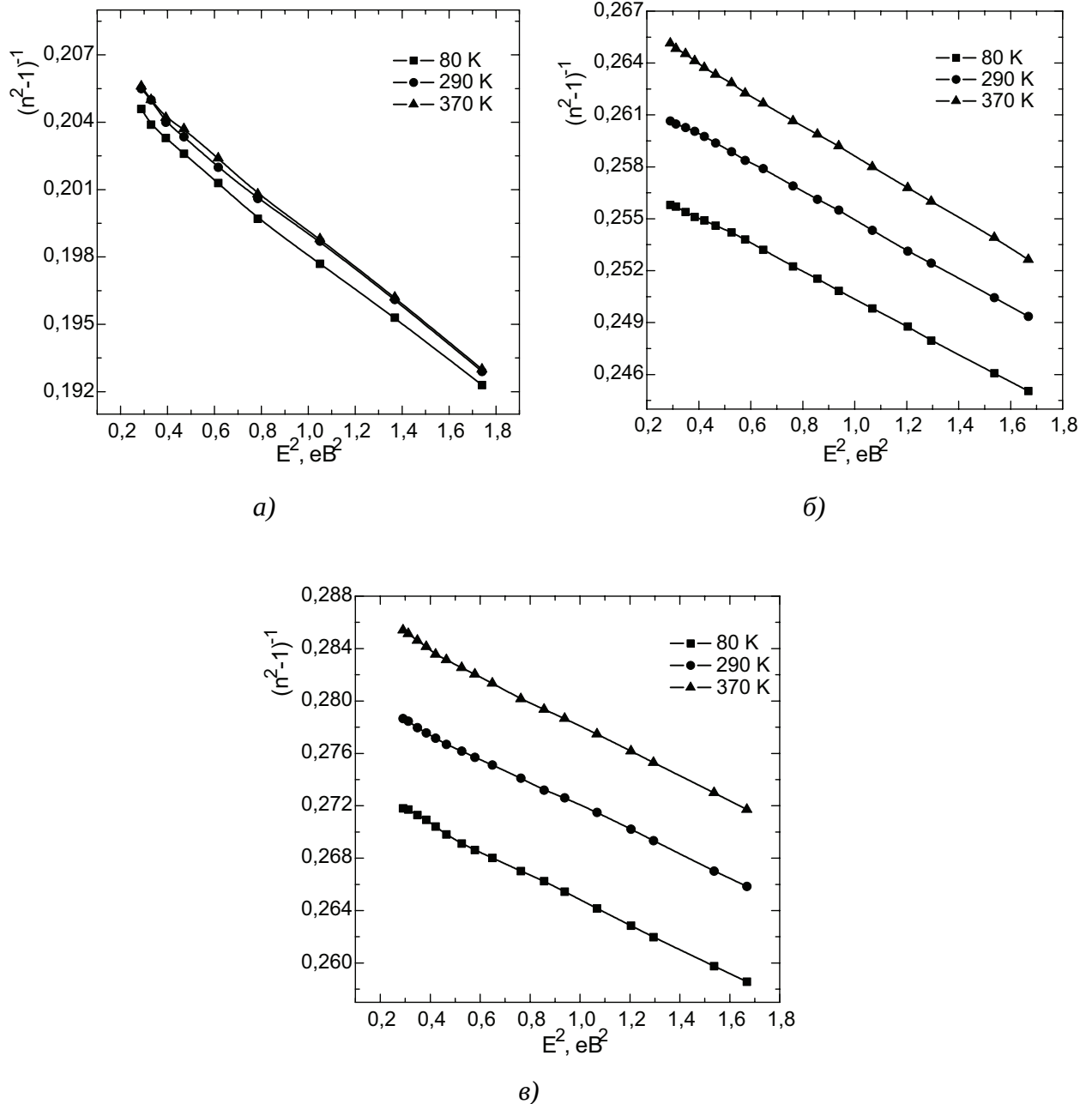


Рис. 2: Залежність $(n^2 - 1)^{-1} = f(E^2)$ для стекел As_xS_{1-x} : а) — As_2S_3 , б) — As_2S_5 , в) — $As_{0,20}S_{0,80}$

Температурну зміну E_0 можна порівняти зі зміщенням краю власного поглинання. Шляхом аналізу температурної залежності $n_\infty(\lambda)$ для досліджуваних стекел визначено

температурний коефіцієнт зміни статичного показника заломлення dn_∞/dT (табл. 1). Видно, що із збільшенням сірки в стеклах As_xS_{1-x} значення dn_∞/dT зростає.

Частотні залежності $n(h\nu)$, n_∞ зв'язані з електронною частиною атомної поляризованості. Зокрема відомо [1], що поляризованість вільних ізольованих атомів характеризується атомними рефракціями. Ковалентні рефракції відображають властивості атомів, з'єднаних чисто ковалентними зв'язками у молекулах (нормальні ковалентні рефракції), або у кристалах (кристалічні ковалентні рефракції). Однак відомо, що у чисто ковалентному випадку електронна пара зміщена до одного з атомів, у так звану область хімічного зв'язку. Ця поляризаційна добавка може бути суттєвою і у випадку склоподібних матеріалів із великими координаційними числами.

Авторами [3] при дослідженні спектральної залежності рефракцій стекел As_XS_{1-X} було одержано, що найкраще співпадають з експериментальними рефракціями — адитивні ковалентні рефракції. Проста сума адитивних ковалентних рефракцій правильно дає значення, якщо застосувати локальну польову поправку Клаузіуса–Мусотті:

$$\frac{n_\infty^2 - 1}{n_\infty^2 + 1} = \frac{4\pi \rho}{3w A} \alpha, \quad (3)$$

де ρ — густина речовини, α — коефіцієнт поляризованості, A — атомна маса, $w = 1,66 \cdot 10^{-24}$ г одиниці атомної маси.

Виходячи з експериментальних значень показника заломлення n і густини ρ для якогось складу халькогенідного скла можна по формулі Лоренц–Лорентца:

$$R_{ек} = \frac{A n^2 - 1}{\rho n^2 + 2} \quad (4)$$

знайти значення експериментальних атомних рефракцій і співставити їх з розрахованими рефракціями при різних схемах хімічного зв'язку. Як було вище сказано, найбільш близькими до $R_{ек}$ є адитивні значення ковалентних рефракцій елементів ($R_{ад}(As) = 11,6$, $R_{ад}(S) = 7,6$) $см^3 ат^{-1}$). Одержано, що з ростом температури $R_{ек}$ збільшується. Крім того, рефракція змінюється від $9,5$ $см^3 ат^{-1}$ (для As_2S_3) до $8,5$ $см^3 ат^{-1}$ (для $As_{0,20}S_{0,80}$) (табл. 1).

Враховуючи формулу (4), вираз для розрахунку коефіцієнта атомної поляризованості α буде мати наступний вигляд:

$$\alpha = \frac{n_\infty^2 - 1}{n_\infty^2 + 1} \frac{3w A}{4\pi \rho} = \frac{3w}{4\pi} R_{ек}. \quad (5)$$

Розраховані коефіцієнти поляризованості α для досліджених стекел наведено у табл. 1. Зміна α корелює зі зміною ступеня іонності зв'язків. Чим більше значення α , тим більша ступінь ковалентності зв'язків [3]. При обчисленні α було враховано температурне розширення матеріалу [2].

Табл. 1: Статичний показник заломлення n_∞ , експериментальна атомна рефракція $R_{ек}$, та їх температурні прирости, а також коефіцієнт поляризованості α стекел As_XS_{1-X} .

Склад As_XS_{1-X}	n_∞	$\frac{dn_\infty}{dT}$	$R_{ек}, \frac{см^3}{ат}$	$\frac{dR_{ек}}{dT}, \frac{см^3}{ат \cdot К}$	$\alpha, см^3$
$X = 0,40$	2,415	$-1,2 \cdot 10^{-5}$	9,5	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$3,76 \cdot 10^{-24}$
$X = 0,30$	2,237	$-6,2 \cdot 10^{-5}$	8,9	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$3,54 \cdot 10^{-24}$
$X = 0,28$	2,190	$-8,1 \cdot 10^{-5}$	8,7	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$3,46 \cdot 10^{-24}$
$X = 0,25$	2,168	$-8,8 \cdot 10^{-5}$	8,6	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$3,43 \cdot 10^{-24}$
$X = 0,20$	2,133	$-10,5 \cdot 10^{-5}$	8,5	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$3,38 \cdot 10^{-24}$

Дуже часто для пояснення температурної поведінки показника заломлення стекол використовується авторська модель запропонована в роботі [20], що залежить від двох факторів, а саме: температурної зміни коефіцієнта поляризованості α та об'ємного розширення матеріалу β :

$$\frac{dn_\infty}{dT} = \frac{(n_\infty^2 - 1)(n_\infty^2 + 2)}{6n_\infty}(\phi - \beta), \quad (6)$$

де $\phi = 1/\alpha \cdot d\alpha/dT$ визначає температурну зміну коефіцієнта поляризованості, а $\beta = 1/V \cdot dV/dT$ — коефіцієнт об'ємного теплового розширення скла. Із (6) випливає, що температурна зміна показника заломлення залежить від співвідношення вкладів двох протилежних механізмів: якщо $\phi > \beta$, то dn/dT буде додатнім, а в іншому випадку — від'ємним. Обчислені значення коефіцієнтів ϕ для досліджуваних стекол As_xS_{1-x} знаходяться в межах $(48,7 \div 66,3) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а β змінюється в межах $(72 \div 126) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [2], що пояснює від'ємний знак dn_∞/dT стекол As_xS_{1-x} у досліджуваному температурному інтервалі (табл. 1). При збільшенні концентрації сірки відносно стехіометричного As_2S_3 у стеклах As_xS_{1-x} вклад температурного розширення у температурну залежність показника заломлення збільшується, а вклад зміни коефіцієнта поляризованості — зменшується, що корелює із зменшенням ковалентності хімічних зв'язків [3]. Для всіх скла-

дів досліджуваних матеріалів з ростом температури коефіцієнт поляризованості α — збільшується.

Висновки

У роботі представлено результати дослідження впливу температури на дисперсію показника заломлення стекол As_xS_{1-x} в області концентрацій від $X = 0,20$ до $X = 0,40$. Одержано, що для досліджуваних матеріалів показник заломлення n на фіксованій довжині хвилі λ із зростанням температури зменшується. Концентраційні залежності показника заломлення пояснено за допомогою формули Лоренц–Лорентца з врахуванням локальної польової поправки Клаузіса–Мусотті. Розраховано значення атомних рефракцій і коефіцієнтів поляризованості стекол As_xS_{1-x} та проаналізовано їх температурну поведінку. Виявлено, що основний вклад у зменшення показника заломлення з ростом температури дає теплове розширення матеріалу, оскільки розраховані значення $1/\alpha \cdot d\alpha/dT$ знаходяться в межах $(48,7 \div 66,3) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а β змінюється в межах $(72 \div 126) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. При збільшенні концентрації сірки відносно стехіометричного As_2S_3 у стеклах As_xS_{1-x} існує тенденція до зростання вкладу коефіцієнта температурного розширення у температурну залежність показника заломлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Бацанов С.С. Структурная рефрактометрия. — М.: Высшая школа, 1979. — 302 с.
- [2] Росола И.И. Исследование структуры стеклообразных полупроводников системы Ge-As-S-I методами ИК- и КР- спектроскопии: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Кишинев, 1985. — 20 с.
- [3] Росола. І.Й., Левко І.В. Дисперсійні властивості стекол As_xS_{1-x} // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. — 2013, Вип. 33. — С. 110–116.
- [4] Adam J. L., Zhang X. (ed.). Chalcogenide glasses: preparation, properties and applications. — Woodhead publishing, 2014. - 704 P.
- [5] Zakery A., Elliott S. R. Optical properties and applications of chalcogenide glasses: a review //Journal of Non-Crystalline Solids. — 2003. — Т. 330. — №. 1-3. — С. 1-12.

- [6] Zhang X., Ma H., Lucas J. Applications of chalcogenide glass bulks and fibres //J. Optoelectron. Adv. Mater. – 2003. – Т. 5. – №. 5. – С. 1327-1333.
- [7] Tsiulyanu Д., Marian S., Liess H-L., Eisele I. Chalcogenide based gas sensors //J. of Optoelec. and Advanc. Mat. – 2003. – Т. 5. – №. 5. – С. 1349-1354.
- [8] Росола И.И., Пуга П.П., Чепур Д.В. Приведенная плотность колебательных состояний и структурные особенности в стеклах системы As-S. — В кн.: Сложные полупроводники (получение, свойства, применение). — Ужгород: Изд-во Ужгородского ун-та, 1981. — С. 83–92.
- [9] Химинец В.В., Пинзеник В.П., Химинец О.В. и др. Новые стеклообразные полупроводники для оптоэлектроники //Перспектив ВДНХ СССР.–Ужгород, 1982. — 7 с.
- [10] Химинец В.В., Пинзеник В.П., Химинец О.В., Росола И.И., Чепур Д.В. Халькогенидные стекла в системе Ge-As-S-J //Информационный листок о научно-техническом достижении. — Львов: Изд-во Львовского ИНТИ. —1983, №59. — 4 с.
- [11] Різак В.М., Різак І.М., Семак Д.Г. Функціональні халькогенідні напівпровідники: Монографія. — Ужгород: Закарпаття, 2001. — 152 с.
- [12] Пуга П.П., Ковач Д.Ш., Зубань В.А., Борец А.Н. Температурная рефрактометрическая установка на базе оптической делительной головки ОДГ-10 //Метрологическое обеспечение производства и контрольно-измерительная техника. — Ужгород, 1984. — С. 43–47.
- [13] Иоффе Б.Т. Рефрактометрические методы химии. — 2-е изд. перераб. и доп. — Л.: Химия, 1974. — 400 с.
- [14] Мосс Т. Оптические свойства полупроводников. — М.: Изд-во Иностран. литерат., 1961. — 304 с.
- [15] Стронський О.В. Халькогенідні склоподібні напівпровідники: властивості та практичні застосування / О.В. Стронський, Є.Ф. Венгер, П.Ф. Олексенко, О.В. Мельничук. — Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2016. — 236 с.
- [16] Петров В.В. Материалы перспективных оптоэлектронных устройств / В.В. Петров, А.А. Крючин, В.М. Рубиш. — Киев: Наукова думка, 2012. — 336 с.
- [17] Риган М.Ю., Штець П.П., Рубиш В.В. Особливості одержання та структура халькогенідних склоподібних матеріалів для оптичного запису інформації // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2007. — №3. — С. 145-156.
- [18] Wemple S.H., Di Domenico M. Behavior of the dielectric constant in covalent and ionic materials. //Phys. Rev. B. — 1971. — V.3, No.4. — P.1338–1352.
- [19] Wemple S.H. Refractive-index behavior of amorphous semiconductors and glass. //Phys. Rev. B. — 1973. — V.7, No.8. — P. 3767–3777.
- [20] Prod'homme L, A new approach to the thermal change in the refractive index of glasses// Phys. Chem. Glasses. — 1960. — No.1. — P. 119—122.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2019

И.И. Росола, А.И. Чобаль, В.М. Ризак

Ужгородский национальный университет, Ужгород, Украина,
e-mail: vrizak@uzhnu.edu.ua

Влияние температуры на дисперсию показателя преломления стекол As_XS_{1-X}

Исследовано дисперсию показателя преломления $n(\lambda)$ стекол As_XS_{1-X} в области концентраций от $X = 0,20$ до $X = 0,40$ пяти составов в температурном интервале от 80 до 370 К. Экспериментальные результаты $n(\lambda)$ стекол As_XS_{1-X} описано с помощью одноосцилляторной модели Вемпле и Ди Доменико. На основе экспериментальных результатов рассчитаны атомные рефракции и коэффициент поляризуемости стекол системы As_XS_{1-X} , а также объяснены их температурное поведение и концентрационная зависимость. Показано, что температурное поведение показателя преломления исследованных стекол в основном обусловлено тепловым расширением материала.

Ключевые слова: стеклообразный, синтез, рефракция, показатель преломления, одноосцилляторная модель, энергия электронного осциллятора, дисперсионная энергия, коэффициент поляризуемости.

I. Rosola, O. Chobal, V. Rizak

Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine,
e-mail: vrizak@uzhnu.edu.ua

Effect of temperature on the reflective index dispersion of As_XS_{1-X} glasses

Purpose. The purpose of this research was to prepare As_XS_{1-X} glasses and to study concentration and temperature dependences of their refractive index.

Methods. The refractive index was measured by a prism method. Plane parallel slabs with thicknesses of ~ 1 mm were cut from synthesized bulk samples. The sample prisms had refracting faces with areas of 5×10 mm and angles between them of $\sim 10^\circ - 15^\circ$. The refracting angles of the prisms were determined on a LOMO G-1.5 goniometer. The temperature was measured with a copper-constantan thermocouple to within ± 0.5 K. The error in the refractive index n over the entire observed spectral range was $\pm 2 \cdot 10^{-4}$.

Results. The dispersion of the refractive index $n(\lambda)$ of As_XS_{1-X} glasses was studied in the concentration range from $X = 0.20$ to $X = 0.40$ of five samples in the temperature range from 80 to 370 K at wavelengths from 1.0 μm to 2.3 μm . It was found that the refractive index of the studied materials n at a fixed wavelength λ decreases with increasing temperature, $dn/dT = -1, 2 \dots - 10, 5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ depending on the composition.

Conclusions. The experimental results of $n(\lambda)$ of As_XS_{1-X} glasses were described in terms of the Wemple – DiDomenico single effective oscillator model. Based on the experimental results, atomic refractions and the polarizability coefficient of glasses of the As_XS_{1-X} system were calculated, and their temperature behavior and concentration dependence were explained. It was concluded that thermal expansion coefficient makes the main contribution to the value of the temperature dependence of the refractive index.

Keywords: glassy, synthesis, refraction, refractive index, single-oscillator model, energy of electronic oscillator, dispersion energy, polarizability coefficient.

REFERENCES

- [1] Batsanov, S.S. (1979), Structural refractometry [Strukturnaya refraktometriya], Vysshaya shkola, Moscow, 302 p.
- [2] Rosola, I.Y. (1985), Investigation of the structure of glassy semiconductors of the Ge-As-S-I system using IR and Raman spectroscopy: Author's thesis [Issledovaniye struktury stekloobraznykh poluprovodnikov sistemy Ge-As-S-I metodami IK- i KR- spektroskopii: avtoref. dis. ... Kand. fiz.-mat. Nauk], Kishinev, 20 p.
- [3] Rosola, I.Y., Levko, I.V (2013), "The dispersion properties of glasses As_xS_{1-x} " [Dyspersiyni vlastyvosti stekol As_xS_{1-x}], Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics [Nauk. Visn. Uzhhorod. Univ. Ser. Fiz.], Iss. 33, pp. 110–116
- [4] Adam, J. L., Zhang X. (2014), Chalcogenide glasses: preparation, properties and applications, Woodhead publishing, 704 P.
- [5] Zakery, A., & Elliott, S. R. (2003). Optical properties and applications of chalcogenide glasses: a review. Journal of Non-Crystalline Solids, 330(1-3), 1-12.
- [6] Zhang, X., Ma, H., & Lucas, J. (2003). Applications of chalcogenide glass bulks and fibres. J. Optoelectron. Adv. Mater, 5(5), 1327-1333.
- [7] Tsiulyanu, Д., Marian, S., Liess, H. L., & Eisele, I. (2003). Chalcogenide based gas sensors. J. of Optoelec. and Advanc. Mat, 5(5), 1349-1354.
- [8] Rosola, I.I., Puga, P.P., Chepur, D.V. (1981), "The reduced density of vibrational states and structural features in glasses of the As-S system" [Privedennaya plotnost' kolebatel'nykh sostoyaniy i strukturnyye osobennosti v steklakh sistemy As-S], Complex semiconductors (production, properties, application) [Slozhnyye poluprovodniki (polucheniye, svoystva, primeneniye)], Uzhgorod University Publishing, pp. 83–92.
- [9] Khiminets, V.V., Pynzenyk, V.P., Khiminets, O.V. (1982), New glassy semiconductors for optoelectronics [Novyye stekloobraznyye poluprovodniki dlya optoelektroniki], Prospect of the Exhibition of Economic Achievements of the USSR [Prospekt VDNKH SSSR], Uzhgorod, 7 p.
- [10] Khiminets, V.V., Pynzenyk, V.P., et.al (1983), "Chalcogenide glasses in the Ge-As-S-J system" [Khal'kogenidnyye stekla v sisteme Ge-As-S-J], Information leaflet on scientific and technological achievement [Informatsionnyy listok o nauchno-tekhnicheskom dostizhenii], Publishing house of Lviv INTI, Lviv, 4 p.
- [11] Rizak, V. M., Rizak, I.M., Semak, D.G. (2001) Functional Chalcogenide Semiconductors [Funktsional'ni khal'kohenidni napivprovidnyky], Transcarpathia, Uzhhorod, 152 p.
- [12] Puga, P.P., Kovach, D.Sh., Zuban, V.A., Borets A.N. (1984), "Temperature refractometric unit based on the optical dividing head ODG-10" [Temperaturnaya refraktometricheskaya ustanovka na baze opticheskoy delitel'noy golovki ODG-10], Metrological support of production and instrumentation [Metrologicheskoye obespecheniye proizvodstva i kontrol'no-izmeritel'naya tekhnika], Uzhgorod, pp. 43–47
- [13] Ioffe, B.T. (1974), Refractometric chemistry methods. 2nd ed. [Refraktometricheskiye metody khimii. 2-ye izd.], Chemistry, Leningrad, 400 p.

- [14] Moss, T. (1961), Optical properties of semiconductors [Opticheskiye svoystva poluprovodnikov], Foreign Literature Publishing House, Moscow, 304 p.
- [15] Stronsky, O.V., Venger, P.F., Oleksenko, P.F., Melnichuk, O.V. (2016), “Chalcogenide vitreous semiconductors: properties and practical applications” [Khal’kohenidni sklopodibni napivprovodnyky: vlastyvoli ta praktychni zastosuvannya], Nizhyn University Publishing, 2016, 236 p.
- [16] Petrov, V.V., Kryuchyn, A.A., Rubish, V.M. (2012), “Materials of promising optoelectronic devices” [Materyaly perspektyvnykh optoelektronnykh ustroistv], Kyev, Naukova dumka, 336 p.
- [17] Ryhan M.Y., Sheets P.P., Rubish V.V. (2007), “Features reception and structure of chalcogenide glass-like materials for optical information recording” [Osoblyvosti odierzanna ta structura halcogenidnykh sklopodibnykh materialiv dla optuchnoho zapusy informacii], Storage and Processing data [Reestracia, zberihanna i obrobka danyh], No 3, pp. 145-156.
- [18] Wemple, S.H., Di Domenico, M. (1971), “Behavior of the dielectric constant in covalent and ionic materials”, Phys. Rev. B., V. 3, No. 4, pp. 1338–1352.
- [19] Wemple, S.H. (1973), “Refractive-index behavior of amorphous semiconductors and glass”, Phys. Rev. B., V. 7, No. 8, pp. 3767–3777.
- [20] Prod’homme, L. (1960), “A new approach to the thermal change in the refractive index of glasses”, Phys. Chem. Glasses, No. 1, pp. 119–122.

© Ужгородський національний університет