

УДК 537.52:621.327

Г.Е. Ласлов, М.П. Чучман, О.К. Шуаїбов

<sup>1</sup>Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54  
e-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua

## ЕМІСІЙНИЙ СПЕКТР ЛАЗЕРНОЇ ПЛАЗМИ $\text{CuSbSe}_2$

Досліджено спектри випромінювання лазерної плазми на основі полікристалу  $\text{CuSbSe}_2$  на відстані 1 мм від мішені. Встановлено, що випромінювання лазерного факела на основі сполуки  $\text{CuSbSe}_2$  визначалося спектральними лініями атомів та іонів міді, сурми та селену. Найбільш ефективно заселяються збуджені стани атомів міді та сурми. Проведено порівняння емісійних спектрів лазерної плазми  $\text{CuSbSe}_2$  та  $\text{CuSbS}_2$  при однакових відстанях від мішені.

**Ключові слова:** лазерна плазма, спектр випромінювання, спектральні лінії, збуджені стани, сполука.

### Вступ

Метод емісійної спектроскопії все більш широко використовується в різних областях науки і техніки. Інформація, отримана за його допомогою, значно доповнює зондовий метод і мас-спектрометрію лазерної плазми. Особливо перспективним він є при діагностиці лазерного напорошення плівок багатоконпонентного складу [1, 2], що на сьогодні актуально у зв'язку з отриманням матеріалів з наперед заданими властивостями.

Оскільки за останні роки виникла проблема пошуку та реалізації альтернативних джерел енергії, особливо енергії Сонця, то бурхливо почали досліджуватися властивості халькогенідів, які мають ефективність перетворення сонячної енергії до 20 відсотків [3]. Імпульсне лазерне напорошення має багато переваг над термічним методом, оскільки при одержанні плівок з лазерного факелу зберігається стехіометрія вихідної сполуки [4], а також можна контролювати процес напорошення. В літературних джерелах на даний час відсутні дані про лазерну плазму на основі сполуки  $\text{CuSbSe}_2$ , тому метою нашої роботи було дослідження спектрів випромінювання лазерного факелу на основі сполуки  $\text{CuSbSe}_2$ .

### Методика експерименту

Лазерна плазма утворювалась внаслі-

док дії на мішень з полікристалічного зразка на базі сполуки  $\text{CuSbSe}_2$  імпульсно-періодичного випромінювання лазера ЛТИПЧ-5 з наступними параметрами: питома потужність  $3\text{-}5 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>; тривалість імпульсу генерації 20 нс; частота генерації 12 Гц; довжина хвилі випромінювання 1,06 мкм. Експериментальна установка дозволяла досліджувати спектри випромінювання спектральних ліній у діапазоні довжин хвиль 200-600 нм з областей віддалених від мішені на відстань 1-7 мм. Розділення випромінювання за довжинами хвиль складало 0,2 нм при використанні монохроматора МДР-2 з дифракційною ґраткою 1200 штрих./мм. Калібрування чутливості системи реєстрації дозволяло вимірювати відносні інтенсивності спектральних ліній. Залишковий тиск у вакуумній камері, де розташовувалася мішень, складав 7-12 Па. Кут між напрямком падіння лазерного променя і поверхнею мішені складав 60°, реєстрація випромінювання проводилася упоперек лазерного променя. Лазерне випромінювання фокусувалось у пляму 0,4 мм лінзою з фокусною відстанню 50 см, а відбір випромінювання факела здійснювався лінзою з фокусною відстанню 10 см. Усереднені за часом випромінювання плазми лазерного факела спектри одержували за допомогою фотопомножувача ФЭУ 106, підсилювача струму У 5-9 та потенціометра КСП4. Похибка вимірювання інтенсивності не перевищувала 10%. Ототожнення

спектрів випромінювання плазми проводилось з використанням довідника [5].

### Результати дослідження та їх обговорення

Реєстрація спектрів випромінювання проводилась з точки, яка віддалена від поверхні мішені на 1 мм (рис. 1).

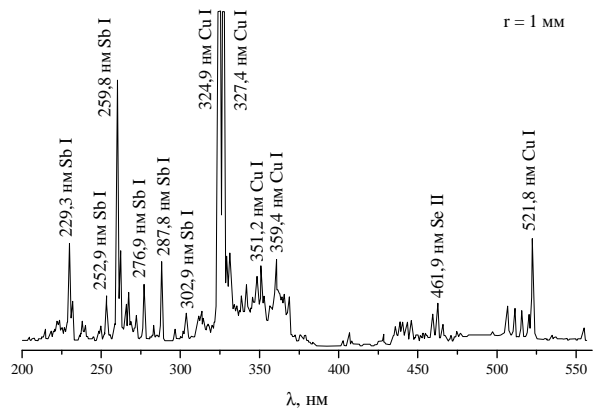


Рис. 1. Спектр випромінювання лазерної плазми на основі сполуки CuSbSe<sub>2</sub>, одержаний із поперечного перерізу плазмового факела товщиною 0,3 мм на відстані 1 мм від поверхні мішені.

Таблиця 1  
Спектри випромінювання лазерної плазми на основі сполуки CuSbSe<sub>2</sub>

λ, нм	A, 10 <sup>8</sup> с <sup>-1</sup>	Атом, Іон	E <sub>н</sub> , eВ	Терм <sub>н</sub>	E <sub>в</sub> , eВ	Терм <sub>в</sub>	I, в.о.
324,9	1,37	Cu I	0,00	4s <sup>2</sup> S <sub>0,5</sub>	3,82	4p <sup>2</sup> P <sub>1,5</sub>	34
327,40	1,36	Cu I	0,00	4s <sup>2</sup> S <sub>0,5</sub>	3,79	4p <sup>2</sup> P <sub>1,5</sub>	43
331,72	0.196	Cu I	5,10	s4p <sup>1</sup> <sup>4</sup> F <sub>3,5</sub>	8,84	s4d <sup>1</sup> <sup>4</sup> G <sub>4,5</sub>	5,46
351,21	0,179	Cu I	5,40	s4p <sup>1</sup> <sup>4</sup> D <sub>3,5</sub>	8,92	s4d <sup>1</sup> <sup>4</sup> G <sub>4,5</sub>	4,73
359,40	1·10 <sup>-6</sup>	Cu I	1,39	4s <sup>2</sup> <sup>2</sup> D <sub>2,5</sub>	4,84	s4p <sup>1</sup> <sup>4</sup> P <sub>2,5</sub>	5,1
521,82	1,22	Cu I	3,82	4p <sup>2</sup> <sup>2</sup> P <sub>1,5</sub>	6,19	4d <sup>2</sup> D <sub>2,5</sub>	6,36
348,38	0,369	Cu I	5,51	s4p <sup>1</sup> <sup>4</sup> D <sub>2,5</sub>	9,06	s4d <sup>1</sup> <sup>4</sup> G <sub>3,5</sub>	4,05
458,70	0.26	CuI	5,10	s4p <sup>1</sup> <sup>2</sup> F <sub>2,5</sub>	7,81	s5s <sup>1</sup> <sup>2</sup> D <sub>2,5</sub>	1,75
464,25	0.074	CuI	5,42	s4p <sup>1</sup> <sup>2</sup> F <sub>2,5</sub>	8,09	s5s <sup>1</sup> <sup>2</sup> D <sub>1,5</sub>	1,13
505,18	1,59	CuII	14,43	4d <sup>3</sup> F <sub>4,0</sub>	16,88	4f <sup>3</sup> G <sub>5,0</sub>	2,22
510,55	0,019	CuI	1,39	4s <sup>2</sup> <sup>2</sup> D <sub>2,5</sub>	3,82	4p <sup>2</sup> <sup>2</sup> P <sub>1,5</sub>	2,10
252,85	14	Sb I	1,22	5p <sup>3</sup> <sup>2</sup> D <sub>2,5</sub>	6,12	6s <sup>2</sup> <sup>2</sup> P <sub>1,5</sub>	2,91
259,8	32	Sb I	1,06	5p <sup>3</sup> <sup>2</sup> D <sub>1,5</sub>	3,83	6s <sup>2</sup> <sup>4</sup> P <sub>0,5</sub>	16
276,9	1,89	Sb I	1,22	5p <sup>3</sup> <sup>2</sup> D <sub>2,5</sub>	5,70	6s <sup>2</sup> <sup>4</sup> P <sub>1,5</sub>	3,56
287,79	2,85	Sb I	1,06	5p <sup>3</sup> <sup>2</sup> D <sub>1,5</sub>	5,36	6s <sup>2</sup> <sup>4</sup> P <sub>0,5</sub>	4,98
302,9	2,62	Sb I	2,03	5p <sup>3</sup> <sup>2</sup> P <sub>0,5</sub>	6,12	6s <sup>2</sup> <sup>2</sup> P <sub>1,5</sub>	1,83
338,31	0,25	SbI	2,03	5p <sup>3</sup> <sup>2</sup> P <sub>0,5</sub>	5,70	6s <sup>2</sup> <sup>2</sup> P <sub>1,5</sub>	2,87
427,15	-	SbII	-	-	14,14	-	0,53
461,87	-	SeII	-	-	14,68	-	2,43
474,22	-	SeI	-	-	8,59	-	0,69

Результати ототожнення спектрів випромінювання лазерної плазми на основі сполуки CuSbSe<sub>2</sub> наведено в таблиці 1. В даній таблиці вказано довжину хвилі випромінювання (λ), імовірність переходу (A) атомів та іонів різних елементів, енергії верхніх і нижніх рівнів переходів (E<sub>н</sub> та E<sub>в</sub>), терми верхніх та нижніх рівнів, статваги рівнів (g), інтенсивність випромінювання (I). Як видно з табл. 1 найбільш ефективно заселяються стани

<sup>2</sup>S<sub>1/2</sub> (E<sub>в</sub>=3,79 eВ) CuI, <sup>2</sup>S<sub>1/2</sub> (E<sub>в</sub>=3,82 eВ) CuI, <sup>4</sup>P<sub>1/2</sub> (E<sub>в</sub>=3,83 eВ) SbI.

Випромінювання лазерного факела на основі сполуки CuSbSe<sub>2</sub> включає спектральні лінії атомів та іонів міді, сурми і селену. Кількість спектральних ліній значно більша, ніж для випромінювання сірки у випадку лазерної плазми аналогічної сполуки з сіркою [6]. Внесок випромінювання іонів селену дещо вищий, ніж атомів на відстані 1 мм від

мішені. На відміну від плазми на основі сполуки з сіркою, спостерігається заселення енергетичних рівнів не тільки поблизу вузького місця рекомбінаційного потоку, а і для енергій 4-5 еВ.

Це говорить про утворення в плазмі не лише іонізованих атомів, але і атомів в основному стані. Таким чином, кількість фізичних процесів, які призводять до появи атомів та іонів у збуджених станах, значно розширюється. Однією з імовірних причин такої поведінки може бути полегшене випаровування молекул та менша їх енергія дисоціації. Кращий прояв іонізованих часток у плазмі лазерного факела свідчить про меншу енергію іонізації селену в порівнянні з сіркою.

В досліджуваній плазмі на основі сполуки  $\text{CuSbSe}_2$  присутні спектральні лінії атомів міді, які відповідають переходам зі зміщених енергетичних станів, щоправда енергії їх нижче, ніж у випадку чистої міді та сполуки відповідного складу на основі сірки.

Діагностику лазерної плазми на основі сполуки  $\text{CuSbSe}_2$  найбільш доцільно проводити за спектральними лініями  $\text{Cu I}$  у видимій області, а в ультрафіолетовій області спектра за випромінюванням  $\text{Sb I}$ . Найбільш інтенсивними атомарними спектральними лініями лазерної плазми на основі сполуки  $\text{CuSbSe}_2$  при відстані від мішені 1 мм є лінії 324,9; 327,4; 521,8 нм  $\text{Cu I}$ , 259,8; 229,3; 287,8 нм  $\text{Sb I}$ ; 461,9 нм  $\text{Se II}$ .

При помірному лазерному опроміненні багатокомпонентної халькогенідної кристалічної мішені основними іонами ерозійної плазми є однозарядні іони

окремих його складових та комплексні іони з хімічним складом вихідної сполуки [7], а при дії лазерного імпульсу відбувається майже повна атомізація речовини.

## Висновки

Випромінювання лазерного факела на основі сполуки  $\text{CuSbSe}_2$  визначалося спектральними лініями атомів та однозарядних іонів міді, сурми та селену.

Найбільш інтенсивними спектральними лініями плазми лазерного факела на основі сполуки  $\text{CuSbSe}_2$  є 324,9; 327,4; 521,8 нм  $\text{Cu I}$ , 259,8; 229,3; 287,8 нм  $\text{Sb I}$ ; 461,9 нм  $\text{Se II}$ .

Кількість спектральних ліній селену значно більша, ніж спектральних ліній сірки у випадку аналогічної сполуки з сіркою.

У досліджуваній плазмі наявні спектральні лінії атомів міді, які відповідають переходам зі зміщених енергетичних станів, щоправда енергії їх нижче, ніж у випадку чистої міді та сполуки відповідного складу на основі сірки.

Кращий, ніж у випадку сполуки відповідного складу на основі сірки, прояв іонізованих часток у плазмі лазерного факела свідчить про меншу енергію атомізації мішені.

Придатні спектральні лінії для діагностики лазерної плазми на основі сполуки це атомарні лінії міді в видимій області та лінії сурми в ультрафіолетовій області.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Geyer T.J., Weimer W.A., Parametric effects on plasma emission produced during excimer laser ablation of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . // *Appl. Spectr.* – 1990. – V.44. – №1. – P. 1659 – 1664.
2. Шуайбов А.К., Шимон Л.Л., Дашенко А.И., Качер И.Э., Чучман М.П. // Спектроскопическая диагностика лазерного распыления мишеней из сурьми и кристаллов  $\text{CuSbS}_2$ . Тезисы докладов III международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики.» – 2001, С. 31.
3. Victor P., Nagaraju J, Krupanidhi S.B. // Pulsed excimer laser ablated copper indium diselenide thin films. *Solid State Com.* – 2000. – V.116. – №12. – P. 649 – 651.

4. Чучман М.П., Шуайбов А.К., Ласлов Г.Е. // Параметры многокомпонентной лазерной плазмы. Журнал технической физики. – 2011. – Т.81. – № 1. – С. 157 – 158.
5. Weise W.L., Martin G.A. Wavelength and transition probabilities for atoms and atomic ions –New York: U. S. Dep. Commer. Nat. Bur. Stand., 1980. –406 p.
6. Шуайбов А.К., Чучман М.П. Дашенко А.И. // Спектроскопическая диагностика лазерной эрозионной плазмы на основе поликристаллов. Оптика и спектроскопия. – 2004. – Т.97. – №4, – С. 674 –680.
7. Качер И.Э., Опачко И.И, Риган М.Ю. // Испарение тройных соединений  $CdGa_2S(Se)_4$  под действием импульсного лазерного излучения. Український фізичний журнал. – 1989. – Т.34. – №11. – С. 1728 – 1732.

Стаття надійшла до редакції 27.05.2011

G.E. Laslov, M.P. Chuchman, A.K. Shuaibov  
Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshin Str., 54

## EMISSION SPECTRUM OF LASER PLASMA ON THE BASIS OF $CuSbSe_2$ COMPOUND

The emission spectra of laser plasma based on the  $CuSbSe_2$  polycrystal at 1mm distance from a target was investigated. It was established that laser radiation plume basis on the  $CuSbSe_2$  compounds defined spectral lines of atoms and ions of copper, antimony and selenium. The excited states of atoms of copper and antimony are most effectively populated A comparison of emission spectra of laser plasma  $CuSbSe_2$  and  $CuSbS_2$  at identical distances from the target was conducted.

**Key words:** laser plasma, emission spectrum, spectral lines, excited states, compound.

Г. Е. Ласлов, М.П. Чучман, А. К. Шуайбов  
Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54

## ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТР ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ $CuSbSe_2$

Исследованы спектры излучения лазерной плазмы на основе поликристалла  $CuSbSe_2$  на расстоянии 1 мм от мишени. Установлено, что излучение лазерного факела на основе соединения  $CuSbSe_2$  определялось спектральными линиями атомов и ионов меди, сурьмы и селена. Наиболее эффективно заселяются возбужденные состояния атомов меди и сурьмы. Проведено сравнение эмиссионных спектров лазерной плазмы  $CuSbSe_2$  и  $CuSbS_2$  при одинаковых расстояниях от мишени.

**Ключевые слова:** лазерная плазма, эмиссионный спектр, спектральные линии, возбужденные состояния, соединение.