

# ЛАЗЕР НА ПАРІ МІДІ ІЗ ДОМІШКОЮ СРІБЛА

**Р.Б. Рійвес, В.А. Кельман, Ю.В. Жменяк, Ю.О. Шпеник,  
С.П. Улусова**

Інститут електронної фізики НАН України,  
вул. Університетська, 21, Ужгород, 88017  
e-mail: vkel@mail.uzhgorod.ua

Вперше виконано експериментальні дослідження характеристик лазера на чистій парі міді із домішкою срібла. Проаналізовано результати та обговорюються можливі механізми впливу.

## Вступ

Базова кінетика генерації у лазерах на самообмежених переходах є у принциповому плані порівняно простою, проте дієвою і раціональною. Для збудження верхніх робочих резонансних ( $r$ ) рівнів використовується ефективна схема (критерії Гоулда), за якою потужний потік їх заселення із основного стану атомів робочої речовини протягом короткого імпульсу накачування здійснюється непружними електрон-атомними зіткненнями. Оскільки ефективність збудження нижніх метастабільних рівнів ( $m$ ) є значно меншою, виникає інверсія населеностей та імпульс генерації на  $r \rightarrow m$  переході, самообмежений у тривалості масштабом у кілька десятків нс. Практично усі спроби оптимізації лазерів на самообмежених переходах виконано у рамках описаної базової кінетики. Відомі, хіба що, поодинокі і в цілому не зовсім вдалі спроби вплинути на режим роботи лазера на парі міді (ЛПМ) уведенням в робочий об'єм лазера домішки цезію з метою спустошення метастабільних рівнів атомів міді у їх зіткненнях із атомами цезію (енергетичний акцептор) реакцією резонансної передачі енергії [1]. Виявилось, що в робочих умовах активного середовища  $Cu+Cs$ - лазера швидкість реакції спустошення не здатна забезпечити позитивного ефекту і вже найпростіший аналіз вказує на те, що цей механізм є повністю неспроможним у даній ситуації. Наслідуючи [2], зупинимося на цьому трошки де-

тальніше. Взавши населеність основного стану атомів цезію  $N_{Cs} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$  у відповідності до даних більшості експериментів [3], відносну швидкість атомів при зіткненнях  $v = 10^5 \text{ см/с}$  та максимально оптимістичне значення  $\sigma = 10^{-14} \text{ см}^2$  ефективного перерізу зазначеного процесу, отримуємо оцінку часу дезбудження метастабільів міді на рівні  $\tau = 1/(N_{Cs}\sigma v) = 1 \text{ мс}$ . Це не тільки значно довше, ніж тривалість імпульсу збудження, але й міжімпульсного проміжку. Навіть при  $N_{Cs} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , очистка буде надто повільною. Отже, не слід вважати ймовірним, що механізм дії присадки полягає у прискоренні дезбудження метастабільів протягом імпульсу збудження.

Спостережуване, однак, на експерименті певне покращення вихідних характеристик лазера, яке все ж таки проявляється при низькій концентрації цезію ( $\sim 1\%$  від концентрації міді), пояснюється швидше впливом домішки на характеристики плазми: нижчими передімпульсними температурою електронів й заселеністю метастабільних станів міді й більш повним відновленням концентрації атомів міді в основному стані [3, 4].

У роботі [5] нами було запропоновано суттєву зміну режиму накачки ЛПМ шляхом уведення в активне середовище домішки срібла (енергетичний донор). У подальшому виявилось, однак, що японськими вченими ця ідея була висунута раніше (див., наприклад, [6]). Очікувалося, що вражаючий збіг енергій групи із двох резонансних рівнів міді та групи із двох резонансних та одного метастабіль-

ного рівня срібла (рис. 1) сприятиме ефективній передачі енергії згідно із наведеною схемою. Цим створюються сприятливі передумови, за яких імовірно матиме місце збільшення ефективності накачки, та й у цілому зміна режиму роботи ЛПМ. Зокрема, передбачалося збільшення тривалості імпульсу генерації та його подовження у міжімпульсний проміжок. З практичної точки зору за умови дієздатності пропонованої видозміни це сприятиме покращенню узгодження у схемах квантових підсилювачів яскравості. Тут обґрунтовується доцільність вказаної видозміни. Наведено також результати вимірювань, виконаних на макеті ЛПМ, які є важливими для встановлення механізму впливу домішки срібла на процеси в активному середовищі та характеристики ЛПМ порівняльним аналізом Cu- та Cu+Ag- лазерів.

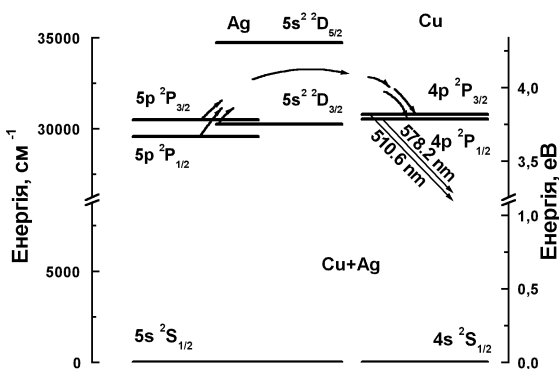


Рис. 1. Енергетична діаграма нижніх рівнів атомів міді та срібла.

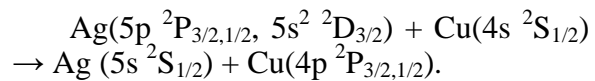
Повертаючись до роботи [6], зазначимо, що в ній домішка срібла у формі AgBr чи AgCl вводилася в активне середовище CuBr- та CuCl- лазерів. При цьому спостерігалось збільшення середньої потужності генерації на 20 %. Концентрація галогенідів срібла напряму не визначалася, а завантаження їх складало в межах кількох % від завантаження галогенідів міді. Зазначимо, що механізм впливу домішки срібла тут детально не обговорюються, а вважається очевидним, що позитивний ефект від введення срібла

зумовлений резонансною передачею енергії протягом імпульсу струму.

Отже в даній роботі вперше повідомляється про вивчення впливу домішки срібла на характеристики лазера на чистій парі міді. На відміну від робіт японських вчених, ми очікували проявлення впливу домішки у більш пізній період.

### 1. Механізм впливу домішки срібла на базову кінетику ЛПМ

Особливість схеми енергетичних рівнів атомів срібла у порівнянні із міддю полягає у тому, що вже відмічена група із трьох рівнів є енергетичним резервуаром значної ємності, який не здатен до швидкої спонтанної дисипації, оскільки самопоглинання перешкоджає їх розпаду резонансними переходами. Зрозуміло, що працездатність запропонованої схеми залежить від цілого ряду факторів. У першу чергу, це ефективність передачі енергії від збуджених атомів срібла до атомів міді у реакціях



На жаль, на даний час нам невідомі ані експериментальні виміри, ані теоретичні оцінки перерізів вказаних реакцій. Спираючись, однак, на загальноприйняті уяви, вважаємо, що визначальним фактором тут є величина дефекту енергії реакції обміну енергії  $\Delta E_{J,J'} = E(J_{\text{Ag}}) - E(J'_{\text{Cu}})$ . Величина обрахованих дефектів для цих реакцій становить -0,039 eV (3/2 → 3/2); -0,008 eV (3/2 → 1/2); -0,067 eV (5/2 → 3/2); -0,036 eV (5/2 → 1/2); -0,153 eV (1/2 → 3/2); -0,122 eV (1/2 → 1/2). У якійсь мірі сприятливим фактором є і те, що для усіх варіантів енергообміну ці реакції є ендотермічними. За цих умов слід очікувати, що сумарна величина перерізу становитиме  $\sim 10^{-14} \text{ cm}^2$ .

Оскільки вказані реакції є зворотними, фактичному спрямуванню реакції у потрібному напрямку сприятиме також вдале співвідношення тисків насичених парів міді та срібла [7] (рис. 2). Зокрема, за температури 1673 – 1773 K, що, власне,

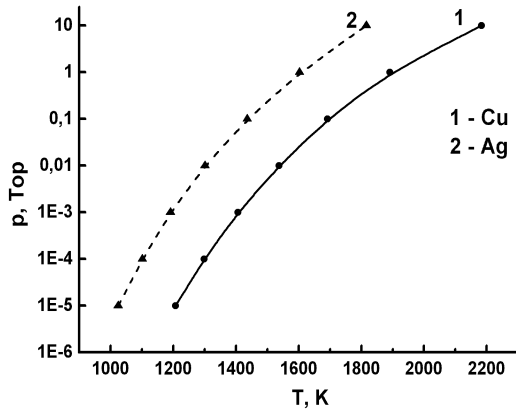


Рис. 2. Температурні залежності тиску насичених парів міді та срібла [7].

у більшості випадків є робочою температурою ЛПМ, співвідношення рівноважних концентрацій срібла та міді складає близько 30:1. На нашу думку це є дуже сприятливим фактором. На відміну від цього, у цитованій вже роботі японських дослідників [6] це співвідношення складає близько 1:1.

## 2. Експериментальне дослідження лазера на парі міді із домішкою срібла, обговорення результатів

Експериментальні дослідження впливу домішки срібла на генераційні властивості лазера на парі міді виконано із активним саморозігрівним елементом типу ТЛГ-5, що має секціоновану ГРТ із корундової кераміки внутрішнім діаметром 12 мм та завдовжки 100 см. Імпульсно-періодичний розряд збуджувався тиратронним генератором із резонансним перезарядом накопичувального конденсатора ємністю  $C_n = 2475$  пФ. Простір поміж ГРТ та скляною вакуумною оболонкою заповнено теплоізолятором. У якості буферного газу використовувався неон. Контроль імпульсів генерації, струму і напруги здійснювався осцилографічним способом. Датчиком імпульсів генерації слугував швидкісний вакуумний фотоелемент ФЭК-22СПУ, а датчиками імпульсів струму і напруги – коаксіальний шунт опором 0,04 Ом та ємнісний подільник напруги 100:1.

Стратегія досліджень полягала у наступному. На першому етапі детально вивчено головні експлуатаційні та вихідні параметра лазера на чистій парі міді. На наступному етапі в активний елемент лазера було розкладено вздовж його довжини через рівні проміжки шматочки срібла. Досліджувалися ті ж параметри і властивості активного середовища, що і в попередніх (контрольних) експериментах із чистою міддю.

Головні висновки порівняльного аналізу полягають у наступному.

Було отримано інтегровані в часі спектри випромінювання імпульсно-періодичного розряду у парі Cu та у суміші парів Cu+Ag із неонем, де срібло грає роль домішки. Температура ГРТ складала близько 1773 К. В емісійному спектрі чистої пари міді домінують за інтенсивністю лінії, що є генераційними (зелена 510,6 та жовта 578,2 нм лінії CuI). Більшість інших ліній також легко ототожнюються емісіями атомарної міді. Інша компонента суміші – неон, що превалює за концентрацією, майже не випромінює. У більшості випадків у спектрі присутні й лінії атомарного водню (серія Бальмера), хоч він і не входить у склад суміші. Типовий спектр цього типу наведено на рис. 3. Умови експериментів тут й надалі – у підписах до рисунків. Скорчені позначення в них означають:  $p(\text{Ne})$  – тиск неону;  $f$  – частота повторення імпульсів;  $U_{\text{вип}}$  та  $I_{\text{вип}}$  – напруга та струм споживання випрямляча.

Введення домішки срібла разюче змінює спектр випромінювання розряду. Початково у спектрі домінують виключно емісії, що ідентифікуються як лінії атомарного срібла. Значно (на порядок і більше) їм поступаються в інтенсивності лінії атомарної міді. Також практично відсутні лінії неону, проте спостерігаються лінії Бальмерівської серії водню. Приклад такого спектру наведено на рис. 4. Протягом періоду ~ 10 годин роботи ГРТ після завантаження срібла характерним є повна відсутність генерації як на зеленій, так і на жовтій лініях міді (резонатор лазера утворено плоскими глухим дзеркалом та

кварцовою плоско-паралельною пластинкою). Цей факт ми вважаємо нехай і очевидним, проте повчальним побічним результатом роботи, оскільки він ясно свідчить, що у випадку сумішей парів металів (хай навіть і споріднених за своїми фізико-хімічними характеристиками, як у даному випадку мідь та срібло), годі очікувати простого сумування властивостей, характерних для розрядів поокремо.

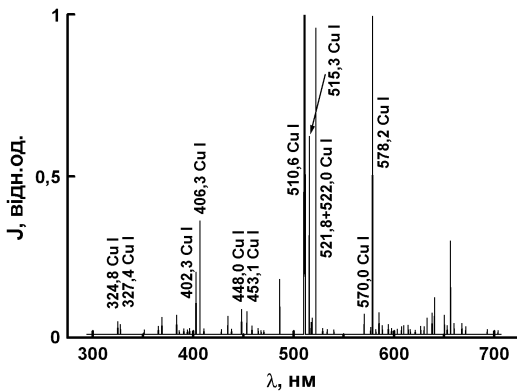


Рис. 3. Інтегрований в часі спектр випромінювання лазера на чистій парі міді:  $p(\text{Ne}) = 32 \text{ Тор}$ ,  $f = 9,6 \text{ кГц}$ ,  $I_{\text{вип}} = 0,41 \text{ А}$ ,  $U_{\text{вип}} = 5,6 \text{ кВ}$ .

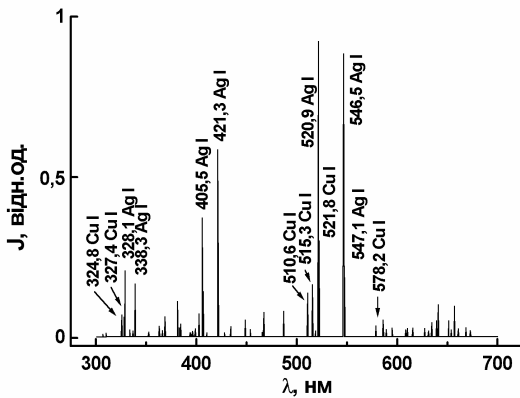


Рис. 4. Інтегрований в часі спектр випромінювання активного елемента на суміші парів міді та срібла:  $p(\text{Ne}) = 75 \text{ Тор}$ ,  $f = 10 \text{ кГц}$ ,  $I_{\text{вип}} = 0,29 \text{ А}$ ,  $U_{\text{вип}} = 5,5 \text{ кВ}$ .

З часом, однак, у спектрі випромінювання спостерігається трансформація у бік зростання інтенсивності емісій атомарної міді та зменшення інтенсивності емісій атомарного срібла. Цей режим роботи характерний певним усталеним співвідношенням  $\sim 1:1$  інтенсивностей споріднених переходів міді та срібла протягом пе-

ріоду, який в наших умовах становив  $\sim 20$  годин роботи ГРТ (тривалість його визначається кількістю завантаженого в ГРТ металевого срібла). Для нього характерним є наявність генерації на обох лініях міді. На рис. 5 наведено порівняльні залежності середньої потужності генерації (сумарно на обох лініях) для чистої міді та для суміші міді із сріблом в усталеному режимі. Із наведеного видно, що середня потужність генерації ЛПМ із домішкою срібла систематично перевищує вказаний параметр для ЛПМ на чистій парі міді у середньому на 10 %. Не зважаючи на відносно невеликий абсолютний приріст, вважаємо, що цей результат має значну вагу. Через це ж слід зазначити, що до нього ми підійшли достатньо обережно, з відповідною увагою. Для повної гарантії цього ефекту була проведена ціла серія досліджень.

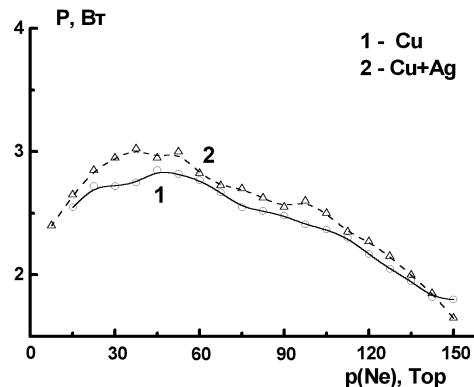


Рис. 5. Залежність середньої потужності випромінювання ГРТ від тиску буферного газу неону:  $f = 9,6 \text{ кГц}$ .

Результати вимірювань часової форми імпульсів генерації в обох випадках (див. рис. б) також узгоджуються із ефектом збільшення середньої потужності, причому як на обох лініях генерації окремо, так й для сумарного генераційного імпульсу. Площа під осцилограмами імпульсної потужності для суміші перевищує площу поїд ними для чистої пари міді, причому десь у такому ж співвідношенні 11:10.

Таким чином, як і для галогенідів міді [6], трансформація імпульсів генерації відбувається протягом імпульсу практич-

но незмінної тривалості. Взявши населеність основного стану атомів міді  $N_{Cu} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $v = 10^5 \text{ см/с}$  та  $\sigma = 10^{-14} \text{ см}^2$ ,

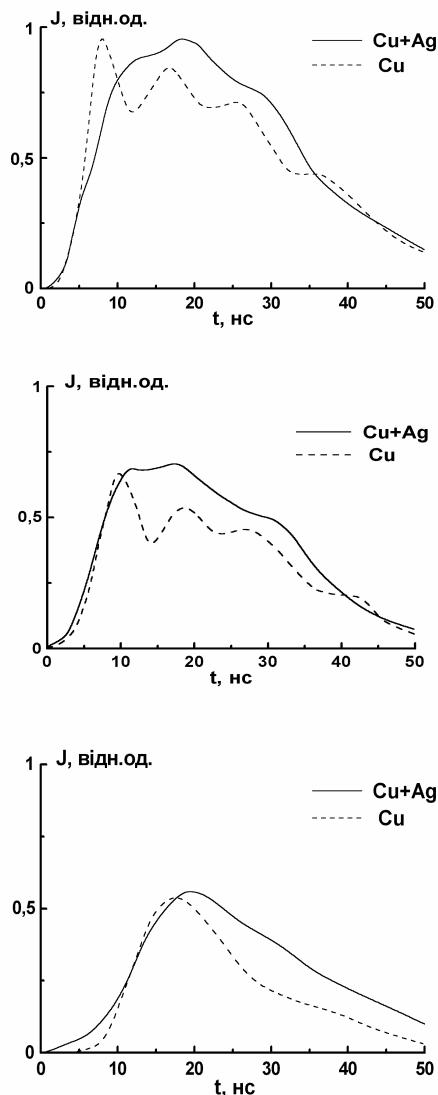


Рис. 6. Форма імпульсів у часі сумарної, зеленої і жовтої генерації (зверху – вниз) при  $\rho(Ne) = 37 \text{ Тор}$ ,  $f = 9,6 \text{ кГц}$ .  
Пунктирні лінії – Cu, суцільні лінії – Cu+Ag.

отримаємо оцінку часу передачі енергії на рівні  $\tau = 1/(N_{Cu}\sigma v) = 1 \text{ мкс}$ . Це довше, аніж тривалість імпульсу збудження, але вже значно коротше міжімпульсного проміжку. Отже, слід вважати ймовірним, що механізм дії присадки полягає у суттєвій підкачці резонансних станів міді зі “срібного резервуару”.

Суттєвою відмінною осцилограм імпульсів генерації для зеленої лінії та сумарної (зелена + жовта) ліній в режимах чиста мідь та мідь + срібло, як зрозуміло

із рис. 6, є ще й те, що в другому випадку не тільки збільшуються імпульсна потужність та енергія імпульсу, але й зникає їх видима коливальна структура. Цю структуру зазвичай пов’язують із надтонкою структурою ліній генерації. Зокрема, як зазначено в [8] із посиланням на роботи [9 – 11], при неоднорідному контурі підсилення (доплерівський контур є неоднорідним) розвиток генерації на окремих спектральних компонентах здійснюється незалежно, а структура на осцилограмах імпульсів викликана неоднотимчасним виходом в генерацію компонент надтонкої структури. Замивання структури може бути спричинене:

- непружними зіткненнями повільних електронів із збудженими атомами міді;
- непружними зіткненнями атомів міді із збудженими атомами срібла; ці ж зіткнення можуть спричинити демаксвелізацію атомів міді протягом імпульсу, якщо призводять до гасіння збуджених станів срібла із переходом їх внутрішньої енергії збудження в кінетичну енергію.

Так чи інакше, під дією фактичного матеріалу ми вимушені пов’язати покращення генераційних характеристик при введенні в ЛПМ домішки срібла із трансформацією населеності підрівнів надтонкої структури міді, і то під час самого імпульсу накачки, та підкачкою резонансних рівнів міді зі “срібного резервуару”

Дослідження часових характеристик розряду для чистої пари міді та для суміші парів Cu+Ag показало, що тривалості імпульсу збудження в обох випадках близькі і складають по основі  $\sim 200 - 220 \text{ нс}$ . Тривалість переднього фронту при цьому не перевищує  $50 - 70 \text{ нс}$ . Часові форми імпульсів спонтанного випромінювання емісій з резонансних рівнів атома міді (зокрема лінії міді  $570,0 \text{ нм}$ ) корелюють за тривалістю із імпульсом струму для чистої міді, проте є дещо тривалішим для суміші мідь + срібло (рис. 7).

Отож, маємо ще одну підставу вважати, що ефект підсилення зумовлено дода-

тковим механізмом підкачки – передачею енергії від “срібного” енергетичного резервуару.

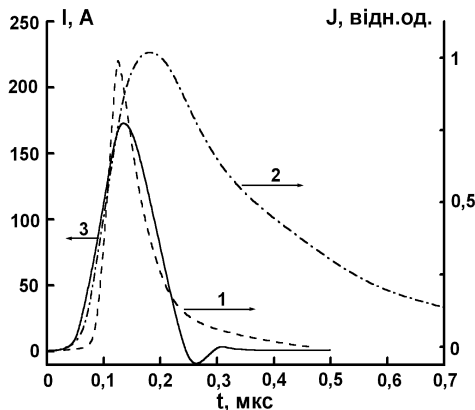


Рис. 7. Осцилограми часового ходу інтенсивності лінії 570,0 нм міді для Cu- (1) та Cu-Ag-лазерів (2) та імпульсу струму (3).

#### Література:

1. T.W.Karras, US Patent # 3 381 107 (1974).
2. G.G.Petrash, Proceedings of SPIE, 4747, 193 (2001).
3. Л.В.Воронюк, Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук, Ужгород (1988).
4. О.В.Жданев, Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук, Томск (2003).
5. Р.Б.Рійвес, В.А.Кельман, Тези доповідей ювілейної конференції молодих вчених та аспірантів ІЕФ`2001. Ужгород, С. 60 (2001).

#### Висновки

Уперше для модифікації вихідних характеристик лазера на чистій парі міді використано домішку атомів срібла. Наявність у атомів срібла потужного енергетичного резервуару з трьох рівнів (два резонансні та один метастабільний), що знаходиться у квазірезонансі із резонансними рівнями атома міді, дає певну підставу очікувати ефективної підкачки в ЛПМ за рахунок ударів II роду. Експериментальне дослідження впливу домішки срібла засвідчило збільшення імпульсної й середньої потужностей та енергії імпульсів генерації ЛПМ на 10 %. Тривалості імпульсів при цьому є нечутливими до введення домішки.

6. K.Oouchi, M.Suzuki, K.Fujii, IEEE J. Quantum Electronics, 27, 2473 (1991).
7. Таблицы физических величин. Под ред. И.К.Кикоина. (Атомиздат, Москва, 1976), 1008 С.
8. В.М.Батенин, В.В.Бучанов, М.А. Казарян, И.И.Климовский, Э.И.Молодых, Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов, (Научная книга, Москва, 1998) 544 С.
9. Casperson L.W., J.Appl.Phys., 47, 4555 (1976).
10. Casperson L.W., J.Appl.Phys., 47, 4563 (1976).
11. Casperson L.W., J.Appl.Phys., 48, 256 (1977).

## COPPER-VAPOR LASER WITH SILVER ADMIXTURE

R.B. Riyves, V.A. Kelman, Yu.V. Zhmenyak, Yu.O. Shpenik,  
S.P. Ulusova

Institute of Electron Physics, Ukr. Nat. Acad. Sci.,  
Universytetska St. 21, Uzhhorod, 88017  
e-mail: vkel@mail.uzhgorod.ua

An experimental investigation of pure copper-vapor laser with silver admixture is reported for the first time. The results are analyzed, possible mechanisms of influence are discussed.