

УДК 535.33
PACS number(s): 42.55.Lt; 52.50.Gi

ВПЛИВ ДОМІШКИ СРІБЛА НА РОБОТУ ЛАЗЕРА НА ПАРІ МІДІ

Р. Рійвес, В. Кельман, Ю. Жменяк, Ю. Шпеник, С. Улусова

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

Вперше виконано експериментальні дослідження характеристик лазера на чистій парі міді з домішкою срібла. Отримано інтегровані в часі спектри випромінювання імпульсно-періодичного розряду в парі Cu та у суміші Cu+Ag. Досліджено залежності середньої потужності генерації та часові форми імпульсів генерації для обох випадків. Отримано збільшення потужності на 10%. Обговорюється можливий механізм впливу срібла.

Ключові слова: лазер на парі міді з домішкою срібла, імпульсно-періодичний розряд, середня потужність генерації.

Базова кінетика генерації у лазерах на самообмежених переходах є порівняно простою, проте дієвою і раціональною. Для збудження верхніх робочих резонансних (r) рівнів використовують ефективну схему (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. Майже усі спроби оптимізації лазерів на самообмежених переходах виконано у рамках описаної базової кінетики. Відомі, хіба що, поодинокі і загалом не зовсім вдалі спроби вплинути на режим роботи лазера на парі міді (ЛПМ) введенням 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]. З'ясувалося, що в робочих умовах активного середовища Cu+Cs-лазера швидкість реакції спустошення не здатна забезпечити позитивного ефекту і вже найпростіший аналіз свідчить про недоцільність цього механізму. Наслідуючи [2], зупинимося на цьому трошки детальніше. Взавши населеність основного стану атомів цезію $N_{Cs} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ відповідно 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 метастабілів 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 $N_{Cs} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ очищення буде надто повільним. Отже, не слід вважати ймовірним, що механізм дії присадки полягає у прискоренні дезбудження метастабілів протягом імпульсу збудження.

Спостережуване, однак, на експерименті певне покращення вихідних характеристик лазера, яке все ж таки проявляється при низькій концентрації цезію (~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] ми запропонували 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 метастабільного 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 зрештою зміна режиму роботи ЛПМ. Зокрема, передбачалося збільшення тривалості імпульсу генерації та його подовження у міжімпульсний проміжок. З практичного погляду за умови дієздатності пропонованої видозміни це сприятиме покращенню узгодження у схемах квантових підсилювачів яксравності. Тут обґрунтовується доцільність зазначеної 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.

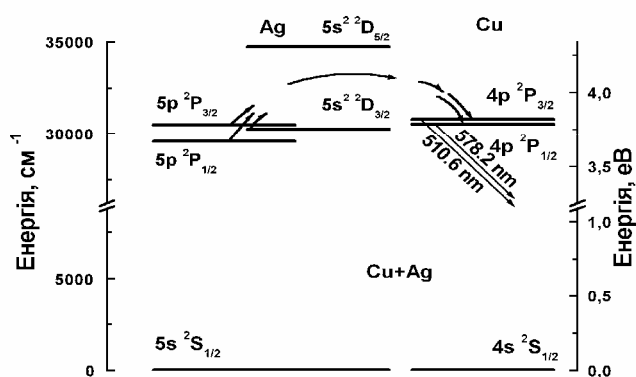
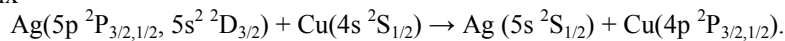


Рис. 1. Енергетична діаграма нижніх рівнів атомів міді та срібла

Повертаючись до праці [6], зазначимо, що в ній домішка срібла у формі AgBr чи AgCl вводилася в активне середовище CuBr- та CuCl-лазерів. При цьому простежували збільшення середньої потужності генерації на 20%. Концентрація галогенідів срібла напряду не визначалася, а завантаження їх становило в межах кількох відсотків від завантаження галогенідів міді. Зазначимо, що механізм впливу домішки срібла тут детально не обговорюється, а вважається очевидним, що позитивний ефект від уведення срібла зумовлений резонансною передачею енергії протягом імпульсу струму.

Отже, у цьому дослідженні вперше вивчено вплив домішки срібла на характеристики лазера на чистій парі міді. На відміну від праць японських вчених, ми очікували проявлення впливу домішки у пізніший період.

Механізм впливу домішки срібла на базову кінетику ЛПМ. Особливість схеми енергетичних рівнів атомів срібла порівняно із міддю полягає у тому, що вже зазначена 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 низки чинників. Першочергово це ефективність передачі енергії від збуджених атомів срібла до атомів міді у реакціях



На жаль, на сьогодні нам невідомі ані експериментальні виміри, ані теоретичні оцінки перерізів зазначених реакцій. Спираючись, однак, на загальноприйняті уявлення, вважаємо, що визначальним чинником 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 еВ (3/2→3/2); -0,008 еВ (3/2→1/2); -0,067 еВ (5/2→3/2); -0,036 еВ (5/2→1/2); -0,153 еВ (1/2→3/2); -0,122 еВ (1/2→1/2). Якоюсь мірою сприятливим чинником є і те, що для усіх варіантів енергообміну ці реакції є ендотермічними. За цих умов слід очікувати, що сумарна величина перерізу становитиме $\sim 10^{-14} \text{ см}^2$.

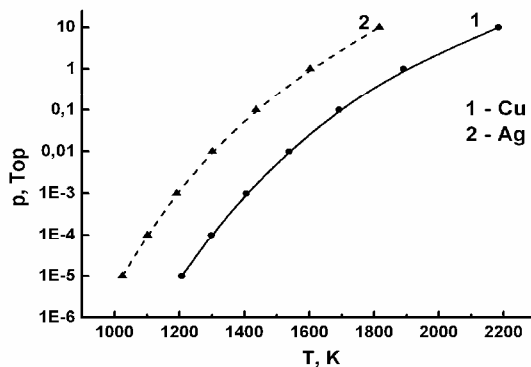


Рис. 2. Температурні залежності тиску насичених парів міді та срібла [7]

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 між ГРТ та склянню вакуумною оболонкою заповнено теплоізолятором. Як буферний газ використовувався неон. Контроль імпульсів генерації, струму і напруги здійснювався осцилографічним способом. Передавачем імпульсів генерації слугував швидкісний вакуумний фотоелемент ФЭК-22СПУ, а передавачем імпульсів струму і напруги — коаксіальний шунт опором 0,04 Ом та ємнісний

подільник напруги 100:1. Стратегія досліджень полягала у такому. На першому етапі детально вивчено головні експлуатаційні та вихідні параметри 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.

Подаємо головні висновки порівняльного аналізу.

Було отримано інтегровані в часі спектри випромінювання імпульсно-періодичного розряду у парі Cu та у суміші парів Cu+Ag із неоном, де срібло грає роль домішки. Температура ГРТ становила 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. Зазвичай 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 і надалі – у підписах до рисунків. Скорочені позначення в них означають: $p(Ne)$ – тиск неону; f – частота повторення імпульсів; $U_{вин}$ та $I_{вин}$ – напруга та струм споживання випрямлювача.

Введення домішки срібла значно змінює спектр випромінювання розряду. Початково у спектрі домінують виключно емісії, що ідентифікують як лінії атомарного срібла. Значно (на порядок і більше) їм поступаються в інтенсивності лінії атомарної міді. Також практично відсутні лінії неону, проте простежено лінії Бальмерівської серії водню. Приклад такого спектра наведено на рис. 4. Протягом періоду ~ 10 годин роботи ГРТ після завантаження срібла характерним є цілковита відсутність генерації як на зеленій, так і на жовтій лініях міді (резонатор лазера утворено плоским 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 цьому випадку мідь та срібло), годі очікувати простого сумування властивостей, характерних для розрядів поокремо.

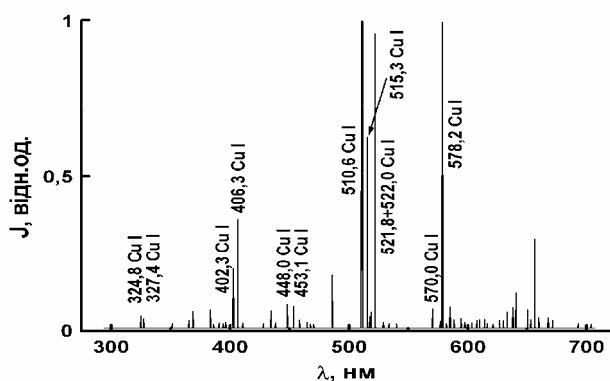


Рис. 3. Інтегрований в часі спектр випромінювання лазера на чистій парі міді:
 $p(Ne)=32$ Тор, $f=9,6$ кГц, $I_{вин}=0,41$ А, $U_{вин}=5,6$ кВ

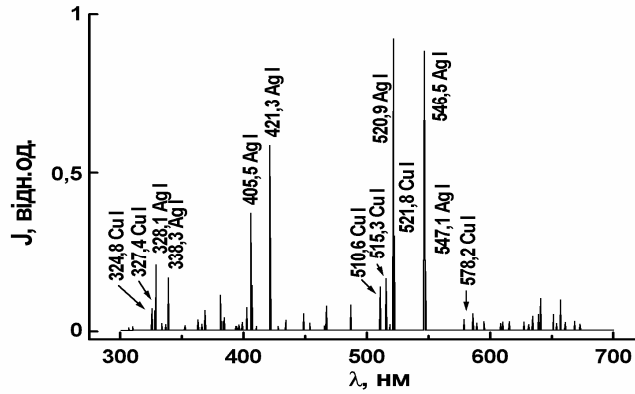


Рис. 4. Інтегрований в часі спектр випромінювання активного елемента на суміші парів міді та срібла: $p(\text{Ne})=75 \text{ Тор}$, $f=10 \text{ кГц}$, $I_{\text{вип}}=0,29 \text{ А}$, $U_{\text{вип}}=5,5 \text{ кВ}$

З часом, однак, у спектрі випромінювання простежується трансформація у бік зростання інтенсивності емісії атомарної міді та зменшення інтенсивності емісії атомарного срібла. Цей режим роботи характерний певним усталеним співвідношенням $\sim 1:1$ інтенсивностей споріднених переходів міді та срібла протягом періоду, який в наших умовах становив ~ 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 зі сріблом в усталеному режимі. Із наведеного видно, що середня потужність генерації ЛПМ із домішкою срібла систематично перевищує зазначений параметр для ЛПМ на чистій парі міді у середньому на 10%. Незважаючи на відносно невеликий абсолютний приріст, вважаємо, що цей результат має значну вагу. Через це слід зазначити, що до нього ми підійшли досить обережно, з відповідною увагою. Для повної гарантії цього ефекту була проведена ціла низка досліджень.

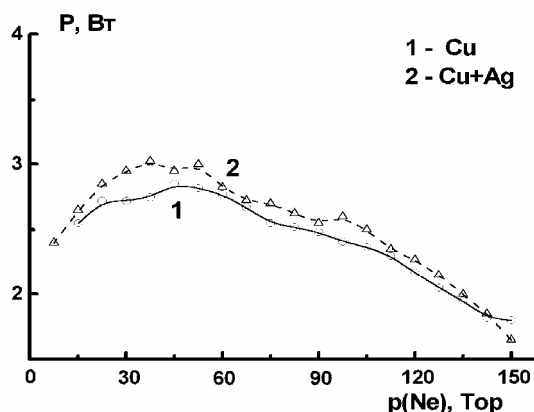


Рис. 5. Залежність середньої потужності випромінювання ГРТ від тиску буферного газу неону: $f=9,6$ кГц

Результати вимірювань часової форми імпульсів генерації в обох випадках (див. рис. 6) також узгоджуються із ефектом збільшення середньої потужності, причому як на обох лініях генерації окремо, так і для сумарного генераційного імпульсу. Площа під осцилограмами імпульсної потужності для суміші перевищує площу попід ними для чистої пари міді, причому десь у такому ж співвідношенні 11:10.

Отже, як і для галогенідів міді [6], трансформація імпульсів генерації відбувається протягом імпульсу практично незмінної тривалості. Взявши населеність основного стану атомів міді $N_{Cu}=10^{15}$ см⁻³, $v=10^5$ см/с та $\sigma=10^{-14}$ см², отримаємо оцінку часу передачі енергії на рівні $\tau=1/(N_{Cu}\sigma v)=1$ мкс. Це довше, аніж тривалість імпульсу збудження, але вже значно коротше від міжімпульсного проміжку. Отже, слід вважати ймовірним, що механізм дії присадки полягає у суттєвому підкачуванні резонансних станів міді зі “срібного резервуару”.

Суттєвою відмінністю осцилограм імпульсів генерації для зеленої 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 зумовлена одночасним виходом в генерацію компонент надтонкої структури. Замивання структури може бути спричинене:

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

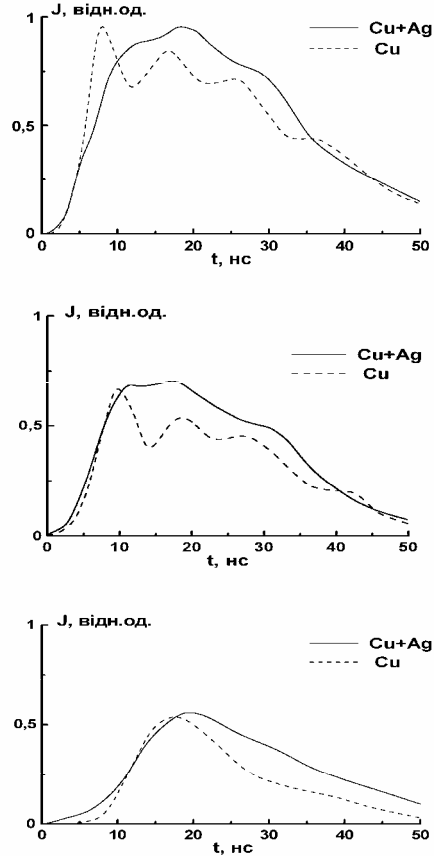


Рис. 6. Форма імпульсів у часі сумарної, зеленої і жовтої генерацій (зверху – вниз) при $p(Ne)=37$ Тор, $f=9,6$ кГц. Пунктирні лінії – Cu, суцільні лінії – Cu+Ag

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

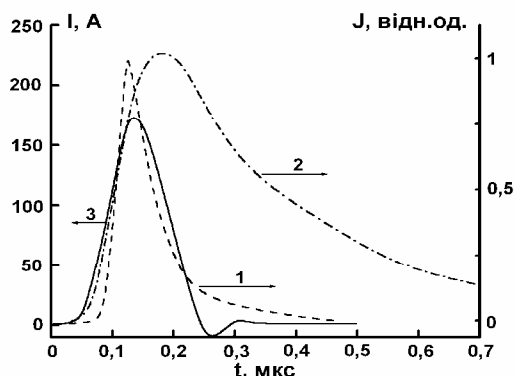


Рис. 7. Осцилограми часового ходу інтенсивності лінії 570,0 нм міді для Cu- (1) та Cu-Ag-лазерів (2) та імпульсу струму (3)

Отож, маємо ще одну підставу вважати, що ефект підсилення зумовлено додатковим механізмом підкачки – передачею енергії від “срібного” енергетичного резервуару.

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 перебуває у квазірезонансі із резонансними рівнями атома міді, дає певну підставу очікувати ефективної підкачки в ЛПМ за рахунок ударів другого 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.

1. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Научная книга, 1998. 544 с.
2. Воронюк Л.В. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Ужгород, 1988.
3. Жданев О.В. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Томск, 2003.
4. Рійвес Р.Б., Кельман В.А. Тези доповідей ювілейної конференції молодих вчених та аспірантів ІЕФ'2001. Ужгород, 2001. 60 с.
5. Таблицы физических величин. Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
6. Casperson L.W. // J.Appl.Phys. 1976. № 47. 4555 p.
7. Casperson L.W. // J.Appl.Phys. 1976. № 47. 4563 p.
8. Casperson L.W. // J.Appl.Phys. 1977. № 48. 256 p.
9. Karras T.W. US Patent # 3 381 107. 1974.
10. Ouchi K., Suzuki M., Fujii K. // IEEE J. Quantum Electronics. 1991. № 27. P. 2473.
11. Petrash G.G. Proceedings of SPIE. 4747. 193. 2001.

COPPER-VAPOR LASER WITH SILVER ADMIXTURE**R. Riyves, V. Kelman, Yu. Zhmenyak, Yu. Shpenik, S. Ulusova**

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

An experimental investigation of copper-vapor laser with silver admixture is reported for the first time. Integrated of time spectra of radiation of pulse periodic discharge in vapor Cu and in a mixture Cu+Ag are obtained. It is explored to dependence of middle power of generation and temporal forms of pulses of generation for both cases. The increase of power is got on 10%. The possible mechanism of influencing of silver are discussed.

Key words: copper-vapor laser with silver admixture, pulse periodic discharge, middle power of generation.

Стаття надійшла до редколегії 19.05.2004

Прийнята до друку 21.11.2005