

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

## ОСОБЛИВОСТІ ІМПУЛЬСНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЛАЗЕРА НА САМООБМЕЖЕНИХ ПЕРЕХОДАХ ІОНІЗОВАНОГО КАЛЬЦІЮ

Є. Світличний, В. Кельман, Ю. Жменяк, Ю. Шпеник

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

Описано конструкцію, технічні засоби збудження та реєстрації параметрів генерації в лазері на самообмежених переходах іона кальцію. Виконано дослідження емісійного спектра лазера та залежностей пікової потужності генерації від температури розрядної трубки, частоти та напруги з метою оптимізації умов збудження. Отримано аргументи на користь обох головних механізмів накачки лазера.

*Ключові слова:* лазер, імпульсна генерація, накачка.

Серед газових лазерів значне місце належить лазерам на самообмежених переходах (СОП), або ж, як останнім часом їх класифікують, лазерам на переходах типу  $g \rightarrow m$ . Останній термін свідчить про те, що верхнім лазерним рівнем є резонансний, а нижнім – метастабільний. Відомим перевагам цей тип лазерів завдячує ефективній схемі накачки в імпульсно-періодичному режимі, що відображені у так званих критеріях Гоулда [1].

Генерацію на СОП уперше було отримано на атомі свинцю ( $\lambda$  722,9 нм) [2] В. Сільфастом із співробітниками, а потім вже і на атомах марганцю (група зелених та ІЧ-ліній) [3] та міді [4]. На сьогодні  $g \rightarrow m$  генерація отримана не менш аніж на 44 переходах у спектрах атомів та іонів [5], охоплюючи спектральний проміжок від 312,2 (Au) до 6456,0 нм ( $Sr^+$ ). Однак лазер на парі міді (ЛПМ) був і залишається кращим серед лазерів на СОП. Це зумовлено переважно тим, що атом міді має чи не ідеальну структуру нижніх енергетичних рівнів та сприятливі часи їх життя з погляду критеріїв Гоулда. ЛПМ генерує водночас на зеленій 510,6 та жовтій 578,2 нм лініях ( $3d^{10}4p^2P_{3/2} \rightarrow 3d^94s^2^2D_{5/2}$  та  $3d^{10}4p^2P_{1/2} \rightarrow 3d^94s^2^2D_{3/2}$  переходи, відповідно).

Практично вже в першій ґрунтовній статті із  $g \rightarrow m$  лазерів [1], що ми згадували в контексті критеріїв Гоулда, було вміщено деякі дані про лазер на СОП іонізованого кальцію. Зокрема, генерацію було отримано на  $g \rightarrow m$  переходах  $4p^2P_{3/2} \rightarrow 3d^2D_{5/2}$  та  $4p^2P_{1/2} \rightarrow 3d^2D_{3/2}$ , ( $\lambda$  854,2 та 866,2 нм, відповідно). Сумарна імпульсна потужність генерації на обох переходах сягала 30 Вт. Тривалість генераційних імпульсів склала  $\sim 30$  нс. Затримка у їх появі стосовно імпульсу

струму тут була на 50 нс більша, аніж за таких самих умов у ЛПМ. Коефіцієнт підсилення для обох ліній генерації становив 58 дБ/м (насичений на довжині 800 мм). Керамічна газорозрядна трубка (ГРТ) мала внутрішній діаметр 10 мм та довжину міжелектродного проміжку 800 мм. ГРТ заповнювалася гелієм до тиску 1–3 Тор. Імпульсний розряд із частотою мережі 60 Гц збуджувався некерованим іскровим розрядником розрядженням ємності 250–2500 пФ через ГРТ. Було також зауважено, що надлишкова 50-нс затримка свідчить на користь того, що вона потрібна для накопичення іонів кальцію від початку імпульсу струму.

Незважаючи на майже 40-річний період розвитку лазерів на СОП, пошук призвів до виявлення ще тільки однієї публікації, у якій вивчалася генерація на СОП іонізованого кальцію [6]. Тут вже були досягнуті потужність в імпульсі генерації 5,4 кВт, середня потужність 0,74 Вт, енергія імпульсу 0,11 мДж та ККД 0,03–0,05%. Експерименти було виконано із ГРТ діаметром 38 мм та завдовжки 152 мм. Оптимальний тиск кальцію становив 54 Па, гелію – 1,33 кПа (або неону 8 кПа). Проте й у цій роботі відсутні висновки щодо гранично досяжних параметрів лазера та головних фізичних процесів, відповідальних за них.

У цій публікації повідомляється про перші результати роботи, розпочатої нами якраз із метою отримання відповіді на ці два кардинальні питання, важливі для будь-якого лазера. Додатковим імпульсом для її провадження є також спокуслива думка про потенційну користь лазера на СОП іонізованого кальцію для зондування шарів іонізованого кальцію в атмосфері Землі за методикою, основні елементи якої представлено в [7].

Експериментальні дослідження виконано з використанням ГРТ із плавленого кварцу внутрішнім діаметром 25 мм та завдовжки 800 мм. Її розміщено у зовнішній кварцовій вакуумній оболонці, до протилежних торців якої вклено коаксіальні водоохолоджувані мідні електроди. Усередині ГРТ розміщено шматочки металічного кальцію. З'ясувалося, по-перше, що ці шматочки повинні мати оптимальну величину  $\leq 5$  мм, оскільки під час роботи вони не оплавляються і не осідають на нижню площину внутрішньої поверхні ГРТ. По-друге, визначено, що для експериментального макету вибір кварцу цілком задовільний, хоч і було відомо про хімічну активність лужноземельних елементів щодо кварцу.

Для збудження розряду використано схему із резонансним зарядом накопичувальної ємності  $C_H=1\ 650\text{--}6\ 600$  пФ та подальшим розрядом її через тиратрон ТГИ1–1000/25 (ТГИ1–2000/35) та ГРТ. У якості буферних газів використовувалися гелій та неон низького тиску. У дослідженні  $C_H$  становила 1 650 пФ, а як газонаповнення застосовано виключно гелій.

Генерацію на СОП іона кальцію отримано із плоским резонатором. Глухе дзеркало вкрите алюмінієвим покриттям. Вихідне дзеркало – прозора кварцова пластинка.

Запис інтегрованих в часі спектрів випромінювання розряду виконано із застосуванням монохроматора МДР–6, фотоприймача ФЭУ–106 та самописця. Часові характеристики імпульсних сигналів досліджувалися з допомогою осцилографа С1–99. Імпульси генерації реєструвалися швидкісним фотопомножувачем 14ЭЛУ–ФК. Середня потужність генерації вимірювалася приладом ИМО–2Н.

Кальцій у фізиці газових лазерів є відомим через те, що забезпечує лазерну генерацію як на атомарних, так і на іонних переходах та у різних режимах накачки. По-перше, це лазер на СОП атома кальцію 5546,0 нм [8]. По-друге, це

лазер на УФ-переходах іонізованого кальцію 373,9 + 370,6 нм [9], що належить до числа найвідоміших із так званих рекомбінаційних лазерів. Проте, як зазначалося, у статті ми досліджували лише генерацію на СОП іонів кальцію. Зазначимо, що всі три типи лазерів можуть бути реалізовані в однаковій конструкції ГРТ та із використанням однієї й тієї ж схеми збудження імпульсно-періодичного розряду. Відмінними є лише склад і тиск газонаповнення. Схему нижніх енергетичних рівнів Ca II, на якій зазначені як резонансні, так і самообмежені ( $r \rightarrow m$ ) та  $5s \rightarrow 4p$  переходи рекомбінаційного лазера у спектрі іонізованого кальцію подано на рис. 1.

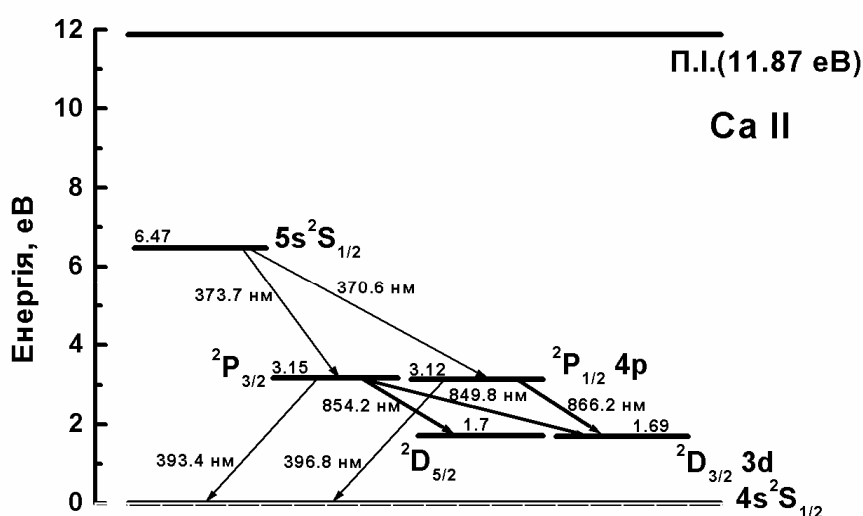


Рис. 1. Схема нижніх енергетичних рівнів Ca II та спектральних переходів між ними

На першому етапі мета праці полягала у виконанні досліджень залежностей імпульсної потужності генерації, сумарної по обох переходах (так і надалі), від величини таких параметрів, як тиск буферного газу гелію  $p_{\text{He}}$ , температура ГРТ  $T$ , напруга на випрямлячі  $U_B$ , частота повторення імпульсів  $f$ .

На рис. 2 зображено емісійний спектр імпульсно-періодичного розряду у суміші He-Ca.

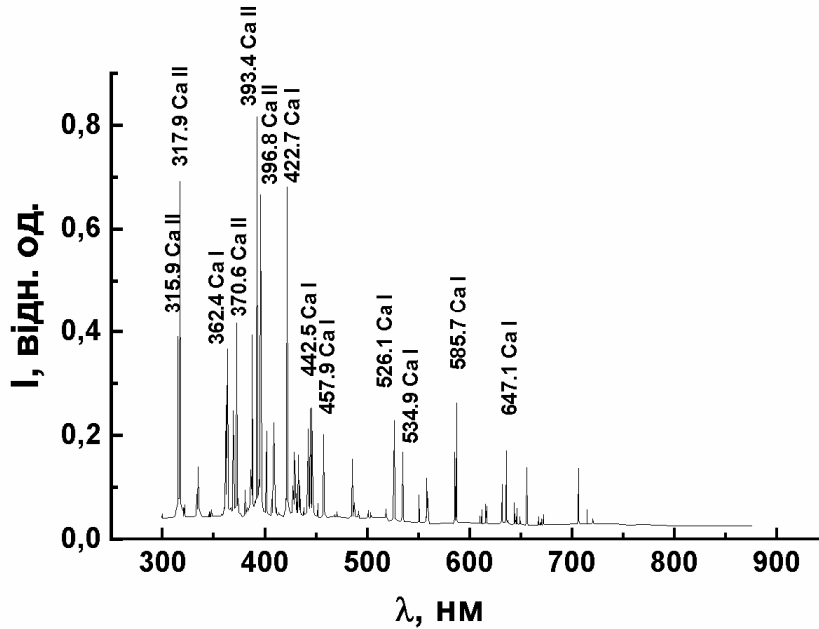


Рис. 2. Інтегрований в часі спектр випромінювання ГРТ лазера на СОП іонізованого кальцію:  $T=923$  К,  $f=6$  кГц,  $U_s=6,6$  кВ,  $p_{\text{не}}=12$  Тор

Умови експерименту – у підписі до рисунка. Спектр записано в спектральному інтервалі чутливості використаної апаратури 300–750 нм. У спектрі присутні виключно лінії атомарного й іонізованого кальцію. При цьому за інтенсивністю іонні лінії навіть перевищують атомарні. Формування такого спектра відбувається поступово, по мірі розігріву ГРТ, коли наявні у спектрі первинно виключно лінії гелію спочатку перестають домінувати, а потім і зовсім зникають. Натомість їх заміщає випромінювання кальцію. Цей ефект відомий для більшості лазерів на СОП, проявився він і тут і пов'язаний зі зменшенням температури електронів у розряді.

Серед інших параметрів експерименту температура ГРТ є чи не найважливішою, оскільки визначає тиск насиченої пари, а отже, і концентрацію кальцію в розряді. Було встановлено (рис. 3), що температурний інтервал існування генерації досить вузький, простягаючись у межах 865–950 К. Нижня межа цього інтервалу відповідає генераційному порозу по концентрації кальцію, верхня – досягненню температурою електронів підкритичного значення.

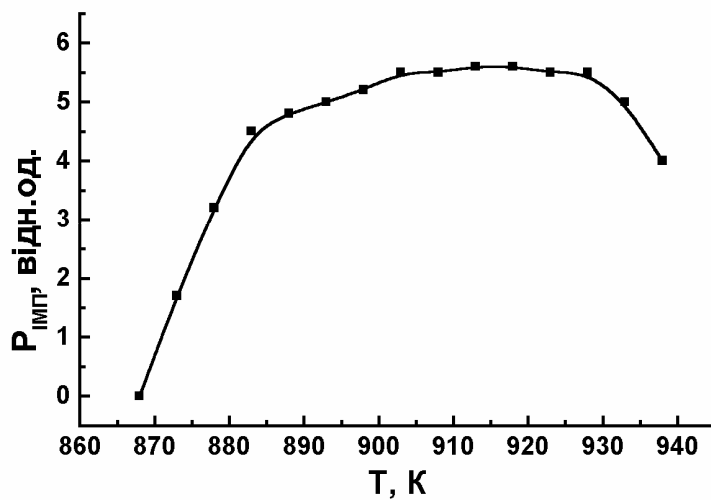


Рис. 3. Залежність імпульсної потужності генерації на  $g \rightarrow m$  переходах іонізованого кальцію від температури ГРТ:  $U_b=6,6$  кВ,  $f=6$  кГц,  $p_{\text{не}}=8$  Тор

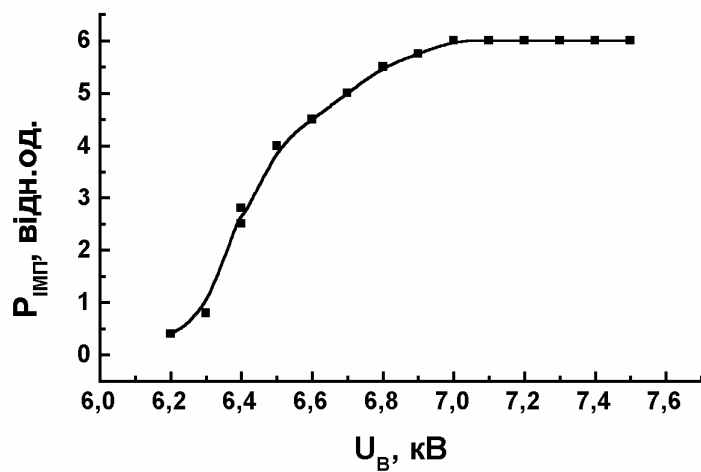


Рис. 4. Залежність імпульсної потужності генерації на  $g \rightarrow m$  переходах іонізованого кальцію від напруги на випрямлячі:  $T=923$  К,  $f=5$  кГц,  $p_{\text{не}}=12$  Тор

Залежність пікової потужності генерації від напруги на випрямлячі (рис. 4) дещо незвична порівняно, скажімо, із лазером на парі міді, значно вищими значеннями напруги, зокрема й порогової, яка в наших умовах становила 6 кВ.

У межах 6–7 кВ спостерігаємо лінійне зростання, а вище 7 кВ потужність виходить на насичення. Високе значення порогової напруги може означати, що в накачці значним є пряме електронне збудження кальцію в резонансні іонні стани.

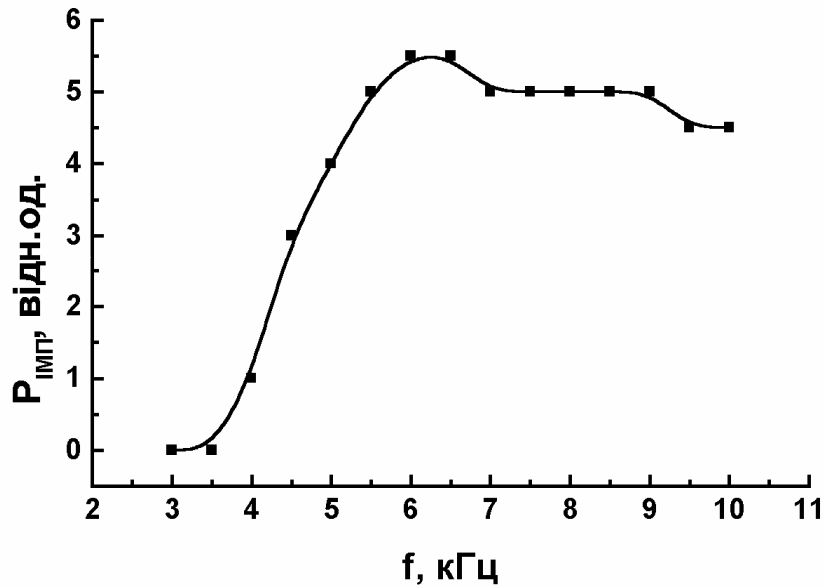


Рис. 5. Залежність імпульсної потужності генерації на  $g \rightarrow m$  переходах іонізованого кальцію від частоти повторення імпульсів:  $U_b=6,6$  кВ,  $T=923$  К,  $p_{\text{He}}=8$  Тор

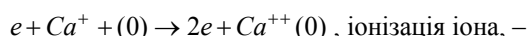
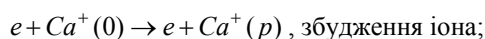
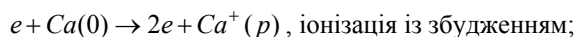
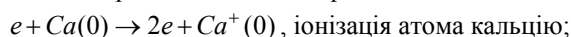
Зрештою, залежність потужності від частоти (рис. 5) обмежена знизу пороговою величиною  $\sim 3$  кГц, в межах 3–6 кГц спостерігається лінійний ріст, а в межах 6–10 кГц – насичення.

За умов експерименту:  $U_b=6,6$  кВ,  $f=6$  кГц,  $p_{\text{He}}=8$  Тор,  $T=923$  К – середня потужність генерації становила 30 мВт.

Отже, ми отримали генерацію на СОП іона кальцію. Добре забутий лазер практично не вивчений. Передусім це стосується механізму збудження генерації. При цьому йдеться практично про вибір з-поміж двох варіантів – чи це збудження з основного стану атома, чи з основного стану іона (для цього слід накопичити їх необхідну кількість з початку імпульсу). Отримані дані залежностей пікової потужності генерації від частоти, напруги на випрямлячі, температури ГРТ є недостатніми для такого вибору. Проте вони містять непрямі аргументи на користь обох гіпотез. Це може означати, що насправді в різних умовах домінують і різні механізми накачки. Одержаний рівень середньої потужності є досить низьким.

Проте отримана сукупність експериментальних даних має допомогти в оптимізації лазера.

У рамках спрощеної п'ятирівневої схеми, що охоплює основні рівні атома, іона та двократного іона кальцію й верхній та нижній робочі лазерні рівні та з урахуванням чотирьох зіткнених процесів



розраховано кінетику населеності атомарних й іонних станів кальцію та часовий хід миттєвої потужності генерації в наближенні насиченої потужності. Однозначно показано, що провідний внесок (не менше 99%) в накачування вносить третій із зазначених процесів. Це означає, що попередньо накопичуються іони кальцію, які в подальшій стадії імпульсу збуджуються у резонансний стан іона.

- 
1. Жуков В.В., Латуш Е.Л., Михалевский В.С. Квантовая электроника 1973. № 4. 1257 с.
  2. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1985. 149 с.
  3. Cahuzac P., Brochard J. J.Phys. 3Q, 1969. 81 p.
  4. Evtushenko G.S., Kataev M.Yu., Klimkin V.M. Atmos. Oceanic. Opt. 1996. Vol. 9. 730 p.
  5. Fowles G.R., Silfvast W.T. Appl. Phys. Lett. 1965. Vol. 6. 236 p.
  6. Karras T.W. In: Proc. Intern. Conf on Lasers'81. St.S Press. USA. 1981. P. 871–876.
  7. Piltch M., Walter W.T., Solimene N., Gould G. et al. Appl. Phys. Lett. 1965. Vol. 7. 309 p.
  8. Walter W.T., Solimene N., Piltch M., Gould G. IEEE J. Quantum Electronics, 1966. Vol. 2. 474 p.
  9. Walter W.T., Solimene N., Piltch M., Gould G. Bull. Am. Phys. Soc. 1966. Vol. 11. 113 p.

**LASER ACTION INVESTIGATION ON CALCIUM ION SELF-TERMINATING TRANSITIONS****E. Svitlichniy, V. Kelman, Yu. Zhmenyak, Yu. Shpenik**

*Institute of Electron Physics, Ukr. Nat. Acad. Sci,  
Universitetska St., 21, UA-88017 Uzhhorod, Ukraine  
e-mail: vkel@mail.uzhgorod.ua  
e-mail: evgeniybest@yahoo.com*

Design, technical means of excitation and registration of generation parameters for a laser on selfterminating transitions of calcium ion are described. The laser emission spectrum is studied as well as the dependences of the generation peak power on the discharge tube temperature, frequency and voltage, aimed at the optimization of the excitation conditions. Arguments in favour of both main mechanisms of the laser pumping are obtained.

*Key words:* laser, pulsed lasing, laser pumping.

Стаття надійшла до редколегії 19.05.2004

Прийнята до друку 21.11.2005