

ІМПУЛЬСНИЙ ЛАЗЕР НА САМООБМЕЖЕНИХ ПЕРЕХОДАХ ІОНІЗОВАНОГО КАЛЬЦІУ

Є.А.Світличний

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

Описано конструкцію, технічні засоби збудження та реєстрації параметрів генерації в лазері на самообмежених переходах іона кальцію. Виконано дослідження емісійного спектру 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.

Вступ

Серед газових лазерів видне місце належить лазерам на самообмежених переходах (СОП), або ж, як прийнято останнім часом їх класифікувати, лазери на переходах типу $r \rightarrow m$. Останній термін прямо вказує на 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 вперше було отримано на атомі свинцю (λ 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 теперішній час $r \rightarrow m$ генерацію отримано не менш аніж на 44 переходах у спектрах атомів та іонів [5], охоплюючи спектральний проміжок від 312,2 нм (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 точки зору критеріїв Гоулда. ЛПМ генерує водночас на зеленій 510,6 нм та жовтій 578,2 нм лініях (пере-

ходи відповідно $3d^{10}4p \ ^2P_{3/2} \rightarrow 3d^94s^2 \ ^2D_{5/2}$ та $3d^{10}4p \ ^2P_{1/2} \rightarrow 3d^94s^2 \ ^2D_{3/2}$).

Практично вже в першій ґрунтовній статті з $r \rightarrow m$ лазерів [1], що згадувалася нами в контексті критеріїв Гоулда, було вміщено деякі дані про лазер на СОП іонізованого кальцію. Зокрема, генерацію було отримано на $r \rightarrow m$ переходах $4p \ ^2P_{3/2} \rightarrow 3d \ ^2D_{5/2}$ та $4p \ ^2P_{1/2} \rightarrow 3d \ ^2D_{3/2}$, (λ 854,2 та 866,2 нм відповідно). Сумарна імпульсна потужність генерації на обох переходах сягала 30 Вт. Тривалість генераційних імпульсів становила ~ 30 нс. Затримка в їх появі по відношенню до імпульсу струму тут була на 50 нс більша, аніж за аналогічних умов у ЛПМ. Коefіцієнт 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-наносекундна затримка свідчить на користь того, що вона необхідна для нагромадження 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 було досягнуто потужності в імпульсі генерації 5,4 кВт, середньої потужності 0,74 Вт, енергії імпульсу 0,11 мДж та ККД 0,03 – 0,05%. Експерименти було виконано з ГРТ діаметром 38 мм та завдовжки 152 мм. Оптимальний тиск кальцію 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 даній 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].

Апаратура і методика експерименту

Експериментальні дослідження виконано з використанням ГРТ з плавненого кварцу внутрішнім діаметром 25 мм та завдовжки 800 мм. Її розміщено у зовнішній кварцовій вакуумній оболонці, до протилежних торців якої вклеєно коаксіальні водоохолоджувані мідні електроди. У середині ГРТ розміщено шматочки металічного кальцію. Виявилось, по-перше, що ці шматочки повинні мати оптимальну величину не більше 5 мм, оскільки в ході роботи вони не оплавлюються і не осідають на нижню площину внутрішньої поверхні ГРТ. По-друге, встановлено, що для експериментального макету вибір кварцу цілком задовільний, хоч і було відомо про хімічну активність лужноземельних елементів щодо кварцу.

Для збудження розряду використано схему з резонансним зарядом накопичувальної ємності $C_H = 1650 - 6600$ 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 даній роботі C_H становила 1650 пФ, а як газонаповнення застосовано виключно гелій.

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

Запис інтегрованих у часі спектрів випромінювання розряду виконано з 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 вимірювалась приладом ИМО-2Н.

Результати та обговорення

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 найбільш відомих із так званих рекомбінаційних лазерів. Проте, як зазначалося, в даній роботі ми досліджували лише генерацію на СОП іонів кальцію. Зауважимо, що всі три типи лазерів можуть бути реалізовані в однаковій конструкції ГРТ та з використанням однієї й тієї ж схеми збудження імпульсно-періодичного розряду. Відмінними є лише склад і тиск газонаповнення. Схему нижніх енергетичних рівнів Са II, на якій вказано як резонансні, так і самообмежені ($r \rightarrow m$) та $5s \rightarrow 4p$ переходи рекомбінаційного лазера у

спектрі іонізованого кальцію подано на рис.1.

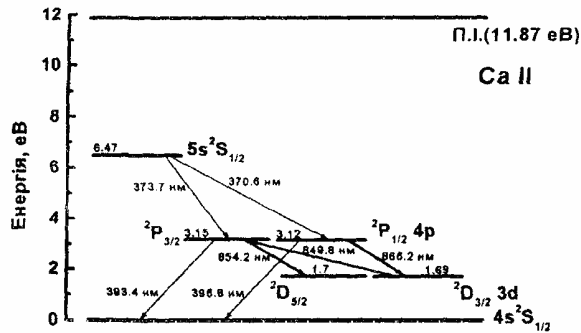


Рис. 1. Схема нижніх енергетичних рівнів Ca II та спектральних переходів між ними.

На першому етапі мета роботи 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_{He} , температура ГРТ T , напруга на випрямлячі U_B , частота повторення імпульсів f .

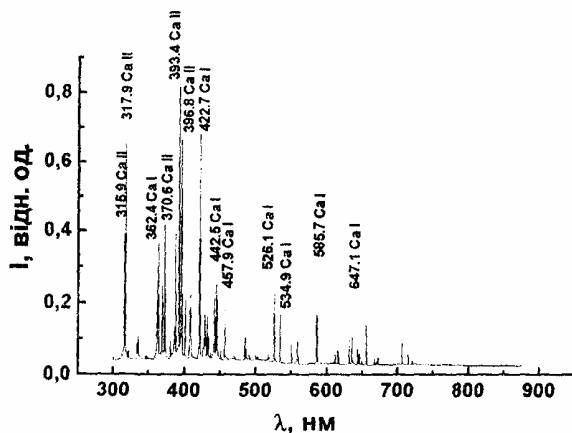


Рис. 2. Інтегрований у часі спектр випромінювання ГРТ лазера на СОП іонізованого кальцію. ($T = 923$ К, $f = 6$ кГц, $P_{He} = 12$ Тор, $U_B = 6.6$ кВ).

На рис.2 зображено емісійний спектр імпульсно-періодичного розряду у суміші He-Ca. У спектрі присутні виключно лінії атомарного й іонізованого кальцію. При цьому за інтенсивністю іонні лінії навіть перевищують атомарні. Формування такого спектру відбувається поступово, по

мірі розігріву ГРТ, коли наявні у спектрі первинно виключно лінії гелію спочатку перестають домінувати, а потім й зовсім практично зникають. Натомість їх заміщує випромінювання кальцію. Цей ефект, відомий для більшості лазерів на СОП, проявився і тут. Він пов'язаний зі зменшенням температури електронів у розряді.

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

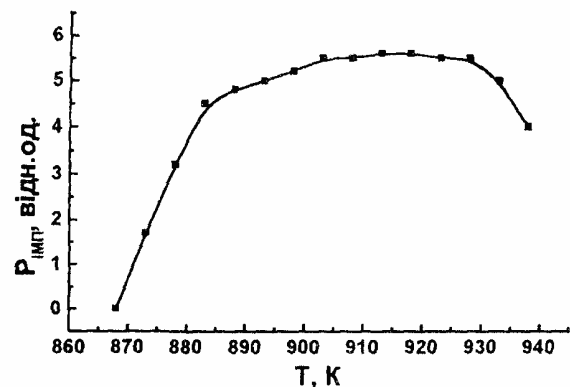


Рис. 3. Залежність імпульсної потужності генерації на $r \rightarrow m$ переходах іонізованого кальцію від температури ГРТ ($U_B = 6.6$ кВ, $f = 6$ кГц, $P_{He} = 8$ Тор).

Залежність пікової потужності генерації від напруги на випрямлячі (рис. 4) дещо незвична у порівнянні, скажімо, з лазером на парі міді, значно вищими значеннями напруги, зокрема й порогової, яка в наших умовах склала 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 значну роль грає пряме електронне збудження кальцію в резонансні іонні стани.

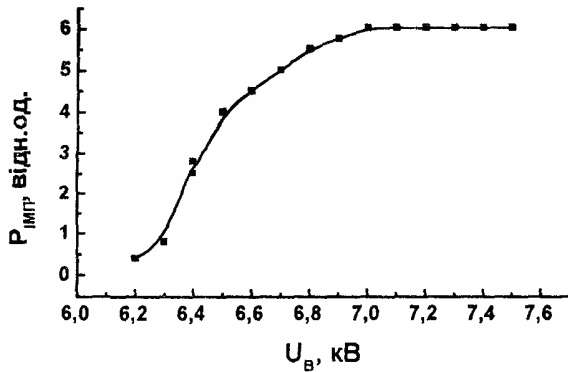


Рис. 4. Залежність імпульсної потужності генерації на $r \rightarrow m$ переходах іонізованого кальцію від напруги на випрямлячі. ($T = 923$ К, $f = 5$ кГц, $P_{He} = 12$ Тор).

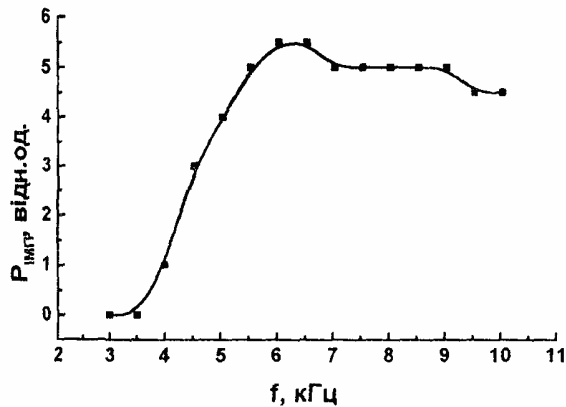


Рис. 5. Залежність імпульсної потужності генерації на $r \rightarrow m$ переходах іонізованого кальцію від частоти повторення імпульсів. ($U_B = 6.6$ кВ, $T = 923$ К, $P_{He} = 8$ Тор).

Нарешті, залежність потужності від частоти (рис.5) обмежена знизу пороговою величиною ~ 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, $P_{He} = 8$ Тор, $T = 923$ К середня потужність генерації склала 30 мВт.

Висновки

Отже, нами отримано генерацію на СОП іона кальцію. Добре забутий лазер практично не вивчений. У першу чергу це стосується механізму збудження генерації. При цьому мова йде практично про вибір із поміж двох варіантів – чи це збудження з основного стану атома, чи з основного стану іону (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. Отриманий рівень середньої потужності є достатньо низьким. Проте отриманий набір експериментальних даних повинен допомогти в оптимізації лазера.

Література

1. W.T.Walter, N.Solimene, M.Piltch, G.Gould, IEEE J. Quantum Electronics 2, 474 (1966).
2. G.R.Fowles, W.T.Silfvast, Appl. Phys. Lett. 6, 236 (1965).
3. M.Piltch, W.T.Walter, N.Solimene, G.Gould, W.R.Bennet Jr, Appl. Phys. Lett. 7, 309 (1965).
4. W.T.Walter, N.Solimene, M.Piltch, G.Gould, Bull. Am. Phys. Soc. 11, 113 (1966).
5. А.Н.Солдатов, В.И.Соломонов, Газо-разрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов (Наука, Сибирское отделение, Новосибирск, 1985).
6. T.W.Karras, In: Proc. Intern. Conf on Lasers'81 (St.S Press. USA, 1981) p. 871–876.
7. G.S.Evtushenko, M.Yu.Kataev, and V.M.Klimkin, Atmos. Oceanic. Opt. 9, 730 (1996).

8. P.Cahuzac, J.Brochard, J.Phys., 30, 81 (1969).

9. В.В.Жуков, Е.Л.Латуш, В.С.Михалевский, Квантовая электроника 4, 1257 (1973).

PULSED LASER ON CALCIUM ION SELF-TERMINATING TRANSITIONS

E.A.Svitlichniy

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

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.