

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛАЗЕРА НА $r \rightarrow m$ ПЕРЕХОДАХ ІОНІЗОВАНОГО КАЛЬЦІЮ

**В.А. Кельман, С.О. Зозуля¹, Ю.О. Шпеник,
Є.А. Світличний**

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

¹ Ужгородський державний інститут інформатики, економіки і права, вул. Заньковецької, 89, Ужгород, 88000

Вперше виконано розрахункові дослідження граничних параметрів лазера на самообмежених переходах іонів кальцію та створено кінетичну модель збудження генерації. Провідним механізмом збудження генерації є електронне збудження попередньо накопичених іонів кальцію в основному стані. Отримана оцінка граничної величини питомого енергозйому 110 мкДж/см^3 стимулюватиме постановку експериментальних досліджень лазера на парі іонів кальцію.

Вступ

Серед газових лазерів особливо вирізняються лазери на самообмежених переходах (СОП). Їм властива дієва і водночас раціональна схема накачування верхніх робочих рівнів. Вони працюють в імпульсно-періодичному режимі із високою частотою повторення імпульсів (типово ~ 10 кГц). Їм притаманні високі значення імпульсної й середньої потужностей генерації та ККД. У своїй більшості ці лазери працюють на атомарних переходах із верхнього резонансного r на нижній метастабільний m стан ($r \rightarrow m$ - переходи) атомів металів. Проте є серед них і $r \rightarrow m$ - лазери на іонних переходах. Зокрема вже в першій ґрунтовній статті із лазерів на СОП повідомлялося про отримання генерації як на $r \rightarrow m$ - переходах міді – лазер на парі міді (ЛПМ) відомий як кращий із цих лазерів і понині, так й іонізованого кальцію [1]. Не дивлячись на тривалий період розвитку, у фізиці іонних лазерів на СОП є ряд білих плям. Зокрема, практично відсутні результати із чисельного моделювання цих лазерів. Між тим є актуальним питання вияснення граничних параметрів генерації Ca^+ - лазера та механізму переважного накачування верхнього лазерного рівня, маючи на увазі як загально-фізичний інтерес та практичну доцільність використання цього лазера для зондування шарів іонізованого кальцію, що

простягаються в атмосфері на висотах 80 – 100 км.

Мета роботи якраз і полягала у створенні моделі накачування Ca^+ - лазера та виконанні розрахунків на її основі для встановлення провідного механізму збудження генерації та її граничних параметрів. Для досягнення цієї мети в ході виконання роботи вирішено наступні задачі:

- створено кінетичну модель лазера, яка при всій можливій простоті враховує найбільш суттєві деталі збудження генерації протягом короткого імпульсу;
- підібрано за літературними даними енергетичні залежності ефективних перерізів елементарних плазмових процесів, врахованих в кінетичній моделі, створено відповідну базу даних;
- обчислено константи швидкостей елементарних плазмових фізичних процесів для різних значень температури електронів, створено відповідну базу даних;
- обчислено кінетику накачування Ca^+ - лазера шляхом розв'язання системи кінетичних диференціальних рівнянь,
- встановлено, що провідний механізм накачування Ca^+ - лазера – каскадне (ступінчасте) збудження іонів кальцію електронним ударом.

В роботі [1] 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 склала ~ 30 нс. Затримка у їх появі по відношенню до імпульсу струму тут була на 50 нс більша, аніж за аналогічних умов в ЛПМ. Коефіцієнт підсилення для обох ліній генерації склав 58 дБ/м (насичений на довжині 800 мм). Газорозрядна трубка (ГРТ) заповнювалася гелієм до тиску 1 – 3 Тор. Було також зауважено, що надлишкова 50- нс затримка свідчить на користь того, що вона необхідна 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 безпосередньо вивчалася генерація на СОП іонізованого кальцію [2]. 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 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.

Тут повідомляється про результати роботи, яка була розпочата як раз 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 [3].

Для більш повної уяви про ситуацію навколо Ca^+ - лазера, зазначимо ще наступне. 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 накачу-

вання. По-перше, це лазер на СОП атома кальцію 5546,0 нм [4]. По-друге, це лазер на УФ- переходах іонізованого кальцію 373,9 + 370,6 нм [5], що належить до числа найбільш відомих із так званих рекомбінаційних лазерів. Проте, як зазначалося, в даній роботі ми займалися моделюванням лише генерації на СОП іонів кальцію. Відмітимо, 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 й тиск газонаповнення. Схему нижніх енергетичних рівнів CaII представлено на рис. 1.

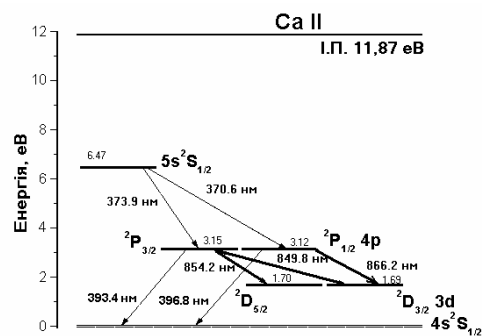


Рис. 1. Схема нижніх енергетичних рівнів іона кальцію.

1. Кінетична модель Ca^+ лазера

Для вирішення задачі чисельного моделювання накачки Ca^+ - лазера було використано спрощену схему рівнів атома й іона кальцію. Ця схема обмежена основним рівнем атома кальцію (0), основним рівнем іона кальцію (1), нижнім робочим рівнем Ca^+ - лазера (2), верхнім робочим рівнем Ca^+ - лазера (3) та основним рівнем двократного іона кальцію (4).

Відповідно до цієї спрощеної схеми рівнів у кінетичній моделі враховано наступні процеси:

- іонізація атомів кальцію електронним ударом ($0 \rightarrow 1$);
- іонізація атомів кальцію із одночасним збудженням у верхній лазерний рівень електронним ударом ($0 \rightarrow 3$);
- збудження іонів кальцію із основного іонного стану у верхній лазерний рівень електронним ударом ($1 \rightarrow 3$);

- іонізація іонів кальцію електронним ударом (1 → 4).

Система диференціальних кінетичних рівнянь, що описує кінетику збудження генерації в наближенні імпульсу (до розряду в момент часу $t = 0$ прикладається зовнішнє поле, що підтримує сталою температуру електронів T_e) виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned} \frac{dN_0}{dt} &= -N_e N_0 \langle \sigma_{01} v \rangle - N_e N_0 \langle \sigma_{03} v \rangle; \\ \frac{dN_1}{dt} &= N_e N_0 \langle \sigma_{01} v \rangle - N_e N_1 \langle \sigma_{13} v \rangle - N_e N_1 \langle \sigma_{14} v \rangle; \\ \frac{dN_2}{dt} &= P + A_{32} N_3; \\ \frac{dN_3}{dt} &= N_e N_0 \langle \sigma_{03} v \rangle + N_e N_1 \langle \sigma_{13} v \rangle - P - A_{32} N_3; \\ \frac{dN_e}{dt} &= N_e N_0 \langle \sigma_{01} v \rangle + N_e N_1 \langle \sigma_{14} v \rangle; \\ \frac{N_2}{g_2} &= \frac{N_3}{g_3}; \\ \frac{dN_4}{dt} &= N_e N_1 \langle \sigma_{14} v \rangle. \end{aligned}$$

Наведена система рівнянь дає можливість обчислити в першу чергу кінетику населеності відповідних рівнів у спектрі кальцію різного ступеня іонізації протягом дії імпульсу збудження.

Вимагає особливої уваги представлення наведених тут позначень. Через N_0 , N_1 , N_2 , N_3 та N_4 тут позначено миттєві значення концентрації часток кальцію в основному атомарному N_0 , основному іонному N_1 , нижньому робочому N_2 , верхньому робочому N_3 та основному двократного іона N_4 станах. N_e – миттєве значення концентрації електронів; перерізи процесів позначені як:

- σ_{01} – ефективний переріз процесу іонізації атомів кальцію електронним ударом (0 → 1);
- σ_{03} – ефективний переріз процесу іонізації атомів кальцію із одночасним збудженням у верхній лазерний рівень електронним ударом (0 → 3);
- σ_{13} – ефективний переріз процесу збудження іонів кальцію із основного іонного

стану у верхній лазерний рівень електронним ударом (1 → 3);

- σ_{14} – ефективний переріз процесу іонізації іонів кальцію електронним ударом (1 → 4).

Ефективні перерізи відповідних елементарних процесів є мірою ймовірності їх протікання у парних зіткнень частинок (у даному випадку електронів із атомами й іонами кальцію) та за певних фіксованих умов. Для електрон-атомних та електрон-іонних зіткнень таким параметром є енергія електронів E .

Через $\langle \sigma_{01} v \rangle$ позначено константу швидкості для процесу (0 → 1), через $\langle \sigma_{03} v \rangle$ позначено константу швидкості для процесу (0 → 3), через $\langle \sigma_{13} v \rangle$ позначено константу швидкості для процесу (1 → 3), через $\langle \sigma_{14} v \rangle$ позначено константу швидкості для процесу (1 → 4).

Зазначені константи швидкостей $\langle \sigma_{ik} v \rangle$ для непружного ($i \rightarrow k$)- процесу визначалися нами виходячи із припущення про максвелівський розподіл електронів по швидкостям (енергіям).

У кінетичній моделі окрім зіткнених процесів враховано також емісійні індуковані переходи із верхнього лазерного рівня на нижній уведенням питомої потужності генерації P , а також спонтанні переходи в тому ж каналі уведенням члена $N_3 A_{32}$ (обидва у числі переходів в одиниці об'єму за одиницю часу).

У вжитій нами моделі використано чотири суттєві зіткненеві процеси. Для їх кількісного врахування було віднайдено із літературних джерел результати експериментальних вимірювань енергетичних залежностей ефективних перерізів σ_{ik} . Ці залежності було отримано серією послідовних процесів: сканування віднайденого експериментального графічного матеріалу [6-9], оцифрування з використанням програми Grafula III [10], апроксимація поліномами та побудова графічних залежностей в уніфікованому виді в інтервалі енергій електронів від 0 до 100 eV із використанням програми Origin 5 [11].

Побудована також відповідна база даних енергетичних залежностей $\sigma_{ik}(E)$ для усіх процесів з кроком енергії електронів 0,1 eV.

Обчислення констант швидкостей реакцій $\langle \sigma_{ik} v \rangle$ для непружного ($i \rightarrow k$)-процесу було здійснено, як вже зазначалося, із використанням максвелівського розподілу електронів за швидкостями. Відомо [12], що в загальному виді

$$\langle \sigma_{ik} v \rangle = \int_0^{\infty} \left(\frac{2E}{m} \right)^{1/2} \sigma_{ik} f(E) dE.$$

У цьому співвідношенні E – енергія, m – маса електронів. Для максвелівського розподілу, що характеризується температурою електронів T_e

$$f(E) dE = 2 \left(\frac{E}{\pi} \right)^{1/2} (kT_e)^{-3/2} \exp\left(-\frac{E}{kT_e}\right) dE.$$

Тут k – стала Больцмана.

Вираз для константи швидкості набуває виду

$$\langle \sigma_{ik} v \rangle = \alpha (kT_e)^{-3/2} \int_0^{\infty} E \sigma_{ik} \exp\left(-\frac{E}{kT_e}\right) dE,$$

де $\alpha = \left(\frac{8}{\pi m} \right)^{1/2}$.

Результати обрахунку наведено на рис. 2 у вигляді залежностей відповідних констант від температури електронів. Вони ж уведені до відповідної бази даних.

Імовірність спонтанного розпаду запозичена із довідника [13] й становить $A_{32} = 0,12 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$.

2. Метод розв'язання системи кінетичних рівнянь

Для інтегрування системи кінетичних рівнянь нами зрештою було обрано найпростіший метод Ейлера, маючи на увазі, що в задачах подібного роду основна похибка спричинена вжитими фізичними допущеннями та похибкою вжитих перерізів основних елементарних процесів. Похибка ж обчислень може бути практично зведена нанівець зменшенням кроку інтегрування

Окремо зупинимося на обчисленні

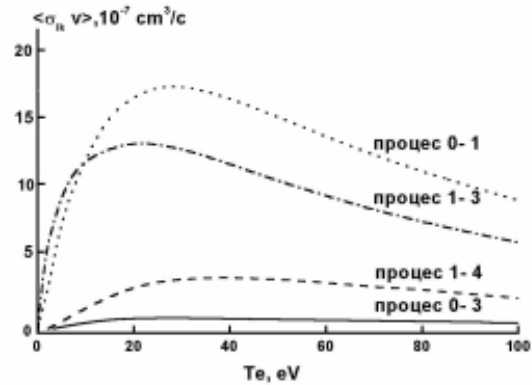


Рис. 2. Залежності констант швидкостей процесів від температури електронів.

питомої потужності генерації P . З цією метою нами використано метод, знаний як метод насиченої потужності. Відомо, що цей метод виправданий для лазерів із великим коефіцієнтом підсилення. Уперше його було використано для оцінки характеристик генерації в азотному лазері [14]. В праці [15] його було використано для чисельного розрахунку лазера на парі міді.

У кінетичній системі рівнянь питома потужність генерації P присутня в явному виді у рівняннях, що описують накачку рівнів 2 та 3. Допоки інверсія між цими рівнями відсутня, вважатимемо, що $P = 0$. На кожному кроці чисельного інтегрування аналізується знак величини

$$N_3 - \frac{g_3}{g_2} N_2.$$

Відповідно до зазначеного, для $N_3 - \frac{g_3}{g_2} N_2 \leq 0$, вважатимемо $P = 0$.

Для проміжку часу, протягом якого виконується умова $N_3 - \frac{g_3}{g_2} N_2 > 0$, цю різницю зводимо до нуля штучно відповідним доданком, який додаємо (віднімаємо) до 3 (від 2)

$$P dt = \frac{1}{2} \left(N_3 - \frac{g_3}{g_2} N_2 \right),$$

вирівнюючи тим самим із точністю до статваг населеності 2-го і 3-го станів. У такий спосіб вдається оцінити потужність генерації, не особливо вникаючи в сам процес розвитку генерації, формування

мод і т.п. У той же час він забезпечує задовільну точність.

3. Результати розрахунків та обговорення

На рис. 3 наведено зображення результатів обрахунку кінетики заселеності рівнів Ca^+ -лазера, отриманих для $T_e = 3$ eV та початкових умов, що є у підпису до рис. Із рис. 3 зрозуміло, що включення імпульсу накачки призводить до швидкого спустошення населеності основного рівня атома кальцію шляхом його іонізації. При цьому інтенсивно росте населеність основного іонного стану кальцію та концентрації електронів. Переважно за рахунок електронного збудження іонів кальцію із основного стану в резонансний здійснюється накачка лазера. Після значного спустошення населеності основного іонного стану, генерація обривається. Населеність основного іонного стану в значній мірі корелює в часі із імпульсом генерації (миттєвою потужністю).

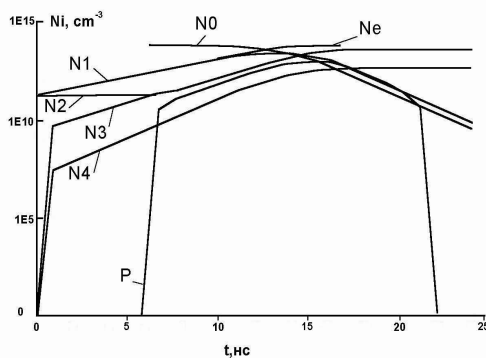


Рис. 3. Часовий хід заселеності рівнів Ca^+ -лазера при $T_e = 3$ eV.

Привертає увагу і наступне. Інтегральний параметр – енергія імпульсу генерації, отримана чисельним інтегруванням кривої $P(t)$, становить для прикладу, що наведений на рис. 3 ~ 110 мкДж/см³. Це є надзвичайно приваблива величина, яка незначно поступається енергозйому, отриманому на основі детальних розрахунків лазера на парі міді. Звичайно, тут слід розуміти, що ця оцінка є граничною, реалізації якої слід прагнути, проте яка навряд чи може бути досягнута на сучасному етапі. Серед причин – неможливість

утримання в експерименті сталою величиною температуру електронів, та неврахування в кінетичній моделі процесу електронного збудження метастабільного стану, оскільки не існує ні теоретичних, ані експериментальних результатів щодо його ефективності.

На рис. 4 наведено обраховану залежність величини питомого енергозйому від температури електронів. Видно, що в широких межах значень T_e ця величина є достатньо консервативною і нечутливою до зміни параметра T_e . В той же час тривалість імпульсу генерації (рис.5) є достатньо чутливою до параметра T_e зменшуючись із його збільшенням. При цьому й початок імпульсу настає через короткий проміжок часу від початку накачування.

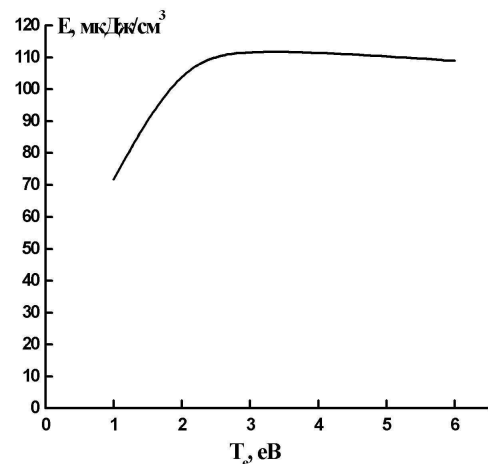


Рис. 4. Залежність питомого енергозйому від температури електронів. $N_0(0) = 1 \cdot 10^{15}$ см⁻³; $N_1(0) = 1 \cdot 10^{12}$ см⁻³; $N_2(0) = 1 \cdot 10^{12}$ см⁻³; $N_3(0) = 0$ см⁻³; $N_4(0) = 0$ см⁻³; $N_e(0) = 1 \cdot 10^{12}$ см⁻³.

Оскільки питома потужність генерації при цьому також зростає, як наслідок маємо практично плоску криву.

Окрім кінетики збудження генерації у Ca^+ -лазері та ряду важливих інтегральних параметрів генерації, що можуть бути досліджені із використанням побудованого програмного продукту, певний інтерес становить питання про провідний механізм накачування верхнього лазерного

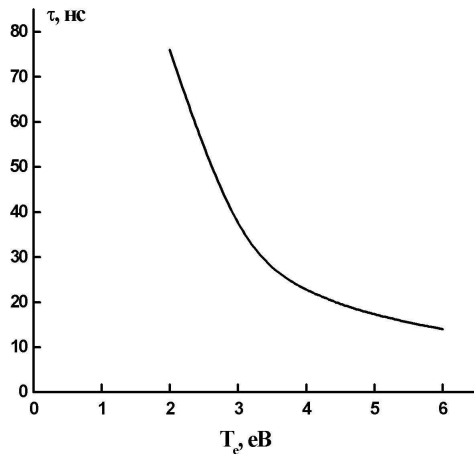


Рис.5. Залежність тривалості імпульсу генерації від температури електронів.

$$N_0(0) = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}; N_1(0) = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3};$$

$$N_2(0) = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}; N_3(0) = 0 \text{ см}^{-3}; N_4(0) = 0 \text{ см}^{-3}$$

$$N_e(0) = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}.$$

рівня. Відповідь на це питання безпосередньо може бути отримана шляхом порівняння потоків заселення верхнього стану за рахунок збудження із основного атомарного стану $N_e N_0 \langle \sigma_{03} v \rangle$ та за рахунок збудження із основного іонного стану $N_e N_1 \langle \sigma_{13} v \rangle$. Така оцінка легко може бути виконана із використанням отриманих даних по кінетиці збудження. Зокрема, опираючись на рис. 3, можна заключити наступне. На початковій стадії імпульсу генерації (16-та наносекунда від початку процесу накачування) вклад першого із зазначених процесів сягає до 10 % від сумарного потоку заселення. В момент максимуму імпульсу генерації (30-та наносекунда від початку процесу накачування) – ~ 1 %. Під кінець же імпульсу генерації (42-га наносекунда від початку процесу

Література

1. W.T.Walter, N.Solimene, M.Piltch, G.Gould, IEEE J. Quantum Electronics, 2, 479 (1966).
2. T.W.Karras, Proc. Intern. Conf on Lasers'81, St. S Press. USA, 876 (1981).
3. Г.С.Евтушенко, В.М.Климкин, Оптика атмосфери и океана, 12,884 (1999).
4. P.Cahuzac, J.Brochard, J.Phys., 30, 81 (1969).

накачування) цей внесок не перевершує 0,5 %.

Таким чином слід вважати, що збудження генерації в лазері на СОП іонізованого кальцію реалізується практично виключно через накопичення на початковій стадії імпульсу однократних іонів в основному стані та їх подальше збудження електронними співударіннями в іонний резонансний стан.

Є підстави вважати, що цей висновок є загальним для більшості іонних лазерів на СОП.

Висновки

1. Створено кінетичну модель збудження генерації в лазері на самообмежених переходах іонізованого кальцію, яка враховує чотири процеси збуджень у парних зіткненнях електронів з атомами й іонами кальцію та спонтанне й когерентне випромінювання по робочому переходу.
2. На основі даних літературного пошуку створено базу даних енергетичної залежності ефективних перерізів вказаних процесів та базу даних щодо температурної залежності констант швидкостей цих процесів.
3. Створено програмний продукт для розв'язання системи кінетичних рівнянь, представлення розв'язків в наглядному графічному виді та обчислення енергії імпульсу.
4. Отримані результати засвідчують, що провідним механізмом збудження генерації є електронне збудження попередньо накопичених іонів кальцію в основному стані. Отримана оцінка граничної величини питомого енергозйому 110 мкДж/см^3 стимулюватиме постановку експериментальних досліджень Ca^+ -лазера.

5. В.В.Жуков, Е.Л.Латуш, В.С. Михалевский, М.Ф Сэм, Квантовая электроника, 4, 1249 (1977).
6. 7. Н.Тawara, Т.Kato, М.Оhnishi, IPPJ-AM-37, Institute of Plasma Physics, Nagoya University, 150 (1985).
8. И.И.Гарга, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук, Ужгород (1974).

9. В.А.Кельман, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук, Ужгород (1977).
10. <http://home.comset.net/wesik>
11. <http://www.originlab.com>
12. С.Е.Вебб, Inst. Phys. Conf., 29, 28 (1976).
13. А.А.Радциг, Б.М.Смирнов, Параметры атомов и атомных ионов, (Справочник. Энергоатомиздат, Москва, 1986) 340 С.
14. Е.Т. Gerry, Appl.Phys.Lett., 7, 6 (1965).
15. D.A. Leonard, IEEE J. Quantum Electronics, 3, 380 (1967)

NUMERICAL MODELING OF THE $r \rightarrow m$ TRANSITION LASER ON IONIZED CALCIUM

V.A. Kelman, S.O. Zozulya¹, Yu.O. Shpenik, E.A. Svitlichnij

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

¹Uzhhorod State Institute of Informatics, Economics and Law, Zanykovetska St. 89,
Uzhhorod, 88000

Calculation of the boundary parameters of the laser on calcium ion selfterminating transitions was made for the first time and the kinetic model of the laser oscillation excitation was build up. The main process of the laser oscillation excitation is the electron impact excitation of the previously cumulated calcium ions in the ground state. The estimated boundary value for the specific energy is $110 \mu\text{J}/\text{cm}^3$ can stimulate further experimental investigations of the calcium ion vapor laser.