

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
"УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ"

Світличний Євген Анатолійович

УДК 533.9 533.93 537

ЛАЗЕРИ НА САМООБМЕЖЕНИХ ПЕРЕХОДАХ АТОМІВ ІМІДІ ТА
КАЛЬЦІЮ З МОДИФІКОВАНОЮ КІНЕТИКОЮ

спеціальність 01.04.04 – фізична електроніка

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Ужгород – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у відділі квантової та плазмової електроніки Інституту електронної фізики НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Кельман Володимир Андрійович
Інститут електронної фізики
Національної академії наук України,
с.н.с. відділу квантової електроніки.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Опачко Іван Іванович завідувач кафедри
електронних систем інженерно-технічного
факультету
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,
МОН України (м. Ужгород).

кандидат фізико-математичних наук, доцент
кафедри машинобудування, природничих дисциплін
та інформаційних технологій
Хом'як Богдан Ярославович
«Мукачівський державний університет»
(м. Мукачево)

Захист відбудеться «17» травня 2019 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 61.051.01 при ДВНЗ “Ужгородський національний університет” за адресою: 88000, м.Ужгород, вул. Волошина, 54, ауд. 181.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ДВНЗ “Ужгородський національний університет” (м.Ужгород, вул. Університетська, 14).

Автореферат розіслано «3» квітня 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 61.051.01
доктор фіз.-мат. наук, професор

Грабар О.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Поєднання в лазерах на самообмежених переходах (СОП) цілої низки унікальних властивостей, таких як широкий діапазон частот слідування імпульсів, висока імпульсна і середня потужності генерації, великі практичний коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт підсилення активного середовища, забезпечило їм широку сферу науково – практичних застосувань, яка постійно зростає. Серед лазерів на самообмежених переходах лазер на парах міді залишається кращим. Це зумовлено переважно тим, що атом міді має практично ідеальну структуру нижніх енергетичних рівнів та сприятливі часи їх життя з точки зору критеріїв Гоулда. Лазер генерує водночас на зеленій 510,6 нм та жовтій 578,2 нм лініях ($3d^{10} 4p \ ^2P_{3/2} \rightarrow 3d^9 4s^2 \ ^2D_{5/2}$ та $3d^{10} 4p \ ^2P_{1/2} \rightarrow 3d^9 4s^2 \ ^2D_{3/2}$ переходи, відповідно). Лазер на парах міді має унікальну сукупність вихідних параметрів: довжини хвиль випромінювання $\lambda = 510,6$ і $578,2$ нм; велике підсилення активного середовища (101 –102 Дб / м); коротка тривалість імпульсів (10–50 нс); висока частота повторення імпульсів (5–30 кГц); високе значення середньої потужності (1–100 Вт) при ККД 0,5–2%; відносно низька енергія в імпульсі (0,1–10 мДж); дифракційна якість пучка випромінювання; висока щільність пікової потужності (10^6 – 10^9 Вт / см²) в плямі фокусування (5–20 мкм). Вищеприведені характеристики ЛПМ залишаються неперевершеними й по теперішній час. Поєднання значних середньої та імпульсної потужностей генерації, високої частоти повторення імпульсів разом з прийнятним ККД забезпечило вже в наш час широку сферу науково – практичних застосувань для ЛПМ таких як, навігація, накачка лазерів на барвниках, центрах забарвлення, а також параметричних генераторів, генерація гармонік, голографія, вимушене комбінаційне розсіяння світла та діагностика плазми, зондування атмосфери та морських глибин, медицина, біологія, високошвидкісна фотографія. На сьогоднішній день, не дивлячись на значний прогрес в розвитку інших типів лазерів, зокрема напівпровідникових, лазери на СОП все ще знаходять широке застосування в різноманітних науково-практичних сферах. Тому покращення вихідних характеристик цих лазерів є безумовно актуальним, що власне, і зумовлює **актуальність** дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконувалася у відділі квантової та плазмової електроніки Інституту електронної фізики Національної академії наук України. Вона лежить в руслі основних наукових напрямків діяльності інституту і виконувалась в рамках наступних тем згідно з розпорядженнями Бюро відділення фізики і астрономії НАН України:

1. “Кінетика фізичних процесів у лазері на парі міді з домішками та в парі вісмуту при нелінійній взаємодії з лазерним випромінюванням”. Термін виконання 01. 2006 – 12. 2008 рр. № Держреєстрації 0106U000308.
2. “Фізичні процеси та явища в атомних та молекулярних системах, 1. “Розробка нових підходів до проблематик лазерів на самообмежених переходах та нелінійної фотоіонізації атомів”. Термін виконання 01. 2000 – 12. 2002 рр. № Держреєстрації 0100U000879.
3. “Прецизійна лазерна спектроскопія рідкісноземельних атомів, розробка і дослідження ексимерних ламп на основі нетоксичних сполук”. Термін виконання 01. 2003 – 12. 2005 рр. № Держреєстрації 0103U000888.
- ініційовані електронними, фотонними пучками і газовим розрядом”. Термін виконання 01. 2002 – 12. 2006 рр. № Держреєстрації 0102U006127.
4. “Елементарні процеси при взаємодії електронів і фотонів з речовиною в газовій та твердій фазах”. Термін виконання 01. 2007 – 12. 2011 рр. № Держреєстрації 0107U000652.
5. “Ексилампи на парогазових сумішах, резонансні ефекти при взаємодії лазерного випромінювання з атомами з валентною оболонкою s^2 ”. Термін виконання 01. 2009 – 12. 2013 рр. № Держреєстрації 0109U001500.
6. “Фізичні процеси та явища при взаємодії електронів і фотонів з речовиною в газовому та конденсованому станах”. Термін виконання 01. 2012 – 12. 2016 рр. № Держреєстрації 0112U002079.
7. “Механізми взаємодії електронів і фотонів низьких та середніх енергій з речовиною в газоподібному і конденсованому станах”. Термін виконання 01. 2017 – 12. 2021 рр. № Держреєстрації 0117U000651. 0109U001500.

Дисертант є співвиконавцем вказаних тем.

Мета і завдання дисертації.

Мета дисертаційної роботи полягала у всебічному вивченні на рівні фізичного експерименту та обґрунтуванні на рівні діагностики плазми та елементів чисельного моделювання механізму впливу домішок металів на генераційні властивості ЛПМ; моделюванні одночасної генерації в лазері на атомарному та іонному СОП.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні **наукові завдання:**

1. Вдосконалено експериментальну апаратуру та методику досліджень генераційних характеристик.
2. Досліджено ефект впливу на генераційні властивості ЛПМ домішки цинку, виконано діагностичні дослідження плазми такого ЛПМ, змодельовано цей вплив на числовій моделі, зроблено висновки щодо механізму впливу.
3. Запропоновано єдиний механізм впливу домішок на генераційні характеристики ЛПМ.
4. Створено модель лазера з одночасною генерацією на атомарному та іонному самообмежених переходах.

Об'єктом дослідження є: нерезонансний тепловий вплив домішок на режим роботи лазерів на самообмежених переходах, кінетика населеності робочих рівнів при одночасній генерації в лазерах на іонних та атомарних СОП.

Предметом дослідження є: вихідні характеристики ЛПМ та ЛПМ із домішкою цинку; механізм впливу домішки металів на генераційні характеристики лазерів на СОП; емісійні характеристики розробленої моделі лазера на парі міді та механізм накачування; модель одночасної генерації на атомарних та іонних СОП

Методи дослідження. Спектроскопічні методи із часовим розділенням, осцилографічна реєстрація, чисельне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів визначається тим, що більшість із результатів роботи отримана вперше.

1. Вперше експериментально досліджено вплив домішки цинку на вихідні параметри лазера на парі міді. Проведено детальні дослідження позитивного впливу домішки на емісійні, спектральні, часові та енергетичні характеристики.
2. Визначено оптимальний інтервал температур нагріву контейнеру з цинком, що призводить до зменшення енерговкладу у розряд на 21,5% та до збільшення енергії імпульсу генерації і коефіцієнту корисної дії.
3. Експериментально та теоретично доведено відсутність резонансно-оптичного механізму впливу домішки цинку на вихідні параметри лазера на парі міді.
4. Запропоновано й обґрунтовано єдиний механізм впливу домішок на теплофізичні параметри лазера на парі міді внаслідок пружних зіткнень електронів із атомами. Це призводить до підвищення температури розрядної трубки, а отже й концентрації атомів міді.
5. Виконано чисельне моделювання одночасної генерації з атомарних й іонних рівнів лазерних самообмежених переходів. Отримані чисельні та аналітичні розв'язки кінетики такої генерації.
6. Отримані розв'язки кінетики одночасної генерації апробовано на лазерних переходах атома та іона кальцію. Розв'язки відображають загальні особливості поведінки населеностей резонансних рівнів та потужності генерації в атомі та іоні в залежності від концентрації збуджуючих електронів.

Достовірність отриманих результатів підтверджується:

застосуванням сучасних експериментальних методів діагностики активних середовищ ЛПМ;

використанням каліброваної апаратури для визначення спектральних, часових і енергетичних характеристик спонтанного випромінювання і генерації.

Практичне значення одержаних результатів.

Результати дисертаційної роботи мають передусім фундаментальний характер і є важливими для більш глибокого розуміння фізики плазмових процесів в розрядних джерелах когерентного й спонтанного випромінювання на основі парів металів та їх хімічних сполук.

Отримані дані безпосередньо можуть бути використані для вдосконалення лазерів на СОП.

Особистий внесок здобувача.

Автор брав безпосередню участь в постановці наукових задач, підготовці і проведенні всіх експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків, обробці та інтерпретації отриманих результатів покладених в основу дисертації. Дисертанту належить визначальний внесок в підготовці та написанні наукових робіт опублікованих за темою дисертації.

Для експериментального вивчення впливу домішки атомів Zn на характеристики генерації ЛПМ на суміші Cu-Zn-Ne здобувачем виготовлено двосекційну газорозрядну трубку (ГРТ). Відпрацьовано техніку і методику проведення експериментальних досліджень із вивчення емісійних характеристик розряду лазера на парах міді з домішкою цинку та проаналізовано фактори, що впливають на достовірність результатів.

Здобувачем разом із колегами відділу квантової та плазмової електроніки проведено чисельне моделювання для розрахунку поглинання з метою пояснення покращення вихідних характеристик ЛПМ. Отримані повний спектральний контур випромінювання резонансної лінії цинку та спектральна залежність перерізу поглинання міді яскраво показують що поглинання не є механізмом впливу, адже обидва контури навіть не перетинаються.

Дисертант самостійно провів експериментальні дослідження, в ході яких, отримав дані залежностей пікової потужності генерації від концентрації домішкових атомів цинку та температури газорозрядної трубки. На основі узагальнення результатів дії різного типу домішок металів висунуто й обґрунтовано гіпотезу про єдиний механізм впливу таких домішок, що полягає в корекції теплофізичних параметрів лазера.

Автором, за його активною та безпосередньою участю, у співробітництві з працівниками відділу електронних процесів і елементарних взаємодій Інституту електронної фізики НАН України отримано теоретичні наукові результати, проведено їх аналіз, обговорення та інтерпретацію.

Здобувач приймав участь у чисельному моделюванні процесу накачування атомарних й іонних рівнів на лазерних самообмежених переходах та отримав аналітичні розв'язки кінетики одночасного накачування лазерних СОП в спектрі атома та іона Ca.

Автором самостійно написана наукова стаття [2]; йому належить основний внесок у написанні статей [6, 37]; підготовлено спільно із Є.Ю. Реметою та В.А. Кельманом [17]; з Ю.О. Шпеником, Ю.В. Жменяком, В.А. Кельманом – статті [16, 27].

В усіх друкованих матеріалах наукових конференцій, шкіл та симпозіумів здобувач брав безпосередню участь. Обробка та аналіз отриманих експериментальних результатів також були зроблені особисто автором. Здобувач брав участь в обговоренні результатів, формулюванні висновків, написанні тез та представляв отримані результати науковій спільноті отримавши позитивні відгуки.

Апробація результатів дисертації.

Результати дисертації представлялися та обговорювалися на:

- Міжнародній конференції молодих учених та аспірантів “ІЕФ 2003” (Ужгород, Україна, 2003);
- Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика 2004» (Львів, Україна, 2004);
- microCAD 2004 International Scientific Conference. University of (Miskolc, Hungary 2004);
- Міжнародному симпозіумі “Лазеры на парах металлов”. (Ростов-на-Дону. Россия 2004.);
- 15 International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Laser Conference. (Prague, Czech Republic 2004);
- Міжнародній конференції молодих учених та аспірантів “ІЕФ 2005” (Ужгород, Україна, 2005);
- Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика 2005» (Львів, Україна, 2005);
- 2nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers. (Yalta, Crimea South Coast, Ukraine, 2005);
- Міжнародній конференції молодих учених та аспірантів “ІЕФ 2007” (Ужгород, Україна, 2007);
- Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика 2007» (Львів, Україна, 2007);
- 4th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems. (Romania 2008.);
- Симпозіум “Лазеры на парах металлов” (Ростов-на-Дону. Россия 2008.);
- Міжнародній конференції молодих учених та аспірантів “ІЕФ 2009” (Ужгород, Україна, 2009);
- Міжнародній конференції Atomic and Molecular Pulsed Lasers. (Tomsk. Russia. 2009.) ; Міжнародній конференції студентів і молодих науковців (ОРАМ 2009– Kharkiv Україна 2009);
- Міжнародному симпозіумі «Лазеры на парах металлов» (ЛПМ – 2010 Ростов-на-Дону. Россия 2010) ;

- 5th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers., (Sevastopol, Crimea, Ukraine. 2010) ;
- Молодіжній школі-конференції з міжнародною участю «Лазеры и лазерные технологии», посвященная 50-летию создания первого лазера в мире. (Томск. Россия 2010.) ;
- Міжнародній конференції молодих учених та аспірантів “ІЕФ 2011” (Ужгород, Україна, 2011) ;
- Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика 2011» (Львів, Україна, 2011);
- Міжнародній конференції «Новітні напрями в атомній фізиці та спектроскопії.».(Ужгород. Україна 2012) ;
- Міжнародній конференції молодих учених та аспірантів “ІЕФ 2013” (Ужгород, Україна, 2013) ;
- Міжнародній конференції молодих учених та аспірантів “ІЕФ 2015” (Ужгород, Україна, 2015) ;
- Міжнародній конференції молодих учених та аспірантів “ІЕФ 2017” (Ужгород, Україна, 2017) ;
- Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика 2018» (Львів, Україна, 2018).

Публікації. Здобувач є співавтором 6 наукових праць за темою дисертаційної роботи. Основні результати викладено в 31 матеріалах і тезах конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація містить вступ, чотири розділи, загальні висновки та список використаних джерел. Матеріали дисертації викладені на 130 сторінках, вони містять 50 рисунків та 12 таблиць. Список використаних джерел містить 163 посилання.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено об’єкт, предмет і методи дослідження, зазначено мету і завдання роботи, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, а також особистий внесок здобувача. Також представлено структуру і обсяг дисертації.

В **першому розділі** дисертації приводиться перелік відомих автору типів домішок та механізми їх впливу на кінетику процесів в лазері на парі міді.

Ретельно описано покращення генераційних характеристик ЛПМ за рахунок використання в їх активному середовищі домішок парів металів або спеціальними конструкційними змінами активного елемента лазера.

Показано що завдяки своїм спектральним та енергетичним характеристикам ЛПМ є одними з універсальних джерел видимого

випромінювання, придатних для широкого кола прикладних задач. Наявність значної кількості наукових праць, в яких щороку повідомляється про нові можливості і сфери застосувань, підтверджує високий науково-технічний інтерес до цього типу лазерів.

Описано відомі лазери на парах металів з модифікованою кинетикою, які в останній час приходять на заміну звичайним лазерам на парах металів і мають набагато кращі лазерні та експлуатаційні параметри.

Проведено пошук літературних джерел в яких описано вплив різних металевих домішок на вихідні характеристики ЛПМ та їх імовірні механізми впливу.

В **другому розділі** дисертаційної роботи описано апаратуру і методику експериментальних досліджень впливу домішки цинку на вихідні характеристики лазера на парі міді

Приведено будову експериментальної установки, схеми контролю часових та спектральних параметрів, схему збудження розряду, а також схему системи вакуумної відкачки та газонапуску.

Показано детальну схему двосекційної газорозрядної трубки для дослідження впливу домішки цинку на вихідні характеристики лазера на парі міді.

В лабораторних умовах апробовано роботоздатність зібраного експериментального макету та отримано одночасну лазерну генерацію на двох довжинах хвиль у поздовжньому імпульсно-періодичному розряді в лазері на парі міді.

Відпрацьовано техніку і методику контролю концентрації атомів робочої суміші лазера на парі міді з домішкою цинку, проведення експериментальних досліджень із вивчення емісійних характеристик розряду лазера на парах міді з домішкою цинку та проаналізовано фактори, що впливають на достовірність результатів.

Приведено оцінки похибок вимірювань енергетичних і часових характеристик випромінювання плазми.

В **третьому розділі** досліджується перший напрямок покращення характеристик лазерів на СОП за рахунок введення домішкових атомів металів, зокрема цинку(домішки оптично-резонансного впливу). Основні результати даного розділу було опубліковано в наших працях [11, 13, 14, 16,18,19, 21-37].

В нашій роботі резонансний механізм впливу був апробований для ЛПМ на чистій парі міді. Нами було використано Cu–Zn–Ne суміш на противагу CuBr-Zn-Ne суміші. Дослідження включало як експериментальне вивчення впливу домішки, так і пряме вимірювання поглинання резонансного випромінювання атома цинку метастабільними станами атома міді. При нагріванні резервуара із цинком до температури понад 350 °С спостерігалось певне покращення усіх контрольованих параметрів лазерних імпульсів (енергія, тривалість та потужність). Воно мало місце при збільшенні температури до ~ 600 °С. Зареєстроване збільшення енергії імпульсу становило до 2 разів у порівнянні до енергії ЛПМ без домішки. При

температурі ж контейнера понад 650°C усі параметри лазерних імпульсів вгасали.

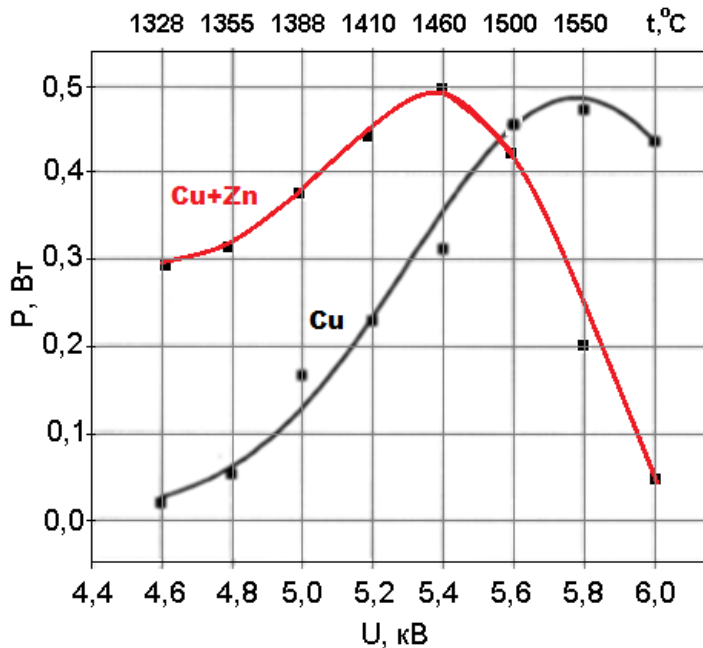


Рис. 1 Експериментальні залежності середньої вихідної потужності ЛПМ від напруги.

метастабільними атомами міді. Виміри проводилися із використанням регульованої затримки імпульсів випромінювання як протягом, так і між імпульсами накачки ЛПМ. В жодному випадку поглинання не було зареєстровано.

З метою перевірки резонансного оптичного накачування як механізму впливу домішки цинку було проведено розрахунки. Для розрахунку спектрального контуру резонансної лінії цинку було враховано надтонку

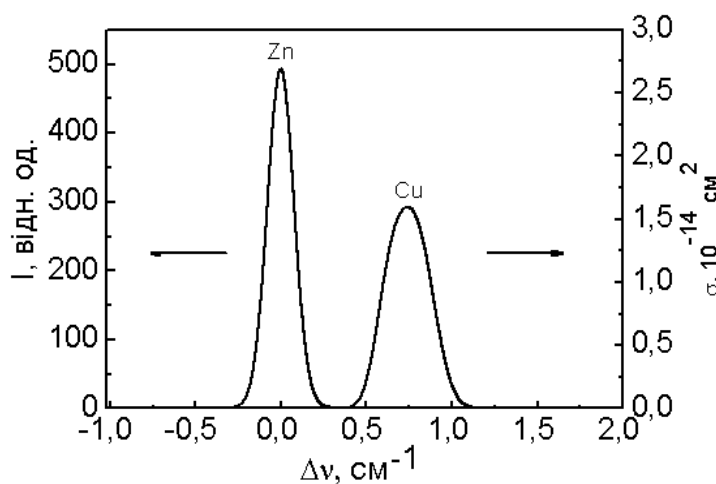


Рис. 2. Розраховані фойхтівські контури лінії випромінювання 213,9 нм атома цинку (відн. од.) та перерізу поглинання лінії 213,9 нм атома міді.

Також було встановлено, що введення домішки цинку на 21,5% зменшує енерговклад при досягненні максимального значення середньої вихідної потужності. (рис.1).

Для перевірки гіпотези дієвості резонансного оптичного накачування як ймовірного механізму позитивного впливу домішки цинку, нами було здійснено експеримент для прямого вимірювання величини поглинання резонансної лінії 213,9 нм Zn I від незалежного імпульсного розряду в парі цинку, у ГРТ ЛПМ

структуру (нтс) цієї лінії, зокрема спектральне зміщення компонент нтс., також враховано ізотопічний зсув.

Виконаний розрахунок (рис 2.) яскраво показує що поглинання не є механізмом впливу, адже обидва контури навіть не перетинаються. Нами був запропонований механізм пружної передачі енергії в електрон-атомних зіткненнях усім компонентам суміші у лазері це збільшує температуру газу а то в свою чергу призводить до збільшення температури

трубки а отже і концентрації атомів міді а отже і потужності генерації. Для оцінки кількості переданої енергії в пружньому зіткненні з електронами нами було використано рівняння теплового

$$\text{балансу } \Delta Q_{el} = \frac{2m_e}{M} N_e N < \sigma_m v > \frac{3}{2} (T_e - T_g), \text{ в якому } < \sigma_m v > \text{ константа}$$

швидкості процесу передачі енергії, отримана усередненням за максвелівським розподілом перерізу обміну кутовим моментом. Отримані результати засвідчують, що при концентраціях атомів міді $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, домішок цезію $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$, срібла та цинку $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, ефективність передачі енергії електронів атомам металів (кількість переданої теплової енергії) є сумірною із передачею енергії атомам буферного газу неону при концентрації $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Опираючись на результати виконаних оцінок, можна заключити, що введення більшості металевих домішок призводить до збільшення теплопередачі від електронів до паро-газової суміші. У свою чергу, уся тепла енергія, зосереджена у буферному газі та атомах міді та домішках у вигляді енергії руху, завдяки теплопровідності у кінцевому випадку передається внутрішній стінці розрядної трубки. Через що її температура зростатиме. Отже, при введенні в активне середовище домішкових атомів металів можна розраховувати на збільшення температури розрядної трубки. На нашу думку, тут можна спрогнозувати ситуації двох типів. Коли лазер на парі міді працює в оптимальному режимі, введення додаткових домішкових атомів може спричинити тільки погіршення умов збудження генерації. Адже при цьому неодмінно спостерігатиметься зниження температури електронів протягом імпульсу струму, а отже й ефективності накачування. Нарешті, коли температура електронів стане меншою порогового рівня, генерація припиниться. Слід зазначити, що у всіх відомих випадках збільшення концентрації домішок понад оптимальне значення завжди призводило до повного зриву генерації. В той же час, за умов, коли температура розрядної трубки дещо менша оптимальної введення атомів домішок спочатку дає позитивний ефект, оскільки призведе до підвищення температури стінки ГРТ. Таке підвищення обмежене досягненням температури понад оптимальну величину, а отже і супроводжується затуханням генерації.

В четвертому розділі досліджується другий напрямок покращення характеристик лазерів на СОП за рахунок реалізації одночасної генерації на атомарних та іонних переходах. Для моделювання були застосовані 3-х рівневі схеми для населеностей робочих рівнів N_k для атома - відкрита схема (враховано іонізацію та збудження рівнів атома) та для іона N_k^i - закрита схема, $k = m, r$. Концентрація електронів N_e задовольняє рівнянню кінетики, що описує іонізацію з рівнів атома:

$$\frac{dN_e}{dt} = N_0 Q_{0i} N_e + N_m Q_{mi} N_e + N_r Q_{ri} N_e.$$

Рівняння для населеностей задовільняють 2 умовам:

умові збереження повного числа частинок робочої речовини у всіх станах – $N = N_0 + N_m + N_r + N_e$,

умові електронейтральності плазми – рівність концентрацій електронів і позитивних іонів – $N_e = N_0^i + N_m^i + N_r^i$.

Це дозволило записати наступні кінетичні рівняння для приведених величин $x_k \equiv N_k / N$, $x_k^i \equiv N_k^i / N$, $x_e \equiv N_e / N$

для робочих рівнів в атомі

$$\frac{dx_m}{dt} = (1 - x_e)NQ_{0m}x_e + x_r[N(Q_{rm} - Q_{0m})x_e + A_{rm}] - x_mN(Q_m + Q_{0m})x_e + p(t),$$

$$\frac{dx_r}{dt} = (1 - x_e)NQ_{0r}x_e + x_mN(Q_{mr} - Q_{0r})x_e - x_r[N(Q_r + Q_{0r})x_e + A_r] - p(t),$$

для робочих рівнів в іоні

$$\frac{dx_m^i}{dt} = x_e^2NQ_{0m}^i + x_r^i[N(Q_{rm}^i - Q_{0m}^i)x_e + A_{rm}^i] - x_m^iN(Q_m^i + Q_{0m}^i)x_e + p^i(t),$$

$$\frac{dx_r^i}{dt} = x_e^2NQ_{0r}^i + x_m^iN(Q_{mr}^i - Q_{0r}^i)x_e - x_r^i[N(Q_r^i + Q_{0r}^i)x_e + A_r^i] - p^i(t),$$

та для приведеної концентрації електронів

$$\frac{dx_e}{dt} = (1 - x_e)NQ_{0i}x_e + x_mN(Q_{mi} - Q_{0i})x_e + x_rN(Q_{ri} - Q_{0i})x_e.$$

У цих рівняннях величини $p(t)$ та $p^i(t)$ це приведені (до числа N часток робочої речовини) миттєві потужності вимушених радіаційних переходів в атомі та іоні. Використані величини Q_{ks} для атома (Q_{ks}^i для іона) – це константи швидкостей реакцій електронного збудження (дезбудження) з рівня k на рівень s ; Q_{ki} – константи швидкостей іонізації з атомного рівня $k=0, m, r$ в основний стан іона, A_{sk} (A_{sk}^i) – ймовірності спонтанного радіаційного розпаду рівня s на рівень k атома (іона). Величини Q_s (Q_s^i), A_s (A_s^i) це сумарні константи швидкостей електронного збудження та дезбудження з рівня s та сумарні ймовірності спонтанного розпаду рівня s на нижчележачі рівні атома (іона). Наведені рівняння пов'язані між собою тільки концентрацією електронів $x_e(t)$.

Рівняння для приведених населеностей розв'язується у наближенні насиченої потужності – $x_m = \varepsilon \cdot x_r$, $x_m^i = \varepsilon^i \cdot x_r^i$, $\varepsilon = g_m / g_r$, $\varepsilon^i = g_m^i / g_r^i$. Тут g_k , g_k^i – статистичні ваги атомних та іонних робочих рівнів. В цьому наближенні у випадку для атома та іона отримуємо по одному диференціальному рівнянню для приведеної населеності верхнього рівня та по одному алгебраїчному рівнянню для приведеної потужності:

$$\begin{aligned} \frac{dx_r}{dt}(1 + \varepsilon) = (1 - x_e)x_eN(Q_{0r} + Q_{0m}) - x_r\{N[Q_{r0} + Q_{ri} + \sum_{k_2} Q_{rk_2} + \\ + (1 + \varepsilon)(Q_{0m} + Q_{0r}) + \varepsilon(Q_{m0} + Q_{mi} + \sum_{k_1} Q_{mk_1})]x_e + A_{r0}\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p(1 + \varepsilon) = (1 - x_e)x_eN(\varepsilon Q_{0r} - Q_{0m}) - x_r\{N[\varepsilon Q_r + Q_{rm} + (1 + \varepsilon)(\varepsilon Q_{0r} - Q_{0m}) - \\ - \varepsilon(Q_m + \varepsilon Q_{mr})]x_e + A_{rm} + \varepsilon A_r\}, \end{aligned}$$

$$\frac{dx_r^i}{dt}(1 + \varepsilon^i) = x_e^2 N(Q_{0r}^i + Q_{0m}^i) - x_r^i \{ N[Q_{r0}^i + (1 + \varepsilon^i)(Q_{0r}^i + Q_{0m}^i) + \varepsilon^i Q_{m0}^i] x_e + A_{r0}^i \},$$

$$p^i(1 + \varepsilon^i) = x_e^2 N(\varepsilon^i Q_{0r}^i - Q_{0m}^i) - x_r^i \{ N[\varepsilon^i Q_r^i + Q_{rm}^i + (1 + \varepsilon^i)(\varepsilon^i Q_{0r}^i - Q_{0m}^i) - \varepsilon^i (Q_m^i + \varepsilon^i Q_{mr}^i)] x_e + A_{rm}^i + \varepsilon^i A_r^i \}.$$

Розв'язки для населеностей $x_r(x_e)$ та $x_{ri}(x_e)$ отримані для загального випадку при відсутності полонення в атомі $A_{r0} \neq 0$ та в іоні $A_{ro} \neq 0$. У випадку повного полонення $A_{r0} = 0$ та $A_{ro} = 0$ розв'язки аналітичні.

Якщо у рівнянні для приведеної концентрації електронів залишити тільки перший доданок (іонізація з основного стану атома) тоді отримуємо наступний аналітичний розв'язок:

$$x_e(t) = \frac{x_{e0} \exp(At)}{1 + x_{e0} [\exp(At) - 1]}.$$

Використовуючи розв'язки для приведених населеностей резонансного рівня та для концентрації електронів отримуємо наступні поведінки приведених питомих потужностей $p(x_e)$ для атома (рис. 3) та для іона $p^i(x_e)$ (рис.4).

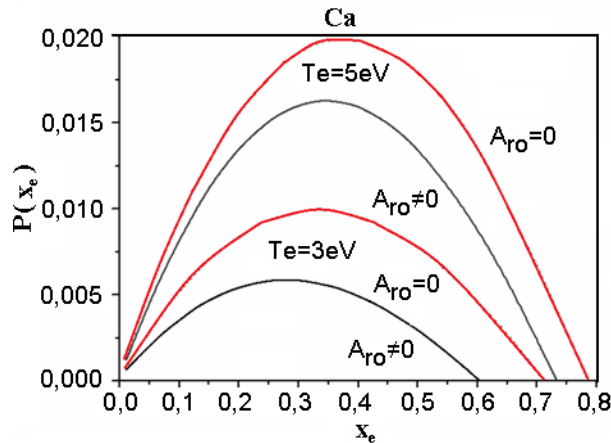


Рис. 3. Приведена насичена потужність на атомних переходах

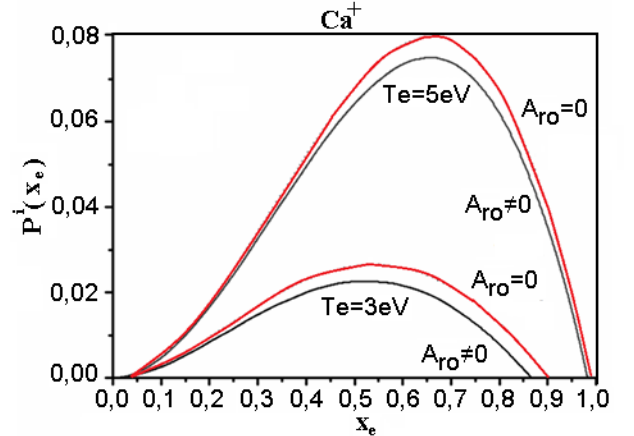


Рис. 4. Приведена насичена потужність на іонних переходах

Приведені насичені потужності $p(x_e)$ на атомних та $p^i(x_e)$ на іонних переходах були отримані для $T_e = 3$ і 5 eV, як з урахуванням спонтанних розпадів, так і нехтуючи ними (повне полонення на резонансних переходах $r \rightarrow 0$).

Основні результати даного розділу було опубліковано в наших працях [1-10,12,15,17].

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Вперше виконано детальне експериментальне дослідження емісійних, спектральних, часових та енергетичних характеристик впливу домішки цинку на генераційні властивості лазера на парі міді.

2. Показано, що введення в робочу зону лазера домішкових атомів цинку в інтервалі температур контейнера з цинком 300 – 600°C до 2 разів збільшує енергію імпульсу генерації, а також зменшує потрібну для її збудження енергію на 21.5% та збільшує коефіцієнт корисної дії.

3. Запропоновано й обґрунтовано єдиний механізм дії різних видів домішок атомів металів на основні параметри лазера на парах міді. Його сутність полягає в корекції теплофізичних параметрів в пружних зіткненнях електронів із атомами кожної з компонент робочої суміші. Ці процеси впливають на температуру розрядної трубки, а отже підвищують в ній концентрацію атомів міді.

4. Вперше виконано чисельне моделювання одночасного накачування атомарних та іонних лазерних рівнів на самообмежених переходах. В наближенні насиченої потужності отримані чисельні та аналітичні розв'язки для залежностей населеностей верхніх лазерних рівнів атома та іона від концентрації електронів. Модель одночасного накачування застосовано для випадку атома та іону кальцію.

5. Доведено, що при концентрації атомів кальцію $N = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ верхня межа питомої вихідної енергії іонного імпульсу перевищує вихідну енергію атомарного імпульсу. Так, їх величини складають 54.3 та 3.39 $\mu\text{J}/\text{cm}^3$ (при $T_e=3 \text{ eV}$) й 91.5 та 3.32 $\mu\text{J}/\text{cm}^3$ (при $T_e=5 \text{ eV}$), тобто у 16 та у 27 разів відповідно.

6. Показано, що максимальна величина – 54,3 Вт ($T_e = 3 \text{ eV}$) та 91,5 Вт ($T_e = 5 \text{ eV}$) – середньої потужності на іонних самообмежених переходах досягається при значних – $\sim 0,85\text{-}0,97 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ – концентраціях електронів розряду, частоті 10 кГц з об'єму 100 cm^3 . Реалізація цих можливих значень вимагає використання всього імпульсу розрядного збудження. При цьому найважливішою умовою є підтримка на належному рівні температури електронів, в нашому випадку це 5 eV.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Світличний Є.А. Імпульсний лазер на самообмежених переходах іонізованого кальцію // ІЕФ'2003. Конференція молодих учених та аспірантів. Програма і тези доповідей. Укладач Завілопуло А.М. – Ужгород, – 2003. – С. 78.
2. Світличний Є.А. Імпульсний лазер на самообмежених переходах іонізованого кальцію // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. 2003. Випуск 14. С. 78 – 82.
3. Світличний Є., Кельман В., Жменяк Ю., Шпенік Ю. Особливості імпульсної генерації лазера на самообмежених переходах іонізованого кальцію // Міжнародна конференція молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “ЕВРИКА - 2004”. Збірник тез. – Львів, – 2004. – С. 117.
4. Kelman V., Szoter L., Shpenik Yu., Svitlichnij E., Yu. Zhmenyak. Pulsed laser on calcium ion selfterminating transitions for lidar application // microCAD 2004 International Scientific Conference. University of Miskolc, Hungary. 18-19 March 2004. Section F: Physics and Education. P. 25 – 30.
5. Светличный Е.А., Кельман В.А., Шпенник Ю.О., Жменяк Ю.В. Лазер на СОП иона кальция // Тезисы докладов симпозиума “Лазеры на парах металлов”. Ростов-на-Дону. 2004. С. 30.
6. Кельман В.А., Зозуля С.О., Шпенник Ю.О., Світличний Є.А. Чисельне моделювання лазера на $r \rightarrow m$ переходах іонізованого кальцію // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. 2004. Випуск 15. С. 158 – 165.
7. Svitlichniy E.A., Kelman V.A., Zhmenyak Yu.V., Shpenik Yu.O. Laser action investigation on calcium ion self-terminating transitions // Book of Abstracts of 15 International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Laser Conference. Prague, (Czech Republic) 30 August – 3 September 2004., P. 138.
8. Світличний Є.А. Іонні лазери на самообмежених переходах. Тези доповідей конференції молодих учених і аспірантів ІЕФ НАН України. – Ужгород, – 2005. – С. 92.
9. Kelman V.A., Shpenik Yu.O., Svitlichniy E.A. Numerical Modeling of the Laser on ionized Calcium r - m Transitions. Міжнародна конференція молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “ЕВРИКА - 2005”. Збірник тез. – Львів, – 2005. – С. 57 – 58.
10. Svitlichniy E.A., Kelman V.A., Shpenik Yu.O. Calculation of kinetics of excitation of pulse generation in ionized calcium // Proceedings CAOL 2005: Papers of 2nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers. Yalta, Crimea South Coast, Ukraine, 2005, V. 1, P. 158-161.
11. Світличний Є.А., Жменяк Ю.В., Шпенік Ю.О. Експериментальне вивчення впливу домішки цинку на характеристики лазера на парі міді. Програма і тези доповідей конференції молодих вчених і аспірантів

- Інституту електронної фізики НАН України ІЕФ-2007. Ужгород. 2007. С. 190.
12. Світличний Є., Кельман В., Ремета Є. Особливості накачування атомарних й іонних лазерних самообмежених переходів. Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА-2007. Тези доповідей. Львів. 2007. С. С20.
 13. Kelman V.A., Svitlichnyi E.A., Zhmenyak Yu.V., Shpenik Yu.O., Plekan O.I. Influence of Zn atom additive on Cu laser characteristics. 4th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems. Romania. 2008. Book of Abstracts. P. 141.
 14. Светличный Е.А., Кельман В.А., Жменяк Ю.В., Шпеник Ю.О. К вопросу о влиянии примеси цинка на выходные характеристики лазера на парах меди. Симпозиум “Лазеры на парах металлов” Ростов-на-Дону. 2008. С. 71.
 15. Кельман В.А., Светличный Е.А., Ремета Е.Ю. Одновременная накачка в лазере на самоограниченных атомарном и ионном переходах в приближении насыщенной мощности. Симпозиум “Лазеры на парах металлов” Ростов-на-Дону. 2008. Сборник трудов. С. 52.
 16. Kelman V.A., Svitlichnyi E.A., Zhmenyak Y.V., Shpenik Y.O. Cu-vapor laser with zinc-atom additive // Appl. Phys. B. – 2009. – V.94. – P. 301 – 305.
 17. Кельман В.А., Светличный Е.А., Ремета Е.Ю. Одновременная накачка в лазере на атомарном и ионном самоограниченных переходах // Журнал технической физики. – 2009. – Т.79, №8. – С. 83 – 89.
 18. Світличний Є.А., Звенигородський В.В., Антонов О.О., Шаповалов А.Л., Жменяк Ю.В., Шпеник Ю.О. До питання про механізм впливу домішки цинку на генераційні характеристики лазера на парі міді. Програма і тези доповідей конференції молодих вчених і аспірантів Інституту електронної фізики НАН України ІЕФ-2009. Ужгород. 2009. С. 74.
 19. Світличний Є.А., Звенигородський В.В., Улусова С.П., Жменяк Ю.В., Шпеник Ю.О., Кельман В.А. Роль каскадних переходів у додатковому заселенні резонансних рівнів міді у мідному лазері. Програма і тези доповідей конференції молодих вчених і аспірантів Інституту електронної фізики НАН України ІЕФ-2009. Ужгород. 2009. С. 75.
 20. Kelman V.A., Svitlichnyi E.A., Remeta E.Yu. Kinetics simulation of laser on atomic and ionic self-terminating transitions simultaneous pumping. Atomic and Molecular Pulsed Lasers. Tomsk. Russia. 2009. Abstracts. P. 37.
 21. Svitlichnyi E.A., Shpenik Yu.O., Zhmenyak Yu.V., Kelman V.A. Investigation of the CVL-vapor laser with zinc additive. Abstracts of International Young Scientist Workshop on Optics, Photonics and Metamaterials (OPAM – 2009). Kharkiv. 2009. P. 44.
 22. Светличный Е.А., Жменяк Ю.В., Антонов А.А., Кельман В.А., Шпеник Ю.О. Универсальный механизм влияния примесей атомов металлов на выходные характеристики лазера на парах меди. Сборник

- трудов симпозиума «Лазеры на парах металлов» (ЛПМ – 2010). Ростов-на-Дону. 2010. С. 78.
23. Svitlichniy E.A., Kelman V.A., Zhmenyak Yu.V., Zvenihorodskiy V.V., Shpenik Yu.O. About the Influence of Metallic Additives on Copper Vapor Laser Output Parameters. IEEE CAOL Proceedings 2010. 5th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers. September 10-14, 2010, Sevastopol, Crimea, Ukraine. P. 262 – 264.
24. Светличный Е.А., Кельман В.А., Жменяк Ю.В., Шпеник Ю.О. К вопросу о универсальном механизме влияния примесей на выходные характеристики лазера на парах меди. Молодежная школа-конференция с международным участием «Лазеры и лазерные технологии», посвященная 50-летию создания первого лазера в мире. Труды школы-конференции. 22 – 27 ноября 2010 г. Россия, Томск. С. 170.
25. Світличний Є.А., Кельман В.А. Жменяк Ю.В., Шпеник Ю.О. Вплив домішок металів на характеристики лазера на парі міді. Програма і тези доповідей конференції молодих вчених і аспірантів Інституту електронної фізики НАН України ІЕФ-2011. Ужгород. 2011. С. 110.
26. Світличний Є.А., Кельман В.А., Жменяк Ю.В., Шпеник Ю.О. Універсальний вплив домішок металів на генераційні характеристики лазера на парі міді. Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА-2011. Тези доповідей. 18-22 травня. Львів. Україна. С.D16.
27. Світличний Є.А., Кельман В.А., Жменяк Ю.В., Шпеник Ю.О. Вплив домішок металів на характеристики лазера на парі міді Науковий вісник Ужгородського університету Серія Фізика. 2011. Вип.29. С. 254-263.
28. Светличный Е.А., Жменяк Ю.В., Антонов А.А., Кельман В.А., Шпеник Ю.О. Универсальный механизм влияния примесей атомов металлов на выходные характеристики лазера на парах меди. Сборник трудов симпозиума «Лазеры на парах металлов» (ЛПМ – 2010). Ростов-на-Дону. 2010. С. 78.
29. Светличный Е.А., Кельман В.А., Жменяк Ю.В., Шпеник Ю.О. К вопросу о универсальном механизме влияния примесей на выходные характеристики лазера на парах меди. Молодежная школа-конференция с международным участием «Лазеры и лазерные технологии», посвященная 50-летию создания первого лазера в мире. Труды школы-конференции. 22 – 27 ноября 2010 г. Россия, Томск. С. 170.
30. Світличний Є.А., Кельман В.А. Жменяк Ю.В., Шпеник Ю.О. Вплив домішок металів на характеристики лазера на парі міді. Програма і тези доповідей конференції молодих вчених і аспірантів Інституту електронної фізики НАН України ІЕФ-2011. Ужгород. 2011. С. 110.
31. Світличний Є.А., Кельман В.А., Жменяк Ю.В., Шпеник Ю.О. Універсальний вплив домішок металів на генераційні характеристики лазера на парі міді. Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА-2011. Тези доповідей. 18-22 травня. Львів. Україна. С.D16.

32. Світличний Є.А., Кельман В.А., Жменяк Ю.В., Шпеник Ю.О. Про механізми впливу домішок металів на характеристики лазера на парі міді. Новітні напрями в атомній фізиці та спектроскопії. Тези доповідей міжнародної конференції. Ужгород. 20-22 вересня 2012 року. С.45.
33. Світличний Є.А., Жменяк Ю.В., Улусова С.П. Про вплив домішки цинку на теплофізичні характеристики лазера на парі міді. Програма і тези доповідей конференції молодих вчених і аспірантів Інституту електронної фізики НАН України ІЕФ-2013. Ужгород. 2013. С. 89.
34. Є.А. Світличний, Ю.В. Жменяк, С.П. Улусова, В.А. Кельман ЕФЕКТ ТЕПЛОВОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ В ЛАЗЕРІ НА ПАРІ МІДІ ІЕФ-2015. Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів. Інститут електронної фізики НАН України, Матеріали конференції. Ужгород 2015. С.225-226.
35. Є.А. Світличний, Ю.В. Жменяк, С.П. Улусова, В.А. Кельман Модифікований лазер на парах міді з домішками металів ІЕФ-2017. Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів. Інститут електронної фізики НАН України, Матеріали конференції. Ужгород 2017. С.225-226.
36. E.A. Svitlichniy, V.A. Kelman, Yu.V. Zhmenyak About universal mechanism of the influence of metal additives on the Copper Vapor Laser Output Parameters . Optical and Quantum Electronics 2018. doi.org/10.1007/s11082-018-1589-7

АНОТАЦІЯ

Світличний Є.А. Лазери на самообмежених переходах атомів міді та кальцію з модифікованою кінетикою –Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 “Фізична електроніка”. ДВНЗ “Ужгородський національний університет” Міністерства освіти і науки України, Ужгород, 2019.

Робота присвячена покращенню вихідних характеристик лазерів на самообмежених переходах двома шляхами. Перший – дослідження впливу домішки цинку на генераційні властивості лазера на парі міді. Другий – розрахунок одночасної генерації на атомарних та іонних переходах.

Вперше апробовано резонансний механізм впливу домішки цинку для лазера на парі міді. Дослідження включало як експериментальне вивчення впливу домішки, так і пряме вимірювання поглинання резонансного випромінювання атома цинку метастабільними станами атома міді. Проведено чисельне моделювання для розрахунку поглинання з метою пояснення покращення вихідних характеристик лазера на парі міді. Як експеримент так і чисельне моделювання показали, що поглинання не є механізмом впливу.

На основі проведеного ретельного аналізу і узагальнення результатів експериментального дослідження різних механізмів дії домішок атомів металів на основні параметри лазера на парах міді, запропоновано й обґрунтовано єдиний механізм їх впливу. Його сутність полягає в корекції теплофізичних параметрів в пружних зіткненнях електронів із атомами кожної з компонент робочої суміші. Так, ці процеси впливають на температуру розрядної трубки, а отже підвищують в ній концентрацію атомів міді.

Для лазера на самообмежених переходах в спектрі атома і іона одного і того ж елемента в наближенні насиченої потужності отримані рішення кінетичних рівнянь в квадратурі, які описують одночасну накачку робочих рівнів. Рішення відображають загальні особливості поведінки заселеності резонансних рівнів атома і іона в залежності від концентрації електронів і дозволяють оцінити верхню межу енергетичних характеристик генерації. Як приклад розглянута одночасна накачування робочих рівнів атома і іона кальцію. Показано, що значення заселеності рівнів, потужності і енергії імпульсів генерації такого іонно-атомарного лазера є порівнянними. Відзначено, що для повної реалізації можливостей іонних лазерів слід забезпечити належні умови збудження рівнів протягом усього імпульсу накачування, особливо в його заключній фазі.

Ключові слова: лазер на парі міді, домішкові атоми, механізм впливу, поглинання, одночасна генерація, накачка рівнів.

АННОТАЦИЯ

Светличный Е.А. Лазеры на самоограниченных переходах атомов меди и кальция с модифицированной кинетикой. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника. - ГВУЗ "Ужгородский национальный университет", Ужгород, 2019.

Работа посвящена улучшению выходных характеристик лазеров на самоограниченных переходах двумя путями. Первый - исследование влияния примеси цинка на генерационные свойства лазера на парах меди. Второй - расчет одновременной генерации на атомарных и ионных переходах.

Впервые апробирован резонансный механизм воздействия примеси цинка на лазер на парах меди. Исследование включало как экспериментальное изучение влияния примеси, так и прямое измерение поглощения резонансного излучения атома цинка метастабильными уровнями атома меди. Проведено численное моделирование для расчета поглощения с целью объяснения улучшения выходных характеристик лазера на парах меди. Как эксперимент так и численное моделирование показали, что поглощение не является механизмом воздействия.

На основе проведенного тщательного анализа и обобщения результатов экспериментального исследования различных механизмов действия примесей атомов металлов на основные параметры лазера на парах меди, предложено и обосновано единый механизм их воздействия. Его суть заключается в коррекции теплофизических параметров в упругих столкновениях электронов с атомами каждой из компонент рабочей смеси. Эти процессы влияют на температуру разрядной трубки, а следовательно повышают в ней концентрацию атомов меди.

Для лазера на самоограниченных переходах в спектре атома и иона одного и того же элемента в приближении насыщенной мощности получены решения кинетических уравнений в квадратурах, которые описывают одновременную накачку рабочих уровней. Решения отражают общие особенности поведения заселенности резонансных уровней атома и иона в зависимости от концентрации электронов и позволяют оценить верхнюю границу энергетических характеристик генерации. В качестве примера рассмотрена одновременно накачка рабочих уровней атома и иона кальция. Показано, что значение заселенности уровней, мощности и энергии импульсов генерации такого ионно-атомарного лазера является сопоставимыми. Отмечено, что для полной реализации возможностей ионных лазеров следует обеспечить надлежащие условия возбуждения уровней на протяжении всего импульса накачки, особенно в его заключительной фазе.

Ключевые слова: лазер на парах меди, примесные атомы, механизм воздействия, поглощение, одновременная генерация, накачка уровней.

SUMMARY

Svitlichnyi E. A. Lasers on selfterminating transitions of copper and calcium atoms with modified kinetics. - Manuscript.

Thesis submitted for the Candidate of Science (PhD) Degree, specialty 01.04.04 – Physical Electronics. – Uzhhorod National University, Uzhhorod 2019.

This work is devoted to improving the output characteristics of lasers on selfterminating transitions in two ways. The first is the study of the effect of zinc additives on the lasing properties of a copper vapor laser. The second is the calculation of simultaneous generation at the atomic and ion transitions.

A two-section gas discharge tube (GDT) was developed for the experimental study of the influence of metal additives on the characteristics of the generation of copper vapour laser (CVL) on the mixture. Techniques and methods of conducting experimental studies on the emission characteristics of the laser discharge on copper vapor and zinc admixture have been worked out and factors influencing the reliability of the results have been analyzed.

For the first time, the resonant mechanism of additive influence on CVL on a pure copper pair has been tested. The study included both an experimental study of the additive impact and a direct measurement of the absorption of resonant radiation of the zinc atom by the metastable states of the copper atom. To test the hypothesis of the effectiveness of resonant optical pumping as a probable mechanism for the positive effect of zinc admixture, we carried out an additional experiment to directly measure the absorption value of the resonance line of 213.9 nm Zn I from an independent emitter based on the pulsed discharge in a zinc pair, in GDT CVL by metastable copper atoms. Measurements were made using a controlled delay of radiation pulses both during and between pump pulses of CVL. In any case, there was no recorded absorption within the sensitivity of the experimental apparatus.

It has been established that the duration, energy, and power of laser pulses increase when a zinc atom diffuses from the reservoir at a temperature of ~ 500 °C in the CVL discharge. Additional experiments and calculations give grounds to assume that not only the optical resonance pump with a 213.9 nm line of zinc, but also the collision of the second kind between zinc atoms in resonant states with copper atoms in the metastable states and which should be taken into account. In order to explain the improvement, numerous calculations were made to calculate the absorption.

The obtained results show that at concentrations of copper atoms $\sim 10^{15}$ cm⁻³, cesium additives $\sim 10^{14}$ cm⁻³, silver and zinc $\sim 10^{15}$ cm⁻³, the efficiency of electron energy transfer to metal atoms (the amount of heat transferred) is commensurate with the energy transfer to atoms Ne buffer gas at a concentration of $\sim 10^{16}$ cm⁻³. Moreover, a more precise estimate of the energy transfer from electrons to gas also requires the Coulomb collisions of electrons with ions to be taken into account. In this case, in metal-inert gas mixtures, metal atoms are predominantly ionized.

It has been established that the introduction of metall additives of all three types (Zn, Cs, Ag) leads to an increase in the heat transfer from electrons to the vapor-gas mixture. In turn, all the thermal energy concentrated in the buffer gas and atoms of copper and impurities in the form of energy of motion, due to the thermal conductivity, is ultimately transmitted to the inner wall of the discharge tube. Because of this, we will assume that temperature of the discharge tube will increase.

When the copper vapor laser operates in the optimal mode, an introduction of the additive atoms may only deteriorate the conditions of generation excitation, because in this case the electron temperature will necessarily be reduced during the current pulse. Obviously, the pumping efficiency will also decrease. Finally, when the electron temperature will become less than the threshold level, generation will stop. It should be noted that in all the cases known for us the concentration increase over the optimal value always results in a total generation failure due to the so-called thermal runaway

A universal mechanism of influence of metal additives is suggested, which can even lead to more expressive consequences than those caused by resonant coincidences of separate energy levels of the working atoms (copper) and atomic impurities.

A theoretical model for the study of simultaneous generation on the atomic and ionic self-limited transitions was created. In the approximation of the saturated power, the expressions in quadratures are obtained for the populations of the upper working levels of the atom and ion using the general equation for the concentration of electrons. The concrete application of the solutions is demonstrated on the example of a laser on a STT of an atom and a calcium ion.

The calculated values of the power and (specific output energy) of the specific power energy are, of course, the upper limit values of these quantities for the given values and. Nevertheless, they demonstrate, on the example of calcium, that there is a wide range of experimental conditions, for which the energy generation parameters on ion STTs not only do not yield to such atomic STTs, but they can, under appropriate conditions, simultaneously pump them far outstrip.

From the calculations it follows that the cross sections of the determining electronic processes of excitation and ionization are favorable for the ionic generation of STTs of calcium ions. Therefore, the main reason for its full implementation (potential capabilities) is to fulfill the condition of the longer possible support for a given value of the temperature of electrons (at least a certain critical value of \sim several electron volts).

It is shown that with the need for significant ionization of the working substance and the long maintenance of the working temperature of electrons, the practical realization of the benefits of ion generation requires more active use of pump devices with lamp switches (incomplete discharges of storage capacitance), or perhaps modulators with pulsed energy storage devices.

Keywords: copper vapor laser, atom additives, mechanism of action, absorption, simultaneous generation, levels pumping.