

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ**

УДК 537.534.1

На правах рукопису

ЧОРНИЙ ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ
КУТОВІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ РОЗПОДІЛИ
ІОНІВ, ЕМІТОВАНИХ ГАЛІЄВИМ
ТА ГАЛІЙ-ІНДІЄВИМ
РІДКОМЕТАЛЕВИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ІОНІВ

01.04.04 - фізична електроніка

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук**

Київ - 1995

ДВ 32.576

Дисертація є рукопис

Робота виконана в Інституті фізики НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук
професор МЕДВЕДЬОВ ВАЛЕНТИН КУЗЬМОВИЧ

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук
КОВАЛЕНКО ВІТАЛІЯ ПЕТРОВИЧ
кандидат фізико-математичних наук
КОЗИРЄВ ЮРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

Провідна організація: Інститут металофізики НАН України.

Захист відбудеться "22" червня 1995р. о 15 годині
на засіданні Спеціалізованої Вченої Ради Д.01.96.01 при
Інституті фізики НАН України за адресою: 252028, м.Київ,
проспект Науки, 46.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці
Інституту фізики НАН України.

Автореферат розіслано "19" травня 1995 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої ради

В.А. ІЖУК

ЛННБ України ім.В.Стефаника

фаниця



00779147 (Z)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Іонні джерела - пристрої для одержання направлених іонних потоків іще не так давно були виключно елементом приладів для наукових досліджень: мас-спектрометрів, іонних мікроскопів, прискорювачів, тощо. В цих іонних джерелах використовувалась іонізація атомів електронним ударом, поверхнева іонізація, термічна іонізація. Вимога високих технічних параметрів іонних джерел для таких приладів була бажаною, але не обов'язковою.

З розвитком мікротехнологій та нанотехнологій (головним чином для мікроелектроніки) з'явилась необхідність в джерелах іонів з невеликим розкидом по енергіях, високою яскравістю та якнайменшим перерізом іонного пучка. Такі джерела необхідні, наприклад, для іонно-променевих установок, що застосовуються в електронній промисловості для субмікронної літографії, безмаскової імплантації легуючих домішок в напівпровідникові матеріали, відновлення та лагодження масок для рентгенівської та оптичної фотолітографії, проведення аналізу елементного складу поверхневих шарів матеріалів, виправлення дефектів в електричних ланцюгах інтегральних мікросхем з метою підвищення виходу придатних мікросхем.

Найкращими джерелами іонів для цих іонно-променевих установок виявились рідкометалеві джерела іонів - РМДІ, в яких іони створюються внаслідок дії електричного поля на вістря, змочене рідким металом. РМДІ являє собою практично точкове джерело, а це винятково цінно: якщо інші іонні джерела характеризуються значною простою протяжністю і через це для фокусування іонів, що емітуються, в малу цятку застосовують складні оптичні системи, то завдяки малим розмірам РМДІ можемо обійтись багато простішою оптичною системою, навіть з урахуванням взаємного відштовхування іонів в пучку

та неминучих сферичних аберацій.

Завдяки надзвичайно високій яскравості цих джерел були одержані діаметри пучків до 50 нанометрів при щільності іонного струму до 10 A/cm^2 . Створення фокусуєчих пристроїв з розподіленням іонів за масами дозволило використовувати сплави РМДІ, що призвело до значного збільшення числа доступних іонів. Були, наприклад, одержані пучки всіх іонів, необхідних для легування кремнію та арсеніду галію. В комбінації з растровими тунельними мікроскопами РМДІ можуть стати основою нанотехнологій, які започатковуються.

Побудова практичних систем формування іонних пучків випередила достатньо глибоке розуміння фізики процесів, що лежать в основі роботи РМДІ, внаслідок чого при створенні таких систем виник ряд труднощів. Хоч на цей час є значна кількість робіт та великий обсяг експериментальних даних, механізм роботи РМДІ до цього часу ще не повністю з'ясований. Лише відомо, що він включає значну кількість ефектів: електрогідродинамічні процеси в електропровідній рідині під дією сильного електричного поля та поверхневого натягу, польове випаровування, іонне бомбардування, перезарядка, польова іонізація та ін. І всі ці процеси відбуваються в надзвичайно малому (розмірами в десятки нанометрів) об'ємі, в якому електричні поля досягають величин, близьких до внутрішньоатомних, а щільність іонів, що емітуються, близька до щільності атомів в суцільному металі. Спектр іонів, що емітуються РМДІ, простягається від одноатомних іонів з різними зарядами до заряджених крапель. Проте як спектр іонів, що емітуються РМДІ, так і їх просторовий та енергетичний розподіл сильно змінюються при зміні зовнішніх параметрів - складу сплаву, температури джерела, величини загального іонного струму, тощо.

З'ясування деталей механізму дії РМДІ становить не тільки фі-

зичний інтерес, але важливо з погляду застосування РМДІ. Без знання того, від чого залежить кількість різних заряджених частинок в загальному іонному струмі, який емітується РМДІ, а також їх розподілу в просторі та по енергіях неможливо оптимізувати робочі характеристики РМДІ. Наприклад, при дослідженні сплавних РМДІ більшість експериментаторів вивчали розподіл іонів за масами, зарядами та енергіями лише для одного напрямку, найчастіше вздовж осі конусу емісії. А проте часто виявлялось, що тих іонів, які необхідні для роботи іонно-променевої установки, в промені значно менше, ніж можна було передбачити, виходячи із складу сплаву. Передбачались різні причини цього явища, але ніхто не припускав, що ці іони емітуються в достатній кількості, але в іншому напрямку.

Таким чином, дослідження рідкометалевих джерел іонів становить собою вельми актуальну проблему як із загальнофізичного погляду (фізичний об'єкт з багатьма складними і цікавими властивостями), так і з практичного погляду (РМДІ - дуже перспективні для застосування в мікроелектроніці та інших галузях техніки). Найважливішим питанням є механізм роботи РМДІ, про який нема чіткої, повної та єдиної думки і через це нами була здійснена викладена нижче робота, яка дозволяє з'ясувати деякі аспекти роботи РМДІ.

Мета цієї роботи - з'ясування механізму формування кутових та енергетичних розподілів іонів в одноелементних та сплавних рідкометалевих джерелах іонів.

Наукова новизна роботи. На прикладі галій-індієвого РМДІ вперше виявлені сильні відмінності кутових розподілів іонів різних елементів, що емітуються сплавним РМДІ. Досліджена залежність цього ефекту від складу сплаву, емісійного струму та температури джерела. Запропоновано пояснення фізичної природи просторової сепарації іонів різних елементів в сплавному РМДІ, що ґрунтується на враху-

ванні відмінності величини електричного поля, необхідного для польового випаровування цих іонів.

Виявлено сильну зміну кутових та енергетичних характеристик іонів Ca^+ та In^+ емітованих галієвим або індій-галієвим РМДІ при підвищенні температури джерела. Вперше виявлені особливості кутових та енергетичних розподілів багатоатомних однозарядних іонів та одноатомних двозарядних іонів при високих температурах джерел, які корелюють з особливостями розподілів однозарядних одноатомних іонів.

На підставі сукупності експериментальних даних висунуто припущення, що зміна кутових та енергетичних характеристик іонів, що емітуються з галієвого та галій-індієвого РМДІ при підвищенні температури джерела, пов'язана із зміною режиму роботи джерела: переходом в нестабільний режим, в якому джерело поряд з іонами емітує заряджені краплі. Запропонована модель роботи РМДІ в нестабільному режимі, яка враховує взаємодію емітованих іонів з осцилюючою емітуючою поверхнею, з зарядженими краплями та з атомами, які виникають в результаті дезінтеграції цих крапель.

Практична цінність роботи.

1. Виявлений ефект сильної просторової сепарації іонів різних елементів, що емітуються із сплавного РМДІ, висуває нові вимоги до конструкції іонно-променевих установок, які використовують такі РМДІ. Для настроювання на максимум виходу необхідних іонів повинна бути передбачена можливість повороту і нахилу джерела відносно вхідного пристрою іонно-оптичної системи.

2. Показано, що в залежності від вибору режиму роботи РМДІ ширина енергетичного розподілу іонів може сильно змінюватись. Отже для кожного джерела слід добирати оптимальний режим роботи (склад сплаву, струм емісії, температуру джерела).

На захист виносяться наступні положення:

1. Вперше виявлено велику відмінність кутових розподілів іонів різних елементів, емітованих сплавним РМДІ і пояснено фізичну природу просторової сепарації іонів різних елементів в сплавному РМДІ, засноване на врахуванні відмінності величини напруженості електричного поля, необхідного для польового випаровування цих іонів.

2. Експериментально виявлено сильну зміну кутових та енергетичних розподілів різних іонів, що емітуються галієвим та галій-індієвим РМДІ при зміні температури джерела. Ці зміни пов'язуються з переходом РМДІ в нестабільний режим, в якому він поряд з іонами емітує заряджені краплі, що приводить до взаємодії емітованих іонів з осцилюючою емітуючою поверхнею, з зарядженими краплями та з атомами, що виникають в результаті дезінтеграції цих крапель.

Достовірність отриманих результатів визначається їх відтвореністю, використанням комплексу сучасних методів дослідження, а також пізнішим підтвердженням окремих отриманих результатів в працях інших дослідників.

Внесок автора. Всі дослідження, результати яких викладені в даній роботі, виконані при безпосередній участі автора в плануванні та постановці експерименту; в експериментальних вимірах, в обробці результатів та їх обговоренні.

Апробація роботи. Результати роботи доповідались на 38-му Міжнародному симпозиумі з польової емісії (Австрія, Відень, 1991); 5-й Міжнародній конференції з вакуумної мікроелектроніки (Австрія, Відень, 1992); 3-й Всесоюзній

конференції з мікроаналізу на іонних пучках (Суми, 1990) ; Всесоюзному семінарі з молекулярно-променевої епітаксії (Новосибірськ, 1991) ; 6-я Республіканській конференції з фізичних проблем мікроелектроніки (Севастополь, 1990) ; Всесоюзному семінарі з інтенсивних іонних джерел та пучків (Київ, 1990, 1991) ; 22-я конференції з емісійної електроніки (Москва, 1994) .

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 8 друківаних роботах; їх список є в кінці автореферату.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох глав, висновків і списку цитованої літератури із 118 назв. Дисертація містить 126 сторінок тексту, 35 малюнків, 3 таблиці.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність теми досліджень, сформульовані мета роботи та положення, що виносяться на захист, відображена наукова новизна та практична цінність роботи.

В першій главі дисертації наведено критичний огляд експериментальних та теоретичних робіт, що відносяться до теми дисертації, а також стисло розглянуто можливі застосування рідкометалевих джерел іонів, переважно в мікроелектроніці. Загальна ідея РМДІ сходить до зміни форми поверхні рідини під дією електричного поля та явища польового випаровування, виявленого Ервіном Мюллером. Останнє явище широко використовується в польовій іонній мікроскопії для одержання атомарнодосконалої поверхні зображуваного вістря та в атомних зондах при дослідженні хімічного складу приповерхневих шарів на вершині вістря.

В найпростішому вигляді РМДІ складається з голки з радіусом скруглення вістря біля Юмкм та витягуючого електрода (екстракто-

ра). Поверхня голки вкривається шаром рідкого металу. При подачі напруги на екстрактор, в результаті сукупної дії сил поверхневого натягу, які прагнуть мінімізувати площу поверхні рідини, та електростатичних сил поверхня приймає, незалежно від властивостей матеріалу, форму конуса з напівкутом $49,3^\circ$ (конус Тейлора). На вершині цього конуса напруженість поля досягає величини порядку 10^8 В/см і починається польова емісія іонів. Через те, що радіус кривизни поверхні рідини в області емісії не перевищує кількох нанометрів, РМДІ становить собою практично точкове джерело, що виключно цінно тим, що полегшує фокусування емітованих іонів в малу цятку.

Енергія пучка РМДІ може бути різною: від одиниць до сотень кілоелектронвольт. Такими пучками можна виконувати ряд надпрезизійних робіт в мікроелектроніці - оброблювати об'єкти субмікронних розмірів (мікрофрезерування), здійснювати безмаскову імплантацію легуючих добавок в напівпровідникові матеріали, проводити аналіз елементного складу поверхневих шарів, виконувати літографічні роботи в субмікронному масштабі та ін. Добрим ґрунтом для розгортання досліджень з РМДІ виявились результати робіт, проведених в 60-ті роки по створенню електрогидродинамічних двигунів для систем орієнтації космічних апаратів.

На початку глави коротко розглянуто описані в літературі основні конструкції РМДІ та їх застосування в мікроелектроніці. Найважливішою характеристикою РМДІ є спектр випромінюваних заряджених частинок. Основним механізмом виникнення іонів в РМДІ є польове випаровування. При відносно повільному польовому випаровуванні більшість металів, як показують досліди із застосуванням атомних зондів, звичайно випаровується у вигляді іонів M^{2+} . Режим роботи РМДІ суттєво відрізняється: великий струм емісії, просторовий заряд, висока температура і т.д. спричиняють те, що найчастіше основною компонен-

тою є іони M^+ , хоч спостерігається також емісія іонів з більшим зарядом та мікрокрапель. Велика різноманітність частинок спостерігається при емісії із сплавних РМДІ. Повної теорії, яка пояснювала б спектр емітованих частинок, досі нема, через що становлять інтерес нові експериментальні дослідження. В невеличкій зоні (кілька нанометрів) поблизу рідкометалевого вістря відбувається не тільки народження іонів, але і збудження частинок, яке спричиняє оптичне випромінювання, що також становить джерело інформації про фізичні процеси в РМДІ.

В огляді проаналізовано експериментальні дані про кутові та енергетичні характеристики РМДІ. Дослідження кутових характеристик РМДІ показало, що як ширина конуса емісії, так і кутова густина струму сильно залежать, окрім струму емісії, від геометрії вістря.

Енергетичний розподіл іонів залежить тільки від величини загального струму емітера та його температури і не змінюється при зміні геометрії емітера, тобто є можливість суттєво збільшувати кутову густину іонного струму без збільшення розкиду іонів по енергіях.

Для двозарядних іонів кутовий розподіл приблизно такий самий як і для однозарядних; кластерні іони мають більш вузький розподіл. Енергетичний розподіл емітованих іонів є важливою характеристикою джерела тому, що він несе інформацію про механізм утворення іонів і є необхідним при конструюванні іонно-оптичних систем.

В огляді стисло розглянуті сучасні теоретичні уявлення про механізм роботи РМДІ. Основою таких уявлень є поведінка рідини, що проводить електричний струм, в електричному полі та польове випаровування. Реальна ситуація в умовах РМДІ ускладнюється надзвичайно великим потоком іонів, що випаровуються, а це вимагає врахування полів, утворених сусідніми випаровуваними частинками.

Теоретичним дослідженням форми рідкометалевого емітера присвячено ряд робіт, серед яких стансвлять найбільший інтерес роботи Форбса, Меіра, Кингхема і Свонсона.

Форма рідкометалевого емітера є самоузгодженою і утворюється в процесі емісії під дією електричного поля, поверхневого натягу, об'ємного заряду, гідродинамічних процесів. Особливий інтерес становить форма вершини емітера, де відбуваються всі основні процеси емісії іонів, крапель, світла.

Характерною особливістю РМДІ є те, що емісія з них, можлива не тільки у вигляді іонів, але і крапель. Краплинна емісія викликає нестабільність роботи РМДІ при великих струмах, розширення енергетичного розподілу. Аналіз цього режиму роботи РМДІ детально розглядається в роботах Гомера, Кингхема, Свонсона, Владимірова та ін.

На основі наявних літературних даних зроблено висновок, що багато які важливі деталі роботи РМДІ досі не вивчено. Не з'ясовано основні фактори, які визначають розподіл іонів за масами, зарядами, кутами вильоту, енергіями; їх зміну при зміні іонного струму і температури, не з'ясовано механізм виникнення оптичного випромінювання РМДІ, практично не досліджені питання, пов'язані із взаємодією атомів різних елементів в зоні іонізації сплавного РМДІ.

В другій главі дисертації наведено опис експериментальної установки та методика експериментів. Експериментальна установка була створена на основі магнітного мас-спектрометра МІ-І20ІТ. У вхідній частині мас-спектрометра (МС) було закріплено барабан, що обертається, в якому змонтовано на ізоляторах РМДІ. РМДІ становить собою тонку танталову трубку з вістрям, яке виступає з неї. Трубка приваровувалась до траверса через дві вольфрамові дужки, які використовуються при нагріві джерела. Вершина вістря РМДІ знаходиться на осі обертання напроти середини вхідної щілини МС. На невеликій (1-2 мм) відста-

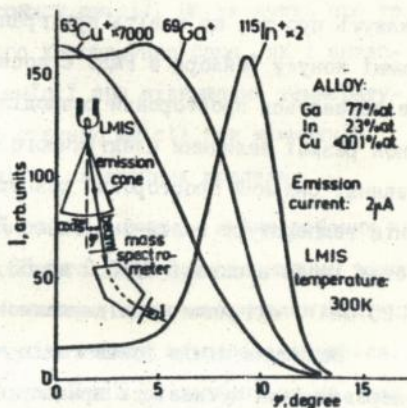
ні від вершини вістря до барабана прикріплений екстрактор з отвором діаметром 3 мм для виходу іонів. Вся конструкція закрита кожухом з нержавіючої сталі, що прикріплений до барабана, з вузькою (шириною біля 1 мм) вертикальною щілиною напроти вхідної щілини МС. Вхідна щілина МС була закрита екраном з нержавіючої сталі з горизонтальною щілиною шириною біля 1 мм напроти її середини. Таким чином, всередину МС попадає іонний пучок, який має переріз $1 \times 1 \text{ мм}^2$ на відстані біля 75 мм від джерела. Це забезпечує роздільну здатність приладу по кутам менше 1° . При обертанні барабана із швидкістю 0,3 об/хв вимірювання однієї кутової залежності звичайно забирало 15-20 с.

При вимірюванні кутової залежності іонного струму вихідна щілина МС повністю відкрита, енергетична апертура МС біля 40еВ, так що сигнал на виході МС практично пропорційний кутовій щільності струму іонів, що вимірюються. РМДІ закріплюється на барабані таким чином, щоб сканування по кутах проходило через центр конуса емісії. Енергетичні розподіли іонів різних елементів визначаються виходячи з форми їх піків на виході МС при настроюванні МС на максимальну роздільну здатність. Порівняння мінімальної ширини піка іонів $^{69}\text{Ga}^+$ на половині висоти, що одержана в наших дослідках, з літературними даними дозволило оцінити роздільну здатність установки по енергіях в 3 еВ.

В третій главі викладені результати дослідження галієвого та галій-індієвого РМДІ при кімнатній температурі. В проведених експериментах було підтверджено відомі з літератури особливості кутових розподілів іонів Ga^+ при кімнатній температурі джерела - наявність максимумів кутової густини струму на краю конусу емісії, розширення конусу емісії із зростанням емісійного струму, залежність кутового розподілу іонів Ga^+ від форми вершини вістря. Новий и не-

сподіваний результат було отримано при дослідженні кутових розподілів іонів Ga^+ та In^+ в сплавному галій-індієвому РМДІ. Була виявлена сильна відміна кутових розподілів іонів галію та індію емітованих із сплавного галій-індієвого джерела.

На мал. I зображені кутові розподіли іонів $^{69}Ga^+$ та $^{115}In^+$ при кімнатній температурі джерела і малому, близькому до порогового, емісійному струмі 2 мкА. Для іонів $^{69}Ga^+$ кутовий розподіл схожий на типовий кутовий розподіл однозарядних іонів для одноелементного джерела при низьких температурах. Для $^{115}In^+$ кутовий розподіл має яскраво виражені максимуми при кутах $\pm 10^\circ$, кутова густина іонного струму індію в цих



Мал. I.

максимумах в багато разів перевищує кутову густану в центрі конусу емісії. Наведено якісне пояснення цього ефекту, що ґрунтується на врахуванні відміни полів випаровування іонів галію та індію. Кожний вид іонів випаровується з тієї частини поверхні виступу на вершині конусу Тейлора, де досягається необхідне для випаровування електричне поле. Іони елемента, який іонізується легше, починають випаровуватися з конічної частини виступу і попадають на край кутового розподілу конусу емісії. Іони елемента, який іонізується трудніше, виходять з вершини виступу і попадають в центральну частину конусу емісії. Були вивчені кутові розподіли іонів Cu^+ , які утворюються

з невеликої (0,004 ат.%) домішки міді в сплаві. Ці іони емітуються, в основному, в центральній частині конусу емісії, що відповідає висунутому раніше поясненню. Дослідження при гранично малих (менш ~ 1 мкА) струмах емісії показали, що і в цьому випадку спостерігається значний просторовий розподіл іонів галію та індію. Ці результати кажуть про те, що навіть при гранично малих струмах емісії на вершині конусу Тейлора в РМДІ є досить тонкий довгий виступ, на якому відбувається просторовий розподіл іонів різних елементів за рахунок різної величини електричного поля, потрібного для їх випаровування. Сильний просторовий розподіл іонів Ga^+ та In^+ при кімнатній температурі галій-індієвого РМДІ спостерігається при всіх вмістах індію в сплаві (від 6 до 63 %) і при всіх струмах емісії (1-20 мкА), які нами досліджувались.

Величини піків іонів галію на виході МС в наших експериментах перевищували чутливість приладу на 4-5 порядків, що дозволяло досліджувати розподіл цих іонів за енергіями в широкому (більш 4-х порядків) динамічному діапазоні. При кімнатній температурі джерела іонів енергетичні розподіли іонів галію та індію, що емітуються з галієвого та галій-індієвого РМДІ при малих струмах емісії, мають близьку до гаусової форму і практично не залежать ні від кута, ні від струму емісії. При великих емісійних струмах ширина енергетичного розподілу на половині висоти піка збільшується. При дослідженні температурної залежності розподілу іонів In^+ за енергіями ми проводили експерименти при емісійному струмі 2 мкА, при якому енергетичний розподіл цих іонів при кімнатній температурі іще близький до "ідеального".

Основним фактором, що визначає енергетичний розподіл іонів в умовах стабільної (без емісії заряджених крапель) роботи РМДІ, є взаємне відштовхування іонів біля зони іонізації (ефект Бюрча).

Наші результати по енергетичному розподілу іонів галію та індію при малих концентраціях індію в сплаві підтверджують, що ефект Бьорча є основною причиною енергетичного розкиду іонів в стабільному режимі РМДІ. Низькоенергетичний "хвіст", що з'являється при великих струмах емісії при кімнатній температурі джерела, практично зникає при віддаленні від центру конусу емісії. Це свідчить про те, що фізична природа виникнення цього хвоста така сама, як і аналогічного хвоста при малих струмах емісії при підвищених температурах джерела. Тобто при підвищених струмах емісії при кімнатній температурі також відбувається емісія заряджених крпель.

В четвертій главі подані результати вивчення зміни робочих характеристик галієвого та галій-індієвого РМДІ при підвищенні температури джерела. Як кутові так і енергетичні характеристики РМДІ при підвищенні температури і малих струмах емісії суттєво змінюються.

Пік кутової густини струму іонів індію розщеплюється на два, які з підвищенням температури джерела зсуваються в протилежних напрямках. Кутова густина струму іонів галію збільшується в центрі конусу емісії і зменшується на його периферії.

При високих температурах джерела енергетичний пік іонів галію або індію поділяється на два. У іонів, які емітуються вздовж осі конусу емісії, більш високоенергетичний пік з цих двох має більшу амплітуду і, крім того, з'являється широкий пік з істотно (на 30-50 еВ) меншою енергією. При віддаленні від осі конусу емісії широкий низькоенергетичний пік зникає. Амплітуда низькоенергетичного піку збільшується і проходить через максимум на краю конусу емісії.

В центрі конусу емісії при підвищенні температури джерела з'являються багатоатомні однозарядні іони Ga_2^+ , $GaIn^+$, Ga_3^+ , In_2^+ і т.д., які мають вузькі (менше 4° від осі конусу емісії) кутові розподіли та значні (більш 50 еВ) енергодефіцити. В центрі

кутового розподілу іонів Ba^{2+} при підвищенні температури джерела з'являється провал, кутова ширина якого приблизно така сама, як ширина кутового розподілу багатоатомних іонів або однозарядних іонів із широкого низькоенергетичного піка.

Вплив температури джерела на кутові розподіли іонів Ba^{+} та In^{+} зменшується із збільшенням струму емісії; при струмах емісії більше 10 мкА сильний просторовий поділ цих іонів зберігається і при високих (~ 750 К) температурах джерела. Сукупність експериментальних результатів найкраще узгоджується з уявленнями про те, що при переході до високотемпературного режиму відбувається перехід від усталеного режиму роботи РМДІ, який характеризується існуванням стабільного виступу на вершині конуса Тейлора, до неусталеного режиму, за якого цей виступ стає нестабільним і окрім іонів емітує заряджені мікрокраплі.

Модель, що пропонується, пояснює спостережені експериментальні зміни кутових та енергетичних розподілів різних іонів при підвищенні температури РМДІ, а також пояснює фізичний механізм виникнення оптичного випромінювання РМДІ.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Проведено систематичне дослідження галієвого та сплавного галій-індієвого рідкометалевого джерела іонів з домішкою міді. Досліджено розподіл іонів по масах, зарядах, кутах вильоту та енергії. Вперше виявлено сильну відміну кутових розподілів іонів різних елементів, що емітуються з сплавного РМДІ.

2. Досліджена залежність сепарації іонів по кутах вильоту від складу сплаву, емісійного струму та температури джерела. Запропоновано пояснення фізичної природи просторової сепарації іонів різних елементів в сплавному РМДІ.

3. В сплавному галій-індієвому РМДІ виявлено, що кутові та

енергетичні розподіли іонів сильно змінюються при підвищенні температури джерела іонів, особливо при малих струмах емісії. Вперше виявлені особливості кутових та енергетичних розподілів багатоатомних однозарядних іонів та одноатомних двозарядних іонів при високих температурах джерел, які корелюють з особливостями розподілу однозарядних одноатомних іонів.

4. Запропонована модель роботи РМДІ в нестабільному режимі, в якому джерело поряд з іонами емітує заряджені краплини.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Медведев В.К., Черный В.И. Угловые распределения ионов Ga^+ и In^+ , эмитируемых из сплавного галлий-индиевого жидкометаллического источника ионов. Письма в ЖЭТФ, 1991, т. 53, в. 9, с. 484-487.
2. Кулик В.С., Медведев В.К., Попович Н.Н., Черный В.И. Угловое и энергетическое распределение ионов Ga^+ , Ga_2^+ и Ga^{2+} , эмитируемых галлиевым жидкометаллическим источником ионов. УФЖ, 1991, т. 36, № II, с. 1626-1635.
3. Medvedev V.K., Chernyi V.I., Popovich N.N., Angular and energy distributions of ions emitted from a GaIn liquid alloy ion source. J.Vac.Sci.Technol.B, 1993, v.11, N 2, p.523-526.
4. Кулик В.С., Медведев В.К., Попович Н.Н., Черный В.И. Исследование угловых и энергетических характеристик ионного пучка из жидкометаллических источников ионов. Тематический сборник научных трудов ИГУ : физико-химические, структурные и эмиссионные свойства тонких пленок и поверхности твердого тела, 1992, с. 260-282.
5. Кулик В.С., Медведев В.К., Черный В.И. Исследование угловых и энергетических характеристик ионного пучка из жидкометаллического источника ионов. Тезисы докладов на VI Республиканской кон-

ференции по физическим проблемам МДП-интегральной электроники.
Севастополь, 1990, с. 122.

6. Chernyi V.I., Medvedev V.K., Kulik V.S. Angular and energy distributions of ions emitted from liquid metal ion sources (LMIS). Proc. 38th IFES (Vienna, Austria), 1991, p.3-35.
7. Medvedev V.K., Chernyi V.I., Popovich N.N. Angular and energy distributions of ions emitted from Ge-In alloy liquid metal ion source. Proc. 5th Intern. Vacuum Microelectronics Conference (Vienna, Austria), 1992, p.2-16.
8. Медведев В.К., Кулик В.С., Попович Н.Н., Черный В.И. Исследование угловых и энергетических характеристик ионного пучка из жидкометаллических источников ионов. Тезисы докладов XXII конференции по эмиссионной электронике, Москва, 1994, т. 3. с. 39-40.

Черный В.И. Угловые и энергетические распределения ионов, эмитируемых галлиевым и галлий-индиевым жидкометаллическими источниками ионов.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника. Институт Физики НАН Украины, Киев, 1994.

Защищается 8 научных работ по экспериментальному исследованию Ga и GaIn жидкометаллических источников ионов /ЖМИ/.

Обнаружено сильное отличие угловых распределений ионов In^+ и Ga^+ , эмитируемых из сплавного ЖМИ. Предложено объяснение этого явления, основанное на учете отличия полей испарения ионов галлия и индия. Рассматривается влияние эмиссии заряженных капель из источника на угловые и энергетические распределения ионов.

Chernyi V.I. Angular and energy distributions of ions emitted from Ga and GaIn liquid-metal ion sources.

The dissertation on the application of the degree of a candidate of physics and mathematics sciences. Specialization - physical electronics 01.04.04.

8 Scientific publications are defend. An essential difference in the angular distributions of the Ga^+ and In^+ ions emitted from the GaIn liquid-metal ion source was observed and explained taking into account the difference in the desorbing fields of these ions. The influence of charged droplet emission on the angular and energy distributions of ions have been considered.

Ключові слова: рідкометалеве джерело іонів, іонна емісія, польове випаровування.

ЛНБ ім. В. Стефанива
17 АН України

Чорний Володимир Іванович

Кутові та енергетичні розподіли іонів, емітованих галієвим та галій-індієвим рідкометалевими джерелами іонів.

Підписано до друку 09.02.95. Формат паперу 60x84/16.

Папір офсетний 72 гр/м². Офсетний друк. Ум.-друк.

аркушів 1,15. Об.-вид. аркушів 0,8. Тираж 100. Зам.4.

Безкоштовно.

Інститут фізики НАН України, ВНТІ

252022, Київ-22, ДСП, проспект Науки, 46

1950

448605

Безкоштовно

АВ 32.516