

О.Є. ЛУШКІН

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
(Вул. Володимирська, 64, Київ 01033; e-mail: san@univ.kiev.ua)

УДК 621.039.6

ПРО ЕФЕКТИВНІ ТЕРМОЕЛЕКТРОННІ КАТОДИ

Проведено огляд наукових робіт, які присвячені найбільш ефективним сучасним термоелектронним катодам, а саме: оксидним катодам (ОК) та металево-пористим катодам (МПК). Основна увага приділена аналізу механізмів емісії цих джерел електронів. Крім того, розглядається зв'язок емісійної здатності МПК з їх фізико-технічними параметрами. Також обговорюється і вплив технології виготовлення на експлуатаційні характеристики катодів.

Ключові слова: оксидний катод, металево-пористий катод, окиси лужноземельних металів, окис скандію, термоелектронна емісія, автоелектронна емісія.

1. Вступ

У наш час, коли напівпровідникова, мікро- і вже наноелектроніка та прилади, створені на їх основі, завоювали найрізноманітніші галузі електронної техніки, може скластися враження, що електровакуумним приладам (ЕВП) більше немає гідного застосування, а згодом про них і зовсім не будуть пам'ятати. Але – це не так. Справа в тому, що розробники радіоелектронних пристроїв зрозуміли – тверде тіло має обмежені можливості. Крім того, в екстремальних умовах експлуатації (космос, військові об'єкти (шахти), агресивні високотемпературні середовища) напівпровідникові схеми працюють ненадійно, чи зовсім не можуть бути використані. Вони в 10^8 разів гірше витримують нейтронне опромінення, в 10^3 разів γ -промені, ніж ЕВП; максимальна температура оточуючого середовища для напівпровідників не може перевищувати $250\text{ }^\circ\text{C}$. (А ЕВП стійко працюють і при $T \approx 600\text{ }^\circ\text{C}$). Більш того, нині достатньо помітні успіхи у так званій вакуумній мікроелектроніці. В приладах вакуумної мікроелектроніки пасивні елементи і активні (джерела електронів) виконуються в одному технологічному циклі, тобто можна говорити про вакуумні інтегральні схеми (ВІС), які використовують мікромініатюрні катоди.

Крім того, існує ціла група вакуумних приладів, які ще багато років не зможуть бути замінені твердотільними приладами. І, в першу чергу, це стосується ЕВП надвисокочастотного діапазону (НВЧ) для далекодіючої радіолокації, радіонавігації, пе-

редавачів космічного зв'язку, передаючих та приймальних трубок високої роздільної здатності і т. ін. Тобто, коли треба перетворити електромагнітні сигнали високої частоти та великої потужності застосовують ЕВП. Крім того, емісія електронів у вакуум – єдиний спосіб одержання вільних електронів.

Основним елементом будь-якого ЕВП є джерело електронів – катод (емітер). Його експлуатаційні параметри цілком і повністю визначають параметри електровакуумного приладу. Це і потужність, і довговічність, і надійність, крутість вольт-амперної характеристики та інші специфічні параметри (для кожного приладу свої). Наприклад, для електронно-променевих трубок – роздільна здатність, для НВЧ приладів – рівень шумів.

У зв'язку з зазначеним вище і сьогодні продовжуються роботи по створенню високонадійних, ефективних та економічних катодів, у тому числі роботи по модернізації і оптимізації експлуатаційних параметрів існуючих джерел електронів.

І на сьогоднішній день в ЕВП, найчастіше, використовуються термоелектронні катоди. В зв'язку з тим, що призначення емітера – підтримання необхідної концентрації електронів поблизу його поверхні і в просторі взаємодії з електричними та магнітними полями, величина струму емісії та час роботи катода без помітного погіршення характеристик – основні його параметри. Однак і емісійна здатність катода, і його довговічність дуже суттєво залежать від робочої температури катода. Зрозуміло, що ці характеристики знаходяться у великому протиріччі. З відомих типів термо-

електронних катодів найкраща збалансованість по усіх вимогах досягається при використанні в ЕВП так званих оксидних катодів (ОК) та металевопористих катодів (МПК). Вони ж є і найбільш ефективними. Тобто у них найкраще співвідношення між густиною струму емісії, що відбирається, та питомою потужністю, яка витрачається на розігрів катода.

2. Оксидні катоди

Оксидний катод був відкритий А. Венельтом ще у 1904 році. Конструктивно він являє собою металеву підкладку (кern), найчастіше, з нікелю, на яку різними методами осаджується твердий розчин (що дуже бажано) карбонатів лужноземельних металів (ЛЗМ) подвійного еквімолярного складу $(\text{BaSr})\text{CO}_3$ або потрійного складу $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$ товщиною декілька десятків мікрметрів. Оптимальним співвідношенням складових в останньому випадку визнане таке: $\text{BaO} : \text{SrO} : \text{CaO} - 47 : 43 : 10$ молярних відсотків відповідно. За допомогою підігрівача, розташованого у керні, карбонати у вакуумі термічно розкладаються до відповідних оксидів з відкачкою газових продуктів реакції з як можна більшою швидкістю. Отриманий таким чином твердий розчин оксидів повинен бути високотемпературним, щоб подальше більш високотемпературне прогрівання, яке називається активуванням, за короткий час привело оксидне покриття ОК в стан високої емісійної здатності. За 110 років існування ОК у всьому світі виконана сила силенна досліджень, спрямованих на з'ясування механізму його емісії. Ще у 1954 році у відомому огляді "Современные термоэлектронные катоды" визначний український вчений, член-кореспондент АН УРСР, організатор і керівник Київської наукової школи фізичної електроніки Н.Д. Моргуліс зазначав, що "оксидний катод – фізично дуже складна і цікава система" [1]. Вже в ті часи дослідники задіяли більше 10 методик, однак за 50 років активного використання ОК в різноманітних ЕВП успіхи були дуже помітними тільки у технології виробництва катодів. Що стосується уявлень про природу термоелектронної емісії з оксидного катода, то на той час Н.Д. Моргуліс про них писав як про "елементарні" і згідно з якими ОК розглядається як бездоганно структурно однорідний шар електронного напівпровідника окису барію з домішкою до-

норних атомів металевого барію. Емісія з нього має характер чистого випаровування.

Однак уявлення про ОК як плівки напівпровідника на металевій підкладці виявились дуже плідними. Наступні 50 років були присвячені широкому розвитку напівпровідникових теорій для пояснення фізичних принципів роботи оксидного катода в різних вакуумних умовах, у широкому діапазоні температур, у стаціонарному та імпульсному режимах роботи при відбиранні струмів емісії від 100 mA/cm^2 до 15 A/cm^2 протягом тисяч і десятків тисяч годин. Результати цих досліджень не одноразово висвітлювалися у минулому в різних оглядах та монографіях. Найбільш відомими у нашій країні є [2–7]. А що стосується наукових статей, то їх за ці роки було надруковано тисячі.

За останні роки тридцять для дослідження термоелектронних катодів було задіяно надпотужний арсенал методів, які використовуються для аналізу хімічного складу, атомної і електронної структури поверхні матеріалів. Це емісійні методи аналізу, зондування поверхні повільними та швидкими електронами, електромагнітним випромінюванням та зондування поверхні іонними і молекулярними пучками. (Наведена класифікація методів за позичена у [8]).

Завдяки цим методам були досягнуті великі і всебічні успіхи в дослідженнях ОК, отримано багато важливих і цікавих результатів, які дозволили сформулювати нову концепцію його роботи [6, 9]. І Залм, і Ніконов запропонували дві спочатку майже ідентичні моделі оксидного катода. Ці моделі базувалися на даних, які доводили, що на поверхні кристалів оксидів ЛЗМ після відповідної термовакуумної обробки утворюється надлишок металу і саме цей надлишок визначає термоелектронні властивості системи. Додаткове наплення барію на поверхню оксидів з зовнішнього джерела забезпечує додаткове зниження їх роботи виходу. Її кінцеве значення мало залежить від типу оксиду, на якому утворюється поверхневий шар. При густині поверхневих станів 10^{13} cm^{-2} робота виходу напівпровідника вже не залежить від властивостей його об'єму і визначається положенням рівня Фермі у поверхні кристала та значенням зовнішньої роботи виходу.

Висока концентрація поверхневих рівнів веде до викривлення зон з відповідною зміною внутрішньої роботи виходу. А оскільки барій на поверхні

кристалів знаходиться в іонній формі (або сильно поляризований), то повинна з'являтися і дипольна складова, яка змінює зовнішню роботу виходу. Її значення екстремально залежить від кількості атомів барію на поверхні, тобто починаючи з певної концентрації N_a повинен відчуватися деполіризуєчий вплив сусідніх атомів і величина зовнішньої роботи виходу буде прямувати до значення роботи виходу товстого шару N_a . При цьому може настати такий момент, коли збільшення зовнішньої роботи виходу не буде компенсуватися відповідним зменшенням внутрішньої роботи виходу і подальше збільшення концентрації барію на поверхні кристалів буде супроводжуватися не зменшенням, а збільшенням загальної роботи виходу.

Б.П. Ніконов вважав, що у активованого ОК значення внутрішньої роботи виходу близьке до енергії активації провідності по поверхні кристалів і становить всього 0,1–0,2 еВ. Тоді основний внесок у роботу виходу ОК вносить висота поверхневого потенціального бар'єра, який визначається складом та властивостями поверхневого шару кристалів [9]. Зонна схема Залма у ті часи [6] передбачала, що пониження потенціального бар'єра за рахунок викривлення зони провідності і дипольного пониження зовнішньої роботи виходу тільки полегшує вихід електронів зони провідності у вакуум.

Результати, якими користувались тоді автори [6, 9, 10], не дозволяли віддати перевагу тій чи іншій схемі роботи ОК. Справа у тому, що був сумнів відносно формування дипольного шару на поверхні іонного кристала навіть з високою концентрацією одного з компонентів ґратки. Згодом ці сумніви були розвіяні [11–13] дослідниками по напильню малої концентрації речовини (10^{-4} – 10^{-2} моношару) на різні оксиди. Було показано, наприклад, що ефективно значення дипольного моменту адатомів N_a на поверхні SrO приблизно на порядок більше значень дипольних моментів адатомів N_a на поверхні металів, а поверхневий бар'єр може виконувати роль донорних центрів з одним електроном, який може вивільнитися при термічній іонізації центра. Тобто, на поверхні оксидного шару утворюються локальні донорні центри, в результаті іонізації яких можуть з'являтися електрони як у зоні провідності поверхневого шару кристала, так і у його поверхні.

Таким чином, ОК з точки зору Б.П. Ніконова [7] – це напівпровідник з донорними центрами, роз-

ташованими близько до дна зони провідності. З ростом поверхневої концентрації донорів вигін зон збільшується, рівень донорів наближається до дна зони провідності. Концентрація донорів у поверхневому шарі стає суттєво більшою, ніж в об'ємі. Це дозволяє розглядати поверхню кристала як “квазіізолювану” з своїм рівнем Фермі, відстань якого від рівня вакууму дає висоту поверхневого потенціального бар'єра. В поверхневому шарі напівпровідника формується зона з локальними донорними центрами, розташованими близько до дна зони провідності, але достатньо далеко від рівня вакууму. В цьому випадку вже при відносно невисоких температурах відбувається повна іонізація домішки і рівень Фермі E_F , відрахований від рівня вакууму (фактично це робота виходу), розраховується за формулою:

$$E_F = \chi + kT \ln \frac{N_C}{N_D} = \chi + \alpha T, \quad (2.1)$$

де N_C – повне число станів у зоні провідності; N_D – концентрація донорів – зовнішня робота виходу напівпровідника – температурний коефіцієнт роботи виходу.

Як зазначає сам автор [7], модель напівпровідника з високою густиною станів на поверхні якісно відповідає експериментальним даним, пояснює залежність струму емісії від концентрації донорів і температурного коефіцієнта роботи виходу. Однак у рамках цієї моделі значення роботи виходу залишається дослідною величиною і не зв'язується з властивостями речовини, з властивостями атомів і молекул, які формують поверхневий шар катода.

В цілому розглянута модель роботи оксидного катода знайшла підтримку у багатьох дослідників, у тому числі і у Г.Я. Пікуса, В.Ф. Шнюкова, Г.Є. Чайки – професорів Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Результати їх досліджень механізму порушення стехіометрії кристалів хімічних сполук при прогріванні у вакуумі з застосуванням основних положень електронної теорії хемосорбції на поверхні напівпровідників та теорії статистичної взаємодії дефектів і електронів у напівпровідниках дозволили їм розробити електронну теорію випаровування і формування складу бінарних напівпровідникових сполук типу A_2B_6 при вільному випаровуванні у вакуум [14, 15]. Спираючись на цю теорію автори [14, 15] сформулювали більш універ-

сальну концепцію роботи ОК. Ця концепція змогла пояснити практично усі експериментальні результати, отримані різними дослідженнями за довгий період використання оксидних катодів в різноманітних ЕВП.

У відповідності з [14, 15] процес випаровування атомів іонного кристала при прогріві у вакуумі здійснюється в три етапи. На початковому етапі поверхневий іон кристалічної ґратки залишає нормальний вузол, утворюючи поверхневий дефект по Френкелю. Такому дефекту в забороненій зоні напівпровідника відповідає певний локальний енергетичний рівень. Обмінюючись електроном (діркою) із зоною провідності (валентною зоною), цей дефект на другому етапі нейтралізується, а потім вже, на третьому етапі, нейтральний атом, оскільки слабо зв'язаний з кристалом, легко випаровується (зв'язок нейтрального атома з кристалом зобов'язаний силам Ван-Дер-Ваальса). Надлишкові атоми, які утворилися на поверхні кристала, можуть також дифундувати і в його об'єм.

Поверхнева концентрація нейтральних атомів, а отже, і їх швидкість випаровування, визначається не лише швидкістю утворення дефектів. Особливу роль тут відіграє електронний стан поверхні – концентрація вільних електронів n_e у приповерхневій області зони провідності. А n_e у загальному випадку регулюється положенням рівня Фермі. Будь-яка зміна концентрації цих електронів призводить до зміни умов нейтралізації іонів і до зміни умов випаровування поверхневих атомів, що, зрозуміло, супроводжується зміною складу поверхневого шару оксидів ЛЗМ. Тобто для кристалів типу A_2B_6 існує глибокий зворотний зв'язок між випаровуванням компонентів та порушенням стехіометрії поверхні кристалів, який здійснюється за допомогою вільних електронів. Цей зв'язок зумовлений сильною і протилежною за знаком для металу та металоїду залежністю швидкостей випаровування компонентів від концентрації вільних електронів, яка при порушенні стехіометрії змінюється внаслідок зміни концентрації катіонних та аніонних вакансій – власних дефектів донорного та акцепторного типу. При цьому зміна швидкостей випаровування компонентів зі зміною концентрації вільних електронів відбувається таким чином, щоб перешкодити розвитку відхилення від стехіометрії.

Отже, встановлено невідому раніше властивість електронної саморегуляції порушення стехіометрії

в бінарних іонних кристалах, яка полягає в тому, що при вільному випаровуванні у вакуумі при фіксованій температурі досягається квазістаціонарний стан (КСС) кристала з незмінним ступенем відхилення від стехіометрії та однаковими швидкостями випаровування компонентів. Досягнутий стан підтримується динамічною рівновагою електронної підсистеми кристала з потоком атомів компонентів, що випаровуються, з одного боку, та дефектами, які утворюються при цьому – вакансіями, з іншого. В процесі прогріву на поверхні кристала утворюється стаціонарний перехідний шар, в якому ступінь відхилення від стехіометрії відрізняється від об'ємної та сильно зменшується при віддаленні від поверхні.

Ступенем відхилення від стехіометрії поверхні кристалів можна прецизійно керувати, впливаючи на їх електронну підсистему електричним полем, світлом, або введенням домішок. Як вільні носії заряду рівною мірою, поряд з електронами, можуть розглядатися і дірки.

Функціонування оксидного катода на всіх етапах його роботи на основі уявлень Г.Я. Пікуса, В.Ф. Шнюкова і Г.Є. Чайки про визначну роль електронної підсистеми у формуванні складу та електрофізичних властивостей кристалів A_2B_6 тезисно виглядає таким чином.

Термічна дисоціація оксидів ЛЗМ, швидкість якої суттєво залежить від їх складу, відіграє суттєву роль у механізмі утворення і підтримання на достатньому рівні концентрації надлишкового металу в оксидному катоді в процесі активування і довгої його роботи в умовах високого вакууму і високої температури. При цьому концентрація надлишкового металу, що утворюється в процесі прогріву, близька до оптимальної.

У процесі роботи ОК у вакуумі встановлюється характерний для даної робочої температури КСС з порушеною стехіометрією поверхні зерен оксиду і однаковими швидкостями випаровування компонентів. У першу чергу, при цьому, спостерігається порушення стехіометрії на поверхні кристалів оксиду, а потім і в їх об'ємі. У випадку тонких оксидних покриттів квазістаціонарні стани не встановлюються, бо до їх встановлення покриття встигають випаруватися. КСС залежать від зовнішніх факторів (температура, анодна напруга, склад залишкових газів в ЕВП та ін.). Встановлення квазістаціонарних станів пояснює стабілізацію

електронних властивостей ОК при довготривалій їх роботі в умовах безперервного випаровування активної речовини у вакуум.

За умови, що парціальний тиск кисню в приладі малий, тобто потік кисню ззовні на катод менше, ніж швидкість випаровування кисню у КСС, за допомогою термічної дисоціації можна отримати ОК, який має високі емісійні властивості і великий термін роботи. В протилежному випадку довготривала робота ОК можлива тільки при наявності додаткового джерела вільного металу, роль якого виконує активатор у керні катода.

Значна кількість надлишкового ЛЗМ, необхідного для створення ефективного ОК, з'являється в покритті навіть на ранній стадії формування оксидного шару – у процесі розкладу карбонатів. Однак надлишковий метал, що утворюється в цей період термовакуумної обробки зразка, знаходиться в атмосфері газів, які виділяються. Ці гази взаємодіють з металом і, таким чином, зменшують його концентрацію. Про це свідчить конверсія CO_2 у CO , яка є наслідком взаємодії CO_2 з вільним металом. З експериментальних даних випливає важливий практичний висновок про те, що для запобігання конверсії двоокису вуглецю в окис і для отримання катодів з оптимальними емісійними властивостями необхідно збільшувати швидкість відкачки газів, тобто зменшувати тиск CO_2 в об'ємі приладу та знижувати максимальну температуру прогрівання катодів у процесі розкладу карбонатів до 1100–1150 К, тобто до температур, при яких конверсія виражена слабо.

Важливе значення має питання про локалізацію надлишкового ЛЗМ, який утворюється у процесі термічної дисоціації оксидів. Аналіз показав, що особливості випаровування оксидів, які спостерігаються, пов'язані, в першу чергу, з суттєвою зміною фізико-хімічних властивостей поверхні зерен оксиду. Помітна роль цієї поверхні підтверджується характером взаємодії оксидного шару з воднем та окисом вуглецю, реакція взаємодії яких з оксидним шаром протікає на поверхні зерен оксиду. Взаємодія оксидів з воднем та окисом вуглецю супроводжується утворенням значної кількості вільного ЛЗМ зі зміною емісійних властивостей катодів. При цьому, в першу чергу, зростає концентрація вільного металу на поверхні зерен, але існує граничне значення його кількості, яка може

тут локалізуватися. Результати по взаємодії водню та окису вуглецю з оксидним шаром особливо важливі, оскільки кількість цих газів в залишковій атмосфері ЕВП є найбільшою.

Процес активування ОК полягає не тільки в створенні певного надлишку металу, насамперед барію, в об'ємі і особливо на поверхні кристалів оксидів, а і в створенні певного співвідношення концентрацій вакансій кисню та металу з перевищенням перших (певного співвідношення концентрацій катіонів і аніонів на поверхні і в об'ємі кристалів). Мінімуму роботи виходу відповідає строго визначене співвідношення концентрацій кисню і металу на поверхні. Тому зменшення роботи виходу при збільшенні надлишку металу, однакове як в ході реакції оксиду з воднем, так і при напыленні з стороннього джерела, зумовлено зменшенням концентрації вакансій металу, в першу чергу, на поверхні кристалів. Крім того, мінімуму роботи виходу відповідає також певне співвідношення концентрацій катіонних вузлів, зайнятих іонами барію і стронцію. У зв'язку з тим, що температура активування ОК, при якій утворюється потрібне співвідношення концентрацій вакансій, помітно вища за робочу, то перехід кристалів оксидів в КСС, що відповідає більш низькій температурі і з меншим надлишком вакансій кисню (атомів металу), повинен супроводжуватися погіршенням емісійних параметрів ОК навіть за відсутності інших факторів, які негативно впливають на його емісію. Це питання є важливим у зв'язку з проблемою довговічності ОК.

Разом із зміною співвідношення концентрацій вакансій кисню і металу важлива роль в падінні емісії ОК впродовж терміну роботи належить зміні співвідношення концентрацій барію і стронцію в загальному надлишку металу як наслідок відомого переважного випаровування із кристалів $(\text{BaSrCa})\text{O}$ барієвої компоненти (головним чином, у вигляді молекул BaO), так і завдяки відмінності в швидкостях випаровування Ba і Sr , особливо у режимі відбору емісійного струму, тобто при наявності анодної напруги.

Для створення довговічних ЕВП використання оксидних покриттів товщиною в десятки долі мікрметра недоцільно внаслідок того, що випаровування вільного ЛЗМ різко зростає зі зменшенням їх товщини. При малих товщинах оксидних шарів суттєво зменшити термін роботи може та-

кож анодна напруга та електронне бомбардування покриття.

В той самий час для тонких плівок оксиду на активних ядрах швидкості випаровування Ва та Sr більше, ніж швидкість випаровування ВаО. При дії електричного поля вони ще більш зростають. Звідси випливає, що загальна швидкість втрати активної речовини за наявності анодної напруги може стати досить великою. Не виключено, що в наслідок малого запасу активної речовини в тонкому оксидному покритті цей ефект може привести до помітного скорочення терміну роботи.

У відповідності з основними положеннями про механізм формування КСС іонних кристалів у вакуумі суттєвий вплив на кінетику цього процесу у випадку кристалів оксидів ЛЗМ повинні здійснювати дрібнодисперсні частинки деяких металів, що знаходяться з ними у контакті. Ці частинки повинні бути хімічно пасивними по відношенню до оксидів, але повинні утворювати стійкі сполуки з киснем або ЛЗМ. Це питання є цікавим для з'ясування ролі дрібнодисперсних доданків в ОК з металізованим оксидним шаром, які вводяться в покриття катодів з метою виключення додаткового випаровування активної компоненти при відборі великих густин емісійного струму. Вивчення цього питання показало, що дрібнодисперсні частинки нікелю та міді суттєво впливають на кінетику випаровування компонентів і формування складу оксидного шару. Наприклад, доданок нікелю, якщо він не піддається суттєвому окисленню у процесі формування оксидного шару при розкладі карбонатів, помітно прискорює утворення надлишку металу і, відповідно, покращує емісійні властивості ОК на початковому етапі його активування.

У світі уявлень про КСС оксидів ЛЗМ вибір доданка, що вводиться в покриття ОК, повинен відбуватися з врахуванням особливостей його взаємодії в умовах високого вакууму з компонентами активного шару катода – металом та киснем. Найбільше підходять для цього метали, які утворюють подібно Ni стійкі і гарно розчинні у металі сполуки з киснем. При цьому вибір режиму розкладу карбонатів повинен звести до мінімуму окислення частинок доданка на стадії розкладу карбонатів.

Відповідальними за високі емісійні властивості ОК є і поверхня, і об'єм кристалів оксидів ЛЗМ. При цьому зміна роботи виходу кристалів оксидів зі зміною в них концентрації надлишкового мета-

лу в загальних рисах нагадує концентраційну залежність роботи виходу металоплівкових систем: робота виходу має мінімум при певній концентрації надлишкового металу, який міцно зв'язаний з поверхнею. При цьому мінімум зумовлений екстремальною залежністю зовнішньої роботи виходу від поверхневої концентрації надлишкового металу, бо внутрішня робота виходу напівпровідника з ростом концентрації донорів (атомів надлишкового металу) монотонно зменшується до свого граничного значення.

Формування КСС змішаних кристалів (BaSrCa)O значно ускладнюється безперервним збідненням їх приповерхневого шару Ва-компонентою внаслідок переважного випаровування молекул ВаО. Тому навіть при характерній для КСС рівності виходів атомів металу і кисню склад поверхні і об'єму змішаних кристалів безперервно змінюється у бік збільшення долі катіонних вузлів, що заняті іонами стронцію. Це приводить до того, що за своїми фізико-хімічними і електронними властивостями, наприклад, по кінетиці випаровування компонентів і роботі виходу, змішані кристали наближаються до властивостей кристалів SrO, що вкриті атомами барію. Внаслідок сильної залежності роботи виходу змішаних кристалів від співвідношення Ва- і Sr-компонент безперервне збагачення їх останньою є однією з причин повільного погіршення емісійних властивостей ОК протягом терміну роботи.

Відповідно до розглянутого матеріалу необхідно переглянути і уявлення про роль у механізмі роботи ОК і активаторів, що вводяться в керн. У зв'язку з тим, що концентрація міцно зв'язаного з ґраткою надлишку металу, який утворюється при термічному розкладі оксидів, близька до оптимальної, то в умовах, що забезпечують ефективне протікання цього процесу, лише незначна частина відновленого активатором металу використовується для активування оксидного катода. Увесь відновлений метал, що залишився, випаровується. Роль активатора в цих умовах зводиться, по суті, до зменшення концентрації вакансій у підґратці металу і повинна бути значною тільки на початковій стадії активування ОК. Наприклад, при високій швидкості окислення металу двооксидом вуглецю або високим тиском залишкового кисню у приладі.

КСС, що досягається, характеризується певним для кожної температури співвідношенням концен-

трацій вакансій кисню n_0 – донорів і металу n_M – акцепторів, суттєво різним на поверхні і в об'ємі кристалів. Внаслідок того, що в процесі прогріву в кристалах оксидів ЛЗМ збільшується надлишок металу, завжди n_0 більше n_M і з ростом температури ця різниця зростає. У процесі прогріву оксидів ЛЗМ у вакуумі при певній температурі утворюються вакансії і кисню, і металу.

У відповідності з електронною теорією випаровування і формування складу кристалів оксидів ЛЗМ при прогріві у вакуумі закономірності цього процесу для зразків, товщина яких співрозмірна з довжиною екранування напівпровідника або менше її, відрізняються від тих, які характерні для товстих кристалів. Це пов'язано з тим, що в тонкому зразку у ході прогріву не може утворюватися сумірний по товщині з довжиною екранування перехідний шар з градієнтом концентрації вільних електронів, що забезпечує рівність швидкостей випаровування атомів металу і кисню. Цей ефект становить особливий інтерес з точки зору довговічності ОК на основі тонких молекулярно напиленних плівок оксиду ЛЗМ (менше 1 мкм).

Детальні дослідження закономірностей кінетики випаровування компонентів і формування складу кристалів оксидів ЛЗМ під впливом електричного поля при паралельних вимірах термоемісійних властивостей вимагали суттєвого перегляду уявлень про фізичну природу явищ, що відбуваються в оксидному шарі при відборі термоемісійного струму, та їх ролі в механізмі струмового активування ОК.

Результати цих досліджень були прямим експериментальним доказом гіпотези про те, що струмове активування ОК не є наслідком електролітичних процесів в оксидному шарі. Тобто немає просторового розділу компонентів у кристалах під дією електричного поля, і що стан оксидного шару при проходженні через нього електричного струму є новим КСС з більш високим надлишком металу, ніж у КСС при тій самій температурі у відсутності струму.

Вони показали, крім того, що збільшення надлишку металу в оксидному шарі ОК зумовлено зменшенням концентрації вільних електронів у поверхні кристалів при відборі термоемісійного струму. З найбільшою ефективністю цей процес протікає у тому випадку, якщо емісійний струм наближається до насичення. Отриманий при цьому надли-

шок металу локалізується, насамперед, на поверхні кристалів оксидів. При цьому, його концентрація в КСС дещо перевищує оптимальну, яка відповідає мінімуму роботи виходу оксидного шару. У випадку кристалів $(\text{BaSrCa})\text{O}$, крім того, ефективність утворення надлишку стронцію при відборі струму значно вища, ніж Ba . З врахуванням екстремальної залежності роботи виходу оксидного шару від співвідношення на поверхні кристалів металу і кисню, з одного боку, і барію та стронцію – з іншого боку, ці результати пояснюють основні закономірності кінетики зміни емісійної здатності ОК у процесі струмового активування. Наприклад, вони пояснюють той факт, що процес струмового активування є процесом, який сам стимулюється та йде з найбільшою швидкістю на тих ділянках поверхні оксидного шару, у яких робота виходу найменша (найбільша густина струму, що відбирається). Завдяки цьому робота виходу даних ділянок швидше досягає мінімального значення, після чого дещо зростає як наслідок збільшення загальної кількості металу над її оптимальною, так і завдяки збільшенню долі Sr в загальному надлишку металу. Суттєвий вплив на ці процеси має емісійна неоднорідність ОК по поверхні.

Внаслідок того, що швидкість утворення надлишку металу максимальна на найбільш активних ділянках поверхні оксидного шару, то, починаючи з моменту, коли їх робота виходу стає мінімальною, а потім починає збільшуватись через зниження струму, що з них відбирається, швидкість генерації надлишку металу в оксидному шарі і, відповідно, швидкість активування ОК уповільнюється. Процес можна суттєво прискорити, якщо вести його не в безперервному, а в періодичному режимі, чергуючи відбір струму насичення з паузами, коли електричне поле вимкнене. Внаслідок більш швидкого видалення під час паузи, утвореного при відборі струму надлишку Sr в струмовому режимі, швидше досягається оптимальне співвідношення концентрацій Ba і Sr у загальному надлишку металу на найбільш активних ділянках поверхні оксидного шару, з одного боку, і прискорюється утворення надлишку металу на менш активних ділянках у результаті перехоплення потоку стронцію в пористому оксидному шарі – з другого боку. Завдяки цьому тривалість активування ОК в цьому режимі скорочується у 3–5 разів, що робить його особливо

перспективним для активування ОК з пасивним керном.

Ці результати з врахуванням емісійної неоднорідності поверхні оксидного шару дозволяють також пояснити особливості зміни емісійної здатності ОК при відборі термоемісійного струму великої густини, наприклад, в імпульсному режимі. І, нарешті, суттєва різниця в швидкостях стимульованого відбору струму утворення надлишку барію і стронцію є однією з головних причин незворотного збільшення роботи виходу ОК при довготривалій роботі в емісійному режимі внаслідок збільшення долі Sr в загальному надлишку металу, і, перш за все, на поверхні кристалів оксидів.

3. Параметри сучасних ОК

Доведено, що структура оксидного шару (густина і пористість, шорсткість поверхні, товщина шару, форма і розмір кристалів, які утворюють шар) і матеріал ядра катода не мають суттєвого впливу на його термоелектронні характеристики, якщо формування його активності вести при тиску менше $5 \cdot 10^{-7}$ Па [7]. Однак технічні характеристики ОК напряму зв'язані з технічними параметрами оксидного шару. Рихлі пористі покриття з крупних кристалів швидше і легше знегажуються і активуються, і при достатньо жорстких режимах обробки можуть втратити значну кількість активної речовини, змінити свій склад з відповідними змінами емісійних властивостей. А от від первинного складу активної речовини ОК емісійна здатність залежить дуже помітно.

Наприклад, емісія катодів з оксалатним покриттям [16] (оксалати ЛЗМ – це MeC_2O_4 , де Me – символ лужноземельного металу (Ba, Sr, Ca)) значно вища, ніж у стандартних оптимально активованих ОК: при $T = 1050$ К в імпульсному режимі вона досягає $15\text{--}20$ А/см², що в 3–5 разів більше, ніж у ОК з карбонатним покриттям. З пониженням температури ця різниця зростає ще більше.

Ефективна робота виходу оксалатних катодів, знайдена за допомогою методу повного струму, в діапазоні температур 750–1050 К становить 1,2–1,35 еВ. Для найкращих зразків звичайних ОК вона дорівнює 1,5–1,55 еВ. На превеликий жаль, автори [16] не отримали даних стосовно довговічності своїх зразків. На основі аналізу характеру зміни емісійної здатності у часі, температурних за-

лежностей швидкостей випаровування компонентів покриття і роботи виходу катодів, а також розжарювальних вольт-амперних характеристик було зроблено тільки прогноз стосовно великого терміну роботи.

Відзначені позитивні якості ОК на основі оксалатів ЛЗМ є наслідком більш сприятливих, в порівнянні з звичайними оксидними катодами, умов утворення однофазного твердого розчину оксидів (BaSr)O при термовакуумній обробці оксалатів.

Помітно кращі параметри, ніж у звичайних ОК, отримані і при введенні в оксидний шар катода оксидів РЗМ. Так, наприклад, ОК з доданками Sc_2O_3 або Eu_2O_3 дозволяють отримувати при температурі 800–830 °С густину струму емісії 2–3 А/см² протягом 1000–4000 годин проти 1500–1000 годин для звичайного ОК [17, 18].

Однак, на сьогоднішній день, фізика роботи ОК з доданками РЗМ залишається нез'ясованою.

Не можна не згадати цікаву розробку сімдесятих років минулого століття – так званий М-катод, або катод на основі молекулярно-напорошеної плівки оксиду (МНПО) [19, 20]. У нього активна речовина така сама, як у звичайного ОК і наноситься вона на такі самі ядра. Але спосіб нанесення зовсім інший: МНПО отримують реактивним розпорошенням іонами аргону мішені з оксидів ЛЗМ стандартного складу, який найбільш часто використовується в катодній техніці. Для стійкості плівки на атмосфері осадження М-покриття проводять в середовищі вуглекислого газу. Отримані таким способом МНПО мають високу густину (до 4,5 г/см³ замість 2,8 г/см³ при звичайному способі нанесення оксидного шару) і являють собою на 60–80% карбонізований оксид, що, з точки зору розробників цього катода, цілком достатньо для забезпечення його стійкості до впливу атмосферного повітря, яке містить пару води, вуглекислий газ, і інші хімічно активні гази по відношенню до оксидів ЛЗМ.

Ці покриття мають також високу гладкість поверхні (внаслідок того, що вона складається з зерен в діаметрі не більше 0,1 мкм [21]), а тому у них висока однорідність струму емісії по поверхні (розкид по роботі виходу електрона від точки до точки не перевищує 0,01 еВ; у звичайних ОК це 0,3–0,5 еВ).

По емісійних параметрах М-катод близький до стандартного ОК, але за рахунок специфіки по-

криття відрізняється рядом особливостей, основними з яких для практичного використання є більш висока емісійна здатність в низькотемпературній області (нижче 900 К) і зменшена у високотемпературній.

Довговічність М-катодів квадратично збільшується з ростом товщини МНПО і різко падає при збільшенні температури [22]. Наприклад, при 870 К, струмовідборі $0,1 \text{ А/см}^2$ і товщині катода 0,8 мкм довговічність досягає 10000 годин. При 920–990 К густина струму, що відбирається, досягає $0,4\text{--}1,0 \text{ А/см}^2$ при довговічності 4000–1500 годин і товщині 0,7–1,8 мкм. Збільшення товщини МНПО призводить до погіршення його адгезії до керна.

Обмеження довговічності М-катодів пов'язано не з значним випаровуванням активної речовини, а зумовлено, в основному, збідненням поверхні оксидного шару Ва-компонентою [22]. Згідно з [23] це пов'язане з обмеженням дифузії через оксидний шар до поверхні барію. На думку авторів [24], більш ймовірною причиною, яка знижує термін роботи цих катодів, є втрата Ва-компоненти за рахунок випаровування, в основному, гідроксиду барію $\text{Ba}(\text{OH})_2$. Його наявність в М-катоді пов'язана, скоріш за все, з недостатньо високим ступенем карбонізації МНПО. Ця думка базувалася на результатах мас-спектрометричних досліджень [25–27], згідно з якими кількість ВаО, яка випаровується за весь термін роботи катода, становить всього 0,01% Ва-компоненти МНПО. Втрата ж цієї компоненти за рахунок випаровування $\text{Ba}(\text{OH})_2$ вже на початковому етапі роботи досягає 5–10% від загального запасу, що призводить до передчасної зміни оптимального співвідношення Ва- і Sr-компоненти на поверхні М-катода, а отже, до суттєвого падіння емісійної здатності катода [28].

Автори [29] поставили під сумнів можливість випаровування з М-катодів $\text{Ba}(\text{OH})_2$. Вони вважають, що випаровується BaCl^+ і зв'язують його утворення в МНПО з технологічним процесом виготовлення ЕВП. Але ж вони погоджуються з можливістю втрати через цей канал суттєвої долі Ва-компоненти МНПО.

Розуміючи, що ступінь карбонізації покриття М-катода безпосередньо після виготовлення є дуже важливою характеристикою для МНПО, автори [30–32] ретельно вивчили вплив умов наплення М-покриття для отримання максимально-

го ступеня його карбонізації. Вони показали, що ця характеристика покриття дуже критична до положення керна катода відносно іонно-оптичної осі системи розпорощення. В області, яка прилягає до осі, карбонатів найменше: ступінь карбонізації не перевищує 0,25–0,3. Ступінь карбонізації залежить також від температури керна катода в процесі осадження оксидів. При цьому, якщо карбонізація менше 30%, то М-покриття не стійке на повітрі і легко гідратується, тобто перетворюється в гідроксиди, кристалогідрати та гідрокарбонати, які є причиною руйнування покриття.

Авторам [30–32] вдалося знайти оптимальний режим осадження активного шару М-катодів, підібравши необхідну швидкість розпорощення мішені та розташувавши kern катода за межами зони, де переважно осаджуються оксиди, які схильні до гідротації при експонуванні на повітрі. Цей режим дозволив їм отримувати М-покриття майже з 100% карбонізацією. Крім того, їм вдалося створити М-католи, покриття яких є твердим високоомогенним розчином із складом, конгруентним складу мішені, що є запорукою виробництва МНПО з високою емісійною здатністю та високою відтворюваністю експлуатаційних параметрів. І, як результат, використання цих катодів у багато каскадних монолітних підсилювачах на вакуумних інтегральних схемах [33].

Аналіз дискусії про наявність $\text{Ba}(\text{OH})_2$ в МНПО між авторами [24–27] та [19–23, 29] з врахуванням результатів роботи [30–32] дозволяє зробити такі висновки: 1) можливість утворення в покритті М-катодів $\text{Ba}(\text{OH})_2$ при їх виготовленні з оксидів ЛЗМ при використанні плазмового методу не виключається; 2) отримання М-катодів з високим ступенем карбонізації покриття цим методом не проста задача і потребує дуже чітко відпрацьованої технології виробництва. Тобто завжди існує певна можливість виготовлення зразків з порушеним фазовим складом на користь оксидів.

Незважаючи на високу ефективність ОК, яка дозволила їх використовувати в багатьох ЕВП і, навіть, в ЕВП НВЧ діапазону (наприклад, в супутникових лампах біжучої хвилі на частотах 3,7–4,2 ГГц з вихідною потужністю до 20 ват [34]), оксидні католи мають і помітні недоліки. Це стосується, в першу чергу, довговічності при відборі струмів в одиниці ампер з квадратного сантиметра. Крім того, у них низька стійкість до отруєн-

ня газами, що містять кисень, низька стійкість до механічних навантажень, після активування їх не можна виносити на повітря. Останній недолік не дозволяє використовувати оксидні катоди у приладах спеціального призначення.

Сучасний розвиток науки та техніки потребує для супутникового зв'язку, РЛС та РПД, особливо у міліметровому діапазоні хвиль (частоти вище 30 ГГц), НВЧ приладів ще більшої вихідної потужності при довговічності у десятки тисяч годин. Для таких приладів потрібні катоди, які здатні забезпечити густину струму емісії до десятків ампер з квадратного сантиметра при довговічності у тисячі годин. З усіх типів емітерів, які використовуються на сьогоднішній день, найбільш перспективними для застосування в таких приладах є металевопоористі катоди (МПК).

4. Металевопоористі катоди

Історія розвитку металевопоористих катодів почалася з металевопоористих вольфрамобарієвих камерних катодів, або, як їх прийнято називати в літературі, L-катодів, розроблених у 1950 році Лемменсом зі співробітниками (фірма Philips). В будь-якому L-катоді є камера з активною речовиною [4]. Камера щільно закривається пористою губкою, зовнішній бік якої є емітуючою поверхнею. В ролі активної речовини використовувалися карбонати ЛЗМ або вольфрамати чи алюмінати Ва–Са. Губка катода – найважливіша його частина – виготовлялася звичайно з вольфрамового порошку певної зернистості, щоб отримати потрібний розмір пор. При прогріві у вакуумі активна речовина розкладається з виділенням Ва та ВаО, які дифундують через пори на поверхню зерен і активують їх. L-катоди мали високу емісійну здатність: дозволяли відбирати густину струму емісії до 5 A/cm^2 у постійному режимі та декілька десятків A/cm^2 в імпульсному режимі з обмеженням струму емісії просторовим зарядом при температурі не вище 1500 К. Вони витримували велике теплове та механічне навантаження, мали високу стійкість до впливу кисню і пари води при монтажі ЕВП. L-катоди, крім того, невибагливі до умов зберігання.

Однак такі недоліки L-катодів, як складність виготовлення, а значить висока собівартість, велика тривалість активування, достатньо висока робоча температура та нерівномірність розігріву робочої

поверхні, яка приводила до помітної емісійної неоднорідності, стимулювали роботи по їх удосконаленню. І тому вже у 1954–1957 роках Леві, Броді та Губером були запропоновані і досліджені просочені (імпрегновані) та пресовані металевопоористі катоди (ІМПК та ПМПК відповідно).

5. Імпрегновані та пресовані металевопоористі катоди

Ці катоди являють собою пористу губку з порошкоподібних металів типу W, Re, Mo або їх суміші, пори якої заповнені активною речовиною. При цьому у ІМПК активною речовиною просочується заздалегідь виготовлена губка, а у ПМПК губка пресується і спікається одночасно з активною речовиною [4]. За складом активної речовини розрізняють алюмінатні, вольфраматні, алюмосилікатні та інші МПК. При прогріві у вакуумі відбуваються складні процеси взаємодії активної речовини з матеріалом губки та термічна дисоціація окремих сполук з виділенням, як і у випадку L-катодів, Ва та ВаО, які дифундують на поверхню зерен і активують їх.

Зрозуміло, що експлуатаційні параметри усіх типів металевопоористих катодів залежать як від параметрів губки, так і від складу активної речовини [4].

Матеріал губки визначає, по-перше, ефективність утворення вільної Ва-компоненти з первинної активної речовини; по-друге, енергію зв'язку Ва та ВаО на робочій поверхні катода, а отже, їх швидкість випаровування, від якої залежить довговічність. Крім того, енергія зв'язку активно впливає на кількість Ва-компоненти на зернах губки, а отже на агрегатний стан адсорбату: його розташування на зернах губки у вигляді двовимірної плівки чи об'ємних утворень – кристалітів. Тобто матеріал губки активно впливає на емісійну здатність МПК. Пористість губки, як і діаметр пор, напряму визначають швидкість випаровування активної речовини. Є залежність випаровування і від товщини губки. Розміри зерен губки, пор та їх розподіл по поверхні губки визначають емісійну однорідність МПК.

Завдання активної речовини – максимально знизити роботу виходу матеріалу губки та забезпечити найвищу емісійну активність катода тисячі годин. На сьогоднішній день розроблена велика

кількість емісійно-активних речовин. Це вольфрамати, алюмінати, алюмосилікати Ва–Са, скандати Ва, вольфрамати Sr та ін. При цьому одних тільки алюмінатів існує декілька типів [4].

Застосування того чи іншого складу активної речовини на практиці зумовлено умовами роботи джерела електронів в ЕВП. Крім того, при виготовленні приладів дуже важливо, щоб катоди володіли гарною повторюваністю параметрів. У зв'язку з цим не можна не згадати алюмінат Ва–Са складу $2,4\text{BaO}\cdot 0,6\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ [35], який практично не містить вільного оксиду барію, а отже вплив атмосферного повітря зводиться нанівець.

Уся історія існування МПК – безперервний рух у напрямку вдосконалення шляхом розробки механізму його емісії. Найбільш важливими етапами розвитку металевих пористих катодів вважаються такі: нанесення плівок тугоплавких металів та металів платинової групи на їх емітуючу поверхню [36] та введення в МПК оксиду скандію Sc_2O_3 [37]. Перше вдосконалення, коли на поверхню катода напорошувалась плівка осмію субмікронних товщин, дозволило при температурі 1100 К підняти емісійну активність практично в десять разів. Друге вдосконалення, коли Sc_2O_3 , наприклад, ввести в губку МПК, а потім просочити її алюмінатом Ва–Са, дозволило для отримання однакового струму емісії знизити робочу температуру катода на 100 К [38]. Згодом параметри Sc–Ва катодів вдалось підняти на рекордний за всю історію існування термокатодів рівень – до 460 А/см² при температурі 1030 °С [39].

Однак, незважаючи на такий вражаючий результат, в літературі немає єдиної точки зору на механізм емісії МПК, і особливо МПК з доданком Sc_2O_3 . На сьогоднішній день в цьому питанні існують найбільш розбіжності, хоча основні гіпотези про можливу структуру та елементний склад емітуючої поверхні металевих пористих катодів були висунуті ще в перші роки їх застосування [40]. Основні з них три: 1) МПК є катодом металоплівковим, тобто основний внесок в емісію катода вносить поверхня зерен губки, вкрита субмоношаровою плівкою активатора [41]; 2) за високу активність МПК відповідають тривимірні структури активної речовини на поверхні катода [42], які ототожнюються з високотемпературними оксидними мікрокатадами [43]; 3) основне джерело електронів – поверхня пор, що заповнена алюмінатом

Ва–Са [44]. Найбільш домінуючими на сьогоднішній день є дві перші точки зору на структуру емітуючого шару МПК: [45–47] та [48, 49] відповідно, а також ще одна точка зору, висловлена Залмом [50] і підтримана [51, 52], згідно з якою поверхня катода має два джерела електронів – і кристаліти, і плівка Ва-компоненти. При цьому, як було доведено пізніше, якщо катод працює у надвисокому вакуумі на рівні 10^{-7} Па, то емісійна картина катода однорідна. При тисках, які відповідають реальним умовам роботи ЕВП, висока емісія на поверхні МПК спостерігається тільки в областях з товстим покриттям [53].

Враховавши складнощі в поясненні ряду експериментальних фактів у прибічників плівкової моделі МПК, проаналізувавши вакуумні умови, в яких проводилися експерименти, порівнявши технологічні параметри катодів, способи їх виготовлення та підготовки до досліджень у різних авторів, а також спираючись на результати попередніх досліджень у цьому напрямку, проведені у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка [54–59], було зроблено висновок про те, що роль тривимірних структур – кристалітів активної речовини – у механізмі емісії металевих пористих катодів безпідставно припущено. Причиною цього є недооцінка впливу властивостей пористої матриці, технології виготовлення катодів та умов термовакуумної обробки у вакуумних приладах на структуру їх емітуючого шару. Тому після таких висновків були проведені комплексні дослідження широкого кола металевих пористих та оксидних катодів з застосуванням мас-спектрометрії, оже-спектрометрії, емісійної та скануючої мікроскопії, рентгенівського мікроаналізу та емісійних вимірів у діодній системі [60–66]. Результати по впливу водню на випаровування та активність зразків слугували додатковим методом досліджень [57, 58].

В ролі зразків використовувалися МПК з різними технологічними параметрами. Вони відрізнялися, по-перше, параметрами губки, а саме: матеріалом губки (вольфрамовий та реній-вольфрамовий порошки), її пористістю, що змінювалась в широких межах, гранулометричним складом губки, який варіювався від 1 мкм до 40 мкм, мікрогеометрією робочої поверхні (механічна обробка поверхні та іонне травлення після виготовлення), а також наявністю або відсутністю на

ній плівки тугоплавких металів типу Os–Ir–Al. По-друге, активною речовиною. Для МПК з Re–W губкою використовувався алюмінат Ва–Са складу $3\text{BaO}\cdot 0,5\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, а для МПК з W губкою алюмінат з більшим вмістом оксиду кальцію по відношенню до ВаО: $2,4\text{BaO}\cdot 0,6\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Більш широкі відомості про технологію виготовлення цих МПК наведено в [67]. (Усі катоди для досліджень були надані НДІ “Оріон”, м. Київ).

Підсумком вивчення фізико-хімічних та емісійних властивостей МПК, що відрізняються різними технологічними параметрами, є такі основні висновки.

1. У процесі термовакуумної обробки на поверхні як без плівкових МПК, так і вкритих плівкою Os–Ir–Al, утворюються і підтримуються тривимірні структури (кристаліти) оксидів ЛЗМ, активовані барієм; і саме вони вносять основний внесок в емісійну здатність катодів. Можливість утворення кристалітів і їх існування при робочій температурі зумовлені наявністю в МПК помітної кількості оксиду барію, який утворюється за рахунок термічної дисоціації алюмінату Ва–Са при виготовленні катода, і його дифузії на робочу поверхню. Висока термічна стійкість об’ємних утворень оксидів ЛЗМ забезпечується високою енергією зв’язку оксиду кальцію з матеріалом губки, на зернах якої мікрористали СаО є центром зародкоутворення кристалітів активної речовини.

2. Підвищення емісійної здатності МПК при нанесенні на їх робочу поверхню плівки Os–Ir–Al зв’язане зі збільшенням на цій поверхні вмісту активної речовини у вигляді кристалітів оксидів ЛЗМ. Встановлено, що плівка Os–Ir–Al складним чином змінює швидкість випаровування Ва-компоненти. Характер випаровування визначається пористістю губки: напилення плівки Os–Ir–Al товщиною 0,3 мкм на катоди з великою пористістю зменшує потік активної речовини, на катоди з середньою пористістю – збільшує, з малою – практично не змінює.

3. Наявність в МПК перед термовакуумною обробкою в ЕВП карбонату барію BaCO_3 , залежність емісійної здатності катодів від парціального тиску CO_2 над зразками при знегажуванні, кореляція між порогом емісії МПК і моментом практично повного розкладу карбонату барію, збігання загальних і ряду окремих закономірностей в фізико-хімічних процесах при взаємодії водню

з МПК і ОК дозволяє стверджувати, що дійсно металево-пористий катод, у крайньому разі, на початку терміну роботи – високотемпературна, але більш складна модифікація оксидного катода.

4. При знегажуванні МПК вільний барій, відповідальний за емісію термокатодів на основі ЛЗМ, утворюється вже на самих початкових етапах цього процесу. Збереження металічного барію до кінця знегажування дозволяє катодам набутися високої активності і без додаткового високотемпературного прогріву. Якщо довговічність МПК, як і ОК, визначається випаровуванням декількох відсотків Ва-компоненти, то відсутність високотемпературного прогріву, який призводить до нераціонального використання активної речовини, може сприяти збільшенню довговічності і надійності роботи ЕВП.

5. Металево-пористі катоди з Re–W губкою мають більш високу емісійну здатність, ніж МПК на основі вольфраму, що пов’язане як з більшою площею робочої поверхні, яка зайнята активною речовиною у вигляді кристалітів оксидів ЛЗМ, так і з більш високою емісійною здатністю моношарової плівки Ва-компоненти на зернах губки з ренію.

6. Пористість губки суттєво впливає на емісійну здатність МПК тільки для катодів, в губку яких введений реній. Існують такі параметри губки, за яких співвідношення між кількістю Ва-компоненти, що випаровується, і тією, що потрапляє на поверхню катода таке, що площа, зайнята активатором, максимальна. У зв’язку з цим максимальна і активність катода, величина якої відповідає найкращим зразкам МПК, вкритих плівкою Os–Ir–Al. Тобто існує можливість отримання високоемісійних металево-пористих катодів і без напилення плівки на основі осмію та ірідію, які дорого коштують.

Для МПК з вольфрамовою губкою пористість і розмір її зерен при рівних інших умовах суттєво впливають на струм емісії тільки в початковий період активування катодів. У кінцевому підсумку активність зразків від цих параметрів не залежить. При зменшенні діаметра частинок та пористості губки збільшується тільки час для досягнення максимальної емісійної здатності МПК: необхідно проводити декілька циклів активування.

7. Геометричний мікрорельєф поверхні МПК визначає швидкість випаровування активної речовини і співвідношення серед продуктів випаровуван-

ня між вільним та окисленим барієм. У катодів, робоча поверхня яких пройшла корекцію за допомогою іонного травлення, сумарний потік Ва-компоненти вище, ніж із МПК з механічною обробкою поверхні. При цьому у іонно-травлених катодів потік барію помітно переважає над потоком оксиду барію у всьому діапазоні робочих температур. Менша швидкість випаровування ВаО у цих зразків може сприяти збільшенню часу життя кристалітів оксидів ЛЗМ, які відповідають за високу емісійну здатність металевих пористих катодів.

8. Активна речовина з МПК випаровується в основному у вигляді Ва, ВаО та Ва(ОН)₂. Наявність серед продуктів випаровування металевих пористих катодів гідрооксиду барію, як і випадку М-катодів, може вносити свій внесок в зменшення довговічності МПК. Однак на відміну від них в МПК втрата Ва-компоненти за рахунок випаровування Ва(ОН)₂ є відносно невеликою і суттєво не відбивається на довговічності.

Зіставлення наведених висновків з врахуванням літературних даних по цьому питанню дозволило авторам [67, 68] представити основні етапи становлення МПК як ефективного джерела електронів таким чином.

Після виготовлення катода його активна речовина, крім алюмінату Ва–Са, містить помітну кількість вільного оксиду барію. За рахунок поглинання пари води з оточуючої катод атмосфери ВаО гідратизується, а потім завдяки наявності у повітрі вуглекислого газу частково перетворюється в карбонат барію ВаСО₃. При термовакуумній обробці під час підвищення температури катод звільняється від газових забруднень і шкідливих доданків, відбувається розклад карбонату барію, йдуть реакції по утворенню вільного барію, який відповідає за емісію термокатодів на основі оксидів ЛЗМ. Основна з них – хімічна реакція матеріалу губки (вольфраму) з алюмінатом Ва–Са. Якщо тиск СО₂ над МПК в цей період нижче, ніж 10⁻⁵ Па, то вміст барію в зразку до кінця знегажування стає помітним. ВаО і Ва дифундують до поверхні губки і активують її: в гирлах пор і на зернах губки утворюються тривимірні структури оксидів ЛЗМ, що активовані барієм. При цьому кристали оксиду кальцію є центром зародкоутворення цих структур. І саме об'ємні утворення оксидів ЛЗМ вносять основний внесок в емісійну здатність катода. Моношарова плівка Ва-компоненти в цей період

слугує, в основному, каналом для потрапляння до кристалітів активної речовини. Якщо губка МПК містить реній, то ця плівка на зернах ренію, крім того, може бути помітним додатковим джерелом електронів.

Погіршення емісійної здатності катодів в процесі роботи пов'язане зі збідненням їх емітуючої поверхні активною речовиною, особливо Ва-компонентою. В результаті цього процесу утворюються умови, які перешкоджають підтримці кристалітів. Час життя цих тривимірних структур визначається запасом оксиду барію, що утворюється при виготовленні катода, а також у процесі роботи, і залежить як від технологічних параметрів його губки (геометричного мікрорельєфу емітуючої поверхні, пористості губки і розміру її частинок), так і робочої температури МПК, які впливають на швидкість випаровування ВаО.

6. МПК з доданком Sc₂O₃

МПК з доданком оксиду скандію на сьогоднішній день мають найвищу емісійну здатність серед термоелектронних катодів, вони дуже стійкі до отруєння атмосферним повітрям і їх вже навіть рекомендовано для застосування в прискорювачах заряджених частинок, в плазмотронах та електро-реактивних двигунах космічних літальних апаратів [69]. Проте такі недоліки, як нерівномірний розподіл емісії по поверхні, аномальна залежність густини струму емісії від напруги електричного поля, низька стійкість до іонного бомбардування та погана відтворюваність експлуатаційних параметрів не дозволяють перейти до їх широкого застосування в різних галузях приладобудування, незважаючи на те, що дослідженню цих проблем присвячено багато робіт останніх років [70–106].

Автор роботи [96] впевнений, що усі перелічені недоліки тісно пов'язані з недосконалою структурою губки: різні за розмірами зерна губки не дають можливості створити однорідну робочу поверхню як за розмірами пор, з яких на робочу поверхню дифундує активна речовина, так і за розмірами конгломератів з зерен губки, де і відбуваються основні фізико-хімічні процеси, що забезпечують високу емісійну здатність МПК. Крім того, автор цієї роботи також звертає увагу на конструкцію підігрівача катода, від якої залежить градієнт температури по поверхні і, отже, однорідність емісії.

Автори робіт [97–99] також вважають, що фізико-технічні параметри губки Sc–Ba МПК є одним з основних факторів, який визначає неоднорідність поверхні катодів по роботі виходу.

Крім того, неоднорідна емісія може бути пов'язана з нерівномірним розподілом скандію по зернах губки, який відіграє значну роль у збільшенні емісії катодів. Для помітного усунення вказаних вище недоліків в [79, 100] було запропоновано до вольфрамового порошку додати оксид скандію та реній у певних пропорціях з застосуванням так званого твердо-рідинного методу, поєднаного з двоступеневим методом відновлення.

Така модифікована технологія виготовлення губки катодів дозволила авторам [100] в подальшому [101] отримати густину струму емісії 31 A/cm^2 при яскравій температурі $850 \text{ }^\circ\text{C}$ з суттєво покращеним розподілом скандію по зернах губки. При цьому для оптимальної емісії співвідношення Ba:Sc:O на поверхні катода повинно бути 1,6:1:2,25.

У зв'язку з тим, що скандій є досить дорогим матеріалом, автори роботи [102] зробили спробу часткової заміни оксиду скандію Sc_2O_3 оксидом Європію Eu_2O_3 . Але спроба виявилася не дуже вдалою: емісійна здатність зразків з доданком Eu_2O_3 була нижчою від Sc–Ba МПК.

Оскільки об'єкт досліджень є складною, багатокомпонентною, багатофазною системою, безпосереднє вивчення фізико-хімічних та емісійних властивостей Sc–Ba МПК не принесло бажаних результатів і серед дослідників не сформувалася єдина точка зору на механізм емісії таких катодів. Так, більшість зарубіжних авторів знаходиться на позиції плівкової моделі механізму емісії, зазначаючи, що у випадку скандатних МПК емісійно-активний комплекс складається з барію, скандію та кисню, при цьому скандій знаходиться на найнижчому рівні. У той самий час результати робіт, проведених у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, свідчать на користь тривимірних структур активної речовини на поверхні скандатних зразків. Щоб вирішити це питання було запропоновано проводити експерименти з моделювання еміючої поверхні катодів та порівнювати отримані результати з результатами досліджень реальних високоактивних МПК [81–94].

Було доведено, що між рівнем емісії скандатного металевопопоролистого катода і присутністю скан-

дієвої компоненти на його робочій поверхні існує тісний взаємозв'язок. Він полягає в тому, що висока емісійна здатність зразків спостерігається за наявності в оже-спектрі їх робочій поверхні ожеліній скандієвої компоненти. При цьому є певний оптимум у кількості оксиду скандію на зернах губки [75].

Комплексний аналіз робіт [65–67, 70, 78, 81, 82, 87, 95] та їх зіставлення з сукупністю даних інших авторів, які займаються проблематикою скандатних катодів, дозволяє стверджувати, що введення оксиду скандію у будь-яку частину металевопопоролистого катода перетворює його з термоелектронного на термоавтоелектронний. Термопольовий характер емісії МПК зі скандієм обговорюється також авторами [103, 104].

Роль скандієвої компоненти в збільшенні емісійного струму полягає в створенні умов для суттєвого зростання саме автоемісійної складової загального струму шляхом сприяння збільшенню кількості та зміни форми емітуючих центрів – кристалітів окислів лужноземельних металів. При цьому хімічний склад кристалітів окислів лужноземельних металів у випадку скандатного металевопопоролистого емітера є таким, що сприяє суттєво глибшому проникненню електричного поля в їх об'єм, наслідком чого також є зростання автоемісійної складової загального анодного струму [95].

Незважаючи на помітні успіхи в технології виробництва Sc–Ba МПК, розробників електровакуумних приладів НВЧ діапазону досягнуті емісійні параметри катодів поки що не задовольняють і особливо з точки зору однорідності робочої поверхні по роботі виходу. Тому роботи по удосконаленню фізико-технічних характеристик таких катодів активно продовжуються [105, 106].

1. Н.Д. Моргуліс, *Успехи физических наук* **53(4)**, 501 (1954).
2. Г. Герман, С. Вагнер, *Оксидный катод* (Гостехиздат, Москва–Ленинград, 1949).
3. Е.С. Ритгнер, *Теоретическое исследование химии оксидного катода. В сб. статей "Оксидный катод"* (Госэнергоиздат, Москва, 1957).
4. Г.А. Кудинцева, А.И. Мельников, А.В. Морозов, Б.П. Никонов, *Термоэлектронные катоды* (Энергия, Москва–Ленинград, 1966).
5. Б.Я. Мойжес, *Физические процессы в оксидном катоде* (Наука, Москва, 1968).

6. П. Залм, *Термоэлектронные катоды. (Обзор)*, пер. с англ. под ред. Б.П. Никонова (ОНТИ, 1970).
7. В.П. Никонов, *Оксидный катод* (Энергия, Москва, 1979).
8. В.Т. Черепин, М.А. Васильев, *Методы и приборы для анализа поверхности материалов. Справочник* (Наукова думка, Киев, 1982).
9. Б.П. Никонов, К.С. Бейнар, *Радиотехника и электроника* **15(6)**, 12722 (1970).
10. Б.П. Никонов, *Изв. АН СССР. Сер. Физическая* **35(2)**, 270 (1971).
11. К.С. Бейнар, Б.П. Никонов, *Изв. АН СССР. Сер. Физическая* **35(2)**, 286 (1971).
12. Б.П. Никонов, *ФТТ* **15(5)**, 1481 (1973).
13. А.М. Соколов, Б.П. Никонов, *Изв. АН СССР. Сер. Физическая* **40(12)**, 2472 (1976).
14. Г.Я. Пикус, Г.Е. Чайка, В.Ф. Шнюков, *УФЖ* **37(7)**, 1021 (1992).
15. V.F. Shnyukov, G.E. Chaika, and G.Ya. Pikus, *Progress in Surface Science* **51(3)**, 175 (1996).
16. Г.Я. Пикус, С.П. Ракитин, В.И. Самійленко, В.Ф. Шнюков, *Изв. РАН. Сер. Физическая* **62(10)**, 2051 (1998).
17. M. Saito, R. Suzuki, K. Fukuyama, K. Watanabe, K. Sano, and H. Nakanishi, *IEEE Trans* **37(12)**, 2605 (1990).
18. Y. Hayashida, N. Ozawa, and H. Sakutai, *Appl. Surf. Sci.* **146(1-4)**, 7 (1999).
19. А.В. Дружинин, Ю.А. Кондрашенков, *Радиотехника и электроника* **18(7)**, 1531 (1973).
20. Ю.А. Кондрашенков, З.Н. Галанина, А.В. Дружинин, *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*, вып. 6, 55 (1974).
21. Л.А. Ашкинази, В.А. Злобин, *Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы*, вып. 3, 10 (1982).
22. Ю.А. Кондрашенков, З.Н. Галанина, А.В. Дружинин, *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*, вып. 7, 35-48 (1974).
23. А.Я. Князев, *Тезисы докладов 18 Всесоюзной конференции по эмиссионной электронике*, 143 (Наука, Москва, 1981).
24. В.Ф. Шнюков, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин, А.И. Зуев, *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*, вып. 4, 42 (1981).
25. В.Ф. Шнюков, А.Е. Лушкин, *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*, вып. 1, 58 (1978).
26. В.Ф. Шнюков, А.Е. Лушкин, *Вести Киевского ун-та. Физика* **19**, 61 (1973).
27. В.Ф. Шнюков, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин, *Вестник Киевского ун-та. Физика* **20**, 88 (1979).
28. В.Ф. Шнюков, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин, *Вести Киевского ун-та. Физика* **26**, 62 (1985).
29. Ю.Ф. Клементьев, А.Я. Князев, Е.Н. Лифанцев, *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*, вып. 10, 23 (1986).
30. А.Н. Говядинов, П.П. Мардилович, *Институт электроники АН БССР. Минск, 20 с. Деп. В ЦНИИ "Электроника". № Ц4272* (1986).
31. Д.И. Алейникова, А.Н. Говядинов, *Электронная техника. Сер. 6. Материалы*, вып. 6, 22 (1988).
32. А.Н. Говядиной, И.Л. Григоришин, П.П. Мардилович, П.А. Ананич, *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*, вып. 6, 36 (1989).
33. I.L. Grigorishin, I.F. Kotova, and N.I. Mukhorov, *IVESC'96 G16/101*.
34. В.И. Козлов, *Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. М. ЦНИИ "Электроника"*, вып. 6, (1980).
35. Н.П. Бродниковский, Л.А. Верменко, О.И. Коновалок и др., *Электронная техника. Сер. Материалы*, вып. 4, 20 (1980).
36. P. Zalm and A.J.A. Van Stratum, *Philips Tech. Rev.* **27**, 69 (1966).
37. A. Oostrom and L. Vanr Augustus, *Appl. Surf. Sci.* **2(2)**, 173 (1979).
38. S. Yamamoto, S. Tagushi, T. Aido *et al.*, *Appl. Surf. Sci.* **17**, 504 (1984).
39. G. Gartner, P. Geittner, D. Raasch, and D.U. Wiechert, *Appl. Surf. Sci.* **146**, 22 (1999).
40. В.М. Скрылева, *Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ*, вып. 5 (ЦНИИ "Электроника", Москва, 1976).
41. Е.С. Риттнер, В.К. Ратледж, Р.Г. Алерт, *В сб. Эффективные термокатоды* (Госэнергоиздат, Москва-Ленинград, 1960), **2**, 320.
42. A. Ahmed, *Sci. Progr. Oxi.* **57**, 259 (1969).
43. А.В. Дружинин, *Радиотехника и электроника* **10(3)**, 498 (1965).
44. И. Броди, Р.О. Дженкинс, *В сб. Эффективные термокатоды* (Госэнергоиздат, Москва-Ленинград, 1960), **2**, 334.
45. G.A. Haas, C.R.K. Marrian, and A. Shih, *Appl. Surf. Sci.* **3/4**, 430 (1985).
46. A.W. Denier van der Gon, M.F.F.K. Jongen, H.H. Bronngersma, U. van Slooten, and A. Manenschijn, *Appl. Surf. Sci.* **111**, 64 (1997).
47. R. Cortenraad, A.W. Deiner van der Gon, H.H. Bronngersma, G. Gartner, and A. Manenschijn, *Appl. Surf. Sci.* **7944**, 1 (2002).
48. А.П. Макаров, О.К. Култашев, Е.Д. Куранова и др., *Радиотехника и электроника* **36(11)**, 2196 (1991).
49. В.Ф. Шнюков, А.Е. Лушкин, *Радиотехника* **100**, 267 (1996).
50. П. Залм, *Термоэлектронные катоды. (Обзор)*, перевод с англ. Б.И. Москалева, под ред. Б.П. Никонова (ОНТИ, 1970).
51. Б.Б. Шишкин, *Изв. АН СССР. Серия физическая* **38(11)**, 2279 (1974).
52. Ю.В. Гурков, А.В. Дружинин, А.А. Исаев и др., *Изв. АН СССР. Сер. Физическая* **38(II)**, 2264 (1974).

53. C.E. Melony, and N. Richardson, Appl. Surf. Sci. **8(1/2)**, 2 (1981).
54. В.Ф. Шнюков, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин и др., Радиотехника и электроника **24(6)**, 1184 (1979).
55. В.Ф. Шнюков, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин и др., Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ **8(320)**, 25.
56. В.Ф. Шнюков, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин и др., Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ **6(342)**, 36 (1982).
57. В.Ф. Шнюков, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин и др., Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ **9**, 40 (1984).
58. В.Ф. Шнюков, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин и др., Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы **1**, 8–12 (1985).
59. В.Ф. Шнюков, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин и др., Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ **8(392)**, 30 (1986).
60. В.Ф. Шнюков, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин и др., Известия АН СССР. Сер. Физическая **52(8)**, 1500 (1988).
61. В.Ф. Шнюков, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин и др., Электронная техника. Сер. А. Электровакуумные и газоразрядные приборы **4**, 50 (1989).
62. В.Ф. Шнюков, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин, А.Н. Божко, Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ **5**, 24 (1991).
63. В.Ф. Шнюков, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин и др., Известия АН СССР. Сер. Физическая **5(12)**, 2357 (1991).
64. О.И. Гетьман, А.Е. Лушкин, В.В. Паничкина и др., Известия РАН. Сер. Физическая **58(10)**, 76 (1994).
65. В.Ф. Шнюков, А.Е. Лушкин, Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник "Радиотехника" **100**, 267 (1997).
66. О.И. Гетьман, В.В. Паничкина, С.П. Ракитин, А.Е. Лушкин, Порошковая металлургия **11/12**, 97 (2005).
67. А.Е. Лушкин, *Роль кристаллитов щелочно-земельных металлов в механизме эмиссии металлопористых катодов. Канд. дис.* (Киев, 1996)
68. В.Ф. Шнюков, *Фізико-хімічні і емісійні властивості термокатодів на основі окислів лужно-земельних металів. Докторська дис.* (Київ, 1994)
69. С.И. Планковский, Е.К. Островский, Е.В. Цегельник, Авиационно-космическая техника и технология **2(49)**, 78 (2008).
70. В.Ф. Шнюков, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин, С.П. Ракитин и др., Изв. РАН. Сер. Физическая **58(10)**, 171 (1994).
71. G. Gartner, P. Geittner, H. Lydtin, and A. Ritz, Appl. Surf. Sci. **111**, 11 (1997).
72. S. Sasaki, I. Amano, T. Yaguchi, N. Matsuzaki, E. Yamada, S. Taguchi and M. Shibata, Appl. Surf. Sci. **111**, 18 (1997).
73. S. Sasaki, T. Yaguchi, N. Mori, S. Taguchi, and M. Shibata, Appl. Surf. Sci. **146**, 17 (1999).
74. Eiichirou Uda, Osamu Nakamura, Sadao Matsumoto, and Toshiharu Higuchi, Appl. Surf. Sci. **146**, 31-38 (1999).
75. S. Sasaki, T. Yaguchi, Y. Nonaka, S. Taguchi, and M. Shibata, Appl. Surf. Sci. **195**, 214 (2002).
76. P. Geittner, G. Gartner, and D. Raasch, J. Vac. Sci. Technol. **18(2)**, 997–999 (2000).
77. G. Gaertner, P. Geittner and D. Raasch., Appl. Surf. Sci. **201**, 61 (2002).
78. І.І. Бех, В.В. Льченко, О.М. Костюкевич, О.Є. Лушкін, Вісник Київського університету, Серія: Фіз.-мат. науки **2**, 236 (2003).
79. Jinshu Wang, Yiman Wang, Siwu Tao, Hongyi Li, Jiancan Yang, and Meiling Zhou, Appl. Surf. Sci. **215**, 38 (2003).
80. Ji Li, Suqiu Yan, Wensheng Shao, Qilue Chen, and Min Zhu, Appl. Surf. Sci. **215**, 49 (2003).
81. В.Ф. Шнюков, А.Д. Горчинский, А.Е. Лушкин, Изв. РАН, Сер. Физическая **58(10)**, 166 (1994).
82. В.Ф. Шнюков, А.Д. Горчинский, Б.И. Михайловский, А.Е. Лушкин, В.Н. Телега., Фіз.-хім., струк. та емісійні власт. тонк. плівок і пов. тв. тіла. Темат. зб. наук. праць під ред. М.Г. Находкіна. Запоріжжя **2(1)**, 158 (1995).
83. W. Muller, Appl. Surf. Sci. **111**, 30 (1992).
84. P.M. Zagwijn, J.W.M. Frenken, U. Van Stoelen, and B.A. Duine, Appl. Surf. Sci. **111**, 35 (1997).
85. S.H. Magnus, D.N. Hill, and W.L. Ohlinger, Appl. Surf. Sci. **111**, 42-49 (1997).
86. Shih, J.E. Yater, and R. Abrams, Appl. Surf. Sci. **146**, 1-6 (1999).
87. І.І. Бех, О.Є. Лушкін, Ю.А. Лень, Вісник Київського університету, Серія: Радіофізика та електроніка **3**, 16 (2001).
88. Shih, J.E. Yater, C. Hor, R. Abrams., Appl. Surf. Sci. **7931**, 1 (2002).
89. S. Iida, T. Tsujita, T. Nagatomi, and Y. Takai, Surf. Interface Anal. **35**, 7 (2003).
90. T. Nagatomi, S. Iida, T. Tsujita, and Y. Takai, Surf. Sci. Letters **523**, 37 (2003).
91. S. Iida, T. Tsujita, T. Nagatomi, and Y. Takai, Surf. Sci. **543**, 1 (2003).
92. T. Tsujita, S. Iida, T. Nagatomi, and Y. Takai, Surf. Sci. **547**, 99-107 (2003).
93. Shin-ichi Iida, Yousuke Nakanishi, Takaharu Nagatomi, and Yoshizo Takai, Jpn. J. Appl. Phys. **43(9A)**, 6352-6353 (2004).
94. Shih, J.E. Yater, and C. Hor, Appl. Surf. Sci. **242**, 35-54 (2005).
95. І.І. Бех, *Фізико-хімічні та емісійні властивості гетерогенних систем на основі скандію. Канд. дис.* (Київ, 2007).
96. Wang Shuguang, Applied Surface Science **251**, 114 (2005).

97. Haiqing Yuan, Xin Gu, Kexin Pan, Yiman Wang, Wei Liu, Ke Zhang, Jinshu Wang, Meiling Zhou, and Ji Li, *Applied Surface Science* **251**, 106 (2005).
98. Wang Jinshu, Lu Hong, Li Lili, and Zhou Meiling, *Journal of Rare Earths* **25**, 194 (2007).
99. Jinshu Wang, Lili Li, Wei Liu, Yanchun Wang, and Yiman Wang, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* **69**, 2103 (2008).
100. Jinshu Wang, Lili Li, Wei Liu, Yanchun Wang, Lei Zhao, and Yiman Wang, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* **68**, 2209 (2007).
101. Jinshu Wang, Yanchun Wang, Wei Liu, Lili Li, Yiman Wang, and Meiling Zhou, *Journal of Alloys and Compounds* **459**, 302 (2008).
102. Jinshu Wang, Xi Wang, Wei Liu, Tao Gao, and Yiman Wang, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* **72**, 1128 (2011).
103. Б.Ч. Дюбуа, А.Г. Михальченко, О.В. Поливникова, М.П. Темиряева, *Электронная техника, Сер. 1, СВЧ-техника* **1(504)**, 25 (2010).
104. Yiman Wang, Jinshu Wang, Wei Lin, Ke Zhang, and Ji Li, *IEEE Transactions on Electron Devices* **54(5)**, 1061 (2007).
105. Jinshu Wang, Chen Lai, Wei Liu, Fan Yang, Xizhu Zhang, Yuntao Cui, and Meiling Zhou, *Materials Research Bulletin* **48**, 3594 (2013).
106. Xizhu Zhang, Jinshu Wang, Wei Liu, Tian Tian, and Meiling Zhou, *Materials Research Bulletin* **48**, 5040 (2013).

Одержано 15.09.14

А.Е. Лушкин

ОБ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРОННЫХ КАТОДАХ

Р е з ю м е

Проведен анализ научных работ, которые посвящены наиболее эффективным современным термоэлектронным катодам, а именно: оксидным катодам (ОК) и металлопористым катодам (МПК). Основное внимание уделено анализу механизмов эмиссии этих источников электронов. Кроме того, рассматривается связь эмиссионной способности МПК с их физико-техническими параметрами. Также обсуждается и влияние технологии изготовления на эксплуатационные характеристики катодов.

О.Ye. Lushkin

ON EFFICIENT THERMIONIC CATHODES

S u m m a r y

A review of scientific works devoted to the most efficient modern thermionic cathodes – oxide cathodes and dispenser cathodes – is made. The main attention is focused on the analysis of emission mechanisms from those electron sources. In addition, the relation between the emission of dispenser cathodes and their physical and technical parameters is considered. The influence of fabrication methods on the cathode performance is discussed.