

В.Г. Бойко, М.С. Заяць

ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ШАРІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ СТРУКТУР

У представленій роботі розглянуто еквівалентну схему тонкоплівкового електролюмінесцентного випромінювача (ТПЕЛВ) з урахуванням витоків діелектрика та запропоновано критерій щодо оптимального вибору діелектрика в структурі для підвищення ефективності її роботи.

Запропоновано методику розрахунку за оптимальним вибором матеріалу діелектричних плівок в електролюмінесцентній структурі з урахуванням їх тангенса діелектричних втрат. В основу алгоритму оптимізації параметрів покладено спосіб попарного порівняння двох діелектриків за умови сталості або збільшення заряду, що протікає через структуру. Розрахункові дані для матеріалів наведені у вигляді таблиці згідно з черговістю погіршення їхніх характеристик. Найбільш привабливими з розглянутих матеріалів є $PbTiO_3$, Ta_2O_5 , Y_2O_3 , а також вдосконалені кераміки, що підтверджується експериментом.

Показана можливість застосування запропонованої моделі для пояснення залежності яскравості свічення електролюмінесцентних випромінювачів від напруги їхнього збудження. Проведений порівняльний аналіз результатів розрахунку та експерименту залежності яскравості від прикладеної напруги ВЯХ (В-V) для трьох типів ТПЕЛВ на основі люмінесцентного шару $ZnS : Mn$ (0,5%) товщиною 0,6 мкм, розміщеного між двома діелектричними шарами товщиною близько 0,3-0,35 мкм з Ta_2O_5 , Sm_2O_3 і Y_2O_3 відповідно.

Встановлено, що порогова напруга збудження люмінесценції корелює зі значенням ϵE , а максимальна яскравість зі значенням $\epsilon E/tg(\delta)$. У таблиці також наведені розрахункові характеристики плівок з $NdAlO_3$ і AlN , нанесених методом високочастотного магнетронного розпилення. Від електролюмінесцентних структур з такими діелектриками можна очікувати більш високих значень яскравості, ніж від структур з діелектричними плівками з Sm_2O_3 і Y_2O_3 . Результати таких досліджень наведені у вигляді графіка та таблиці.

Цей метод може знайти практичне застосування в розробці нових матеріалів і технологій їхнього отримання.

Ключові слова: тонкоплівковий електролюмінесцентний випромінювач, люмінофор $ZnS : Mn$, тангенс кута діелектричних втрат, кераміка на основі титанату барію ($BaTiO_3$), плівки $PbTiO_3$, Ta_2O_5 , Y_2O_3 , $NdAlO_3$ і AlN .

1. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ТА МЕТОДИКА ЙОГО ВИРІШЕННЯ

Відомо, що надійна і ефективна робота тонкоплівкових електролюмінесцентних випромінювачів (ТПЕЛВ), які містять шар люмінофора (в нашому випадку $ZnS : Mn$) між двома діелектричними шарами, залежить від діелектричних (D) шарів, що входять в їхню структуру. Шар діелектрика повинен стабілізувати будь-який можливий (або необхідний) пробій напівпровідникового (S) шару [1]. Зазвичай можливість застосування діелектрика в структурі і його якість оцінюють, виходячи з добротності діелектричного шару:

$$\gamma = C_{y\delta} U_{np}, \quad (1)$$

де $C_{y\delta}$ – питома (на одиницю площі) ємність і U_{np} – напруга пробою діелектрика відповідно. Однак для поліпшення світлотехнічних характеристик ТПЕЛВ без поліпшення властивостей основних матеріалів – електролюмінофорів, тобто змінами конструкції пристроїв даного типу, крім вимоги високих значень діелектричної проникності і напруги пробою, необхідно враховувати діелектричні втрати, які можуть проявлятися у діелектрика. У структурах з низькими діелектричними втратами в D-шарі утруднений витік через нього електронів люмінесцентного шару, і оскільки число електронів, що збуджують центри люмінесценції, підвищується, яскравість таких елементів стає вищою [2].

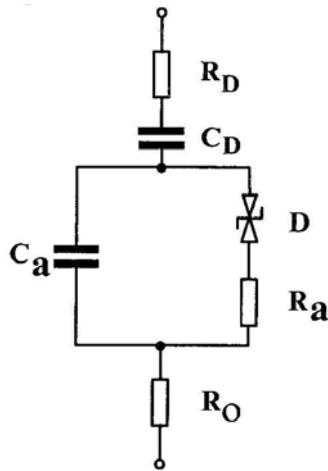


Рис. 1. Еквівалентна схема ТПЕЛВ при значних витоках діелектрика.

В ході досліджень була розглянута еквівалентна схема ТПЕЛВ з урахуванням витоків діелектрика (рис. 1). Для зручності розгляду D-шар був представлений у вигляді послідовної схеми заміщення, що включає опір втрат R_D і еквівалентну ємність C_D [3]. Активний ЕЛ-шар являє собою еквівалентну ємність C_a , з'єднану паралельно з двома протилежно включеними стабілітронами (D) з однаковою напругою стабілізації U_{np} , вище якої їхній диференціальний опір R_a різко падає [4], і опору струмопровідних шарів – R_O .

Згідно з розрахунком, проведеним для аналогічної еквівалентної схеми в статті [4], вираз для величини заряду (Q), що переноситься через люмінесцентний шар протягом протікання активного струму при імпульсному збудженні, можна представити у вигляді:

$$Q = 2 C_D (U_O - U_{nop}) \{ [1 - \exp(-t_i/\tau)] / [1 + \exp(-t_i/\tau)] \}, \quad (2)$$

де $U_{nop} = U_{np} [(C_D + C_a)/C_D]$ – мінімальна (порогова) напруга, прикладена до структури випромінювача світла, при якій напруга на активному шарі досягає значення пробоя; U_{np} – напруга пробоя; U_O – амплітуда біполярних імпульсів напруги прямокутної форми, прикладених до ТПЭЛВ; C_D – ємність діелектрика; τ – постійна часу, що визначає заряд ємності при протіканні активного струму через опір R_a люмінесцентного шару; t_i – тривалість імпульсу напруги збудження.

У нашому випадку значення постійної часу визначається як: $\tau = C_D (R_a + R_O + R_D)$, де R_O – опір струмопровідних шарів; R_D – опір діелектричних втрат.

Розглянемо вираз (2) у двох граничних випадках, коли структура збуджується довгими імпульсами і величина $t_i / \tau \gg 1$, або коли збуджуючі імпульси короткі і величина $t_i / \tau \ll 1$. Відповідно в першому випадку вираз (2) можна записати як:

$$Q = 2 C_D (U_O - U_{nop}), \quad (3)$$

а в другому –

$$Q = C_D (U_O - U_{nop}) (t_i/\tau). \quad (4)$$

Умовно замінімо в структурі один діелектрик на інший. Щоб при цьому вихідні параметри випромінювача при заданій напрузі не погіршилися, необхідно зберегти незмінним значення переданого через активний шар заряду. Виходячи з (3), цю умову можна записати у вигляді:

$$C_D \leq C'_D, \quad (5)$$

а для (4) у вигляді:

$$\frac{U_O - U_{nop}}{R_a + R_o + R_D} \leq \frac{(U_O - U_{nop}) + (U_{nop} - U'_{nop})}{(R_a + R_o + R_D) + (R'_D - R_D)}, \quad (6)$$

де U'_{nop} – порогова напруга структури з новим діелектриком; R'_D – опір втрат нового діелектрика; C'_D – ємність нового діелектрика.

Вираз (5) очевидний, проаналізуємо нерівність (6). Відповідно до властивості похідних пропорцій:

$$\frac{U_O - U_{nop}}{R_a + R_o + R_D} \leq \frac{U_O - U'_{nop}}{R'_D - R_D}, \quad (7)$$

а з урахуванням виразу (4) маємо:

$$\frac{Q}{t_i} \leq \frac{U_O - U'_{nop}}{R'_D - R_D}. \quad (8)$$

Якщо ввести деякі коефіцієнти пропорційності L і K між старими – R_D, C_D і новими – R'_D, C'_D параметрами діелектриків як:

$$L = R'_D/R_D, \text{ а } K = C'_D/C_D \quad (9)$$

і взяти до уваги, що згідно з (2) $U'_{nop} = U_{np} [(C'_D + C_a)/C'_D]$, можна встановити зв'язок між L і K :

$$L \leq 1 + \frac{U_{np} C_a t_i}{R_D C_D Q} \left(1 - \frac{1}{K}\right). \quad (10)$$

Загальний вигляд залежності $L = f(K)$ представлений на рис. 2, з якого видно, що з ростом K , тобто зі збільшенням ємності діелектрика, величина L , що характеризує опір діелектричних втрат діелектрика, досягає насичення. При цьому

$$L_{\max} = \frac{U_{np} C_a t_i}{R_D C_D Q} + 1. \quad (11)$$

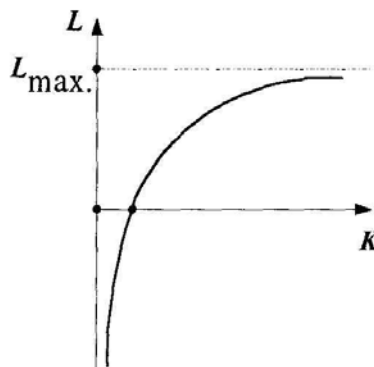


Рис. 2. Загальний вигляд функції $L = f(K)$ для ТПЕЛВ.

Таким чином, в реальних конструкціях є можливість компенсації діелектричних втрат за рахунок збільшення їхньої ємності. Однак, як впливає зі співвідношення (10), збільшення ємності більш ніж на порядок малоефективне, тобто при збільшенні діелектричних втрат до значення більше L_{max} , витоки вже неможливо буде компенсувати навіть нескінченно великим збільшенням ємності діелектрика.

З метою вибору кращого діелектрика для ТПЕЛВ з урахуванням діелектричних втрат скористаємося аналітичним виразом (10). Беручи до уваги вираз (4), перетворимо цей вираз в зручний для розрахунку вид. Для послідовної схеми заміщення [3]:

$$R_D = tg_D(\delta)/C_D\omega, \quad (12)$$

де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота; $tg_D(\delta)$ – тангенс діелектричних втрат, а $C_D = \varepsilon_0\varepsilon_D S/d_D$, де ε_0 – діелектрична постійна; ε_D – діелектрична проникність діелектрика; S – площа випромінювача; d_D – товщина діелектрика. Перетворимо (10) до наступного виду:

$$\frac{tg'(\delta)\varepsilon_D d'_D}{tg(\delta)\varepsilon'_D d_D} \leq 1 + \frac{E_a \varepsilon_a d_D (R_a + R_O + R_D)}{(U_O - U_{nop})\varepsilon_D R_D} \left(1 - \frac{\varepsilon_D d'_D}{\varepsilon'_D d_D} \right), \quad (13)$$

де $tg'_D(\delta)$, ε'_D , d'_D – відповідні величини для структур з новим діелектриком.

Розглянемо отриманий вираз. Включені в нього величини тангенса кута втрат і діелектричної проникності є електричними параметрами діелектричних плівок. Вони наведені в табл. 1. Найбільш типовими параметрами ТПЕЛВ з ZnS в якості люмінофора є: напруженість поля перед пробоем люмінесцентного шару $E_a = 2 \times 10^6$ В/см; товщина люмінесцентного шару $d_a \approx 0,6$ мкм; діелектрична проникність люмінофора $\varepsilon_a = 9$; різниця $(U_o - U_{nop.}) \approx 20$ В [8].

Припустимо, що в структурі товщина діелектричного шару приблизно дорівнює товщині люмінесцентного шару при однакових значеннях полів пробоем [7]. У разі діелектрика, більш стійкого до електричного пробоем, його товщину будемо вибирати у стільки ж разів меншою, у скільки разів його поле пробоем більше по відношенню до поля пробоем ZnS. Назвемо цю величину відносною товщиною ($d_{відн}$) діелектрика $d_{відн} = E_a d_a / E_D$, де E_D – напруженість поля пробоем діелектрика. Оцінимо величину $(R_a + R_O + R_D) / R_D$. Опір R_a можна представити як: $R_a = \rho d_a / S$, де ρ – питомий опір люмінесцентної плівки при пробоем, який, в свою чергу, дорівнює добутку $R_{\square} d_a$, де R_{\square} [ом/квадрат] – поверхневий питомий опір люмінесцентної плівки ZnS (ом/□), який визначається тільки питомим опором і товщиною плівки.

Відповідно до роботи [4] величина поверхневого опору люмінесцентної плівки ZnS в реальних структурах при пробоем дорівнює 20 ом/□ при товщині плівки близько 1 мкм, тобто одного порядку з опором прозорих провідних шарів [10]. Щоб знехтувати опором електродів, розглянемо випадок точкового випромінювача. Тоді враховуючи вираз (12), який визначає значення опору діелектричних втрат діелектрика, а також те, що частота, на якій зазвичай вимірюються параметри діелектриків $f = 1000$ Гц, ми можемо оцінити величину $(R_a + R_O + R_D) / R_D$.

Оцінка показує, що вона буде близько 1. Отже, нерівність (13) можна записати в такому вигляді:

$$\frac{tg'(\delta)\varepsilon_D E_D}{tg(\delta)\varepsilon'_D E'_D} \leq 1 + \frac{E_a^2 \varepsilon_a d_a (R_a + R_O + R_D)}{(U_O - U_{nop})\varepsilon_D E_D R_D} \left(1 - \frac{\varepsilon_D E_D}{\varepsilon'_D E'_D} \right). \quad (14)$$

Видно, що вираз (14) включає в себе всі відомі величини і він зручний для розрахунків. При розрахунках будемо користуватися максимально досягнутими для D-шарів величинами $tg(\delta)$, E і ε , взятими з табл. 1 (чим менше тангенс кута втрат, тим краще).

Результати розрахунку також представлені в табл. 1. Матеріали розташовані так, що зі зменшенням порядкового номера розрахункові властивості плівки поліпшуються, тобто меншому порядковому номеру плівки відповідає більш високоякісний діелектрик. Проведені розрахунки показують, що найбільш оптимальними діелектриками виявилися $PbTiO_3$, Ta_2O_5 і Y_2O_3 . Враховуючи, що недоліком $PbTiO_3$ є високі температури осадження плівок (нижня температурна межа утворення плівок з високим значенням ε (160-190) становить $820^\circ K$ [1]), можна визнати, що найбільш придатним діелектриком в результаті розрахунку є – Ta_2O_5 . Про високу якість таких плівок повідомляється в [2,9,13].

Крім того, з результатів розрахунків можна зробити висновок, що не обов'язково матеріал з більш високим значенням добротності – γ займає більш високе місце, а саме: між представленими значеннями величин $\varepsilon E \sim \gamma/\varepsilon_0$ і $\varepsilon E/tg(\delta) \sim \gamma/\varepsilon_0 tg(\delta)$ не спостерігається повної відповідності.

З аналізу наведених розрахунків можна зробити ще деякі висновки. Для структур, в яких може бути застосований непрозорий діелектрик (наприклад, зворотні електролюмінесцентні структури), найбільш прийнятними можуть бути шари кераміки на основі титанату барію ($BaTiO_3$) з $tg(\delta) = 0,015$, $E = 0,15 \times 10^6$ В/см, $\varepsilon = 16000$. Такими параметрами володіють поліпшені кераміки марок ВС-1 і ВС-3, які використовуються для виготовлення конденсаторів. Товщина шарів повинна бути близько 4-6 мкм [11].

Таблиця 1. Типові властивості різних тонких діелектричних шарів.

№ з/п	Матеріал	Поле пробою (E), (В/см) $\times 10^{-6}$	Діелектрична проникність ε	Тангенс кута діелектричних втрат при 1 кГц, $tg(\delta)$	εE , (В/см) $\times 10^{-8}$	$\varepsilon E / tg(\delta)$, (В/см) $\times 10^{-11}$	Літера- тура
1.	$PbTiO_3$	2-3	20 -100	0,001 -0,02	3	3	[5]
2.	Ta_2O_5	1 – 6	20 -25	0,001	1,5	1,5	[5]
3.	Y_2O_3	2-5	9 – 13	0,001 – 0,003	0,65	0,65	[5]
4.	SiO_2	1,5 – 10	4-6	0,001	0,6	0,6	[5]
5.	$Y_2Ca_3(BO_3)_4$	4	9,7	0,002	0,388	0,19	[6]
6.	$NdAlO_3$	4-6	15	0,005	0,9	0,18	[6,7]
7.	$La_2Ca_3(BO_3)_4$	5	8,0	0,003	0,4	0,13	[6]
8.	Al_2O_3	1 – 6	6-8	0,004	0,48	0,12	[5]
9.	SiO	2	6	0,001	0,12	0,12	[5]
10.	ZrO_2	4	20-22	0,008 – 0,01	0,88	0,11	[5]
11.	$Y_2Ba_3(BO_3)_4$	5	6,5	0,003	0,325	0,11	[6]
12.	$La_2Sr_3(BO_3)_4$	3,7	8,6	0,003	0,318	0,11	[6]
13.	TiO_2	1	30-40	0,005 – 0,03	0,4	0,08	[5]
14.	$La_2Ba_3(BO_3)_4$	3,5	8,5	0,005	0,297	0,0595	[6]
15.	Si_3N_4	1	6	0,001 – 0,004	0,06	0,06	[5]
16.	$Er_2Ba_3(BO_3)_4$	3,0	6,0	0,005	0,18	0,04	[6]
17.	ZnS	1	9	0,01	0,09	0,01	[5]
18.	MgF_2	2	3,5	0,01	0,07	0,01	[5]

2. ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

На рис. 3 показані залежності яскравості від прикладеної напруги ВЯХ (В-V) для трьох типів ТПЕЛВ [2] на основі люмінесцентного шару ZnS: Mn (0,5%) товщиною 0,6 мкм, укладеного між двома діелектричними шарами товщиною близько 0,3-0,35 мкм з Ta₂O₅, Sm₂O₃ і Y₂O₃ відповідно. Плівка ZnS: Mn була нанесена в одному робочому циклі методом електронно-променевого осадження на ці три зразки. Плівки осаджувалися на струмопровідне скло, зверху формували алюмінієвий електрод. Ці пристрої збуджувалися біполярними прямокутними імпульсами частотою 1000 Гц. На цих зразках спостерігалася електролюмінесценція зі спектром, типовим для марганцю, з максимумом 585 нм. Плівки Sm₂O₃ і Y₂O₃ наносилися методом електронно-променевого осадження, а Ta₂O₅ – методом високочастотного магнетронного розпилення. Електричні властивості цих діелектричних плівок вимірювалися для структур типу метал-ізолятор-метал (МІМ) при синусоїдальній напрузі збудження на частоті 1000 Гц. Діелектричні параметри наведені в табл. 2.

З порівняння даних рис. 3 і табл. 2 видно, що поріг збудження люмінесценції корелює зі значенням ϵE , а максимальна яскравість зі значенням $\epsilon E / tg(\delta)$. У таблиці також наведені розрахункові характеристики плівок з NdAlO₃ і AlN, нанесених методом високочастотного магнетронного розпилення [12-14]. Від електролюмінесцентних структур з такими діелектриками можна очікувати більш високих значень яскравості, ніж від структур з діелектричними плівками з Sm₂O₃ і Y₂O₃.

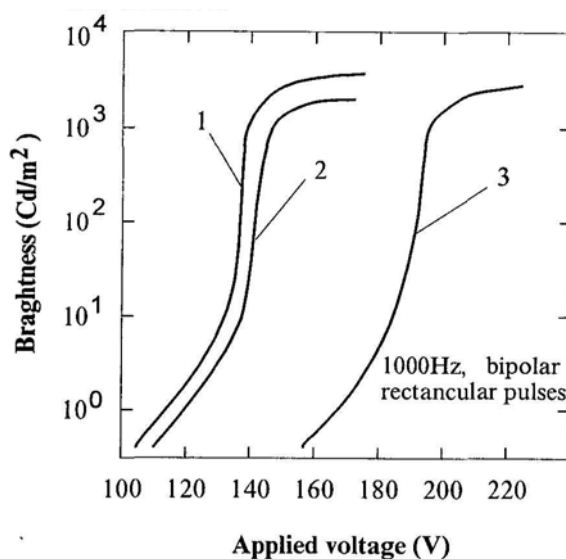


Рис. 3. Порівняння ВЯХ ТПЕЛВ з різними діелектричними плівками (1 – Ta₂O₅; 2 – Sm₂O₃; 3-Y₂O₃).

Таблиця 2. Параметри діелектричних плівок.

№ з/п	Матеріал	ϵE , (В/см) $\times 10^{-8}$	$\epsilon E / tg(\delta)$, (В/см) $\times 10^{-11}$
1.	Ta ₂ O ₅	0,24	0,24
2.	Y ₂ O ₃	0,08	0,04
3.	Sm ₂ O ₃	0,17	0,02
4.	NdAlO ₃	0,15	0,18
5.	AlN	0,12	0,15

І нарешті, вираз (14) можна спростити, якщо підставити в праву частину значення вхідних величин і припустити, що порівнюється пара діелектриків (згідно з табл. 1), у яких різниця між добутком εE максимальна. У цьому випадку (14) приймає простий вигляд:

$$\frac{tg'(\delta)\varepsilon_D E_D}{tg(\delta)\varepsilon'_D E'_D} \leq 1,18, \quad (15)$$

що зручно для експрес-аналізу структур ТПЕЛІВ на основі ZnS з різними діелектриками. Більш того, дана нерівність підтверджує висновок авторів про можливість компенсації тангенса кута втрат за рахунок збільшення його питомої ємності (див. діелектрики № 14, 15 в табл. 1) і ще раз вказує на важливість комплексної характеристики ізолюючого шару – $\varepsilon E / tg(\delta)$ в структурі.

3. ВИСНОВКИ

Підводячи підсумок, необхідно відзначити, що запропонований вище алгоритм для оптимізації діелектричних шарів в електролюмінесцентних структурах є зручним розрахунково-методичним підходом при розробці нових пристроїв відображення інформації і може бути цікавий розробникам і дослідникам конденсаторних структур будь-якого типу.

V.G. Boiko, M.S. Zayats

FEATURES OF SELECTING DIELECTRIC LAYERS FOR ELECTROLUMINESCENT STRUCTURES

The paper considers an equivalent scheme of a thin-film electroluminescent emitter (TFELE), taking into account dielectric leaks, and proposes a criterion for the optimal choice of a dielectric in the structure to increase its efficiency.

A calculation method is proposed for the optimal choice of material for dielectric films in an electroluminescent structure, taking into account their dielectric loss tangent. The algorithm for optimizing the parameters is based on the method of pairwise comparison of two dielectrics, provided that the charge flowing through the structure is constant or increased. The calculated data for materials are given in the form of a table according to the sequence of deterioration of their characteristics. The most attractive of the materials considered are PbTiO₃, Ta₂O₅, Y₂O₃, as well as improved ceramics, which is confirmed by experiment.

The possibility of applying the proposed model to explain the dependence of the luminosity of electroluminescent emitters on their excitation voltage is shown. A comparative analysis of the results of the calculation and experiment of the dependence of brightness on the applied voltage (B-V) for three types of TFELE based on a luminescent layer ZnS : Mn (0.5%) with a thickness of 0.6 μm, placed between two dielectric layers with a thickness of about 0.3- 0.35 μm with Ta₂O₅, Sm₂O₃ and Y₂O₃, respectively. It is established that the threshold luminescence excitation voltage correlates with the value of εE , and the maximum brightness with the value of $\varepsilon E / tg(\delta)$. The table also shows the calculated characteristics of NdAlO₃ and AlN films deposited by high-frequency magnetron sputtering. Higher brightness values can be expected from electroluminescent structures with such a dielectric than from structures with dielectric films with Sm₂O₃ and Y₂O₃. The results of such studies are presented in the form of a graph and table.

This method can find practical application in the development of new materials and technologies for their production.

Keywords: thin-film electroluminescent emitter, ZnS: Mn phosphor, dielectric loss tangent, ceramics based on barium titanate BaTiO₃, PbTiO₃, Ta₂O₅, Y₂O₃, NdAlO₃ and AlN films.

1. Мозжухин Д.Д., Бараненков И.В. Тонкоплёночные электролюминесцентные устройства. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1985. №7. С. 84 – 94.
2. Kozawaguchi H., Ohwaki J., Tsujiyama B. Thin film electroluminescent devices with low operating voltage and high brightness. *Rev. Elec. Commun. Lab.* 1984. **32**, № 1. P. 71-77.
3. Пасынков В.В. Материалы электронной техники. Москва: *Высшая школа*. 1980. 406 с.
4. Васильченко В.П., Матизен Л.Л., Войханский М.А. Изучение переноса заряда в электролюминесцентных структурах на основе ZnS. *Уч. зап. ТГУ. Труды по электролюминесценции*. Тарту. 1987. № 779. С.22 – 49.
5. R. Menn, R. Tyeta, P. Gabeloto at al. Значение и исследование диэлектрического слоя. *Le vidio Canchers Mincent*. 1984. **39**. P. 205-212.
6. В.Г. Краснов, К.Г. Марин, Л.С. Устюгова и др. Материалы для тонко – и толстоплёночной технологии изготовления ГИС. *Электронная промышленность*. 1980. Вып. 8-9. С. 79 – 80.
7. Н.М. Парфёнов, С.М. Кокин, Б.Г. Беккер и др. Влияние диэлектрика на параметры тонкоплёночных электролюминесцентных структур. *Изв. вузов. Сер. физ.* 1986. **29**, №4. С. 119 – 120.
8. Mach R., Muller G.O. Physical concepts of high-field electroluminescence devices. *Phys. Stat. Sol. (a)*. 1982. **69**, №11. P.11-66.
9. Pignolet A., Mohan Rao G., Krupanidhi S. B. Rapid thermal processed thin film of reactively sputtered Ta₂O₅. *Thin Solid Films*. 1995. 258. P.230 – 235.
10. Guryanov G., Zayats M. Transparent conductive In₂O₃:Sn films technology. ICPTTF-IX, May 19-24, 2003, Ivano-Frankivsk, 2003. P. 65 – 67.
11. В.Е. Родионов. Электролюминесцентные индикаторы с керамическим диэлектриком. Киев: НАН Украины, 2010. 228 с. ISBN 978-966-02-5657-6.
12. Boyko V. G., Zayats N. S. The application of ferroelectrics to create electroluminescent indicators of the temperature. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2012. **15**, № 2. P. 162 - 165.
13. В.Г. Бойко, С.Н. Гурьянов, Н.С. Заяц и др. Отработка технологии получения оксидных плёнок для различных структур оптоэлектроники на промышленной установке магнетронного типа «Катод – 1М». *ОПТ*. 2005. Вып.40. С. 143 - 148.
14. Н.С. Заяц, В.Г. Бойко, Н.И. Ключ и др. Низкотемпературная ионно-плазменная технология формирования наноструктурированных слоев нитрида алюминия. В кн. *Наноразмерные системы и наноматериалы: исследования в Украине*. Редкол.: А.Г. Наумовец (глав. ред.). Київ:Академперіодика, 2014. 768 с.

Інститут фізики напівпровідників
ім. В.С. Лашкарьова НАН України
41, проспект Науки,
03680 Київ, Україна
E-mail: zayats@isp.kiev.ua

Отримано 27.08.2021