



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **102780** (13) **U**
(51) МПК (2015.01)
H01L 21/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2015 03206	(72) Винахідник(и): Деменський Олексій Миколайович (UA), Єрохін Сергій Юрійович (UA), Краснов Василь Олександрович (UA), Лебедь Олег Миколайович (UA), Шутов Станіслав Вікторович (UA)
(22) Дата подання заявки: 06.04.2015	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.11.2015	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.11.2015, Бюл.№ 22	(73) Власник(и): ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ, пр. Ушакова, 20, м. Херсон, 73000 (UA)

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ПЕРЕГРІВУ КРИСТАЛА НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ДІОДА

(57) Реферат:

Спосіб визначення величини перегріву кристала напівпровідникового діода за рівнем зниження прямого падіння напруги U включає вимірювання калібрувальної залежності $U(T, I)$ при постійному прямому струмі $I = I_i = \text{const}$ і температурах $T = \text{var}$. Спочатку при заданій робочій температурі середовища випробувань $T = T_a$ вимірюють пряму гілку вольт-амперної характеристики (ВАХ) діода й перебудовують її у вигляді $\lg I = f(U)$, потім вимірюють калібрувальну залежність $U(T, I_i)$ при температурах $T \geq T_a$ та струмі $I_i = I_{1m}$, де I_{1m} - струмова координата точки переходу лінійної ділянки залежності $\lg I = f(U)$ до нелінійної, а величину перегріву ΔT обчислюють.

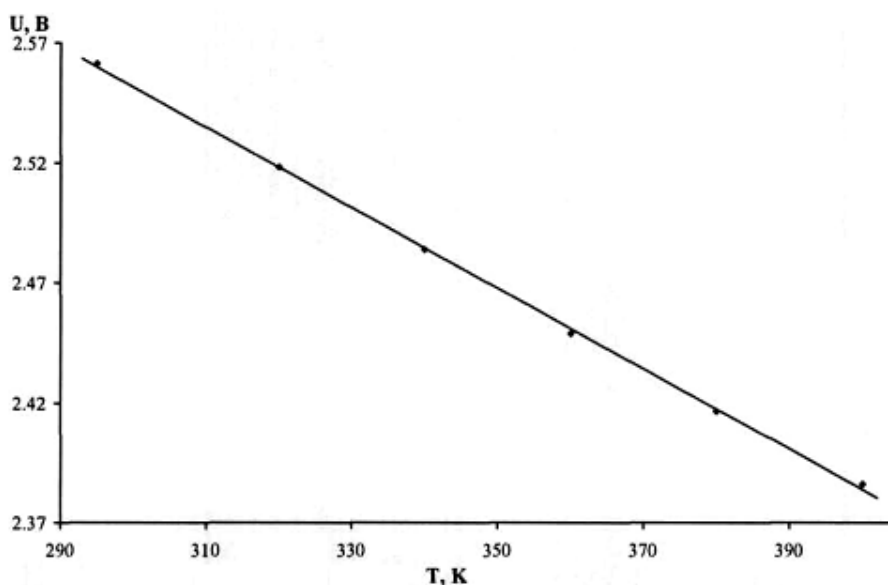


Fig. 2

UA 102780 U

Корисна модель належить до галузі напівпровідникової електроніки і може бути використана для вимірювання температури активної області напівпровідникових приладів як на етапах розробки та виробництва приладів, так і при виборі режимів експлуатації споживачем.

Відомий спосіб вимірювання температури шарів світлодіодної структури з використанням Раманівської спектроскопії [A Comparative Study of Thermal Metrology Techniques for Ultraviolet Light Emitting Diodes / Natarajan S., Habtemichael Yis., Graham S. // Journal of Heat Transfer, Vol. 135 (9), 091201, (2013)]. Спосіб реалізовано для ультрафіолетових світловипромінюючих діодів на основі $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Даний спосіб є неруйнівним. Однак його широке застосування обмежене світловипромінюючими приладами, оскільки він не дозволяє контролювати температуру активних областей приладів у непрозорому корпусі.

Відомий спосіб визначення температури потужних світлодіодів на основі InGaN/GaN за допомогою методу інфрачервоної мікротермографії [Remote temperature mapping of high-power InGaN/GaN MQW flip-chip design LEDs / Malyutenko V. K., Malyutenko O. Yu., Zinovchuk A. V. and others // Proc. of SPIE, Vol. 5941, 59411K, (2005)]. Цей спосіб заснований на вивченні теплового випромінювання світловипромінюючих приладів. Він забезпечує прийнятну точність і високу швидкість вимірювань, однак дифракційні обмеження не дозволяють визначати розподіл температури в приладових чипах з габаритами менше міліметра. На інфрачервону термографію впливають багато факторів, які важко контролювати, а саме: невизначеність випромінювальної та відбивної здатності поверхонь різних матеріалів структури приладу, теплове випромінювання навколишнього середовища і самої вимірювальної системи, а також невизначеність відгуків ІЧ-приймача та передавача. Усі ці фактори суттєво погіршують точність вимірювання температури. Крім того, безпосереднє визначення температури активної області приладу способом інфрачервоної термографії обмежується безкорпусними приладовими структурами, а також приладами, корпуса яких є прозорими для ІЧ-випромінювання.

Відомий спосіб визначення температури переходу на прикладі потужних світлодіодів на основі AlGaInP та InGaN за допомогою методу електролюмінесценції [Measurement of the junction temperature in high-power light-emitting diodes from the high-energy wing of the electroluminescence band / Vaitonis Z. and others // J. Appl. Phys, Vol. 103, 093110, (2008)]. У цьому способі використовується залежність ширини забороненої зони матеріалу від температури. Даний метод дає можливість оцінити температуру безпосередньо активної області приладу (тобто області, де генерується випромінювання).

Однак калібрувальна залежність спектра електролюмінесценції може суттєво відрізнятися для малих і великих струмів зсуву, тим самим маскуючи температурну залежність. Це пов'язане з тим, що при малих струмах міжзонні переходи носіїв здійснюються, здебільшого, крізь домішкові рівні, тоді як при більших струмах будуть переважати переходи зона-зона.

Відомий спосіб вимірювання температури переходу світлодіоду [Nguyen Hoang et. al. System and method for estimating the junction temperature of a light emitting diode. - US Patent No. 8534914 B2, 2013], суть якого полягає в наступному. У процесі вимірювання через світлодіод пропускається прямокутний імпульс струму, максимальне значення якого дорівнює робочому струму діода, а мінімальне ненульове значення є вимірювальним струмом. Визначення температури переходу здійснюється за прямим падінням напруги на переході при протіканні вимірювального струму на основі знятої заздалегідь калібрувальної залежності прямого падіння напруги від температури. Цей спосіб дозволяє вимірювати температуру активної області корпусованих приладів. Однак, комутаційні перешкоди, обумовлені перехідними процесами, які мають місце при переключенні з робочого струму світлодіода на вимірювальний і назад, вимагають деякої затримки вимірювання.

У випадку розігріву приладу прямокутним імпульсом струму великої потужності, за час спаду імпульсу й проходження перешкод відбувається процес охолодження структури. Тож у момент фактичного вимірювання температура кристала є дещо нижчою. Це обумовлює необхідність знати теплову постійну часу для кожного матеріалу діодної структури, що ускладнює процес визначення температури р-n-переходу.

Крім того, після перемикавання на вимірювальний струм у структурі відбувається процес розсмоктування нерівноважного заряду неосновних носіїв, інерційність якого також спричиняє необхідність затримки вимірювання.

Також слід зазначити обмеженість застосування цього способу вимірювання, оскільки він заявлений тільки для світло діодів.

Недоліком способу є його складність, оскільки потрібне попереднє дослідження сімейства вольт-амперних характеристик (ВАХ) зразка, що досліджується з метою визначення області лінійної термочутливості калібрувальної залежності. В протилежному випадку необхідно вказувати термочутливість для кожної точки залежності.

Найбільш близьким технічним рішенням є спосіб вимірювання температури переходу за рівнем зниження прямого падіння напруги напівпровідникового світлодіода [Stevens A. L. In-circuit temperature measurement of light-emitting diodes. - US Patent Application Publication No.: US 2012/0299481 A1, 2012. - прототип]. Цей спосіб вимірювання температури включає: вимірювання залежності прямого падіння напруги від температури $U(T, I)$ при постійному прямому струмі $I = \text{const}$ і температурах $T = \text{var}$; визначення температурного коефіцієнта світлодіода (термочутливості), а також визначення фактичної температури переходу світлодіода на основі виміряної напруги і знайденого температурного коефіцієнта.

Спосіб дозволяє вимірювати температуру активної області корпусованих приладів. Оскільки в цьому способі в процесі вимірювань використовується постійний струм, то він дозволяє уникнути недоліків попереднього методу, обумовлених імпульсним режимом роботи світлодіода, і не вимагає знання теплової постійної часу матеріалу активної області.

Незважаючи на перераховані переваги, для визначення температурного коефіцієнта цим способом потрібне вимірювання мінімум двох температур і напруг при кожній з них. Це знижує точність визначення температури, оскільки передбачає лінійну залежність напруги від температури. А заявлене в способі визначення температурного коефіцієнта шляхом вимірювання багатьох температур і напруг при кожній з них суттєво ускладнює процес вимірювання, оскільки також передбачає обчислення температурного коефіцієнта при кожній температурі. Крім того, для реалізації даного способу потрібне проведення попередніх досліджень, пов'язаних з визначенням температурних областей постійної термочутливості діодів. Остання обставина також ускладнює умови застосування даного способу.

Також, слід зазначити обмеженість застосування такого методу вимірювання температури переходу, оскільки він заявлений тільки для світло діодів.

В основу корисної моделі поставлено задачу створити більш простий і не потребує спеціальних додаткових вимірювань спосіб визначення величини перегріву кристала напівпровідникового діода за рівнем зниження прямого падіння напруги, який дозволить визначати температуру перегріву кристала для більш широкого діапазону напівпровідникових приладів - не тільки світлодіодів, але й випрямляючих діодів, діодів Шотткі, лазерних діодів та ін.

Це досягається тим, що у способі визначення величини перегріву кристала напівпровідникового діода за рівнем зниження прямого падіння напруги U , що включає вимірювання калібрувальної залежності $U(T, I)$ при постійному прямому струмі $I = I_i = \text{const}$ і температурах $T = \text{var}$ спочатку при заданій робочій температурі середовища випробувань $T = T_a$ вимірюють пряму гілку вольт-амперної характеристики діода і перебудовують її у вигляді $I_g I = f(U)$, потім вимірюють калібрувальну залежність $U(T, I_i)$ при температурах $T \geq T_a$ та струмі $I_i = I_{1m}$, де I_{1m} - струмова координата точки переходу лінійної ділянки залежності $I_g I = f(U)$ до нелінійної, а величину перегріву ΔT обчислюють за формулою:

$$\Delta T = \frac{1}{S} \cdot \Delta U, \quad (1)$$

де

$$S = \frac{dU(T, I)}{dT}, \quad (2)$$

S - диференційна струмова термочутливість, що виміряна на калібрувальній залежності $U(T, I_{1m})$,

$$\Delta U = U'_0 - U_0,$$

де U_0, U'_0 - координати напруги, відповідно, точки переходу лінійної ділянки ВАХ до нелінійної і точки перетину прямої $I = I_p$ з прямою (променем), що є продовженням лінійної ділянки ВАХ в область значень $I > I_{1m}$, I_p - амплітуда заданого робочого струму.

Місцями виділення тепла всередині діода є: омичні контакти, зовнішні шари й активна область. При малих значеннях робочого струму нагріванням контактів і зовнішніх шарів можна знехтувати через незначну кількість джоулевого тепла, що виділяється на їх паразитних опорах

(I^2R). У цьому випадку основним тепловим джерелом є активна область. При більших значеннях струму внесок паразитних опорів контактів та зовнішніх шарів у підвищення температури всередині діода зростає і його вже необхідно враховувати.

Істотною відмінністю запропонованого способу визначення величини перегріву кристала напівпровідникового діода за рівнем зниження прямого падіння напруги є вимірювання при заданій робочій температурі середовища випробувань $T = T_a$ прямої гілки ВАХ діода з наступною перебудовою її в напівлогарифмічних координатах і знаходження точки переходу лінійної ділянки отриманої характеристики до нелінійної. Така операція дозволяє строго визначити діапазон робочого струму, у якому самонагрівання досліджуваного приладу не має істотного впливу на температуру активної області, а для його визначення потрібне зняття лише однієї ВАХ досліджуваного зразка. Крім того, вона дозволяє, не проводячи попередніх досліджень до вимірювання калібрувальної залежності $U(T, I_i)$ при температурах $T \geq T_a$ і струмі $I_i = I_{1m}$, визначити область значень термочутливості приладу. Таким чином, можна заздалегідь підібрати мінімально необхідну кількість дискретних значень для визначення середньої термочутливості. Це суттєво спрощує методику визначення температури активної області напівпровідникового приладу.

Значення робочої напруги U_p визначається як рекомбінаційним і дифузійним процесами на р-п-переході, так і впливом джоулевого тепла, пов'язаного з дією послідовного опору діода. Особливістю запропонованого способу є використання прямої (променя), що є продовженням лінійної ділянки ВАХ в область значень $I > I_{1m}$ (штрихована лінія на Фіг. 1). Вона моделює продовження ВАХ кристала напівпровідникового діода після точки перегину для випадку, коли ключовими факторами, що визначають значення робочої напруги, виступають дифузійні й рекомбінаційні процеси на р-п-переході, а вплив, що викликаний самонагріванням досліджуваного приладу, не враховується. Перетин цієї прямої з прямою $I = I_p$ дозволяє отримати координату (значення) напруги U'_o , що відповідає тій частині робочої напруги U_p , яка пов'язана із рекомбінаційними і дифузійними процесами на р-п-переході для заданого робочого струму. На основі цього також можна визначити, яка частина робочої напруги обумовлюється впливом джоулевого тепла.

Додатковою перевагою запропонованого способу вимірювань є те, що він дозволяє досить точно прогнозувати величину перегріву кристала напівпровідникового діода для заданих режимів експлуатації приладу. Для цього потрібне зняття хоча б однієї прямої гілки ВАХ при температурі середовища, в якому буде здійснюватися експлуатація приладу. Далі проводяться вже описані в даному способі операції та вимірювання калібрувальної залежності $U(T, I_{1m})$. Спосіб, що пропонується, дозволяє прогнозувати величину перегріву при потрібних значеннях струму і напруги для температури середовища експлуатації, при якій вимірювалась пряма гілка ВАХ. Це дуже практично й зручно при проектуванні та виробництві різних пристроїв (приладів), систем, а також при виборі режимів експлуатації споживачем. Інші ж способи, як правило, забезпечують лише безпосередньо пряме вимірювання температури активної області *in situ*.

Проілюструємо спосіб, що пропонується, прикладом визначення температури перегріву активної області світлодіода, що випускається серійно та випромінює біле світло, при робочому струмі 0,03 А. Температура середовища випробувань (кімнатна температура) становила $T_a = 295$ К.

Для визначення температури перегріву вимірюють пряму гілку вольт-амперної характеристики світлодіода шляхом зняття значень струму, які відповідають прямій напрузі, що подається на діод. Значення напруги перебували в діапазоні від 0 до 3 В.

За отриманими даними будують графік прямої гілки вольт-амперної характеристики в координатах $I_g = f(U)$ (див. Фіг. 1). На осі абсцис відкладають значення прямих напруг, а на осі ординат - відповідні їм логарифми значень струму.

На графіку визначають точку переходу лінійної ділянки вольт-амперної характеристики до нелінійної з координатами (U_o, I_{1m}) . Напруга U_o і струм I_{1m} склали 2,563 В та 1,438 мА відповідно.

Далі будують пряму $I = I_p$, що відповідає заданому робочому струму 0,03 А і пряму (промінь), яка є продовженням лінійної ділянки вольт-амперної характеристики в область значень $I > 1,438$ мА. У точці перетинання цих прямих знаходять значення напруги U'_o , яке склало 2,689 В.

Далі проводять вимірювання калібрувальної залежності $U(T, I_{1m})$ при постійному прямому струмі $I_{1m} = 1,438$ мА у діапазоні температур від 295 до 400 К. Калібрувальну залежність було знято в наступних контрольних точках за температурою: 295, 320, 340, 360, 380, 400 К (див. Фіг. 2.).

- 5 Після цього по калібрувальній залежності $U(T, I_{1m})$ визначають диференційну струмову термочутливість за формулою (2):

$$S \approx \frac{(2,387 \text{ В} - 2,563 \text{ В})}{(400 \text{ К} - 295 \text{ К})} = -1,68 \text{ мВ/К}.$$

Диференційна струмова термочутливість S , обчислена з отриманої калібрувальної залежності, склала 1,68 мВ/К.

- 10 У результаті, величина перегріву ΔT , розрахована за формулою (1) склала:

$$\Delta T = \frac{1}{(1,68 \text{ мВ/К})} \cdot (2,689 \text{ В} - 2,563 \text{ В}) = 75 \text{ К}.$$

- 15 Таким чином, запропонований спосіб, у порівнянні з відомими технічними рішеннями визначення температури активної області напівпровідникових приладів, характеризується простотою реалізації, дозволяє зменшити кількість операцій та має більш широкий діапазон застосування для різних приладів, оскільки може бути застосований до будь-яких напівпровідникових приладів на основі активних переходів (p-n, n-n⁺, p-p⁺, Ме-напівпровідник та ін.). Усе це обумовлює його широке застосування.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 20 Спосіб визначення величини перегріву кристала напівпровідникового діода за рівнем зниження прямого падіння напруги U , що включає вимірювання калібрувальної залежності $U(T, I)$ при постійному прямому струмі $I = I_i = \text{const}$ і температурах $T = \text{var}$, який **відрізняється** тим, що спочатку при заданій робочій температурі середовища випробувань $T = T_a$ вимірюють пряму
- 25 гілку вольт-амперної характеристики (ВАХ) діода й перебудовують її у вигляді $I_g = f(U)$, потім вимірюють калібрувальну залежність $U(T, I_i)$ при температурах $T \geq T_a$ та струмі $I_i = I_{1m}$, де I_{1m} - струмова координата точки переходу лінійної ділянки залежності $I_g = f(U)$ до нелінійної, а величину перегріву ΔT обчислюють за формулою:

$$\Delta T = \frac{1}{S} \cdot \Delta U,$$

- 30 де $S = \frac{dU(T, I)}{dT}$ - диференційна струмова термочутливість, виміряна на калібрувальній залежності $U(T, I_{1m})$,

$$\Delta U = U'_0 - U_0,$$

U_0, U'_0 - координати напруги, відповідно, точки переходу лінійної ділянки ВАХ до нелінійної і точки перетину прямої $I = I_p$ з прямою (променем), що є продовженням лінійної ділянки ВАХ в

- 35 область значень $I > I_{1m}$, I_p - амплітуда заданого робочого струму.

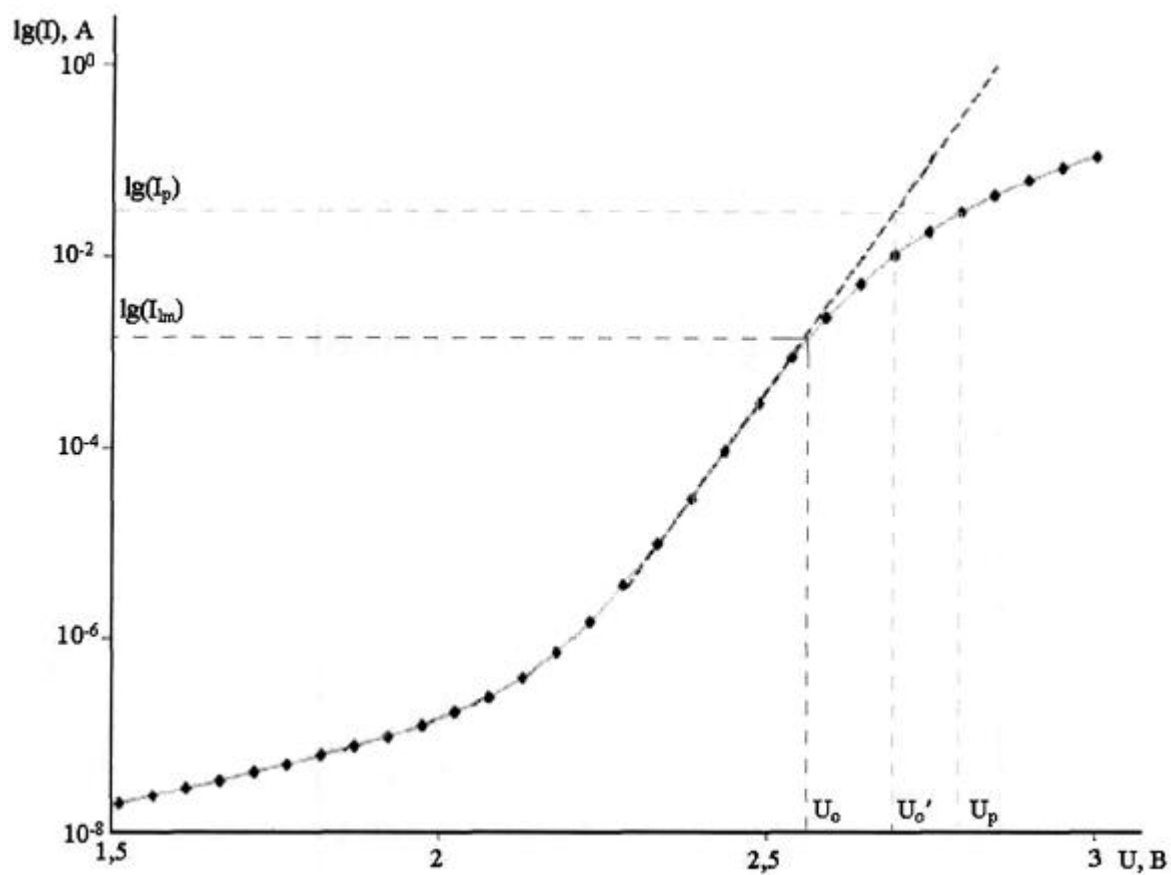


Fig. 1

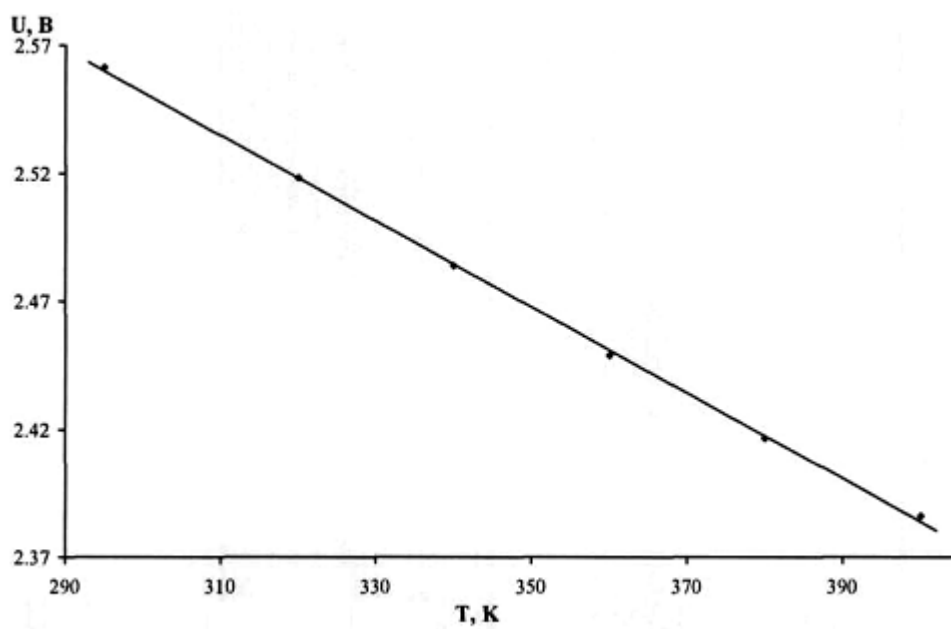


Fig. 2

Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601