



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **146236** (13) **U**  
(51) МПК (2021.01)

**H05K 9/00**

**H05F 3/02** (2006.01)

**H05F 3/04** (2006.01)

**H05K 1/02** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

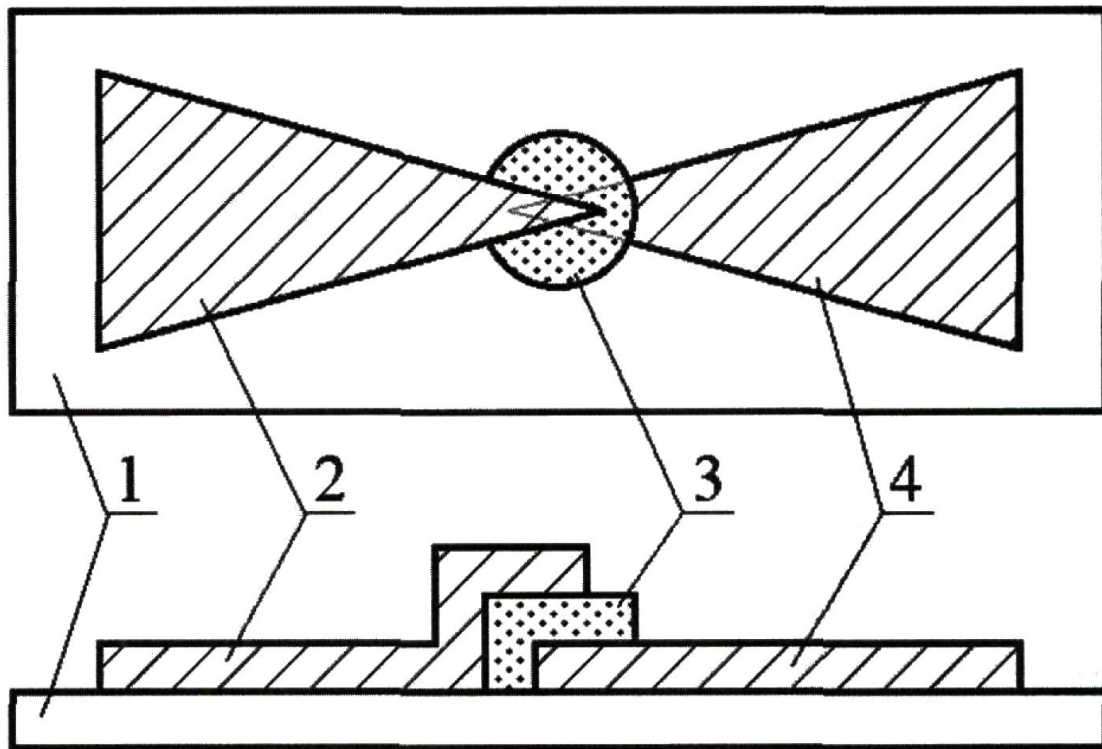
<b>(21)</b> Номер заявки: <b>u 2020 03902</b>	<b>(72)</b> Винахідник(и): <b>Хрипунов Геннадій Семенович (UA),</b> <b>Кіріченко Михайло Валерійович (UA),</b> <b>Зайцев Роман Валентинович (UA),</b> <b>Дроздов Антон Миколайович (UA),</b> <b>Меріуц Андрій Володимирович (UA),</b> <b>Нікітін Віктор Олексійович (UA),</b> <b>Хрипунов Максим Геннадійович (UA)</b>
<b>(22)</b> Дата подання заявки: <b>30.06.2020</b>	
<b>(24)</b> Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>04.02.2021</b>	
<b>(46)</b> Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>03.02.2021, Бюл.№ 5</b>	<b>(73)</b> Володілець (володільці): <b>НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ</b> <b>УНІВЕРСИТЕТ "ХАРКІВСЬКИЙ</b> <b>ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ",</b> вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002 (UA)

**(54) ЕЛЕМЕНТ ЗАХИСТУ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ВІД НАДВИСОКОЧАСТОТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ІМПУЛЬСІВ**

**(57) Реферат:**

Елемент захисту радіоелектронної апаратури від імпульсної перенапруги складається з двох електродів, зазор між якими заповнений хімічно чистою напівпровідниковою сполукою типу  $A_2B_6$ , що при проходженні надвисокочастотного високовольтного імпульсу тривалістю 30-100 нс за час, який не перевищує 2 нс, стрибкоподібно зменшує питомий електричний опір, забезпечуючи стікання енергії імпульсу крізь елемент захисту, має ресурс не менше 1000 спрацювань. Елемент виконаний у вигляді планарної тонкоплівкової композиції, має товщину не більше 12-15 мкм. Електроди мають форму трикутника та розміщені відносно один одного із площею перекриття не більше 5 мкм<sup>2</sup>. Рушійним механізмом переходу елемента у стан підвищеної провідності є інжекція електронів у напівпровідникову сполуку із збереженням її фазового складу.

**UA 146236 U**



Фиг. 2

Запропонована корисна модель належить до галузі електронної техніки та спрямована на забезпечення захисту радіоелектронної апаратури (РЕА) від надвисокочастотних (НВЧ) імпульсів та серій імпульсів електричної напруги як штучного так і природнього походження, збільшення надійності захисних елементів, спрощення технології їх виробництва і зниження матеріалоемності.

Проблема забезпечення електромагнітної стійкості радіоелектронної апаратури полягає в тому, що під впливом НВЧ електромагнітних імпульсів (ЕМІ) в ланцюгах індукуються імпульси перенапруги, що може мати серйозний згубний вплив на елементи РЕА.

Напівпровідникові радіоелектронні прилади особливо чутливі до руйнуючого впливу ЕМІ, завдяки властивостям р-п переходу та специфічній теплопровідності напівпровідникових матеріалів. Зі зменшенням розмірів конструкцій напівпровідникових пристроїв рівень їх пошкодження знижується, а для інтегральних схем - від  $10^{-3}$  Дж до  $10^{-7}$  Дж. Для забезпечення захисту електричних ланцюгів використовують елементи захисту РЕА від НВЧ ЕМІ. Найважливішою їх властивістю є їх здатність знижувати електричний опір з  $10^4$ - $10^{10}$  Ом за порядку кількох наносекунд до величини, значно нижчої, ніж вхідний опір елемента РЕА, коли напруга в ланцюзі перевищує порогову напругу. Враховуючи викладене, до основних характеристик сучасних елементів захисту РЕА слід додати також збільшений ресурс експлуатації та малий час релаксації, що дасть змогу протистояти сучасним зразкам зброї, які генерують серії ЕМІ.

З попередніх розробок відомий спосіб [1], який включає використання як захисного елемента плазмової хмари, що генерується в атмосфері безпосередньо над об'єктом, що захищається, оскільки як відомо плазма є природнім бар'єром для електромагнітних хвиль. Для формування шару плазми використано потужний імпульсний лазер із довжиною хвилі 1,06 мкм та тривалістю імпульсу 10 нс. Тобто використання такого способу не потребує модифікації РЕА, оскільки захист від ЕМІ реалізовано за рахунок створення додаткової системи на кшталт комплексів протиповітряної оборони.

Недоліком способу є неможливість використання для захисту малих розосереджених об'єктів та дронів через стаціонарний характер захисної системи, неможливість захисту від серій ЕМІ, необхідність окремої системи сенсорів для вчасної детекції генерації ЕМІ та велика вартість подібного захисного комплексу.

Відома також конструкція [2], яка являє собою елемент захисного кожуха РЕА, виконаний на основі тонких аморфних плівок напівпровідникового халькогенідного сплаву із елементів V або VI групи - Te, As, Ge, Si, який під дією імпульсу напруги, що поданий від спеціальної схеми детекції ЕМІ за час на рівні кількох наносекунд переходить із напівпровідникового у металевий стан та таким чином блокує проходження ЕМІ, оскільки метал є непрозорим для електромагнітних хвиль.

Недоліком розробки є необхідність використання додаткового ланцюга детекції ЕМІ та живлення захисного шару, що власне і забезпечує його перехід у металевий стан. Схема живлення виконана на основі конденсатора, що не дозволяє захистити елементи РЕА від швидкої серії імпульсів через необхідність перезарядки конденсатора.

Відомий [3], у якому пропонується захисний елемент у вигляді електростатичного розрядника, виконаний у планарному дизайні на друкованій платі. Особливості дизайну елементів розрядника, виконані із використанням фотолітографії, дозволили відмовитись від системи детекції ЕМІ, оскільки стікання напруги крізь іскровий проміжок розрядника відбувається лише при досягненні певного, наперед заданого значення напруженості електричного поля на вістрі розрядника, таким чином даний захисний елемент працює повністю в автоматичному режимі та може здійснювати захист РЕА від серії імпульсів.

Недоліком розробки є використання як елемента захисту іскрового розрядника, оскільки принцип його роботи обумовлює ускладнення конструкції РЕА через необхідність ізоляції такого елемента від загальної атмосфери, в якій знаходиться РЕА з міркувань безпеки та стабільності роботи, оскільки як відомо параметри іскрового розряду залежать в тому числі і від атмосфери, в якій він відбувається. Також використання при виготовленні захисного елемента процесів фотолітографії ускладнює технологію виробництва та збільшує вартість таких приладів.

Найбільш близьким аналогом до запропонованої корисної моделі можна вважати напівпровідниковий симетричний обмежувач [4] - елемент захисту високочастотної РЕА від впливу НВЧ імпульсів високої напруги тривалістю до 1 мкс, штучного та природнього походження, типова форма яких наведена на Фіг. 1. Основою елемента є хімічно чиста напівпровідникова сполука типу  $A_2B_6$  зі стовпчатою, орієнтованою, уздовж зазору монокристалічною структурою, у якій наявний, при нагріванні і охолодженні, оборотний фазовий перехід. Конструктивно такий елемент було виготовлено шляхом нанесення напівпровідникової

сполуки на металеву підкладку, що забезпечувала електричний контакт до корпусу приладу. Неруйнуючий електричний контакт до напівпровідникової сполуки забезпечувався металевим електродом із півсферичною полірованою поверхнею. Для відстеження змін товщини плівки, викликаних нагріванням і охолодженням під час фазових переходів, електрод мав можливість

5 вільно переміщатися перпендикулярно до поверхні плівки за рахунок реалізації пружинного підвісу та використання трубчастої фторопластової вставки як направляючого елемента. Для захисту від зовнішнього середовища та підключення до контактів РЕА всі деталі елемента захисту біло розміщено у стандартних корпусах НВЧ діодів типу Д403Б.

Принцип дії засновано на тому, що під дією імпульсу тривалістю 1 мкс та більше за рахунок нагрівання напівпровідникової сполуки відбувається зміна її фазового стану та, як наслідок, стрибкоподібне зменшення питомого електричного опору, що і забезпечує захист РЕА шляхом стікання заряду імпульсу крізь захисний елемент. При охолодженні захисного елемента відбувається зворотний фазовий перехід у стан із збільшеним електричним опором і елемент знову переходить у режим очікування, та як показано у [4], елемент такого типу може

10 спрацювати не менше 50 разів.

Недоліком найближчого аналога є використання принципу фазового переходу, для реалізації якого потрібне нагрівання напівпровідникового матеріалу до температури перекристалізації, що зменшує ресурс елемента, оскільки 50 кратне спрацювання є недостатнім в сучасних умовах для надійного захисту РЕА від серій НВЧ високовольтних імпульсів різного походження. Також в сучасних умовах є неприйнятним наявність рухомих механічних частин та розміщення захисного елемента у окремому корпусі, із урахуванням постійної мініатюризації РЕА захисний елемент повинен бути виконаний у планарному дизайні для його розміщення безпосередньо на платах тих елементів РЕА, що потребують захисту.

20

Задача запропонованої корисної моделі полягає у забезпеченні захисту РЕА від імпульсів та серій імпульсів високої напруги як штучного так і природного походження, збільшенні надійності захисних елементів, спрощенні технології їх виробництва і підвищенні ефективності використання дорогих ресурсів.

25

Поставлена задача вирішується тим, що елемент захисту радіоелектронної апаратури від імпульсної перенапруги, який складається з двох електродів, зазор між якими заповнений хімічно чистою напівпровідниковою сполукою типу  $A_2B_6$ , що при проходженні надвисокочастотного високовольтного імпульсу тривалістю 30-100 нс за час, який не перевищує 2 нс, стрибкоподібно зменшує питомий електричний опір, забезпечуючи стікання енергії імпульсу крізь елемент захисту, має ресурс не менше 1000 спрацювань, згідно з корисною моделлю, елемент виконаний у вигляді планарної тонкоплівкової композиції, має товщину не

30 більше 12-15 мкм, електроди мають форму трикутника та розміщені відносно один одного із площею перекриття не більше 5 мкм<sup>2</sup>, а рушійним механізмом переходу елемента у стан підвищеної провідності є інжекція електронів у напівпровідникову сполуку із збереженням її фазового складу.

Запропонований елемент захисту РЕА має такі відмінні риси: в діапазоні тривалості імпульсу 30-100 нс перехід напівпровідникової сполуки у стан з низьким опором забезпечується інжекцією електронів із металевих електродів;

40

не використовується принцип фазового переходу для зміни стану провідності напівпровідникової сполуки, що збільшує ресурс елемента не менше ніж до 1000 спрацювань;

конструктивно елемент виконаний у вигляді планарної тонкоплівкової композиції, що виключає використання процесу фотолітографії;

45

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями:

на Фіг. 1 наведені типові профілі ЕМІ, що генеруються під час ядерного вибуху та в результаті роботи спеціалізованих генераторів

на Фіг. 2 схематично показано запропоноване конструктивне рішення елемента захисту РЕА: 1 - діелектрична підкладка, 2, 4 - металеві електроди, 3 - напівпровідникова сполука типу  $A_2B_6$ ;

50

на Фіг. 3 показано експериментальний стенд на основі зарядової лінії, що забезпечує генерацію прямокутних імпульсів високої напруги із наносекундною тривалістю фронту наростання;

на Фіг. 4 наведені типова форма прямокутного імпульсу, дії яких піддавалися тестові зразки елементів захисту РЕА (а) та типова вольт-секундна характеристика тестових зразків елементів захисту РЕА під дією імпульсу високої напруги.

55

Приклад реалізації запропонованої корисної моделі.

Практична апробація розробки проведена на серії зразків із структурою,  $e/A_2B_6/Me$ , геометрія яких відповідала наведеній на Фіг. 2. Досліджувані зразки підключались до

60

вимірювального стенда, показаного на Фіг. 3, основним елементом якого є кабельний генератор типу зарядова лінія, що являє собою коаксіальний кабель довжиною 15 м, яка при розряді на узгодженому навантаженні номіналом 50 Ом забезпечує формування імпульсу прямокутної форми, амплітуда якого становить половину від зарядної напруги кабелю. Як комутатор використано ртутне герконове реле, що дозволило отримати час наростання імпульсу напруги не більше 1 нс та тривалість від 30 до 100 нс. Вимірювальний стенд дозволяє подавати на досліджуваний зразок прямокутні імпульси напруги з амплітудою від 20 до 200 В у ручному або автоматичному режимі з періодом від 1 с до години. Типова форма таких імпульсів, зареєстрована за допомогою цифрового осцилографа Siglent SDS, показана на Фіг. 4а.

За результатами апробації зразків елементів захисту під дією імпульсів напруги з амплітудою від 20 В до 200 В та тривалістю 30 та 100 нс було одержано серію вольт-секундних характеристик, якісно подібних до зображених на Фіг. 4а та схематично наведених на Фіг. 4б.

Аналізуючи дані, наведені на Фіг. 4а та 4б, можна зробити висновок, що вольт-секундна характеристика має чотири чітко виражені часові інтервали: I асимптотичного спаду (50 нс після спрацювання елемента захисту) до деякої залишкової напруги  $U_3$ . Було встановлено, що виготовлені зразки спрацювають при напругах на рівні 1/3 величини поданого імпульсу. Зі збільшенням амплітуди поданого імпульсу напруги час швидкого спадання скорочується, а час релаксації збільшується. Середній час наростання фронту імпульсу (область I на Фіг. 4б) і час швидкого спадання (область II на Фіг. 4б) становив 2,5 нс і 27 нс відповідно і нс залежав від збільшення напруги імпульсу, і розбіжність цих значень для різних зразків становило не більше 0,5 нс. Час же повільного зниження (область III на Фіг. 4б), навпаки, зростає із збільшенням амплітуди імпульсу, його максимальне значення становило 9 нс, а розбіжність - 6 нс. Далі, через 50 нс після спрацювання, на зразках фіксувалась певна залишкова напруга  $U_3=1,5$  В, яка була однаковою для всіх зразків.

Стосовно механізму подібного спрацювання, що являє собою багаторазове перемикання між станами з низьким і високим рівнем електропровідності, то раніше у [4] для подібних тестових об'єктів спостерігали особливість швидкого перемикання, але без можливості повторити це перемикання багато разів, оскільки ефект перемикання був пов'язаний з формуванням каналу високої провідності в плівці напівпровідника за рахунок локального плавлення матеріалу під впливом високоенергетичного електромагнітного імпульсу. Тестові структури на основі такого механізму не змогли продемонструвати стабільність ефекту перемикання, оскільки чисельні локальні плавлення тонкоплівкової напівпровідникової структури призводять до її деградації та неможливості відновлення до початкового стану. Але для розроблених зразків елементів захисту, згідно з оцінками енергії імпульсу ( $W=tU^2/R=80 \cdot 10^{-9} \cdot 42^2/50 \approx 2,76$  мкДж), цієї енергії достатньо лише для нагрівання плівки напівпровідникової сполуки в контактній області до температури  $\sim 50^\circ\text{C}$  ( $W=mc\Delta T \rightarrow \Delta T=2,76/46^\circ\text{C}$ ), якої, як і тривалості імпульсу, недостатньо для забезпечення високої електропровідності за рахунок нагрівання. Тому механізм, пов'язаний із інжекцією електронів від металевого контакту, є найбільш вірогідним механізмом переходу плівки у стан з високою електропровідністю під дією короткочасного імпульсу високої напруги.

При напругах, що відповідають переходу в стан з високою електричною провідністю ( $\sim 20$  В), швидкість дрейфу інжекттованих електронів (якщо припустимо, що рухливість електронів у плівці напівпровідникової сполуки типу  $A_2B_6$  становить  $\sim 100$  см<sup>2</sup>/Вс) досягає  $\sim 3 \cdot 10^6$  см/с, а час їх транзиту крізь плівку становить  $\sim 2 \cdot 10^{-10}$  с, що коротше їхнього часу життя, який для плівок такого типу, виготовлених вакуумними методами, зазвичай становить  $\sim 1$  нс. Подібний розрахунок вичерпно пояснює здатність зразків елементів захисту багаторазово перемикатися перед станами низької та високої провідності. Реалізація у дослідженій структурі інжекції електронів, як рушійного механізму переходу у стан підвищеної провідності, не впливає на структуру напівпровідникової плівки, тому досліджені зразки мають практично не обмежений ресурс роботи та можуть бути встановлені у блоках РЕА, не потребуючи періодичної заміни. Для підтвердження тестові зразки були піддані дії серії імпульсів високої напруги у кількості 1000 шт. із періодом 0,5 с, та таким чином було продемонстровано здатність пропонованого елемента захисту РЕА до багаторазового перемикання як зі стану з низькою електропровідністю до високопровідного, так і у зворотному напрямі.

Експериментально встановлена практична ефективність запропонованої моделі - елемента захисту РЕА - здатність структури  $Me/A_2B_6/Me$  до багаторазового перемикання між станами з низьким і високим рівнем електропровідності під впливом імпульсів високої напруги. Час перемикання не перевищує 2,5 нсек, а амплітуда початкового імпульсу практично не впливає на час перемикання та значення напруги, при яких структура переходить у стан високої провідності.

Таким чином, використання запропонованої корисної моделі дозволяє забезпечити захист радіоелектронної апаратури від імпульсів та серій імпульсів високої напруги як штучного, так і природного походження, збільшити надійність захисних елементів, спростити технології їх виробництва і знижити матеріалоемність.

5 Джерела інформації:

1. Патент US № 10.342.111 B2., МПК H05H 1/24, F41H 13/00, F41H 11/00. Electromagnetic pulse protection method and electromagnetic pulse protection system /Sh. Nishikata, Y. Kuroda, H. Ikebuchi, K. Hamamoto, M. Morioka, A. Ochiai. - № 15/562642 Заявлено 14.04.2016; Опубл. 02.07.2019.

10 2. Патент US № 5.022.742, МПК G02F 1/015, G21F 3/00, G02F 1/01. Fast shutter for protection from electromagnetic radiation /F.D. Hains. - № 06/538617; Заявлено 03.10.1983; Опубл. 11.07.1991.

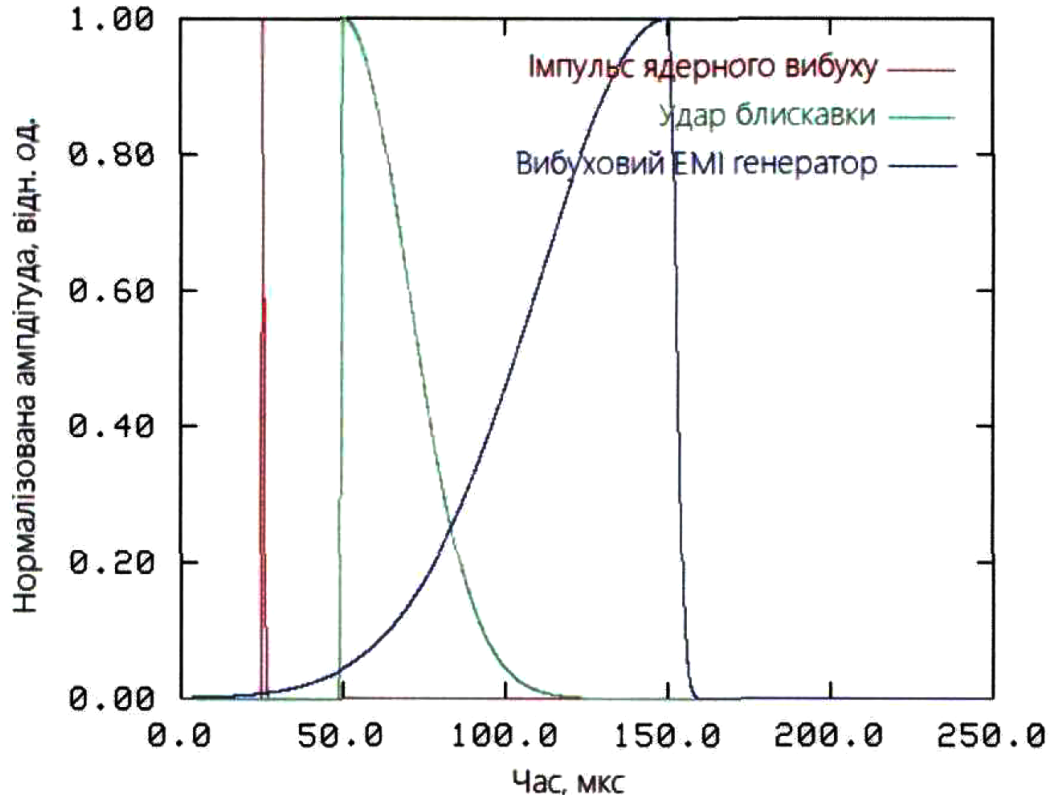
3. Патент US № 2004/0027779 A1, МПК H05K 9/00; H05F 3/02; H05F 3/04; H05K 1/02; H02B 1/00. Electrostatic discharge protection /D.J. Byrne, A.S. Pandit, M.N. Robins. - № 10/215501; Заявлено 09.08.2002; опубл. 12.02.2004.

15 4. AC CPCP № 319546, МПК H05K 9/00; H05F 3/02; H05F 3/04; H05K 1/02 опубл. 01.10.1990.

#### ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

20 Елемент захисту радіоелектронної апаратури від імпульсної перенапруги, який складається з двох електродів, зазор між якими заповнений хімічно чистою напівпровідниковою сполукою типу  $A_2B_6$ , що при проходженні надвисокочастотного високовольтного імпульсу тривалістю 30-100 нс за час, який не перевищує 2 нс, стрибкоподібно зменшує питомий електричний опір, забезпечуючи стікання енергії імпульсу крізь елемент захисту, має ресурс не менше 1000

25 спрацювань, який **відрізняється** тим, що елемент виконаний у вигляді планарної тонкоплівкової композиції, має товщину не більше 12-15 мкм, електроди мають форму трикутника та розміщені відносно один одного із площею перекриття не більше 5 мкм<sup>2</sup>, а рушійним механізмом переходу елемента у стан підвищеної провідності є інжекція електронів у напівпровідникову сполуку із збереженням її фазового складу.



Фіг. 1

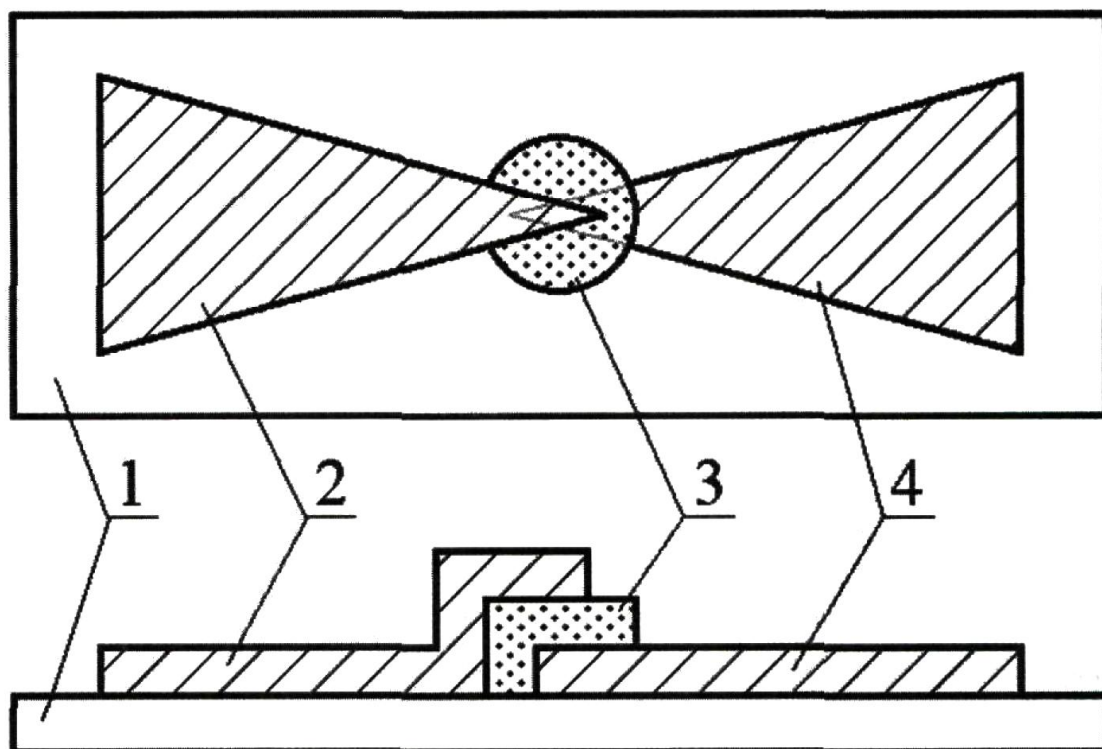


Fig. 2

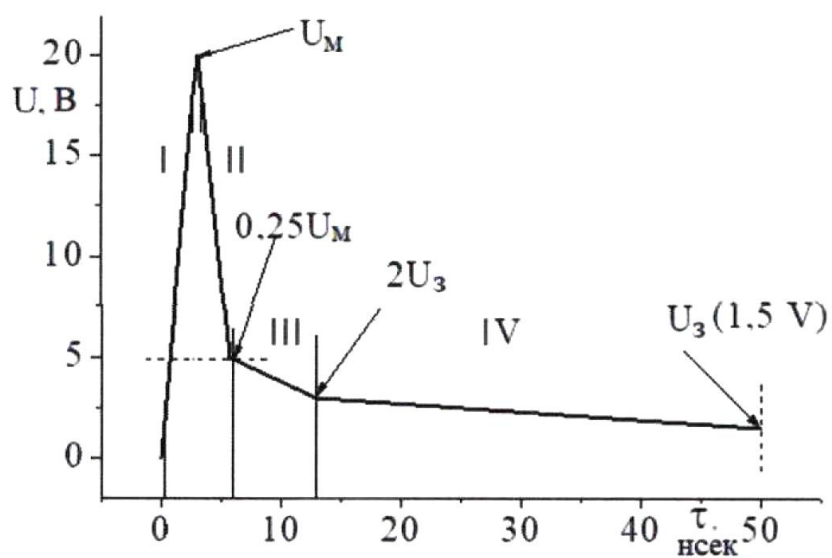


Fig. 3





a)



б)

Фіг. 4