

Кунденко М.П.¹, д.техн.н., професор, Мардзявко В.А.², аспірант,
Руденко А.Ю.², аспірант

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ГЕНЕРАЦІЇ НВЧ ВИПРОМІНЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯМ АДАПТИВНОГО ТИПУ ДІОДІВ ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО КОНСТРУЮВАННЯ АПАРАТІВ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

² Державний біотехнологічний університет, Харків

Ключові слова: діод, генератор імпульсних напруг, зерно, НВЧ випромінення, діод Ріда.

Постановка проблеми. Розвиток сучасного агропромислового комплексу тісно пов'язаний з вирішенням питань підвищення якості продукції у всіх технологічних процесах, зокрема в процесі зберігання. Перспективним для застосування залишається електрофізичний метод обробки зернової продукції, розвиток даного методу крокує з розвитком напівпровідникової техніки та методів компоновки, що можуть забезпечити якісне використання елементів та з'єднань НВЧ ланцюгів, забезпечення адаптивного контролю параметричних складових системи з можливістю їх корегування [1–2].

Дослідження питання вдосконалення розглядалися в роботі [3], де визначались методики підсумовування потужностей та адаптивного поєднання діодів в загальну систему в резонатор при максимальній потужності випромінення.

Слід зауважити потреби установок у високоефективних генераторах надвисокої частоти (НВЧ) з високим ККД схем генерування з урахуванням теплових втрат в діодах. Для зменшення теплових втрат в процесі роботи діоду слід адаптувати процес генерації імпульсу вихідної потужності та моменту так званого терморелаксу.

Для ефективного виконання технологічного процесу слід використовувати генератори частотою 20 ГГц та вище, однак важливою складовою також є потужність випромінювання. В роботі Сілі І. І. [4] вказується про потреби використання випромінення потужністю 600 Вт для знезараження клубнів картоплі, виходячи з чого можна сказати, що потрібно раціонально оцінювати параметри потужності опромінення НВЧ зважаючи на біофізичні особливості всіх агрокультур.

Мета: аналіз технології генерації НВЧ випромінення за параметром ККД імпульсного генератора.

Аналіз попередніх досліджень. Конструювання та проектування електромеханічних засобів, що базуються на використанні НВЧ пов'язують з використанням напівпровідникових генераторів та діодних підсилювачів. Використання даних елементів дозволяє отримувати значення потрібних для використання параметрів потужності та частоти від 1 Вт з частотними показниками від 29 до 50 ГГц, чи навпаки. Радіотехніка такого типу дозволяє використовувати напівпровідникову техніку в розробці високостабільних потужних імпульсних

генераторів [5].

В процесі використання діоди поділяють на декілька типів, що базуються на особливостях напівпровідників, котрі використовуються в діоді: до першого типу можна віднести напівпровідники, які базуються на ефекті Ганна; до другого відносять напівпровідники, що використовують проліт електронів в області дрейфу з множенням заряду, перспективними для такого типу є діоди Ріда або двопролітний лавинно-пролітний діод (ЛПД).

Використання в діодах такзваного «ефекту Ганна», базується на використанні іонізуючих процесів в атомарній структурі твердого тіла під впливом сильних електричних полів. Він може спричинити появу додаткових електронів і дірок, які можуть впливати на провідність та інші електронні властивості матеріалу. Ефект Ганна виявляється, коли напруженість електричного поля в міжатомному просторі стає настільки великою, що відбувається значна тунельна іонізація. Досить яскраво це представляється в сполуках *GaAs*, *InP*. Такий ефект можливо спостерігати й в інших сполуках, де можливо два мінімуми в структурі кристалу діода [6–7].

Описати роботу системи бази діода з арсеніду галію *n*-типу можна відносно носіїв заряду, котрі знаходиться в сильному електромагнітному полі, рухливість якого залежить від напруженості поля $\mu = \mu(\epsilon)$. Статична провідність напівпровідника враховують в диференційному законі Ома:

$$i = en\mu\epsilon = \sigma_0\epsilon, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{диф}} = \frac{\partial i}{\partial \epsilon} = en\mu + en\epsilon \frac{\partial \mu}{\partial \epsilon} = \sigma_0 \left(1 + \frac{\epsilon}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial \epsilon} \right). \quad (2)$$

У відповідності з диференційним законом Ома (2) провідність напівпровідника прив'язується до напруженості поля, зміни якого можуть корегувати диференційну проникність в позитивне або негативне значення.

Спостерігати даний ефект можливо при використанні зокрема арсеніду галію *n*-типу. Даний ефект отримується при використанні рівномірно легованого металу, що використовується як і в будові звичайного діоду рис. 1.

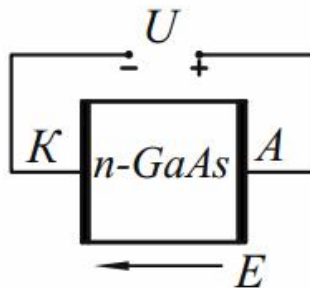


Рисунок 1 – Схема заміщення з використанням арсеніду галію *n*-типу

Протікання процесів в даній системі пояснюються графіками рис. 2 (а, б) та рис. 3 (а, б) [8].

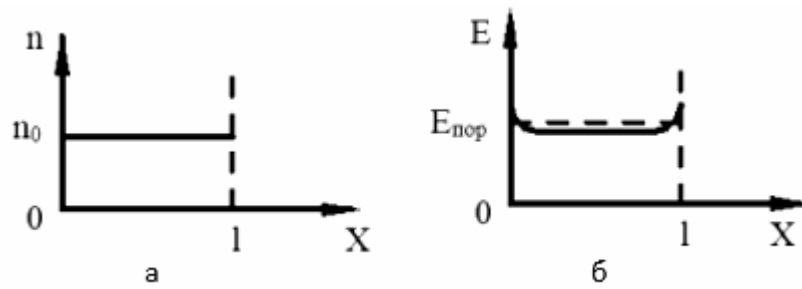


Рисунок 2 – Концентрація розподілу електронів й напруженості електромагнітного поля в кристалі: *a* – концентрація електронів в напівпровіднику, що поміщений в електромагнітному полі; *б* – зміна напруженості в об’ємі всього напівпровідника по в електромагнітному полі

Процес, який протікає в діоді (див. рис. 1), пояснює процес підсилення, котрий відбувається циклічним повторенням утворень доменів біля катода та рухом в сторону анода з подальшою руйнацією, що дозволяє збільшити I_{max} .

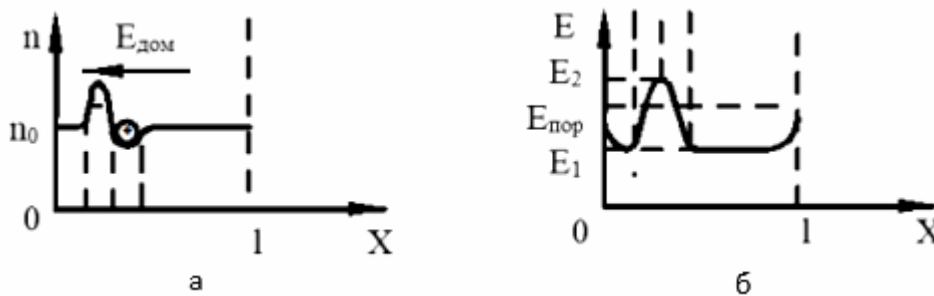


Рисунок 3 – Розподіл носіїв зарядів та напруженості в кристалі при утворенні домену: *a* – з урахуванням власного електромагнітного поля $E_{дом}$; *б* – показники напруженості поля в домені E_2 та E_1 за його межами

Пояснення роботи діода з ефектом Ганна дає можливість використання таких діодів в промисловості та в процесі генерації НВЧ випромінювання в установках для знезараження. Один з варіантів використання даного діода, котрий проаналізований вище, базується на використанні параметру довжини кристалу в своїй конструкції, що має назву пролітного режиму.

Основними параметрами діоду Ганна є частота коливань, вихідні потужності та коефіцієнт корисної дії. Даний діод отримав широке застосування в генерації НВЧ випромінювання, діапазон можливостей становить від 1 до 90 ГГц.

Діоди другого типу – ЛПД. Конструкція ЛПД базується на використанні від’ємного опору в діапазоні надвисоких частот, утворення якого відбувається в процесі множення носіїв заряду та їх проході через напівпровідник. Рух заряджених частинок з утворенням надлишкових носіїв в області дрейфу в момент лавинного пробію відбувається в зоні впливу прикладеної напруги. За рахунок виникнення такого процесу відбувається збільшення струму та зменшення напруги, тому виникнення провідності з від’ємним показником дає змогу використовувати це в установках для генерації НВЧ випромінювання [8–9].

Вперше дослідження в цьому напрямку було проведено 60-х роках в Німеччині вченим В. Шотткі. Діоди які використовувалися для порівняння, мали свої певні конструктивні особливості, за якими їх можна поділити як:

- діод Ріда;
- діод з різким несемеричним переходом;
- діод з двома дрейфовими областями;
- діод з двошаровою базою;
- діод з тришаровою базою.

В дослідженнях вказують на перспективу використання інжекційно-прогонного діоду (ІНД) [10]. Діод ІНД має більше схожості з діодом з двошаровою базою. ІНД має більше переваг над діодом Ріда (табл. 1).

З перелічених переваг та якостей, що роблять ІНД діод перспективним у розвитку та застосуванні у виробництві відображаються й головні недоліки, котрі насамперед обмежують його застосування. В апаратах для знезараження зернової продукції даний діод типу ІНД застосовувати нелогічно, адже низький ККД даного діода є значним негативним показником, логічно використовувати подібний за властивостями двошвидкісно пролітний діод або модернізований діод Ріда.

В процесі генерування ЛПД застосовують в поєднанні з резонатором, що дає можливість генерування в НВЧ діапазоні в неперервному режимі з ККД 10 % при цьому верхньою межею в частотному діапазоні є 300 ГГц. Такий генератор має можливість регулювання частоти за допомогою зміни постійної напруги або використання змін власної частоти резонатора.

Якщо розглядати проблему ефективності роботи потрібно сконцентрувати увагу на процесі роботи діода в режимі генератора, в якому відбір потужності відбувається від терміналу.

Таблиця 1 – Переваги ІНП

Перевага в процесі використання	Пояснення та обґрунтування
Відсутність затримки	Мінімізовано час наростання лавини, що аргументується застосуванням даних приладів для виконання конструкторських завдань при генерації малих потужностей з залученням низького ККД.
Менший шум при переході через бар'єр	Інжекція носіїв заряду через бар'єр значно краща ніж в ЛПД
Більша потужність та менша величину мінімального сигналу	Така особливість переваг пояснюється конструктивними особливостями самого приладу

Модифікація діода Ріда можлива при застосуванні бар'єру Шотткі. Загалом бар'єр Шотткі представляє собою фізичний процес, що протікає з насиченням напівпровідника металевою основою, що провокує утворення носіїв та додаткового опору поля, якість подолання якого залежить від параметрів бар'єра та затраченої сили [11].

Діод Ріда модифікують за допомогою заміщення шару p^+ на металевий шар контакту. Така конструктивна особливість збільшує ККД шляхом зменшення накопичення неосновних носіїв, що є притаманним діоду Ріда [12–13].

Проаналізоване вище є складовою подальшого удосконалення устаткування для знезаражуючих технологій агропродукції. Використання застарілої напівпровідникової технології є стримуючим фактором, отже можливе прискорення використання даного типу знезараження та стимуляції. На даний момент головним питанням є покращення ефективності обробки установкою, тому необхідно зосередитись на підвищенні ККД генеруючої установки НВЧ. ККД можливо збільшити за рахунок правильного вибору генеруючого діода, що підвищує продуктивність генератора НВЧ. Обрання діода відбувається за параметрами у відповідності з класовими типами та має концентруватися на відповідних параметрах потрібного класу. Основними параметрами для діода Ганна є робочий діапазон частот; мінімальна безперервна вихідна потужність генеруючого сигналу в робочому діапазоні частот; робочий струм діода; опір діода [14]. Діоди Ріда мають наступні параметри: вихідна потужність P , номінальний робочий струм I_0 , температурний коефіцієнт потужності ТКП, температурний коефіцієнт частоти ТКЧ, а також параметр самого діода (допустима величина струму $I_{доп}$, пробивна напруга $U_{пр}$, ємність корпусу C_k , індуктивність діода, ємність $p-n$ переходу C).

Але використання діодних генераторів передбачає використання певних схем підсилення з загально відомим конструктивними особливостями та використання в них складової для отримання оптимальної потужності необхідного діапазону при встановленні оптимальних умов для діода в максимумі ККД генерації.

Виклад основного матеріалу. При розгляданні проблеми підвищення ККД генерування НВЧ для обробки сільськогосподарської продукції виникає питання ККД самого діодного елемента.

Загалом втрати в напівпровідникових діодах пов'язані з втратами зворотних струмів, що описується за допомогою апроксимації реальної вольт-амперної характеристики (ВАХ). Залежність даного типу втрат показана на рис. 4, гілку характеристики ВАХ діода апроксимуємо за допомогою двох прямих, за початкові значення прямої беруться початкове падіння напруги на вентилі діода U_0 (напруга відсічки або порогова напруга) та середнє значення диференційного опору на робочій ділянці характеристики R_d . Диференційний опір визначається як $R_d = tg\alpha$, а отже це тангенс похилої прямої, що проходить крізь дві точки ВАХ. За таким принципом апроксимують й зворотну гілку характеристики ВАХ. Параметрами зворотної гілки служать зворотній струм $I_{зв}$ та середня динамічна провідність G_d , котру визначають як $G_d = tg\beta$.

Посилаючись на рис. 4, за яким відбувається апроксимація прямої гілки ВАХ, описується напрямок напруги в діоді в прямому напрямі за формулою:

$$u_{в.п.} = U_0 + R_d i_{в.п.} \quad (3)$$

Наступним кроком є визначення середньої потужності за період $P_{п}$, при протіканні прямого струму:

$$P_{п} = \frac{1}{T} \int_0^{\lambda} u_{в.п.} i_{в.п.} dt \quad (4)$$

Кінцевим рівнянням для $P_{п}$ буде рівняння:

$$P_{\pi} = \frac{U_0}{T} \int_0^{\lambda} i_{\text{в.п.}} dt + \frac{R_{\text{д}}}{T} \int_0^{\lambda} i_{\text{в.п.}}^2 dt = U_0 I_{\text{в.ср}} + R_{\text{д}} I_{\text{в}}^2 = P_{\text{п.ср.}} + P_{\text{пд.}} \quad (5)$$

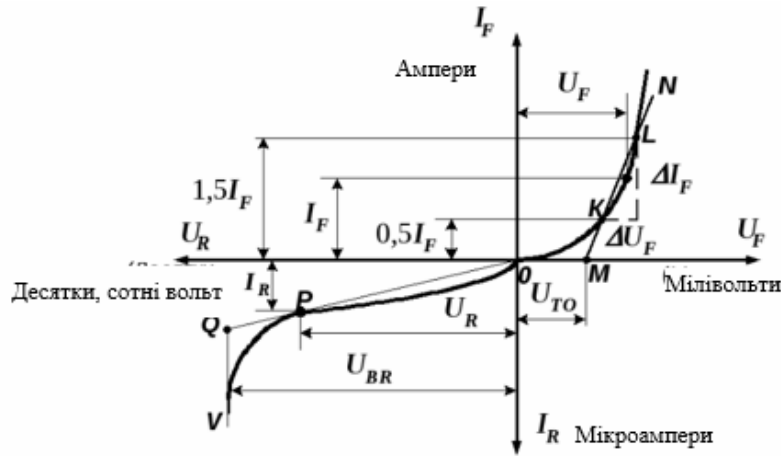


Рисунок 4 – Вольт-амперна характеристика діода

Аналізуючи кінцевий варіант формули (5) видно, що потужність втрат прямого струму поділяється на дві складові $P_{\text{п.ср.}}$ та $P_{\text{пд.}}$. Потужність $P_{\text{п.ср.}}$ залежить від середнього значення струму через діод, $P_{\text{пд.}}$ кратна квадрату діючого значення. Загальні твердження ведуть до умов правильності обрання діода, адже коефіцієнт кривої струму залежить від ряду причин. Крива струму значно залежить від шляху його проходження, режиму роботи діода та співвідношення втрат середнього значення струму. В номінальній роботі в сумі втрат виокремлюються втрати середнього значення струму, а в режимі перенавантаження втрати визначає діючий струм [14–16].

Втрати потужності в діоді при протіканні зворотного струму розраховуються за таким же алгоритмом з використанням апроксимації ВАХ діода (див. рис. 4), миттєве значення струму визначається за формулою (6):

$$i_{\text{в.зв.}} = I_{\text{зв}} + G_{\text{д}} u_{\text{в.зв.}} \quad (6)$$

Посилаючись на рис. 4, можна без великих проблем визначити середнє значення потужності $P_{\text{зв.}}$, користуючись формулою (7):

$$P_{\text{зв.}} = \frac{1}{T} \int_0^{T-\lambda} u_{\text{в.зв.}} i_{\text{в.зв.}} dt = I_{\text{зв}} U_{\text{в.ср}} + G_{\text{д}} U_{\text{в}}^2 \quad (7)$$

Формула (7) показує, що втрати в діоді на зворотній гілці залежать від середнього та від діючого значення напруги. Загалом на втрати зворотного струму приходиться 5–10 % загальних втрат в кремнієвих діодах. Розглядаючи втрати в високовольтних діодах, можна відмітити, що такі втрати зростають з додатковим зростанням температури в зоні $p-n$ переходу [17–18]. Тоді розрахунок прийме вигляд (8):

$$P_{зв.л} = U_{л.в.зв} i_{зв} + R_{дф.зв} i_{зв}^2, \quad (8)$$

де $R_{дф.зв}$ – диференціальний опір в зоні лавинного прольоту в ВАХ ($R_{дф.зв} = tg\delta$).

Використовуючи формул (8), можна розрахувати середнє значення потужності $P_{зв.л}$ в періодичному режимі роботи або в процесі однократного імпульсу.

До третьої гілки втрат можливо віднести комутаційні втрати. Загалом вважається, що комутаційні втрати виникають в інтервалах часу увімкнення та вимкнення діоду. Перехідний процес, що протікає, не є миттєвим, а має певний часовий проміжок в діапазоні від одиниці до десятків мікросекунд [20–21].

На рис. 5, а вказано зміни струму й напруги діодів в інтервалі включення $t_{вк}$ та в інтервалі часу зворотного відновлення $t_{зв.в}$. В процесі включення вентиля із-за перехідних процесів в $p-n$ переходу прямої напруги встановлюється не відразу. В процесі роботи пристрою в інтервалі часу вмикання при наростанні струму через вентиль може збільшитися пряма напруга, що обумовлює миттєві значення потужності достатньо великого діапазону.

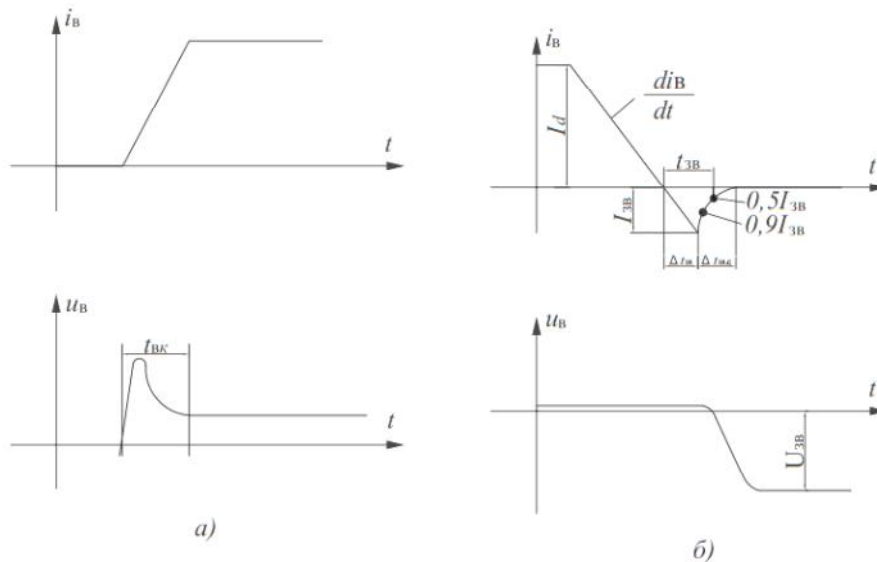


Рисунок 5 – Криві миттєвого значення струму та напруги для перехідних процесів:
а) вмикання; б) вимкнення

Розглядаючи процес вимикання діода, можна сказати, що замикаюча здатність відновлюється за проміжок часу, яка супроводжується процесом спадання прямого струму $i_{в} \rightarrow 0$, таким чином в продовж певного відрізка часу ($\Delta t_{зв}$) діод має пропускну здатність.

На рис. 5,б відображено перехідний процес відновлення запірної функції за інтервал часу $\Delta t_{зв.с}$. В продовж протікання перехідного процесу відновлення відбувається скачкоподібне зростання опору, що в призмі закону Ома пояснює подальшу стабілізацію зворотного струму до нормальних значень [22].

Максимум значення зворотного струму $I_{зв}$ в діоді обумовлене так званим ефектом накопичення носіїв заряду неосновної ланки в структурі $p-n$ переходу. Накопичення заряду залежить передусім від струму в період вимкнення I_d , а також від швидкості його спадання в процесі регенерації $di_{в}/dt$. Можливо стверджувати, що основна доля

втрат діодів основана на втратах комутаційного характеру в процесі вимкнення. Розрахунок середнього значення комутаційних втрат:

$$P_{\text{ср.вик.}} \approx \frac{U_{\text{зв}} I_{\text{зв.м}} \Delta t_{\text{зв.с.}}}{6T}. \quad (9)$$

Відповідно, формула (6) виведена, виходячи з лінійної апроксимації кривих $i_{\text{в}}(t)$ і $u_{\text{в}}(t)$ в інтервалі $\Delta t_{\text{зв.с.}}$.

Комутаційні втрати грають значну роль й повинні бути враховані тільки при роботі діода в перетворювачах високої та надвисокої частоти ($f = 400$ Гц).

Розглядаючи ЛПД структуру, можливо стверджувати, що втрати зворотного струму є не актуальними для даного типу напівпровідників. Це пояснюється принципом роботи та метою використання структурної особливості конструкції ЛПД. Оптимізацію даного процесу генерації пов'язують з пролітною зоною. Час прольоту залежить безпосередньо від довжини пролітної зони $l_{\text{пр}}$ та дрейфової швидкості насичення $v_{\text{нас}}$ [23–24]:

$$t_{\text{прл}} = \frac{l_{\text{пр}}}{v_{\text{нас}}}. \quad (10)$$

Насамперед актуальність застосування діода в процесі генерування, як сказано раніше залежить від його особливостей в конструкції насамперед ЛПД розрізняють за (7): однопролітна $p^+ - n - n^+$ структура; двопротітна $p^+ - p - n - n^+$ структура; структура $p^+ - p - i - n^+$ (діод Ріда). Розглядаючи процес роботи ЛПД можна стверджувати, що в процесі генерування в діоді одночасно буде подаватись зворотна напруга $U_{\text{зв}}$, котра матиме значення, близькі до напруги пробою, та напруга НВЧ $u(t)$. На відрізку часу, коли змінна напруга проходить максимум, на відрізку $p - n$ переходу досягається крайнього значення $E_{\text{кр}}$ та на ділянці $l_{\text{пр}}$ починається лавинне множення заряду. Залежно від довжини пролітної частини та НВЧ напруги згусток може рухатись або в прискорювальному, або в гальмувальному полі НВЧ. Значну роль відіграють періоди, в яких перебуває згусток носіїв заряду. Загалом можливо розрізнити додатний та від'ємний період. Додатним вважається період, коли на проміжку часу електрони НВЧ напруги максимально прискорюються в зоні дії НВЧ поля, а в від'ємному відбувається зворотній процес, тобто процес гальмування. Розглянуті види роботи ЛПД зветься пролітним режимом *IMPATT (Impact Avalanche Transit Time)*.

До недоліку структури $p^+ - n - n^+$ відноситься зменшення напруження електричного поля в зоні n^+ порівняно з насиченням поля, що впливає на швидкість руху електронів, котра є меншою за швидкість насичення.

Висновки. Процес підвищення генерації НВЧ випромінення базується на конструктивних особливостях діода, які обумовлюють ККД генератора. Основні втрати установки концентрує зона прольоту діода. Якщо розглядати зону прольоту в процесі генерації, одну третину загальної площі прольоту займає шар множення, що зумовлює зменшення подачі напруги НВЧ, частина якої залишається в області множення, чим зменшує подачу енергії до НВЧ поля.

На основі цього ККД діода в даному режимі роботи не може перевищувати 15%. Можливість зменшення втрат цілковито залежить від модифікації структури діода на базі $p^+ - p - i - n^+$, в результаті чого підвищення ККД генеруючої установки НВЧ випромінювання доцільне заміною звичайного ЛПД на діод Ріда, модифікація якого обмежує пролітну зону на діапазон (0,15...0,2 мкм). Генератори, що базуються на використанні таких діодів, збільшують ККД в діапазоні сантиметрових хвиль до 40 %. В процесі знезараження потрібно використовувати високі частоти, а отже зміниться й діапазон хвиль та проникаючий вплив на клітину, що обумовлює виникнення необхідності у збільшенні потужності джерела.

Використання двопробного діоду нівелює попередній недолік за рахунок збільшення дрейфових ділянок, що дає можливість збільшити потужність енергії на виході. Збільшення потужності та можливість керування в зоні обробки дає перевагу та якість знезаражуючої дії при використанні НВЧ полів в сільському господарстві в процесі обробки зернових.

Література

1. Бондаренко І. Мікроелектроніка НВЧ. Ч.2. Напівпровідникові елементи та пристрої НВЧ: навч. посібник для студентів ЗВО. Харків : ХНУРЕ, 2019. 172 с.
2. Кунденко М., Вахоніна Л., Руденко А. Аналіз проблеми якості обробки в установках для електромагнітної обробки зернової продукції // Інженерія природокористування. 2022. Т. 1, № 23. С. 40–45.
3. Ефект Ганна. URL: <https://uchil.net/?cm=92588> (дата звернення: 23.08.2023).
4. Sili I. Parameters of the impulse generator based on impatt diodes for the potato's pests extermination purpose // Scientific bulletin of the Tavria Agrotechnological State University. 2018. Vol. 8, no. 2. URL: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2018-2-49> (дата звернення: 23.08.2023).
5. Семікіна Т.В., Слободян Н.В. Фізична електроніка. Конспект лекцій. Частина I «Випрямні та спеціальні діоди: основні параметри, особливості функціонування. Діоди надвисоких частот». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 94 с.
6. Стороженко И.П., Кайдаш М.В. Варизонный AlGaInAs-диод Ганна // Вакуумная и твердотельная электроника. 2016. Т. 7, № 3. С. 52–57.
7. Стороженко І.П., Аркуша Ю.В. Про підвищення потужності коротких діодів Ганна на основі варизонного InGaPAs // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. 2019. № 31. С. 62–78.
8. Чміль А.І., Лазарюк К.О. Методи передпосівної обробки насіння кукурудзи в електромагнітному полі // Енергетика і автоматика. 2015. № 4. С. 227–234.
9. Твердотільна електроніка: навч. посібник для студентів ЗВО / І. Бондаренко та ін. Харків : ХНУРЕ, 2020. 236 с.
10. Грищенко Я.С. Дослідження діодних НВЧ перетворювачів частоти : магістерська робота. Харків, 2020. 111 с.
11. Лавинно-пролетный диод. URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/3666/ЛАВИННО (дата звернення: 23.08.2023).
12. Філінюк М.А., Барабан М.В. Аналіз сучасних досягнень створення інформаційних пристроїв на основі одноперехідних транзисторних структур // Інформаційні технології та комп'ютерна техніка. 2012. № 2. С. 1–10.

13. Осадчук В., Осадчук О. Напівпровідникові прилади з від'ємним опором: Навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2006. 162 с.
14. Куц С.М., Прогонов Д.О., Смирнов В.П. Теорія сигналів. Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи. Частина 2. Спектральний аналіз періодичних сигналів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 36 с.
15. Татарчук Д.Д., Кобак М.М., Молчанов В.І. Мікрохвильова електроніка: навч. посіб. Київ : Аверс, 207. 125 с.
16. Семікіна Т.В., Слободян Н.В. Навчальний посібник модулю «Фізична електроніка» конспект лекцій частина I «Випрямні та спеціальні діоди: основні параметри, особливості функціонування. Діоди надвисоких частот». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 94 с.
17. Kundenko M., Rudenko A., Iegorova O., Iegorov O. and Mardziavko V. Model of Pulses Propagation in Cellular Structures of Fibers. 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 323-328.
18. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем: монографія / Ю. Я. Бобало та ін. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2011. 300 с.
19. Осадчук В.С, Осадчук О.В. Напівпровідникові прилади з від'ємним опором. Вінниця : ВНТУ, 2006. 162 с.
20. Твердотільна електроніка: навч. посібник для студентів ЗВО. / Бондаренко І.М та ін. Харків : ХНУРЕ, 2020. 236 с.
21. Напівпровідникові та феритові НВЧ-пристрої / О. О. Дробахін та ін. Дніпро : РВВ ДНУ, 2013. 104 с.
22. Achour Y., Starzyński J., Jakubiuk K. New Architecture of Solid-State High-Voltage Pulse Generators. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 13. P. 4823. URL: <https://doi.org/10.3390/en15134823> (date of access: 23.08.2023).
23. Шихненко М. Стартер-генератор підвищеної енергоефективності на основі вентильно-індукторної машини : дис. ... канд. : 05.09.01. Київ, 2021. 205 с.
24. On the theory of a pulse laser with microwave pumping / В. В. Семенець et al. // *Radiotekhnika*. 2019. Vol. 4, no. 199. P. 97–103. URL: <https://doi.org/10.30837/rt.2019.4.199.12> (дата звернення: 23.08.2023).

Bibliography (transliterated)

1. Bondarenko I. Mikroelektronika NVCh. Ch.2. Napivprovidnykovi elementy ta prystroi NVCh: navch. posibnyk dlia studentiv ZVO. Kharkiv : KhNURE, 2019. 172 s.
2. Kundenko M., Vakhonina L., Rudenko A. Analiz problemy yakosti obrobky v ustanovkakh dlia elektromahnitnoi obrobky zernovoi produktsii // *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*. 2022. T. 1, № 23. P. 40–45.
3. Efekt Hanna. URL: <https://uchil.net/?cm=92588> (data zvernennia: 23.08.2023)
4. Sili I. Parameters of the impulse generator based on impatt diodes for the potato`s pests extermination purpose // *Scientific bulletin of the Tavria Agrotechnological State University*. 2018. Vol. 8, no. 2. URL: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2018-2-49> (data zvernennia: 23.08.2023).

5. Semikina T.V., Slobodian N.V. Fizychna elektronika. Konspekt lektzii. Chastyna I «Vypriamni ta spetsialni diody: osnovni parametry, osoblyvosti funktsionuvannia. Diody nadvysokykh chastot». Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022. 94 p.
6. Storozhenko Y.P., Kaidash M.V. Varizonnnyy AlGaInAs-diod Ganna // Vakuumnaya i tverdotel'naya elektronika. 2016. T. 7, № 3. P. 52–57.
7. Storozhenko I.P., Arkusha Yu.V. Pro pidvyshchennia potuzhnosti korotkykh diodiv Hanna na osnovi varizonnogo InGaPAs // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. 2019. № 31. P. 62–78.
8. Chmil A.I., Lazariuk K.O. Metody peredposivnoi obrobky nasinnia kukurudzy v elektromahnitnomu poli // Enerhetyka i avtomatyka. 2015. № 4. P. 227–234.
9. Tverdotilna elektronika: navch. posibnyk dlia studentiv ZVO / I. Bondarenko ta in. Kharkiv : KhNURE, 2020. 236 p.
10. Hryshchenko Ya.S. Doslidzhennia diodnykh NVCh peretvoriuvachiv chastity: mahisterska robota. Kharkiv, 2020. 111 p.
11. Lavinno-proletnyy diod.
URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/3666/ЛАВИННО (data zvernennia: 23.08.2023).
12. Filyniuk M.A., Baraban M.V. Analiz suchasnykh dosiahnen stvorennia informatsiinykh prystroiv na osnovi odnoperekhidnykh tranzystornykh struktur // Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna tekhnika. 2012. № 2. P. 1–10.
13. Osadchuk V., Osadchuk O. Napivprovidnykovi prylady z vidiemnym oporom. Navchalnyi posibnyk. Vinnytsia: VNTU, 2006. 162 p.
14. Kushch S. M., Prohonov D. O., Smyrnov V.P. Teoriia syhnaliv. Metodychni vkazivky do praktychnykh zaniat ta samostiinoi roboty. Chastyna 2. Spektralnyi analiz periodychnykh syhnaliv. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2019. 36 p.
15. Tatarchuk D.D., Kobak M.M., Molchanov V.I. Mikrokhylova elektronika: navch. posib. Kyiv : Avers, 207. 125 p.
16. Semikina T. V., Slobodian N. V. Navchalnyi posibnyk moduliu «Fizychna elektronika» konspekt lektzii chastyna I «Vypriamni ta spetsialni diody: osnovni parametry, osoblyvosti funktsionuvannia. Diody nadvysokykh chastot». Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho., 2022. 94 s. [Semikina T.V., Slobodian N.V. Training manual of the module "Physical electronics" lecture notes part I "Rectifiers and special diodes: basic parameters, features of operation. Diodes of ultra-high frequencies". Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky, 2022. 94 p.
17. Kundenko M., Rudenko A., Iegorova O., Iegorov O. and Mardziavko V. Model of Pulses Propagation in Cellular Structures of Fibers. 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 323–328.
18. Matematychni modeli ta metody analizu nadiinosti radioelektronnykh, elektrotekhnichnykh ta prohramnykh system: monohrafiia / Yu. Ya. Bobalo ta in. Lviv : Vyd-vo Lviv. politekhniky, 2011. 300 p.
19. Osadchuk V.S, Osadchuk O.V. Napivprovidnykovi prylady z vidiemnym oporom. Vinnytsia : VNTU, 2006. 162 p.
20. Tverdotilna elektronika: navch. posibnyk dlia studentiv ZVO / Bondarenko I.M ta in. Kharkiv : KhNURE, 2020. 236 p.
21. Napivprovidnykovi ta ferytovi NVCh-prystroi / O. O. Drobakhin ta in. Dnipro : RVV DNU, 2013. 104 p.

22. Achour Y., Starzyński J., Jakubiuk K. New Architecture of Solid-State High-Voltage Pulse Generators. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 13. P. 4823. URL: <https://doi.org/10.3390/en15134823> (data zvernennia: 23.08.2023).

23. Shykhnenko M. Starter-henerator pidvyshchenoi enerhoefektyvnosti na osnovi ventylno-induktornoї mashyny: dys. ... kand. : 05.09.01. Kyiv, 2021. 205 p.

24. On the theory of a pulse laser with microwave pumping / V. V. Semenets et al. *Radiotekhnika*. 2019. Vol. 4, no. 199. P. 97–103. URL: <https://doi.org/10.30837/rt.2019.4.199.12> (data zvernennia: 23.08.2023).

УДК 62–93

Кунденко М.П., Мардзявко В.А., Руденко А.Ю.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ГЕНЕРАЦІЇ НВЧ ВИПРОМІНЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯМ АДАПТИВНОГО ТИПУ ДІОДІВ ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО КОНСТРУЮВАННЯ АПАРАТІВ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ

Потреба в пошуку актуального методу знезараження зернової продукції як ніколи актуально стоїть в наш час. Потреби агровиробників повинні уособлюватися в багатофункціональних приладах, що дають можливість впливати не тільки на аспект знезараження, а й дозволяти б стимулювати біологічні процеси. До такої методики відносять використання надвисокочастотного (НВЧ) випромінення. Установки, що використовуються для вирішення питань знезараження мають одну головну схожу рису, а саме використання в системі генерації діодів. Розглядаючи основну типову конструкцію генератора НВЧ, можливо спостерігати основну проблему втрат корисної дії системи генерації – це втрати в діодах. Для якісного використання та впровадження потрібно враховувати якість обробки зернової продукції, високих показників можна досягти за рахунок використання радіотехніки. Модернізація загалом відбувається методом заміни застарілої генеруючої частини установки на нову з кращими технічними показниками та більшою варіативністю діапазонів частот та потужностей. Насамперед, про що це нам говорить – кожна сільськогосподарська культура має власні радіо-фізичні характеристики, цей фактор важливий для збільшення ефективності обробки. Дослідження показують, що гнучкість та керованість установки для обробки сільськогосподарської забезпечується використанням модернізованих діодів. В роботі досліджено основні види діодів, що використовуються в генеруючих установках, описано основні три зони втрат, загалом та безпосередньо в лавинно-пролітному діоді (діод Ріда). При дослідженні втрат, поверхнево розглянуто матеріали котрі використовують в напівпровідниковій техніці, з метою покращення провідності діода. На основі проведеного дослідження зроблено обґрунтовані висновки відповідно до теми дослідження. Базовим елементом установки є використання імпульсних генераторів, але використання застарілих генераторів є нераціональним та безглуздим. Зрозуміло, що успіх цього методу обробки залежить від розвитку радіотехніки. Постійні зусилля в цьому напрямку допоможуть зберегти та покращити ефективність цієї технології.

Ключові слова: діод, генератор імпульсних напруг, зерно, НВЧ випромінення, діод Ріда.

Кунденко Н.П., Мардзявко В.А., Руденко А.Ю.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ГЕНЕРАЦИИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ АДАПТИВНОГО ТИПА ДИОДОВ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО КОНСТРУИРОВАНИЯ АППАРАТОВ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ

Потребность в поиске актуального метода обеззараживания зерновой продукции как никогда актуальна в наше время. Потребности агропроизводителей должны олицетворяться в multifunctional приборах, позволяющих влиять не только на аспект обеззараживания, но и позволяющих стимулировать биологические процессы. К такой методике относят использование сверхвысококачастотного (СВЧ) излучения. Установки, используемые для решения вопросов обеззараживания, имеют одну главную схожую черту, а именно использование в системе генерации диодов. Рассматривая основную типовую конструкцию генератора СВЧ, можно наблюдать основную проблему потерь полезного действия системы генерации – это потери в диодах. Для качественного использования и внедрения следует учитывать качество обработки зерновой продукции, высоких показателей можно добиться за счет использования радиотехники. Модернизация в целом происходит методом замены устаревшей генерирующей части установки новой с лучшими техническими показателями и большей вариативностью диапазонов частот и мощностей. В первую очередь, о чем это нам говорит – каждая сельскохозяйственная культура имеет собственные радиофизические характеристики, этот фактор важен для увеличения эффективности обработки. Исследования показывают, что гибкость и управляемость установки для сельскохозяйственной обработки обеспечивается использованием модернизированных диодов. В работе исследованы основные виды диодов, используемых в генерирующих установках, описаны основные три зоны потерь, в целом и непосредственно в лавинно-пролетном диоде (диод Рида). При исследовании потерь поверхностно рассмотрены материалы, используемые в полупроводниковой технике, с целью улучшения проводимости диода. На основе проведенного исследования сделаны обоснованные выводы в соответствии с темой исследования. Базовым элементом установки является использование импульсных генераторов, но использование устаревших генераторов нерационально и бессмысленно. Понятно, что успех этого обработки зависит от развития радиотехники. Постоянные усилия в этом направлении помогут сохранить и улучшить эффективность этой технологии.

Ключевые слова: диод, генератор импульсных напряжений, зерно, СВЧ излучение, диод Рида.

Kundenko M.P., Mardzyavko V.A., Rudenko A.Yu.

ANALYSIS OF THE TECHNOLOGY OF GENERATING MICROWAVE RADIATION WITH THE DEFINITION OF AN ADAPTIVE TYPE OF DIODES FOR THE FURTHER DESIGN OF DEVICES FOR DISINFECTION

The need to find an actual method of decontamination of grain products is more relevant than ever in our time. The needs of agro-producers should be embodied in multifunctional devices that give the opportunity to influence not only the aspect of disinfection, but

also would allow to stimulate biological processes. This technique includes the use of ultra-high-frequency (UHF) radiation. Installations used to solve decontamination issues have one main similar feature, namely the use of diodes in the generation system. Considering the main typical design of the microwave generator, it is possible to observe the main problem of the losses of the useful effect of the generation system - these are the losses in the diodes. For high-quality use and implementation, it is necessary to take into account the quality of processing of grain products, high indicators can be achieved due to the use of radio equipment. Modernization generally occurs by replacing the outdated generating part of the installation with a new one with better technical performance and greater variability of frequency and power ranges. First of all, what this tells us is that each crop has its own radio-physical characteristics, this factor is important for increasing processing efficiency. Studies show that the flexibility and controllability of the plant for agricultural processing is ensured by the use of modernized diodes. The paper examines the main types of diodes used in generating units, describes the main three loss zones, in general and directly in the avalanche diode (Reed diode). During the study of losses, the materials used in semiconductor technology were superficially considered in order to improve the conductivity of the diode. On the basis of the conducted research, reasonable conclusions were made in accordance with the topic of the research. The basic element of the installation is the use of pulse generators, but the use of outdated generators is irrational and pointless. It is clear that the success of this processing method depends on the development of radio technology. Continued efforts in this direction will help preserve and improve the effectiveness of this technology.

Keywords: diode, pulse voltage generator, grain, microwave radiation, Reed diode.