

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРА НА ЛАВИНО-ПРОЛІТНОМУ ДІОДІ**Вступ**

Мікрохвильові колювання, що генеруються в p - n -переході, який включено в зворотному напрямку, були теоретично розглянуті ще в 1958 р. W.I. Read. Він запропонував таку структуру діода, який мав негативний динамічний опір. Робота генератора на основі такого діода базувалася на тому, що в p - n -переході в результаті зіткнень генеруються носії заряду, які взаємодіють з високочастотним полем зовнішньої коливальної системи, віддаючи йому свою енергію в певні проміжки часу.

Значно пізніше А.С. Тагер, А.І. Мельников, Г.П. Ковельов, А.М. Цебієв, а потім Т. Місава [1] займалися структурами p - n і p - i - n і, використовуючи принцип дії діода Read, варіюючи різні структури, вони створили так званий лавино-пролітний діод (ІМРАТТ).

Сьогодні мікрохвильові генератори, побудовані на лавинних діодах, забезпечують досить високу ефективність у порівнянні з іншими твердотільними генераторами, що працюють у безперервному режимі. Генератори на лавино-пролітних діодах застосовуються в радіорелейних лініях, системах зв'язку, сліпої посадки літаків, електронних вимірювачах висоти, стаціонарних та переносних радіолокаційних станціях, і навіть в пристроях боротьби з шкідниками сільського господарства [2, 3].

Певний інтерес представляє собою дослідження проблем технологічності, стабільності, регулювання вихідної частоти та потужності, синхронізації таких генераторів, їх електронного налаштування тощо [4]. Розгляду деяких з цих проблем присвячена ця стаття.

Особливості лавинного ефекту в лавино-пролітному діоді

Сьогодні мікрохвильові генератори, побудовані на лавинних діодах, демонструють свою високу ефективність, яка обумовлюється в значній мірі їх принципом дії.

Проаналізуємо процеси, що протікають у p - n -переході, підключеному у зворотному напрямку (рис. 1, а). Можливий вид розподілу електричного поля в такому діоді представлено на (рис. 1). На цьому рисунку L_a представляє собою товщину напівпровідникового слою діода певної провідності. Розподіл кількості носіїв заряду, в цьому випадку, представлено на рис. 1. Природно, що концентрація носіїв збільшується від нуля всередині переходу до максимуму на його краях.

У частині переходу дякуючи зовнішній напрузі вільних носіїв заряду практично немає. Це спустошений шар (на рис. 1). Це шар напівпровідника, обмежений з обох боків шаром нейтрального напівпровідника. Напруженість електричного поля в цьому шарі прагне $E=0$, в той час як у площині, де просторовий заряд іонів змінює знак, вона максимальна. Із збільшенням зовнішньої напруги електричне поле також збільшується, а спустошений шар розширюється. Коли напруженість поля досягає деякого критичного значення $E = E_{krit}$, починається процес інтенсифікації ударної іонізації, що призводить до лавинподібного зростання кількості носіїв заряду.

Імовірність іонізації сильно залежить від величини електричного поля, тому область, де утворюються носії заряду, є більш-менш вузьким шаром. Цей шар називається шаром множення. На практиці цей шар розташований по обидва боки технологічного переходу.

Завдяки зовнішньому електричному полю електрони, створені в шарі розмноження, дрейфують через відрізок збідненого шару до граничної області нейтрального напівпровідника, тоді як дірки проходять через p -шар, а електрони через n -шар.

Оскільки напруженість електричного поля велика, $E = E_{krit} > 10^4$ v/cm, швидкість дрейфу носіїв заряду практично постійна і не залежить від електричного поля. Із збільшенням енергії носіїв заряду збільшується ймовірність того, що носії заряду більш часто будуть стикаються з іонами кристалічної решітки, що в кінцевому підсумку призводить до насичення швидкості носіїв.

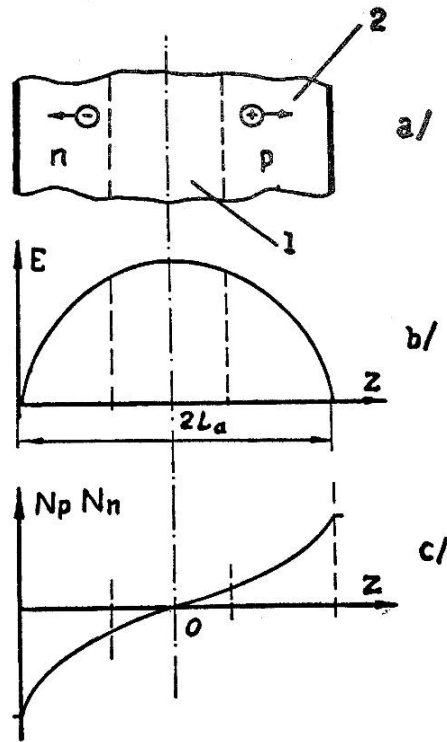


Рис. 1. Розподіл електричного поля та концентрації носіїв в p - n напівпровідниковому переході

Таким чином, перехід p - n , підключений у зворотному напрямку, який знаходиться під дією зовнішнього електричного поля напруженістю $E = E_{\text{крит}}$, можна вважати еквівалентним діодові, в якому роль катода відіграє шар розмноження, а роль проміжку вільного пробігу відіграє решта шару напівпровідникової структури. Очевидно, струм, що надходить із шару розмноження, збільшується або зменшується в залежності від розміру силового поля, що переважає в цьому шарі.

Однак миттєве значення електричного поля визначає не величину самої лавини, а лише швидкість зміни струму через діод (для утворення лавини потрібен певний час), тому зміна струму не слідує відразу за зміною електричного поля, а затримується на фазовий кут $\pi/2$.

Зсув фаз між напруженістю електричного поля на діоді і струмом, що протікає через нього, призводять до негативного опору діода (рис. 2).

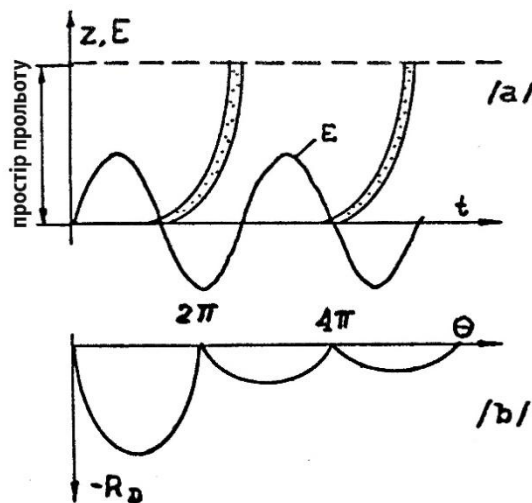


Рис. 2. Виникнення негативного опору в p - n -переході

В результаті наявності високочастотної напруги, підключеної до p - n -переходу, генеруються зарядові пакети шару множення, які негайно, якщо фазова затримка $\pi/2$, переходять в гальмівне високочастотне поле і пакети, що несуть заряд завдяки обміну енергією між високочастотним полем і пакетами носіїв заряду, опір діоду може вважатися негативним.

Звертає увагу, що для виникнення негативного опору, а отже і постійних незатухаючих високочастотних коливань необхідне певне фазове співвідношення між зовнішнім полем та процесами всередині діода.

Розподіл електричного поля для більш складної p^+-n-n^+ напівпровідникової структури представлено на рис. 3.

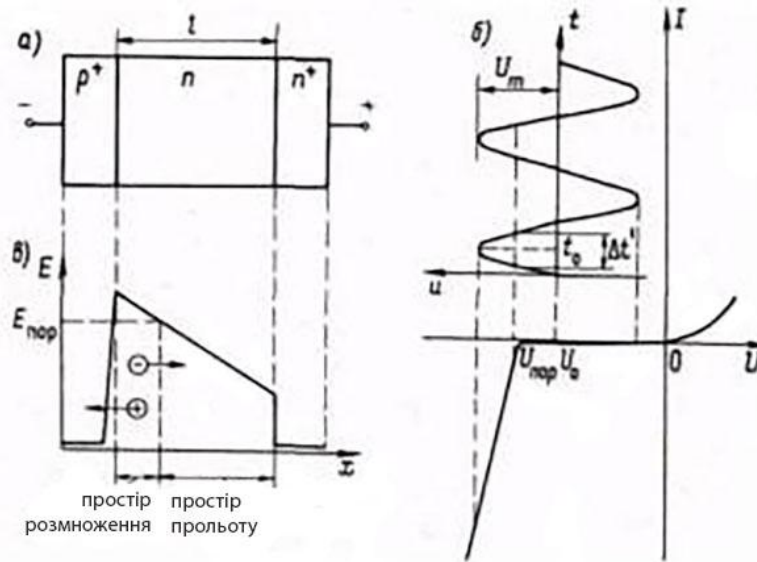


Рис. 3. Розподіл електричного поля ЛПД структури p^+-n-n^+

В результаті сумісної дії постійної та змінної напруги в області p^+-n -переходу, де сумарна напруженість електричного поля протягом певного часу перевищує порогове значення, виникає лавинний пробій, що приводить до лавиноподібного наростання числа носіїв заряду. Електрони, що дрейфують в пролітному просторі, утворюють імпульс конвекційного току, який в свою чергу взаємодіє з змінним електричним полем. Ця взаємодія супроводжується віддачею електронами своєї енергії змінному електричному полю, але тільки в тому випадку, якщо вони опиняються в гальмуючій фазі поля.

Для виготовлення ЛПД використовуються різні структури, такі, як чотиришарова структура Ріда, асиметричний різкий p - n -перехід, симетричний p - n -перехід, діод з двома дрейфовими областями ($p^+ - p - n - n^+$), діод з двошаровою базою, діод з тришаровою базою (модифікований діод Ріда). Кожна з наведених структур характеризується певною напругою пробою, розміром області лавинного множення і області дрейфу, ступенем впливу об'ємного заряду носіїв і температури, а також динамічними характеристиками асиметричного різкого p^+-n -переходу. Відзначимо, що в ЛПД розподіл концентрацій домішок в переходах має бути якомога ближче до ступінчатого. Найбільш важливим результатом фізичних процесів, що протікають в ЛПД, є наявність від'ємного опору. Комплексний опір ЛПД може бути досліджено експериментально. Цей опір, як показують результати експериментів, суттєво залежить від таких параметрів, як струм живлення, температура, частота.

На рис. 4 наведено одну з можливих залежностей комплексного опору лавино-пролітного діода з арсеніду галію від частоти та струму живлення при кімнатній температурі.

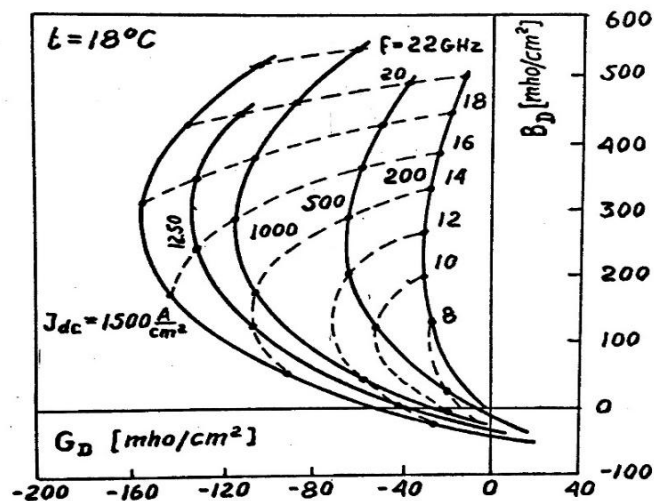


Рис. 4. Залежність комплексного опору ЛПД від частоти

Опис об'єкту дослідження

Для досліджень параметрів ГЛПД серед великого різноманіття різних конструктивних рішень була вибрана досить оригінальна конструкція генератора, що поєднує в собі як полозкові елементи, так і хвильоводний резонатор радіального типу. Конструктивною основою такого генератора є двосторонній фольгований діелектрик Polyguide.

Подальший експеримент показав, що використовувати відкриту конструкцію коливальної системи недоцільно, оскільки через низьку діелектричну проникність матеріалу Polyguide спостерігався високий рівень випромінювання в оточуюче середовище і, як наслідок, – низька добротність коливальної системи. Тому діод був по-суті розміщений в середині резонатора радіального типу, заповненого діелектриком.

Живлення на лавино-пролітний діод надходить через полозковий фільтр та відповідний отвір в радіальному резонаторі. Еквівалентна ємність, що присутня в резонаторі і роль якої виконує відповідний регулюючий гвинт, дозволяє проводити її налаштування в певному діапазоні частот. Для виведення мікрохвильової енергії використовується петля, розташована в резонаторі.

Регулюючи положення петлі, можна забезпечити узгодження між зовнішнім навантаженням і резонатором. Постійний струм живлення надходить на діод через фільтр низьких частот, виконаний за технологією друкованої плати. Для відводу теплової енергії передбачено відповідний радіатор з ребрами охолодження.

Розроблений генератор легко може бути поєднаний з іншими хвильоводними структурами, виконаними в полозковому варіанті (наприклад, циркуляторами).

Ескіз конструкції варіанту генератора на лавино-пролітному діоді, параметри якого були досліджені, наведено на рис. 5.

Як видно з рис. 5, основою генератора є двостороння металізована пластинка Polyguide з змонтованим на ній алюмінієвим кільцем. За допомогою спеціального монтажного вузла лавино-пролітний діод розташовується в середині резонатора. З правого боку генератора знаходиться роз'єм постійного струму, а з лівого боку – роз'єм мікрохвильового виходу.

Механічне налаштування генератора відбувається за допомогою гвинта налаштування, розташованого навпроти лавинного діода. Виведення мікрохвильової енергії здійснюється за допомогою спеціальної петлі зв'язку. В такому ГДПД є можливість регулювати нахил петлі, тобто вихідну потужність генератора. В конструкції генератора, що розглядається, застосований лавино-пролітний діод типу Tesla VB 0234.

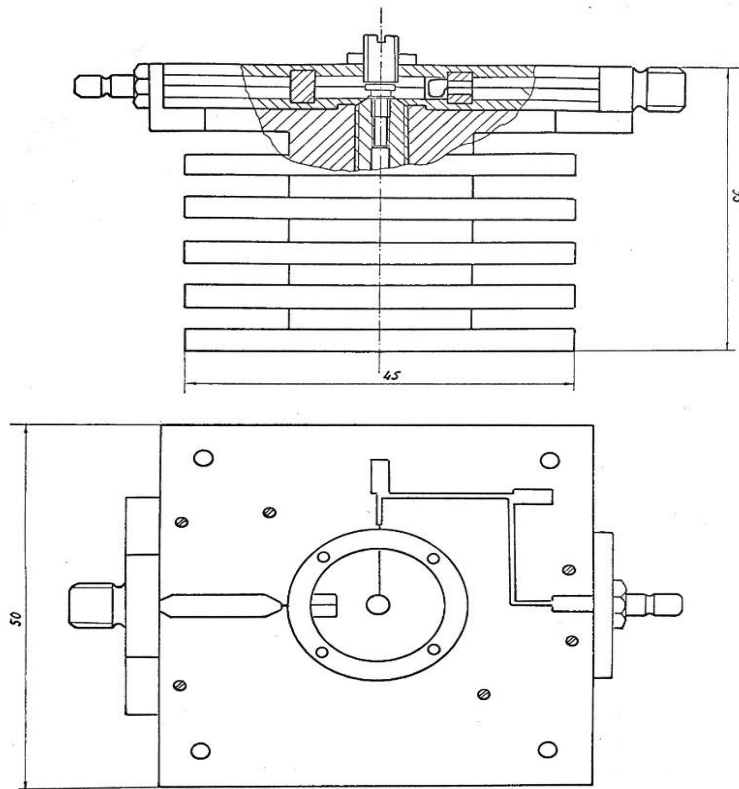


Рис. 5. Ескіз конструкції ГЛПД

Результати експериментальних досліджень

Основну увагу при дослідженнях ГЛПД приділено характеру залежності вихідної потужності від частоти налаштування при різних струмах живлення.

На рис. 6 наведено отриману експериментальним шляхом залежність вихідної потужності генератора від частоти при різних струмах живлення.

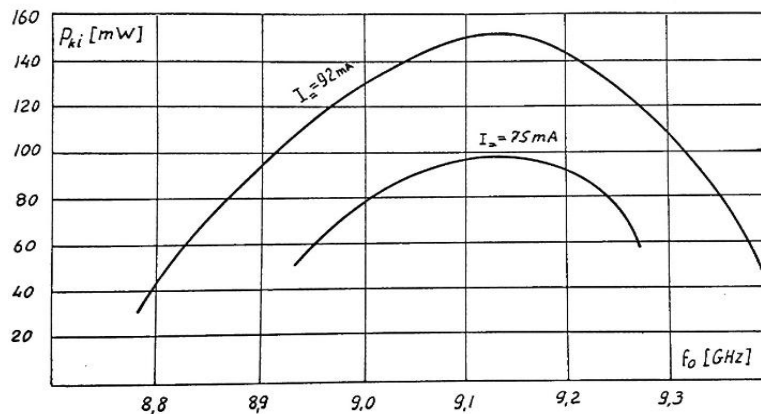


Рис. 6. Залежність вихідної потужності ГЛПД від частоти

Як видно з цього графіка, потужність струму значною мірою залежить як від постійного струму живлення, що протікає через лавинний діод, так і від частоти його налаштування. Звертає на себе увагу, що діапазон налаштування, а також вихідна потужність збільшується зі збільшенням постійного струму.

Як витікає з теорії лавинного ефекту, провідність лавинного діода є функцією постійного струму, що протікає через діод, тому природно, що зі зміною постійного струму змінюється як вихідна потужність, так і частота генератора. Результати дослідження вихідної частоти ГЛПД від струму живлення наведено на рис. 7.

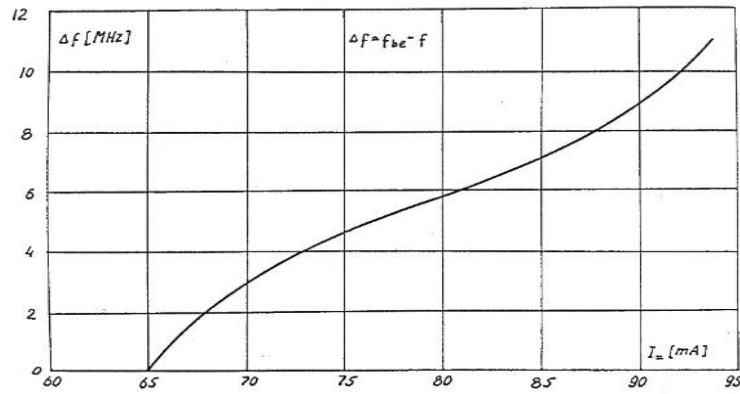


Рис. 7. Залежність вихідної частоти ГЛПД від струму живлення

Залежність, наведена на рис. 7, демонструє можливість електронного налаштування ГЛПД. Змінюючи постійний струм живлення, ми отримали можливість електронного налаштування частоти коливань в смузі близько 10 МГц. Додаткове налаштування генератора можливе також і механічним шляхом, за допомогою спеціального безлюфтового гвинта.

Цілком природно, що вихідні параметри ГЛПД залежать від добротності зовнішнього коливального контуру. Ця важлива характеристика генератора може бути визначена на основі вимірювання параметрів генератора як в холодному режимі, так і в режимі генерування. В цьому випадку коефіцієнт добротності генератора буде залежати від постійного струму, що протікає через діод. Результат таких досліджень наведено на рис. 8.

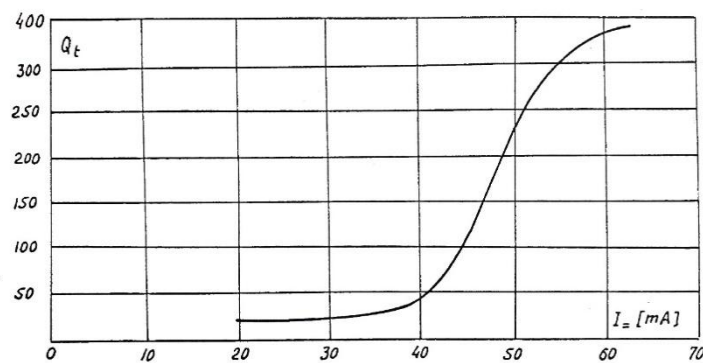


Рис. 8. Залежність коефіцієнта добротності від струму живлення

З цього графіка видно, що залежність навантаженої добротності Q_t від постійного струму слабшає поблизу струму збудження коливань (в нашому випадку струм збудження коливань становив $I = 75$ мА) і в подальшому залишається майже постійною.

Виходячи з цього, можна з високою достовірністю сказати, що добротність генератора, виміряна поблизу струму збудження, представляє загальну добротність генератора в робочому режимі.

Висновки

Таким чином, ГЛПД, що був досліджений, характеризується досить високими експлуатаційними параметрами, що дає можливість використовувати його у відповідних НВЧ пристроях. Отримані результати свідчать про його задовільну технологічність, високу працездатність та стабільну роботу.

Список літератури:

1. T. Misawa. Multiple uniform lagger approximation in analysis of negativ resistance in $p-n$ junction in breakdown // IEEE Tran. Electron Devices vol. ED-14 1967. Pp.795 – 808.
2. Сили И.И., Черенков А.Д. Параметры и стабильность частоты диодного генератора с резонатором проходного типа // Энергосбережение Энергетика Энергаудит. 2015. №9. С. 53 – 59.

3. Сили И. И. Теоретический анализ процесса взаимодействия радиоимпульсов с колорадскими жуками в растительной среде картофеля // Технологический аудит и резервы производства. Харьков, 2015. №4. С. 55 – 59.
4. Карушкин Н. Ф. Синхронизация генераторов на ЛПД импульсного и непрерывного действия в мм-диапазоне длин волн. Ч. 1. Конструкции генераторов и обобщенная модель их синхронизации внешним сигналом // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2021 № 1–2 С. 10 – 20. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2021.1-2.10>
5. Edgar Martinez: Next Generation of Terahertz Sources and Detectors. (PDF), S.4, abgerufen am 5. September 2021 (Vortragsfolie).

Надійшла до редколегії 11.02.2023

Відомості про авторів:

Меняйло Олександр Дмитрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів, Україна; e-mail: oleksandr.meniailo@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3760-0523>

Махонін Віктор Геннадійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів, Україна; e-mail: viktor.makhonin@nure.ua

Світличний Микита Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, студент ВСАМ-22 кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів, Україна; e-mail: mykyta.svitlychnyi@nure.ua