

УДК 621.385.12

О. О. МАНЬКО, доктор техн. наук, професор;
 Я. А. КРЕМЕНЕЦЬКА, С. В. МОРОЗОВА,
 Державний університет телекомунікацій, Київ

СУБМІЛІМЕТРОВИЙ ДІАПАЗОН І НОВІТНІ ДОСЯГНЕННЯ НА БАЗІ НАНОТЕХНОЛОГІЙ

Схарактеризовано головні напрямки розвитку терагерцової електроніки на базі таких фізичних процесів у наноструктурах, як тунелювання (резонансне і нерезонансне), автоелектронна емісія, лавинне множення. Описано найважливіші світові проекти та новітні прилади в зазначеній сфері.

Ключові слова: субміліметровий діапазон; системи та прилади ТГц-випромінювання; напівпровідникові та вакуум-напівпровідникові наноструктури; системи безпроводового зв'язку близького радіуса дії.

Вступ

Останнім часом активно досліджуються властивості хвиль субміліметрового діапазону, які мають істотні практичні переваги порівняно з іншими електромагнітними хвилями. На базі цих властивостей розробляються та розвиваються різноманітні радіотехнічні системи, зокрема системи безпроводового зв'язку близького радіуса. Водночас постійне зростання обсягів інформації спонукає до створення та пошуку нових шляхів у побудові пристроїв генерування, детектування, обробки сигналів із заданими характеристиками, здатних працювати в широкому діапазоні електромагнітних хвиль. Утім субміліметрова ділянка спектра досі не набула належного технічного оснащення. Подолання цього недоліку відкриває принципово нові можливості щодо вдосконалення напівпровідникових і електровакуумних приладів.

Основна частина

Субміліметрові хвилі належать до електромагнітних хвиль довжиною $\lambda = 100 \dots 1000$ мкм, яким відповідають частоти терагерцового діапазону (300 ГГц ... 3 ТГц). Ці хвилі займають область між двома радіодіапазонами: довгохвильовим інфрачервоним і надвисокочастотним (рис. 1).

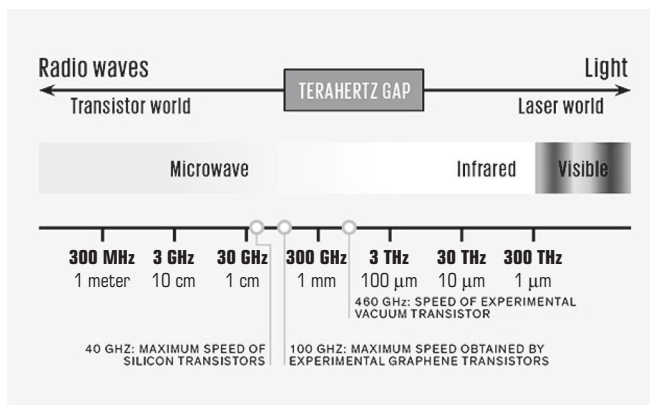


Рис. 1. Положення терагерцового діапазону в спектрі електромагнітних хвиль

Терагерцовий діапазон хвиль був практично недосяжний до 2002 року, коли з'явився перший терагерцовий квантовокаскадний лазер, який працює на частоті 1,4 ТГц і має потужність 2 мВт [1]. Відтоді проводяться інтенсивні дослідження з метою подолання фізичних і технологічних обмежень для створення пристроїв генерування, приймання, обробки та ве-

дення-виведення випромінювання терагерцових сигналів. Так, у США фахівці компанії NASA, Національної агенції з авіонавтики та досліджень космічного простору, у 2014 році експериментально виявили, що вакуум-канальні транзистори (ВКТ) здатні працювати на частоті 460 ГГц, яка в 10 разів перевищує частоту найкращих кремнієвих метал-оксид-напівпровідник (МОН) транзисторів, тобто зі швидкодією, порівняною з передбаченою швидкодією графенового транзистора (рис. 1) [2]. Не припиняються також дослідження можливостей перестроювання частоти систем детектування циркулярно-поляризованого терагерцового випромінювання [3].

Терагерцовий діапазон має надзвичайно важливу здатність гарантувати іскробезпеку, не спричиняючи іонізуючої та руйнівної дії. Саме тому він становить значний інтерес для радіотехнічних застосувань. Передусім ідеться про забезпечення транспортної безпеки, засобів зв'язку, медичного діагностичного обладнання, систем неруйнівних випробувань для військового використання та аерокосмічної апаратури.

Згідно з документом під назвою «Системи терагерцового випромінювання» (Terahertz Radiation Systems), що його опублікувала компанія BCC Research (США), яка досліджує розвиток різноманітних технологій, ринок терагерцових пристроїв у 2016 році становитиме 127 млн дол., а в 2021-му досягне 570 млн [4].

Найширшого застосування терагерцові системи набули в астрономічних дослідженнях (обсяг продажу 2011 року становив 70 млн дол.). Проте очікується, що до 2016 року продаж у цьому сегменті ринку зменшиться вдвічі (до 35 млн дол.) і залишиться на цьому рівні до 2021 року (рис. 2).

Обсяг продажу, млн дол.

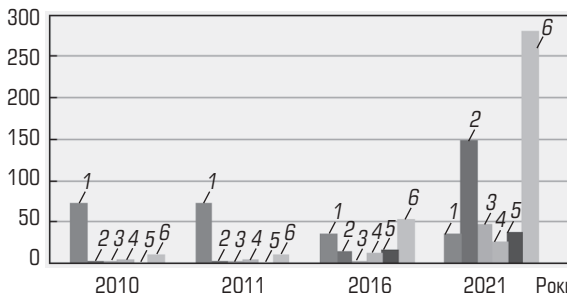


Рис. 2. Динаміка світового ринку за галузями застосування терагерцових приладів: 1 — астрономічні дослідження; 2 — біомедичні дослідження; 3 — військові системи зв'язку; 4 — неруйнівні випробування; 5 — безпека передавання інформації; 6 — інші

Головні особливості, переваги та сфери застосування терагерцового діапазону

Хвилі терагерцового діапазону мають здатність проникати в різноманітні як неорганічні, так і органічні непровідні й непрозорі для світла у видимій частині спектра сполуки (тканини, папір, пластмаса тощо), зокрема й в тканини людського тіла.

Оскільки енергія фотонів при терагерцовому випромінюванні невелика, то вона не призводить до такого шкідливого для людини впливу, яким є іонізуюче рентгенівське випромінювання. Саме це дозволяє використовувати терагерцове випромінювання в комп'ютерній діагностиці. Більш того, багато хімічних і біологічних речовин у цьому діапазоні мають унікальну структуру спектра, за якою можна проводити їх ідентифікацію.

У хвилях терагерцового діапазону відсутні інтерференційні явища та завмирання сигналу, вони характеризуються високою відбивальною здатністю. Швидкість передавання даних на базі цих хвиль не менша за 10 Гбіт/с, що сприяє розвиткові засобів безпроводового зв'язку близького радіуса дії, а також дозволяє створювати стільникові системи радіусом до одного кілометра.

Терагерцові хвилі дають змогу:

- ◆ передавати великі обсяги інформації, причому телевізор із терагерцовим трансивером здатний передавати і приймати зображення високої чіткості, а цифрова фотокамера з терагерцовим блоком — практично миттєво пересилати знімки портативному комп'ютеру;

- ◆ за нульової видимості здійснювати навігацію, застосовувати хвилі цього діапазону для забезпечення автотранспортної безпеки;

- ◆ проводити відеозйомку за несприятливих (дощ, сильний туман тощо) погодних умов, використовувати ці хвилі для систем зв'язку військового призначення у радіоелектронних засобах розвідки. Так, керівник програми «Терагерцова електроніка» Джон Альбретч зазначив, що здатність синхронно обробляти сигнали на частоті 0,85 ТГц дозволить створювати апаратуру, необхідну для реалізації програми DARPA «Відеолокатор із синтезуванням апертури» (*Video Synthetic Aperture Radar — ViSAR*) [4]. Мета цієї програми — розробка та демонстрація можливостей інформаційного датчика надзвичайно високої частоти (*Extremely High Frequency — EHF*), який в умовах щільної хмарності (природної, на зразок піщаної бурі, або штучної димової завіси) зможе підтримувати настільки ж ефективну роботу засобів систем виявлення, прицілювання та наведення, як і сучасні інфрачервоні системи в безхмарну погоду;

- ◆ будувати системи зв'язку на основі гібридного з'єднання оптоволоконно-радіоканал (ГЗОР) [5], головні положення якого визначено Рекомендацією МСЕ-Р F.1332. Головне, що ГЗОР надає системам широкопasmового радіозв'язку простий і ефективний інтерфейс із ВОЛЗ, а також має низку притаманних оптоволоконним технологіям переваг, таких як висока завадостійкість, забезпечення великих розв'язок між оптичними каналами, безконтактна комутація;

- ◆ широкий спектр сигналу та перестроювання за частотою й амплітудою дає змогу моделювати різноманітні сигнали складних форм із різними властивостями щодо прохідності, відбивальної здатності тощо, а також застосовувати нові способи кодування й модуляції інформаційних сигналів.

Слід відзначити можливості широкого застосування терагерцових хвиль у радіоастрономії, при дослідженні космічного простору, для супутникового зв'язку. Ці хвилі добре відбиваються металами, а також залежно від частоти відбиваються чи поглинаються водою і при цьому проходять крізь більшість діелектриків. Відбиття зазначеного випромінювання дозволяє отримувати спектроскопічну інформацію і 3D зображення з унікальними спектральними підписами — терагерцові відбитки пальців. Терагерцове зображення отримують швидше, ніж рентгенівське.

Фізичні та технологічні проблеми реалізації терагерцового діапазону

Особливість цієї ділянки спектра полягає в тому, що відповідні хвилі мають надто велику довжину для застосування в добре розвиненій оптичній техніці, але надто малу для перенесення в цей діапазон радіометодів.

Квантові властивості електромагнітних коливань, що виявляються при їх взаємодії з речовиною та зарядженими частинками, можна чітко виокремити лише на достатньо високих частотах. На низьких частотах, навпаки, більш виразно виступають хвильові властивості. Тому в надвисокочастотних (НВЧ) радіодіапазонах використовують класичну електродинаміку та електроніку, в інфрачервоних і більш короткохвильових — методи та засоби, що відповідають квантовій оптиці та електроніці.

Донедавна субміліметровий діапазон, незважаючи на залучення методів і апаратури, використовуваних як в оптичному, так і в міліметровому діапазоні хвиль, залишається одним із малоосвоєних діапазонів. Це пов'язано з фізичними процесами в оптичному діапазоні, а саме з квантовими міжрівневими переходами: енергія фотонів на таких відносно низьких для оптичного діапазону частотах настільки мала (порядку кількох міліелектрон-вольт), що виявляється порівнянню з енергією теплових фотонів кристалічної решітки, а це призводить до зриву генерації в таких структурах. У напівпровідникових структурах частота обмежується часом прольоту електроном збідненої частини або вакуумного проміжку, часом наростання лавини, розігріву електронів та інерційністю процесів переносу електронів через резонансні бар'єрні структури.

Протягом багатьох років субміліметровий діапазон в літературі називали білою плямою, спектроскопічним провалом. Тепер його прийнято називати терагерцовою щілиною. Вчені робили спроби створення альтернативних теплових генераторів субміліметрового діапазону з кінця XIX століття. Ще в 1895 році П. М. Лебедев за допомогою іскрового генератора, побудованого ним же, отримав хвилі завдовжки менш як 3 мм, а його послідовники (А. А. Глагольєва-Аркадьєва та ін.) — ще коротші [6]. Проте через монохроматичність і малу спектральну густину випромінювання метод не набув широкого застосування.

Згодом, у 1902 році П. М. Лебедев у доповіді «Шкала електромагнітних волн в ефіре» наголосив, що субміліметровий діапазон, який відповідає «молекулярним коливанням матерії», при освоєнні стикається з істотною проблемою. «Сейчас мы не имеем возможности предвидеть, как удастся разрешить это затруднение; во всяком случае, способ получения еще более коротких волн будет очень крупным шагом вперед в области экспериментальной физики».

Лазери субміліметрового діапазону, що характеризуються монохроматичністю й достатнім рівнем потужності, практично не можна перестроїти. Через це вони дозволяють проводити вимірювання лише на фіксованих частотах при зміні магнітного поля чи інших параметрів, обмежуючи цим самим можливість дослідження.

Основним методом просування НВЧ приладів у більш короткохвильові діапазони протягом багатьох років було лінійне моделювання. Якщо, наприклад, при створенні нового генератора робочу частоту його змістити відносно моделі та всі важливі з погляду електродинаміки й електроніки розміри змінити пропорційно до довжини хвилі, а застосовані значення магнітного поля — обернено пропорційно до довжини хвилі, залишивши робочі напруги незмінними, то струми нового приладу та його параметри будуть такі самі, як і в моделі, а густина струмів зміниться пропорційно до квадрата робочої частоти.

Утім зазначеному модельному освоєнню субміліметрового діапазону заважають такі чинники:

- у разі перевищення певного рівня частоти не можна виконати вимоги щодо забезпечення низького енергоспоживання;
- зростають омичні високочастотні втрати, оскільки на базі традиційних технологій при створенні пристроїв, розміри яких зі збільшенням частоти суттєво зменшуються, не вдається втримувати заданих допусків. Окрім того, шорсткість поверхонь елементів підсилювача на частотах терагерцового діапазону

стає співрозмірною з глибиною скін-ефекту, що призводить до зростання втрат схеми;

- зі зменшенням розмірів сповільнювальної системи для забезпечення проходження більшого струму необхідно підвищувати густину струму електронного променя, тобто потрібні катоди з надзвичайно високою густиною струму;

- зростання густини струму в електронних пучках за законами моделювання, а також труднощі відведення теплоти в разі зменшення геометричних розмірів елементів, що нагріваються;

- прилади займають чималу площу та мають порівняно велику масу, тоді як практично відсутні компактні малогабаритні вакуумні прилади, використовувані в пристроях спектроскопії та формування зображення, необхідних у медичному та промислового обладнанні, а також у системах супроводу й посадки літаків за умов нульової видимості;

- істотне зростання необхідного для фокусування електронного пучка магнітного поля потребує застосування дуже сильних магнітів;

- проміжний варіант досягнення терагерцових частот полягає в примноженні робочих частот схем міліметрового діапазону, а це обмежує як вихідну потужність приладів, так і отримуване відношення сигнал/шум.

Головні віхи терагерцової електроніки в ХХ сторіччі ілюструє наведена далі таблиця [7].

Рік	Організація, яка створює та досліджує прилади терагерцового діапазону	Проекти та досягнення
2003	Манчестерський університет (Великобританія)	Діод SSD, що сам перемикається — нанорозмірний нелінійний пристрій, сформований у гетероструктурі (вузько- чи широкозонних напівпровідникових сполук — відповідно InGaAs/AlInAs та InAs/AlSb чи GaN/AlGaIn), що містить двовимірний газ; робоча частота — 1,5 ТГц
2006	Міністерство оборони США (DARPA)	Проект SWIFT (Sub-millimeter Wave Imaging Focal Plane Technology) отримання зображень у субміліметровому діапазоні
2009	Міністерство оборони США (DARPA)	Програма «Терагерцова електроніка» (Terahertz Electronics), розробка й демонстрація матеріалів і технологій виробництва транзисторів і мікросхем приймачів та задавальних генераторів терагерцових частот
2010	Міністерство оборони США (DARPA) та дослідна лабораторія СВ	Фосфід-індієві HEMT і HBT транзистори, максимальна частота яких перевищує відповідно 1 і 0,62 ТГц
2011	Компанія Teledyne Scientific & Imaging (Ізраїль)	130-нм InGaAs/InP DHBT транзистор із граничною частотою підсилення за струмом, що перевищує 529 ГГц, та максимальною частотою генерації понад 1,1 ТГц. Напруга пробою транзистора 3,5 В; густина струму — 10 мкА/мкм ² ; розмір еміттера — 2 нм
2011	Телекомунікаційні компанії Японії Nippon Telegraph and Telephone та Технологічний інститут Токіо	Резонансно-тунельний діод на основі InGaAs/AlAs із частотою генерації 542 ГГц та вихідною потужністю 210 мкВт
2012	Компанія Northrop Grumman (США)	Створення в межах фази II першого у світі твердотілого приймача з граничною частотою підсилення 0,85 ТГц
2013	Компанія Northrop Grumman (США)	Контракт на розробку технологій, необхідних для реалізації компактних і високопродуктивних електронних схем, що працюють на частоті 1,03 ТГц
2013	Університети Манчестера та Ноттінгема	Транзистори із гранично високою частотою на основі графена, нових матеріалів із вуглецевою матрицею та гетероструктур напівпровідникових сполук
2014	Дослідницький центр Еймса (Ames Research Centre) NASA та Національний центр нанотехнологічного виробництва (National NanoFab Center) Південної Кореї	Транзистор із вакуумним каналом, або «вакуумна нанолампа». Гранична частота підсилення за струмом першого вакуумного транзистора становить 400 ГГц
2014	Науковий центр Гельмгольца (Дрезден)	Фотонні терагерцові пристрої на основі графена, що долають обмеження існуючої технології. Створений оптичний квантовий генератор терагерцового випромінювання на основі графена з оптичним накачуванням — перший крок на шляху реалізації нових типів графенових терагерцових лазерів
2015	Компанія Northrop Grumman	Інтегральний підсилювач, що містить 10 транзисторних каскадів і працює на частоті 1012 ГГц

Перспективні нанорозмірні терагерцові пристрої

Найперспективніші розробки в галузі терагерцової електроніки базуються на використанні таких фізичних процесів у наноструктурах, як тунелювання (резонансне і нерезонансне), автоелектронна емісія, лавинне множення [8; 9].

Зауважимо, що такі прилади працюють у сильних зовнішніх електричних полях для прискорення електронних процесів. Густина струму в таких структурах, отримана на основі математичного моделювання, становить $10^6 \dots 10^9$ А/м². Отримані експериментальні потужності дорівнюють 210 мкВт. І щоб зменшити напругу, яка прикладається до таких структур, і отримати необхідну напруженість поля та потужність сигналу, змінюють форму й розміри катода (наприклад, застосовують вістрійні катоди), використовують вакуумні проміжки у формі потенційних бар'єрів, а також вакуумні канали. Адже вакуум — це набагато краще середовище для передавання електрона, ніж тверде тіло, де внаслідок зіткнення електронів з атомами матеріалу виникають перешкоди, шуми й спотворення. Бар'єрні структури діодів, що працюють у діапазоні від 100 до 1000 ГГц, мають товщину 1,5...5 нм із сильнолегованими і нелегованими шарами, функціонують на базі квантово-механічного ефекту тунелювання.

Зауважимо, що одnobар'єрна структура, така як $n + \text{GaAs} - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x} - n + \text{GaAs}$ (рис. 3, а), із нерезонансним тунелюванням, характеризується меншою інерційністю та не настільки потужними шумами, як резонансна двобар'єрна структура $n + \text{GaAs} - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x} - \text{GaAs} - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x} - n + \text{GaAs}$ із двома резонансними рівнями (рис. 3, б).

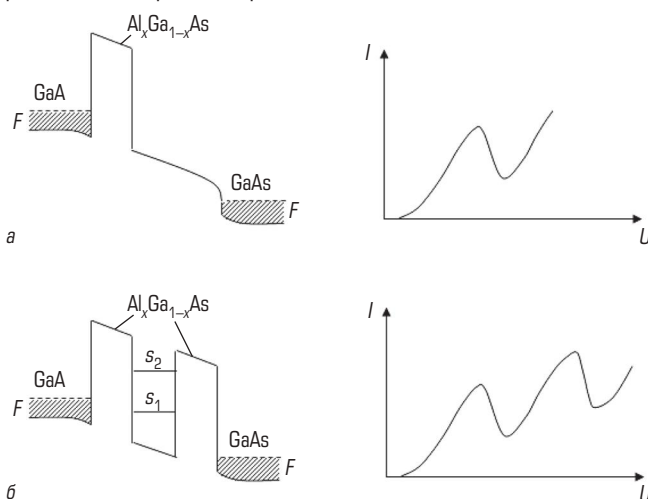


Рис. 3. Схематичні енергетичні діаграми ВАХ: а — одnobар'єрної, б — двобар'єрної структури

У [9] досліджено можливість генерування сигналів у діапазоні 100...1000 ГГц у вакуум-напівпровідникових структурах із вістрійним катодом на основі керованого лавинного пробію з вакуумною ділянкою дрейфу. Розрахункова максимальна густина струму імпульсу береться порядку 10^8 А/м²; ККД становить 6–10%.

Розміри вістрійної структури та розподіл електричного поля зображено відповідно на рис. 4 і 5 [10]. Вважається, що в такій структурі напруга на р–п ділянці перевищує значення роботи виходу електрона напівпровідник–вакуум, а час затримки визначається часом формування лавини.

З'явилися енергоефективні й швидкодійні вакуумні твердотільні прилади типу нанотранзистора з вакуумним каналом [4].

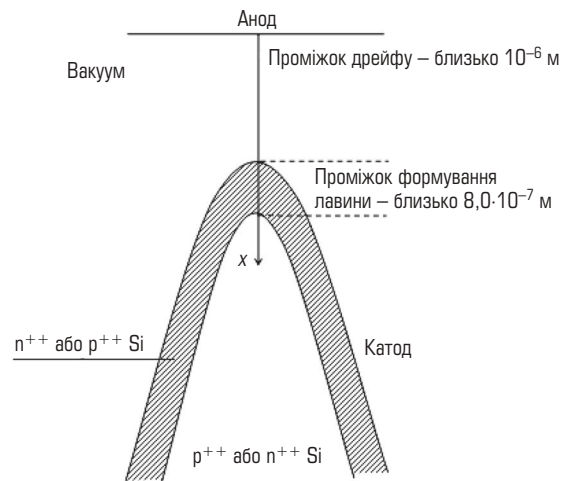


Рис. 4. Вістрійна структура діода на основі керованого лавинного пробію

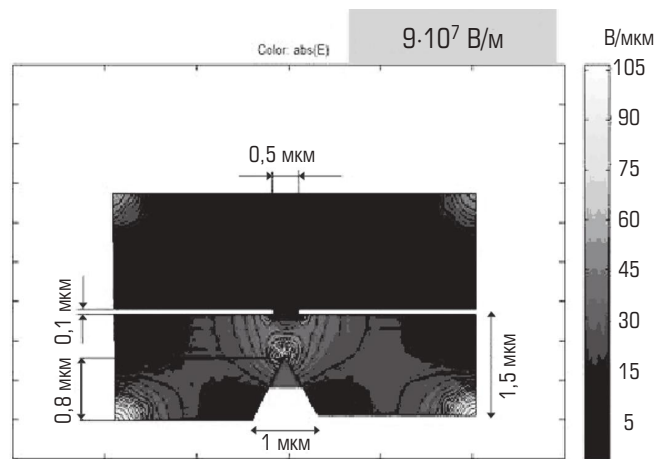


Рис. 5. Розподіл напруженості поля вістрійного катода

Транзистор виготовлено на легованій фосфором кремнієвій підкладці, в якій за допомогою літографії створюється невелика порожнина, з трьох боків якої розташовано електроди, подібні до польового транзистора (рис. 6). Відстань між витком (анодом) і стоком (катодом) дорівнює 150 нм, унаслідок чого уможливується автоелектронна емісія під дією зовнішнього електричного поля без попереднього збудження електронів.

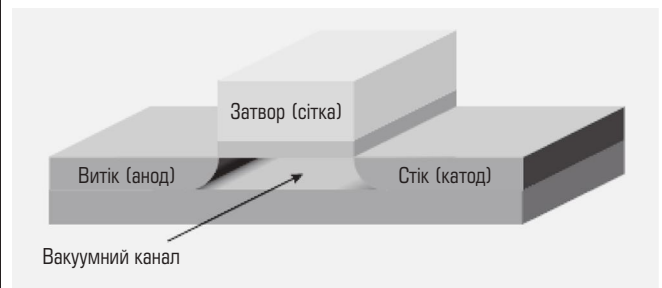


Рис. 6. Структура вакуумного транзистора

Завдяки квантово-механічній природі процесу автоелектронної емісії маємо змогу отримувати величезну густина струму. Зокрема, це пов'язано з тим, що тунельний механізм вивільнення електронів із твердого тіла не вимагає енергетичних витрат на емісійний акт і виключає, таким чином, необхідність зовнішнього впливу на матеріал катода.

Наприклад, теоретичні розрахунки показують, що можна досягти 10^7 А/м² для частоти 1000 ГГц. Проблему з наявністю чистого вакууму під тиском інженери NASA Ames розв'язали, скоротивши відстань між катодом і анодом настільки, що вона стала менша за довжину вільного пробігу електрона до його зіткнення з молекулою газу. За нормального атмосферного тиску довжина вільного пробігу електрона становить близько 200 нм. А якщо використовувати гелій, то вона збільшується до 1 мкм. При достатньо низькій напрузі в електронів не вистачить енергії, щоб іонізувати гелій, так що деградації катода не відбувається.

Порівняно із сучасними транзисторами робоча напруга вакуумного нанопристрою достатньо велика: вона становить 10 В (проти 1 В). Зазначимо, що гранична частота підсилення за струмом першого вакуумного транзистора становила 400 ГГц.

Таким чином, нанорозмірні вакуумні транзистори можуть працювати на високих частотах, не поступаючись при цьому за масою, вартістю, терміном дії напівпровідниковим пристроям, а за стійкістю до впливу несприятливих зовнішніх умов, особливо до радіаційного опромінювання, перевершуючи їх.

Остання властивість особливо важлива для військових систем, заради досягнення радіаційної стійкості яких витрачаються великі фінансові й часові ресурси. А високу робочу напругу розробники планують знизити до 2 В за рахунок зменшення відстані між витоком і стоком до 10...20 нм. У цьому разі гранична частота може становити 600 ГГц. Як стверджують дослідники, на основі вакуумних, як і на основі звичайних транзисторів, можлива побудова логічних схем.

Сьогодні вже створено прилад, що самостійно перемикається (*Self-Switching Diodes* — SSD) [11] і слугує для детектування терагерцового випромінювання. Цей прилад побудовано за допомогою двох витравлених ізолювальних канавок (глибина їх залежить від використаного матеріалу) шириною W_h і W_v , між якими розташовується канал (на основі InGaAs) А шириною W і довжиною L . Канавки і канал обмежено виступами В, що виконують функцію затвора, приєднаного до стоку (рис. 7, а).

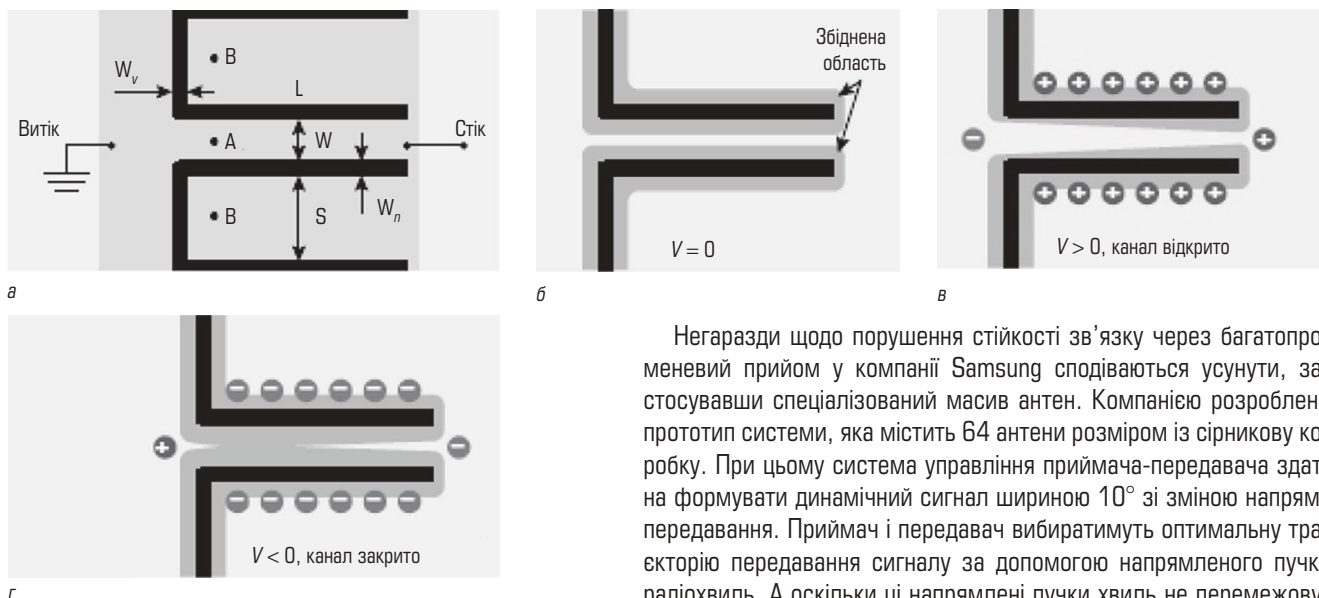


Рис. 7. Структура діода, що самостійно перемикається

Принцип функціонування цього діода полягає у формуванні на межі поділу канавок і шару двовимірного електронного газу збідненої області (рис. 7, б). У результаті реальна ширина каналу фактично менша від заданого значення W . При прямому зміщенні діода (рис. 7, г) позитивний заряд двох виступів буде притягувати електрони в канал, унаслідок чого струм діода збільшиться, а при протилежному зміщенні електрони зазнають відштовхування, а отже, струм зменшується (рис. 7, в).

Таким чином, провідність каналу модулюється прикладеною напругою. Чим менша ширина каналу, тим більша є різниця його провідності в разі прямого і протилежного зсуву.

Учені Манчестерського університету продемонстрували роботу схеми відповідного приймача на частоту 1,5 ТГц при кімнатній температурі.

На шляху до створення технології мобільного зв'язку 5G

Для майбутньої високошвидкісної технології 5G вже тепер пропонується розглядати використання міліметрового діапазону радіохвиль (від 3 до 300 ГГц). За розрахунками компанії Samsung, державні і міжнародні регулятори можуть надавати дозвіл на використання спектра шириною до 100 ГГц. У цьому діапазоні теоретично можливе передавання інформації зі швидкістю до 10 Гбіт/с, що більш ніж достатньо для будь-яких сучасних потреб [12]. Суттєвою перевагою міліметрового діапазону є надзвичайно висока пропускна здатність каналів зв'язку і близька до оптичної форма поширення випромінювання, завдяки чому усувається інтерференція. Проте постають труднощі, пов'язані з поглинанням міліметрових радіохвиль в атмосфері, опадах і водяній парі.

Аналіз особливостей поширення радіохвиль показує, що в терагерцовому діапазоні (для хвиль 1,3; 0,96 і 0,88 мм) ослаблення не велике (до 500 м) і для малої дальності дії радіотехнічних систем цілком придатне. При цьому середні значення загасання з імовірністю 0,8, зазначеною у «вікнах прозорості», не перевищують відповідно 3; 8,5 і 10 дБ/км [13].

Негаразди щодо порушення стійкості зв'язку через багатопроменевий прийом у компанії Samsung сподіваються усунути, застосувавши спеціалізований масив антен. Компанією розроблено прототип системи, яка містить 64 антени розміром із сірникову коробку. При цьому система управління приймача-передавача здатна формувати динамічний сигнал шириною 10° зі зміною напрямку передавання. Приймач і передавач вибиратимуть оптимальну траєкторію передавання сигналу за допомогою напрямленого пучка радіохвиль. А оскільки ці напрямлені пучки хвиль не перемешуються, то можливе повторне використання частотного діапазону.

При цьому відстань стійкого прийому становитиме близько 2 км за умови прямої видимості. Субміліметрові хвилі мають велику проникну здатність, забезпечуючи теоретичну швидкість передавання інформації понад 10 Гбіт/с.

Експерти відзначають, що технологія 5G має складатися з кількох систем, які паралельно працюють у різних діапазонах, зокрема в міліметровому та субміліметровому.

Наприклад, Даніель Мительман, професор кафедри електротехніки та обчислювальної техніки Університету Райса (США) прогнозував у березні 2015 року кілька сфер застосування терагерцової фотоники:

по-перше, це розробка методів для настільної генерації терагерцових імпульсів дуже високої інтенсивності. Пік поля 1 мВ/см навіть для частот міліметрового та субміліметрового діапазонів, що вже не є рідкістю. Це відкриває зовсім новий світ терагерцової нелінійної оптики;

по-друге, вочевидь, доступні безпроводові мережі працюватимуть на частотах, більших за 100 ГГц.

І хоча 60 ГГц уже впроваджено у виробництво, усе ж технології, необхідні для частот від 100...400 ГГц, істотно відрізнятимуться від сучасних [7].

Література

1. **Masashi, T.** Terahertz semiconductor-heterostructure laser / Masashi Tachiki, Shouta Fukuya, Tomio Koyama. Mechanism of Terahertz Electromagnetic Wave Emission from Intrinsic Josephson Junctions // PRL 102, 127002.— 2009.

2. **Jin-Woo, Han.** Introducing the vacuum transistor: a device made of nothing [Електронний ресурс] / Han Jin-Woo // Meeyu Meuyappan.— 2014.— Режим доступу:

<http://spectrum.ieee.org/semiconductors/devices/introducing-the-vacuum-transistor-a-device-made-of-nothing>.

3. **Photoinduced** handedness switching in terahertz chiral metamolecules [Електронний ресурс] / [Shuang Zhang

Jiangfeng Zhou, Yong-Shik Park a. o.].— Режим доступу: xlab.me.berkeley.edu/pdf/202.pdf

4. **Майская, В.** На пути к достижению субмиллиметрового диапазона длин волн / В. Майская // Электроника: наука, технология, бизнес.— 2013.— № 6.— С. 44–58.

5. **Булгаков, Б. М.** Направления создания телекоммуникационных радиосистем миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / Б. М. Булгаков, С. А. Кравчук, Т. Н. Нарытник // Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2003): материалы конф.— Севастополь: Вебер, 2003.— С. 305–308.

6. **Гершензон, Е. М.** Субмиллиметровая спектроскопия. Физика / Е. М. Гершензон // Соросовский образовательный журнал.— 1998.— № 4.— С. 78–85.

7. **Коята, У.** Oclisations up to 1.40 THz from Resonant-Tunneling-Diode-Based Oscillators with Integrated Patch Antennas [Електронний ресурс] / Y. Koyama R. Sekiguchi, T. Ouchi // The Japan Society of Applied Physics.— Режим доступу: arxiv.jsap.jp/link?APEX/6/064102.

8. **Кременецька, Я. А.** Використання ефектів сильних полів у нанорозмірних діодних структурах / Я. А. Кременецька // Наук. записки УНДІЗ.— 2013.— № 1.— С. 37–41.

9. **Волков, Е. Ю.** Презентация на тему «разработка SiC эмиттеров» / Е. Ю. Волков, А. М. Светличный.— Таганрог: Южный федеральный университет, 2012.

10. **Song, A. M.** Nano-diode that does not rely on pn junction [Електронний ресурс] / A. M. Song.— Режим доступу: personalpag-es.manchester.ac.uk/staff/A.Song/research/SelfSwitchingDevice.htm

11. **Методика** оценки характеристик терагерцевых радиолокационных устройств обнаружения наземных объектов / [Р. П. Быстров, И. Л. Масленникова, А. В. Соколов, Г. К. Чистова] // Журнал радиоэлектроники.— 2010.

Рецензент: доктор техн. наук, професор С. В. Толюпа, Державний університет телекомунікацій, Київ.

А. А. Манько, Я. А. Кременецкая, С. В. Морозова

СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЙ ДИАПАЗОН И НОВЕЙШИЕ ДОСТИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Охарактеризованы главные направления развития терагерцевой электроники на основе таких физических процессов в наноструктурах, как туннелирование (резонансное и не резонансное), автоэлектронная эмиссия, лавинное умножение. Описаны важнейшие мировые проекты и новейшие устройства в указанной сфере.

Ключевые слова: субмиллиметровый диапазон; системы и приборы терагерцевого излучения; полупроводниковые и вакуумно-полупроводниковые наноструктуры; системы беспроводной связи ближнего радиуса.

A. A. Manko, Y. A. Kremenetskaya, S. V. Morozova

THE SUBMILLIMETRIC RANGE AND MODERN ACHIVEMENTS ON THE BASIS ON NANOTECHNOLOGIES

In this article were considered the main ways of development of terahertz electronics on the basis of such physical processes in nanostructures like tunneling, resonant tunneling, autoelectronic emissions, avalanche multiplication. The most important world projects and modern devices were described in the specified field.

Keywords: submillimeter range; THz Band communications networks; THz systems; THz devices; semiconductor and vacuum-semiconductor nanostructures; off-wire communication of near radius networks.