

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ
імені В.Є. ЛАШКАРЬОВА

На правах рукопису
УДК 681.7, 537.5

ШЕВЧИК-ШЕКЕРА АННА ВОЛОДИМИРІВНА

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕРАГЕРЦОВОЇ СИСТЕМИ
БАЧЕННЯ НА БАЗІ БАГАТОЕЛЕМЕНТНОГО ПРИЙМАЧА
ВИПРОМІНЮВАННЯ**

05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ, 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у відділі фізики та технології низьковимірних структур Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова Національної академії наук України.

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України,
Сизов Федір Федорович,
завідувач відділу фізики та технології
низьковимірних структур

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор,
Боровицький Володимир Миколайович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», професор кафедри оптичних та
оптико-електронних приладів

кандидат технічних наук,
Радкевич Олександр Іванович,
НТК «Інститут Монокристалів»,
зам. директора по науці ДП «НДІ Мікроприладів»

Захист відбудеться 28 травня 2019 р. о 16 год. 15 хв. На засіданні спеціалізованої ради Д 26.199.01 при Інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України (Київ, пр.. Науки 41, м. Київ, 03028)

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України

Автореферат розіслано _____ 2019 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради Д 26.199.01
к.ф.-м.н., с.н.с.



О. Б.Охріменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми: використання активних терагерцових (ТГц) систем бачення (СБ) є привабливим для фундаментальних та прикладних досліджень в багатьох галузях людської діяльності. ТГц випромінювання (0,1 ТГц – 10 ТГц (3 мм – 0,03 мм)) проникає крізь більшість діелектриків та поглинається провідниками, окрім того, є неіонізуючим для живих організмів.

Одним з важливих напрямків використання специфічних властивостей ТГц випромінювання є розробка систем для спостереження та отримання інформації про наявність прихованих або сторонніх предметів в листах, бандеролях, багажу, що запаковані в пластикові або картонні контейнери, які прозорі для ТГц випромінювання.

Висока проникаюча здатність у діелектричному середовищі, відсутність іонізуючого впливу, велика інформаційна ємність ТГц випромінювання, зумовили широке використання ТГц СБ для систем безпеки. ТГц випромінювання проходить крізь об'єкт спостереження, що не містить молекул води або інших сильно поглинаючих речовин практично без втрат енергії, взаємодіє з окремими молекулами і молекулярними комплексами, що дозволяє не тільки виявляти, але і ідентифікувати різні середовища. Таким чином, можна демаскувати небезпечні вкладення, наприклад, таблетки, порошки, наркотики, зброю або вибухові речовини.

Сучасний процес виробництва ТГц СБ часто залишається складним і трудомістким, внаслідок чого вартість його є вкрай високою. Для активних ТГц СБ важливим і актуальним є розробка та виготовлення ТГц квазіоптики, що дозволить підвищити якість зображення, забезпечити максимальну рівномірність засвітки багатоелементних приймачів терагерцового випромінювання. До кінця невирішеною задачею залишається вибір матеріалу та впровадження сучасних технологій для виготовлення квазіоптичних елементів, з урахуванням оптимального співвідношення ціна-якість, розробка методик тестування параметрів ТГц СБ.

В роботі запропоновано модель ТГц системи бачення на базі багатоелементного приймача випромінювання (ПВ) КМОН транзисторів, що є чутливими, швидкими, компактними, не потребують охолодження до криогенних температур, виготовляються з достатньо вивчених та технологічно освоєних матеріалів; впроваджено нову адитивну технологію шарового наплавлення та використання станку з числовим програмним керуванням (ЧПК) для створення ТГц асферичних лінз, що дозволить суттєво зменшити ціну виробу без впливу на якість отриманих ТГц зображень.

Результати дисертації дозволяють за рахунок попереднього теоретичного моделювання, розроблених методик, виконати поточну задачу дослідження та створення ТГц СБ, забезпечити оптимальне поєднання функціональних вузлів та отримання інформативних зображень, з врахуванням зовнішніх умов функціонування.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України протягом 2010-2019 рр., зміст відповідає основному напрямку науково-дослідницьких робіт інституту. Проведені дослідження виконувалися в рамках тем:

науково-технічна робота «Розроблення сканера терагерцового діапазону для використання в системах контролю та безпеки» за договором № ДЗ/6-2017 від 14.11.2017 р; Ш-41-12 «Фізичні та фізико-технологічні аспекти створення сучасних напівпровідникових матеріалів і функціональних структур для нано- і оптоелектроніки». Відомча тематика ВФА НАНУ. Виконується за Постановою Бюро ВФА НАНУ від 27.11.2011 р. № 8; Ш-7-11 «Дослідження, розробка та діагностика напівпровідникових пристроїв мікрохвильової та ІЧ нанофотоелектроніки», Відомча тематика ВФА НАНУ. Виконується за Постановою Бюро ВФА НАНУ від 20.12.2010 р. № 10; Ш-7-16 «Розробка та діагностика напівпровідникових структур ІЧ та терагерцової фотоелектроніки», Відомча тематика ВФА НАНУ. Виконується за Постановою Бюро ВФА НАНУ від 12.05.2015 р. № 4.

Мета та задачі дослідження: дослідження методів проектування та розробка терагерцової системи для отримання зображень. Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити наступні задачі:

1. Проведення порівняльного аналізу сучасних ТГц СБ.
2. Адаптація математичної моделі ТГц СБ та оптимальне поєднання головних функціональних вузлів.
3. Моделювання основних функціональних вузлів ТГц СБ.
4. Пошук нових підходів до створення квазіоптики ТГц діапазону.
5. Створення експериментального зразка ТГц СБ та отримання ТГц зображень.
6. Впровадження методів тестування основних вузлів ТГц СБ.

Об'єкт дослідження: принципи функціонування та побудови ТГц СБ.

Предмет дослідження: методи проектування та методики оцінки параметрів складових вузлів ТГц СБ.

Методи дослідження: В ході вирішення окремих задач в роботі використані: математичне моделювання ТГц СБ на основі теорії лінійних систем; комп'ютерне моделювання ТГц СБ в середовищі MathCad; визначення характеристик джерел випромінювання; експериментальна перевірка теоретичних положень шляхом створення макету ТГц СБ та його експериментальними випробуваннями.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Адаптовано математичну модель ТГц СБ для дослідження процесу отримання зображень скритих об'єктів.
2. Удосконалено методики тестування основних вузлів ТГц СБ.
3. Впроваджено нову адитивну технологію пошарового наплавлення для створення квазіоптики для ТГц діапазону.

4. Освоєно процес виготовлення ТГц лінз із гіперболічним профілем із фторопласту за допомогою станка з числовим програмним керуванням для візуалізації скритих об'єктів в ТГц СБ.
5. Проведено проектування та експериментальне дослідження роботи головних функціональних вузлів ТГц СБ.
6. Проведено оцінку основних параметрів терагерцових приймачів: чутливості та потужності еквівалентної шуму.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційного дослідження є основою для розуміння принципів функціонування та побудови ТГц СБ.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

1. Адаптовано для ТГц діапазону частот математичну модель, яка описує ТГц СБ і може застосовуватись для розрахунку проходження ТГц випромінювання крізь всі функціональні ланки ТГц СБ .
2. Впроваджено нову адитивну технологію пошарового наплавлення та використання станка з ЧПК для створення ТГц асферичних лінз.
3. На основі запропонованих методів побудована модель ТГц СБ для візуалізації прихованих об'єктів, що працює на базі багатоелементного приймача КМОН транзисторів.
4. Проведено оцінку основних параметрів ТГц приймачів випромінювання.
5. За допомогою розробленої ТГц СБ, на експериментальному макеті, отримані зображення прихованих об'єктів.
6. Впроваджені методики тестування основних вузлів ТГц СБ.

Впроваджені методи проектування та методики оцінки параметрів складових вузлів ТГц СБ знайшли застосування при проектуванні та розробці моделі ТГц СБ на базі багатоелементного приймача випромінювання для потенційного замовника (ПАТ "Укрпошта"), про що складено відповідний акт.

Особистий внесок здобувача. Здобувач приймав участь у проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, в аналізі одержаних результатів та формулюванні висновків. Дослідження характеристик асферичних лінз ТГц діапазону, впровадження нових технологій для створення терагерцової квазіоптики; дослідження реальних та граничних НЕР приймачів ТГц випромінювання; проектування, виготовлення та дослідження роботи основних функціональних вузлів ТГц СБ.

Усі основні результати роботи з достатньою повнотою відображені у 20 наукових працях, з них 9 в наукових журналах та 10 в матеріалах та тезах конференцій, 1 патент.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи обговорювалися на всеукраїнських та міжнародних конференціях, зокрема: X Міжнародна науково-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи", 27-28 квітня 2010 року, НТУУ "КПІ", м. Київ, Україна; 13 International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science, Taras Shevchenko National University//P. 140-141, Kyiv, Ukraine, 2012; 6-та Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка та

мікросистемні технології» (СЕМСТ-6), Україна, Одеса, 2014; MIKON 2014, 20th Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications, June 16-18, Gdansk, Poland (2014), p. 767-770; 13-та міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 23-24 квітня 2014 року, НТУУ «КПР»; 2015 IEEE 15th Mediterranean Microwave Symposium (MMS); 7-ма Українська наукова конференція фізики напівпровідників УНКФН-7 26-30 вересня, 2016, Дніпро, Україна; конференції молодих вчених з фізики напівпровідників "Лашкарьовські читання - 2017", Київ, 2-4 квітня 2017 р. Україна // с. 103, Київ, 2017.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 робіт, серед яких 9 статей у фахових наукових виданнях (3 статті – у іноземному фаховому науковому виданні) та 10 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, 1 патент.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації сягає 110 сторінок, з обсягом основного тексту 104 сторінок. Дисертація містить 57 рисунків, 64 формули, 4 таблиці, список використаних джерел із 43 найменувань на 106-110 сторінках та 1 додаток на 105 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета, об'єкт та предмет досліджень, наведений зв'язок роботи з науковими темами, дані про апробацію роботи.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячений огляду літературних даних стосовно існуючих на сьогодні ТГц СБ. Розглянуті підходи до побудови активних та пасивних ТГц СБ.

Всі системи, що розробляються на даний час діляться на активні та пасивні ТГц СБ. У першому випадку об'єкт спостереження (ОС) опромінюється ТГц випромінюванням, а реєструюча апаратура приймає відбите від ОС або пройшовше крізь нього випромінювання. У разі пасивної ТГц СБ реєструється власне випромінювання об'єкта спостереження. Основним плюсом першого методу є низькі вимоги до чутливості приймача випромінювання, проте використання активних методів в ряді випадків є небажаним, наприклад при використанні в медицині та деяких систем служби безпеки. Існуючі розробки пасивних ТГц СБ працюють в більшості випадків на приймачах прямого детектування. Застосування супергетеродинного ПВ дозволяє отримати спектральну інформацію про випромінювання об'єктів спостереження, що в свою чергу дозволяє визначати хімічний склад цих об'єктів, а значить має великий практичний попит з точки зору застосування в медичних системах і службах безпеки. Крім цього, супергетеродинний приймач дозволяє отримувати інформацію про розподіл фази в фокальній площині об'єкта. За допомогою такого приладу можна будувати зрізи, розташовані на різній

глибині об'єкта спостереження, завдяки обробці амплітудних і фазових розподілів сигналу в площині приймача.

Аналіз літератури показує значні успіхи, досягнуті в даний час в області розробки ТГц систем бачення, але існуючі системи мають недостатню інформацію щодо проектування ТГц систем бачення із врахуванням поточної задачі спостереження, зовнішніх умов функціонування. Більше того, на сьогоднішній день відсутні чіткі рекомендації для надання повної інформації про формування функціональних блоків ТГц СБ, умов отримання інформативних зображень на виході системи. Таким чином, для ефективної роботи ТГц систем бачення необхідною є розробка рекомендацій оптимального поєднання головних функціональних блоків із врахуванням умов спостереження та отримання інформативних зображень ТГц СБ.

У другому розділі адаптовано математичну модель ТГц СБ, за аналогією з існуючими математичними моделями для систем інших спектральних діапазонів. Описано математичну модель активної ТГц системи бачення, що враховує особливості проходження сигналу через кожний блок інформаційного комплексу «Джерело випромінювання – об'єкт – ТГц система – оператор», і дозволяє оцінювати ефективність окремих каналів ТГц СБ.

Моделювання ТГц системи бачення виконано в такій послідовності:

1. Моделювання та оцінка ефективності сигналів від джерела випромінювання.
2. Моделювання та оцінка ефективності квазіоптичної системи. Описана функція пропускання квазіоптичної системи, на основі якої представлені дифракційна ефективність та функція розсіювання точки.
3. Моделювання та оцінка ефективності блоків приймача випромінювання та обробки зображень.
4. Моделювання та оцінка зображення на екрані дисплея та особливості сприйняття зоровою системою.

Найбільш зручним інструментом для аналізу інформаційного комплексу «штучне джерело-об'єкт –ТГц система – оператор» є модуляційна передавальна функція (МПФ, МТФ), яку можна застосовувати тільки до лінійних інваріантних систем.

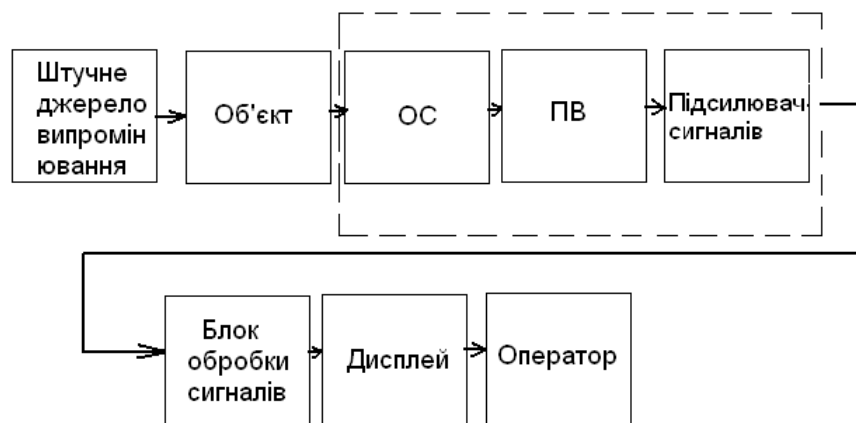


Рис.1. Узагальнена схема проходження сигналу при дистанційних спостереженнях

Кожен елемент такої системи має свою модуляційну передавальну функцію. Узагальнена МПФ ТГц СБ, згідно теорії лінійних систем, визначаємо добутком МПФ її окремих елементів:

$$MTF_{THz_NA}(v_x, v_y) = MTF_s(v_x, v_y) MTF_{ob}(v_x, v_y) MTF_{dif_os}(v_x, v_y) MTF_{IA}(v_x, v_y) MTF_{dys}(v_x, v_y) \times MTF_{eye}(v_x, v_y) \quad (1)$$

де $MTF_s(v_x, v_y)$, $MTF_{ob}(v_x, v_y)$, $MTF_{dif_os}(v_x, v_y)$, $MTF_{IA}(v_x, v_y)$, $MTF_{dys}(v_x, v_y)$, $MTF_{eye}(v_x, v_y)$ – МПФ випромінювача, об'єкта, ОС, ПВ, дисплея, спостерігача.

Для оцінки якості зображення ТГц СБ запропоновано використати критерій ймовірності розпізнавання об'єкта P_r , який складається з ймовірності виявлення об'єкта P_d та ймовірності розпізнавання по критерію Джонсона $P_r(N)$. Проведено методику розрахунку P_r для ТГц СБ за аналогією для оглядових телевізійних систем

$$P_r = P_d \cdot P_r(N) \quad (2)$$

Отримано вираз, що дозволяє розраховувати ймовірність розпізнавання зображення об'єкта в залежності від параметрів дисплея, характеристик джерела, характеристик об'єкта, параметрів ТГц ПВ та зорового сприйняття оператора.

Третій розділ присвячено дослідженню основних параметрів терагерцових приймачів: чутливості та потужності еквівалентної шуму. Значення потужності еквівалентної шуму – NEP (noise equivalent power) визначає мінімальну потужність випромінювання, яке потрапляє на приймач і яку він може зареєструвати, за умови, що відношення сигнал / шум дорівнює одиниці.

$$NEP = \frac{U_{noise}}{S}, \quad (3)$$

де U_{noise} - амплітуда шуму в смузі частот 1 Гц, S - чутливість приймача.

Показано, що одними з перспективних теплових ТГц ПВ є болометри на гарячих носіях заряду (hot electron bolometers (HEB)) і датчики на краю переходу (TES - transition edge sensors). На частоті функціонування (0,4-2,5) ТГц чутливість HEB-приймачів досягає значень шумової температури

$$T_w = 10 \cdot \frac{h \cdot \nu}{k_B}. \quad \text{Також в ТГц діапазоні широко використовують детектори}$$

випрямляючого типу: ПВ на основі бар'єрів Шоткі, ПВ на основі тунельних переходів надпровідник / напівпровідник, ПВ на основі нелінійності тунельного струму квазічастиц в переходах надпровідник-ізолятор-надпровідник (СІС). Типові значення еквівалентної шуму потужності ПВ випрямляючого типу, які функціонують, в основному, в області низьких і наднизьких температур ($T < 4$ К, Джозефсоновські і інші тунельні контакти), в залежності від спектрального

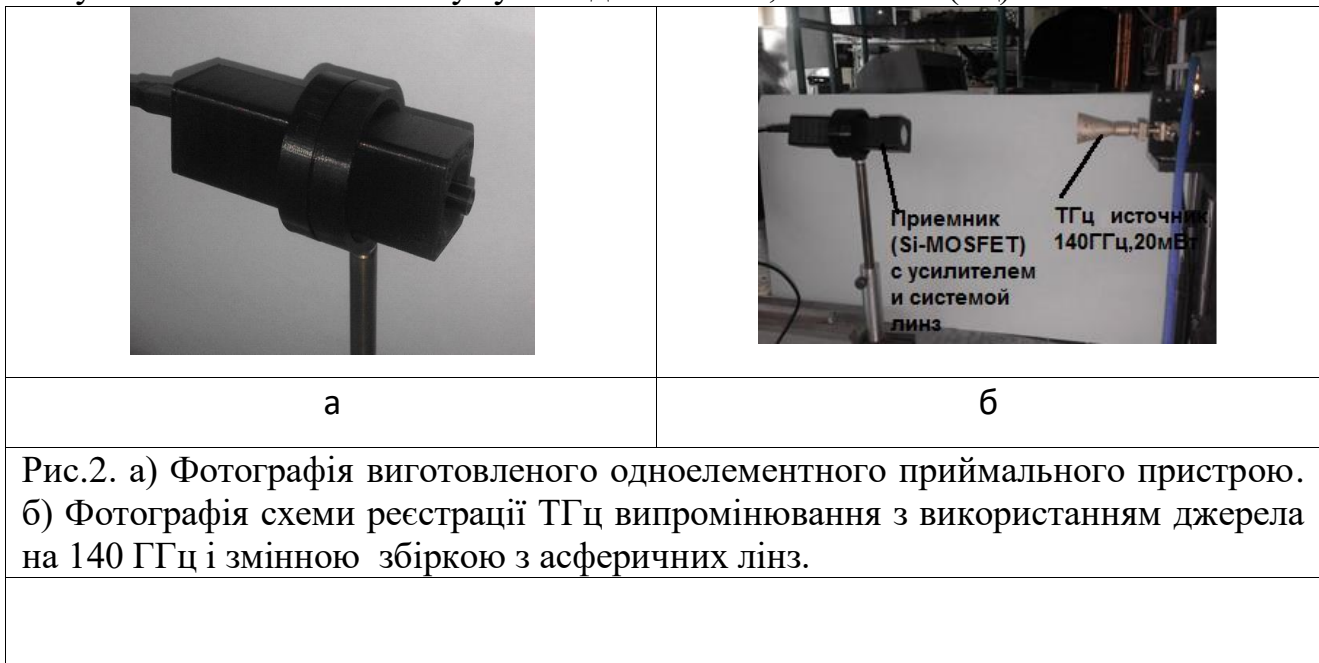
діапазону, режиму і температури функціонування знаходиться в межах $NEP = (10^{-13} \div 10^{-16}) \frac{Вт}{\sqrt{Гц}}$. При температурах близьких до кімнатної основними неохолоджуваними приймачами випрямляючого типу в ТГц області спектра залишаються точково-контактні і планарні діоди Шотткі, NEP яких знаходиться в межах $NEP = (10^{-8} \div 10^{-10}) \frac{Вт}{\sqrt{Гц}}$.

Запропоновано формулу для визначення граничних значень NEP ТГц ПВ з урахуванням фактора групування фотонів (коефіцієнт Бозе-Ейнштейна) та вплив дифракції, яку вносить мікроантена при введенні випромінювання в ПВ.

$$NEP(\lambda) = \sqrt{\lambda^2 \cdot \frac{\varepsilon \cdot \tau}{\eta} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot h^2 \cdot c^2}{\lambda^6} \cdot \frac{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k_B \cdot T}}}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k_B \cdot T}} - 1} \right) d\lambda}, \quad (4)$$

де ε - коефіцієнт пропускання атмосфери, τ - коефіцієнт пропускання оптики, η - квантова ефективність приймача випромінювання, k_B - постійна Больцмана, c - швидкість світла, λ - довжина хвилі випромінювання, T - температура випромінювання фону.

Проведено оцінку чутливості S і NEP розробленого приймача ТГц випромінювання з ТГц ПВ на базі n-канального кремнієвого Si-MOSFET транзистора (рис. 2.). На частоті 140 ГГц чутливість дорівнює $S=2,8 \times 10^5$ В/Вт, потужність еквівалентна шуму складає $NEP=4,3 \times 10^{-10}$ Вт (Гц) $^{-1/2}$



В четвертому розділі проведені дослідження та впровадження сучасних технологій для виготовлення ТГц квазіоптики. Для ТГц діапазону спектра розглянута можливість використання нових технологій виготовлення

квасіоптичних елементів за допомогою 3D друку та станка з ЧПК. 3D друк включає технологію пошарового створення фізичного об'єкта по цифровій 3D-моделі. Широке розповсюдження 3D друку пов'язано з високою точністю відтворення деталей (до 100 мкм) в поєднанні з високою якістю та доступною ціною. Для виготовлення лінз використовувався 3d принтер Creator FlashforgePro. Матеріалом для лінз був обраний Polystyrene (HIPS), який є компромісом між матеріалами з великим коефіцієнтом поглинання (PLA, ABS, нейлон) і значною деформацією, - HDPE і PP.

Після проектування та розрахунку були отримані наступні параметри для ТГц лінз: $D = 80$ мм, радіус кривої передньої (+) та задньої (-) поверхні $\frac{1}{c} = 65$ мм; конічні постійні $k = -2,6$ (поверхні другого порядку - гіперболоїд), фокусна відстань $f = 125$ мм.

Для оцінки якості виготовлених лінз був розрахований радіус кружка Ейрі

$$r = 1,22 \cdot \lambda \cdot \frac{f}{D} = 1,22 \cdot 2\text{мм} \cdot \frac{125\text{мм}}{80\text{мм}} = 3,8\text{мм}$$

На рисунках (3,4) представлені отримані характеристики однієї із виготовлених ТГц лінз із HIPS. Розмір кружка Ейрі, виготовленої із HIPS лінзи за допомогою 3D принтера складає $DA_{\text{Airy-meas}} \approx 8,8$ мм, що наближується до розрахункового значення $DA_{\text{Airy-calc}} \approx 7,6$ мм.

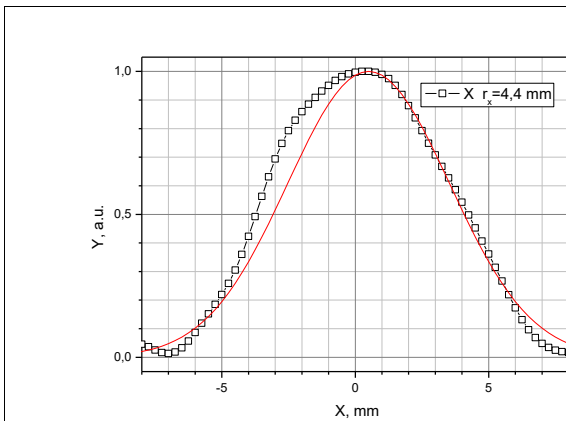


Рис. 3. Розподіл інтенсивності випромінювання від осесиметричної ТГц лінзи (частота 140 ГГц) вздовж осі X з апроксимацією Гаусовою кривою.

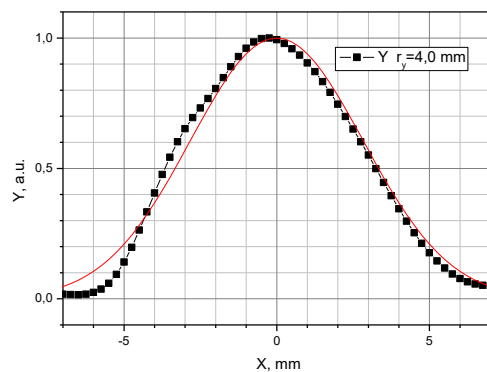


Рис. 4. Розподіл інтенсивності випромінювання від осесиметричної ТГц лінзи (частота 140 ГГц) вздовж осі Y з апроксимацією Гаусовою кривою.

Для ТГц діапазону спектра розроблено процес виготовлення поверхонь другого порядку терагерцових лінз за допомогою станка з ПЧК (рис. 5.).



Рис. 5. Загальна структурна схема послідовності етапів для виготовлення поверхонь другого порядку терагерцових лінз.
 На рис. (6 - 8) представлені виготовлені ТГц лінзи і отримані функції розсіювання точки (ФРТ, PSF).

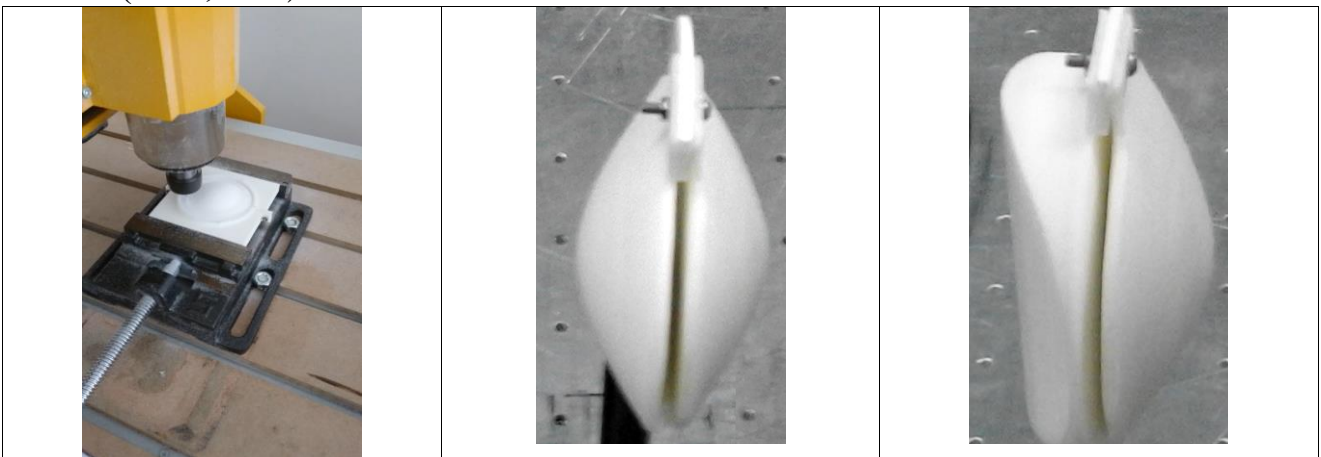
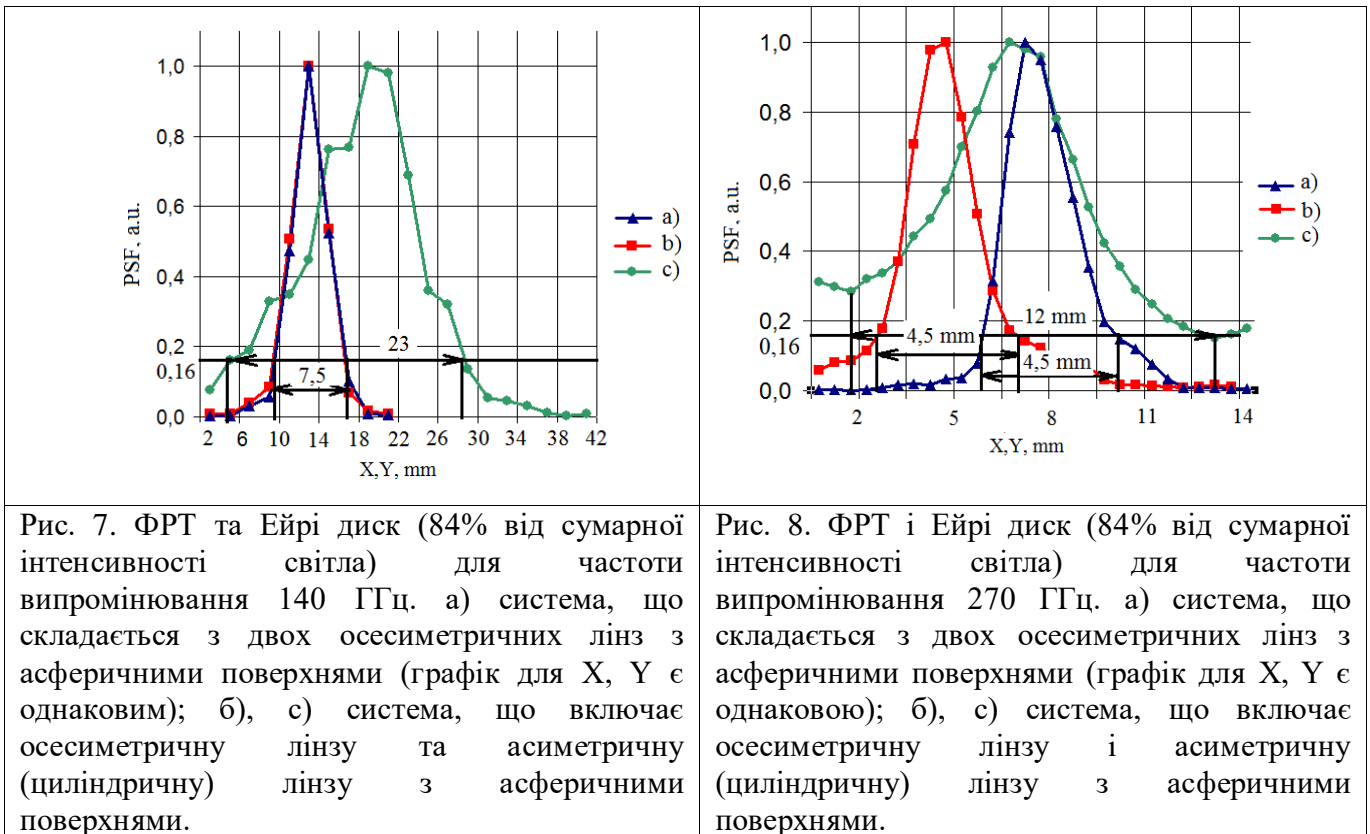


Рис.6. Фотографії процесу виготовлення та виготовлені ТГц лінзи з фторопласту.

Розрахункові і експериментальні дані центрального максимуму функції розсіювання точки - диск Ейрі, мають близькі значення ($DAiry-calc \approx 7,6$ мм, $DAiry-meas(на\ 3D\ принтері) \approx 8,8$ мм і $DAiry-meas(на\ ЧПУ) = 7,6$), відповідно, цей тип лінз може використовуватись для ТГц СБ.



П'ятий розділ присвячено експериментальній реалізації ТГц СБ: розробці вузлів ТГц СБ, впровадженню методик тестування складових частин ТГц СБ, проведення експерименту та отримання ТГц зображень.

Однією з ключових задач систем виявлення скритих об'єктів в ТГц діапазоні спектру є отримання зображень високої роздільної здатності. Оптимальною конструкцією є використання рефракційної оптики (об'єктива), що передає випромінювання від об'єкту спостереження в площину зображення (рис.9).

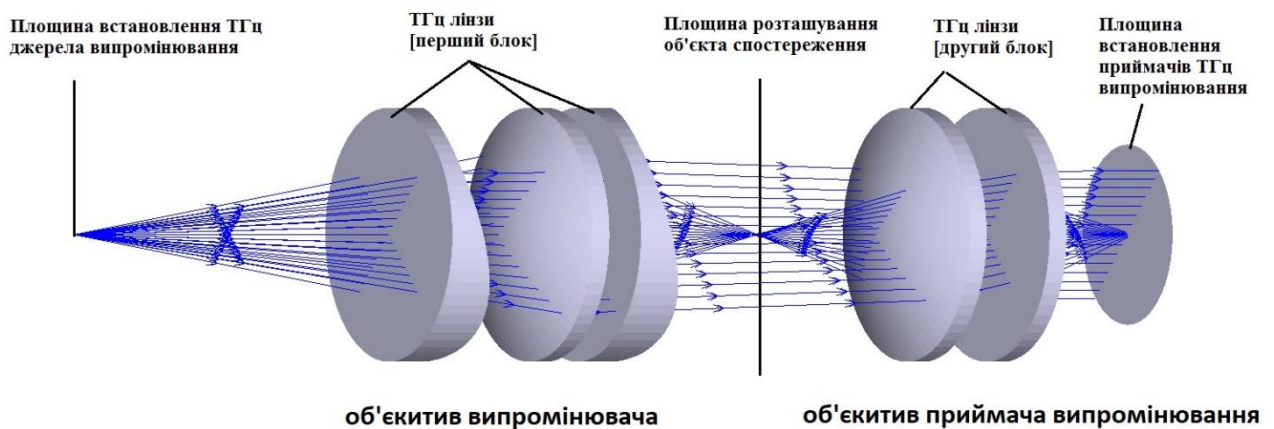


Рис. 9. Блок-схема оптичної системи з п'ятих асферичних лінз для сканування об'єктів.

Спроектована та виготовлена квазіоптична схема активної ТГц СБ виконує дві основні задачі: по-перше, фокусує випромінювання на об'єкт спостереження, по-друге, формує зображення об'єкта в площині, де розташовані лінійчаті приймачі випромінювання.

В якості ТГц ПВ використано лінійчатий 40-елементний приймач терагерцового випромінювання (рис. 10), який складається з п'яти лінійчатих 8-елементних приймачів, виготовлених за інтегральною 0.35 мкм кремнієвою технологією.

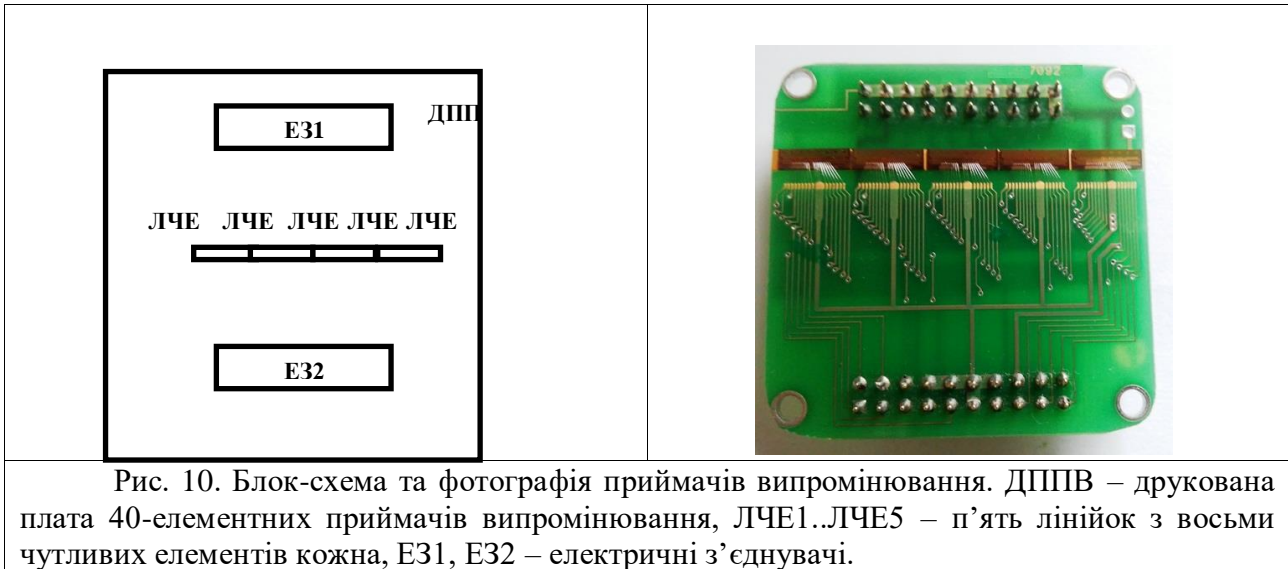


Рис. 10. Блок-схема та фотографія приймачів випромінювання. ДППВ – друкована плата 40-елементних приймачів випромінювання, ЛЧЕ1..ЛЧЕ5 – п'ять лінійок з восьми чутливих елементів кожна, Е31, Е32 – електричні з'єднувачі.

Тестування є невід'ємною складовою процесу створення нових ТГц СБ. Одним з головних завдань було впровадження методик тестування складових частин терагерцового сканера для оцінки якості та подальшого вдосконалення розроблених функціональних вузлів системи. Були впроваджені методики: визначення діаграми спрямованості рупорної антени; визначення просторового розподілу інтенсивності випромінювання в фокусі лінзи; визначення оптичного пропускання на частоті випромінювання 140 ГГц; визначення чутливості до терагерцового випромінювання багатоелементного лінійчатого приймача випромінювання.

Розробка дослідного зразка терагерцової системи бачення на базі багатоелементного приймача включала декілька етапів. На першому етапі був розроблений макет, де було відпрацьовано побудову зображення від одного джерела випромінювання на частоті 140 ГГц, з використанням асферичних осесиметричних та циліндричних лінз, на 32-елементній лінійці кремнієвих МДН транзисторів (рис.11). В процесі експерименту отримані зображення формату 32x200, швидкістю сканування 200 мм/с і часом сканування 1с. На другому етапі було розширено формат зображення до 160x240 за рахунок використання чотирьох джерел терагерцового випромінювання з частотою 140 ГГц, чотирьох комплектів розроблених асферичних лінз, чотирьох 40-елементних лінійок кремнієвих МДН транзисторів. В процесі експерименту побудовані зображення зі швидкістю сканування 200 мм/с і часом сканування 1с (рис. 12).

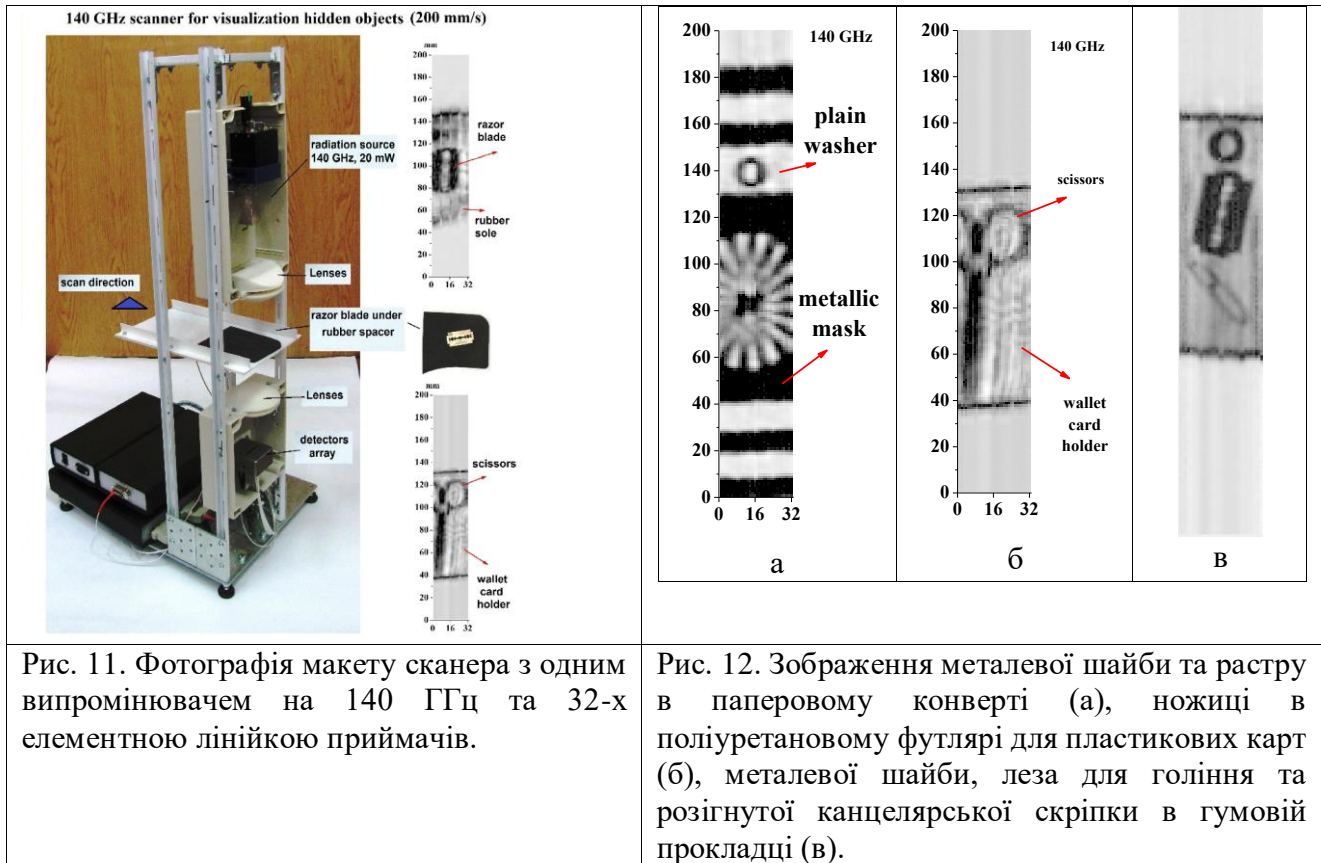


Рис. 11. Фотографія макету сканера з одним випромінювачем на 140 ГГц та 32-х елементною лінійкою приймачів.

Рис. 12. Зображення металевої шайби та растру в паперовому конверті (а), ножиці в поліуретановому футлярі для пластикових карт (б), металевої шайби, леза для гоління та розігнутої канцелярської скріпки в гумовій прокладці (в).

ВИСНОВКИ

1. Адаптовано математичну модель для ТГц системи бачення за аналогією з математичною моделлю для тепловізійних систем, що враховує особливості проходження сигналу в усіх функціональних блоках терагерцової системи «Випромінювач – об’єкт – оптична система – приймач – блок обробки сигналів – дисплей – оператор».
2. Впроваджено нову адитивну технологію пошарового наплавлення по цифровій 3D-моделі з точністю до 100 мкм для створення квазіоптики.
3. Освоєно процес виготовлення ТГц лінз із гіперболічним профілем із фторопласту за допомогою станка з програмним числовим керуванням для візуалізації скритих об’єктів ТГц СБ.
4. Проведено оцінку основних параметрів терагерцових приймачів: чуливості та потужності еквівалентної шуму, на прикладі розробленого ТГц приймача випромінювання на базі КМОП транзистора показано, що для 140 ГГц чуливість та потужність еквівалентна шуму таких приймачів складає $S=2,8 \times 10^5$ В/Вт, $NEP=4,3 \times 10^{-10}$ Вт (Гц) $^{-1/2}$.
5. Впроваджено методики тестування основних вузлів для ТГц СБ: діаграми спрямованості рупорної антени, просторового розподілу інтенсивності випромінювання в фокусі лінзи, оптичного пропускання на частоті випромінювання 140 ГГц, чуливості багатоелементного

- лінійчатого приймача випромінювання, чутливості (динамічного діапазону) приймачів терагерцової системи.
6. Розроблено макет терагерцової системи бачення на базі 40-елементного кремнієвого МДН транзистору, який використано для тестувань та як базову модель для подальших розробок терагерцових систем бачення для неруйнівного контролю і візуалізації вмісту листів та невеликих бандеролей. Отримані зображення різних предметів на частоті 140 ГГц, швидкості сканування 200 мм/с, часу сканування 1с.
 7. Отримані зображення об'єктів в терагерцовому діапазоні.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шевчик-Шекера А.В. Предельные и реальные значения NEP приемников излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн /Шевчик-Шекера А.В.// Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування». – 2011. – Вип. 41. – С.29 – 38.
2. Шевчик-Шекера А.В. Mm-wave narrow-gap uncooled hot-carrier detectors for active imaging/ F. Sizov, V. Zabudsky, A. Golenkov, А.В. Шевчик-Шекера / Optical Eng.// –2013.–№52(3).
3. Шевчик-Шекера А.В. Використання новітніх технологій для створення асферичних лінз ТГц/суб-ТГц діапазонів/ Шевчик-Шекера А.В., С. Е. Духнін. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування». – 2015.– Вип. 49.– С. 134-139.
4. Shevchik-Shekera A.V. Mercury–cadmium–telluride thin layers as subterahertz and infrared detectors/ F.F. Sizov Z.F., Tsybrii V.V., Zabudsky Golenkov, Shevchik-Shekera A.V., O.G. Petryakov, V.V. Dvoretsky, S.A. Michailov, N. Lysiuk I., Dieguez E.//Optical Engineering. –2015. –№54(12), 127102.
5. Шевчик-Шекера А.В. Design of optical components for terahertz/sub-terahertz imaging systems / S.E. Dukhnin, Шевчик-Шекера А.В. // Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2015– № 3. – Т. 18.–С. 341-343.
6. Shevchik-Shekera A. V. Two-color Arrays for Sub-Terahertz/Infrared Imaging / J. Gumenjuk-Sichevska, O. Golenkov, I. Lysjuk, E.Melezhhik, M. Sakhno, A. Shevchik-Shekera, Z. Tsybrii, V. Zabudsky, F. Sizov, S. Dvoretsky, N.Mikhailov. //IEEE 7th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL). – 2016. – P.225 – 227.
7. Shevchik-Shekera A.V. Detection of IR and sub/THz radiation using MCT thin layer structures: design of the chip, optical elements and antenna pattern F.F. / Sizov, Z.F. Tsybrii, V.V. Zabudsky, A.V. Shevchik-Shekera, M.V. Sakhno, S.Ye. Dukhnin, A.G. Golenkov, E. Dieguez, S.A. Dvoretsky. // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. –V. 19. – N 2. P. 149-1552016. –2016.
8. Шевчик-Шекера А.В. Одноэлементное приемное устройство для регистрации излучения суб-ТГц/ТГц диапазона на основе кремниевого

- полевого транзистора. / И. А. Лысюк, А. Г. Голенков, Шевчик-Шекера А.В., С. Е. Духнин, В. П. Рева, Ф. Ф. Сизов. // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. –Т. 14. – № 3. –2017.- С. 38-46.
9. Shevchik-Shekera A.V. Designing and manufacturing polysterene lenses for the terahertz region / Shevchik-Shekera A., V. Zabudsky, A. Golenkov, S. Dvoretzky, // Semiconductor physics quantum electronics & optoelectronics. – 2018. – Vol. 21.– № 1. – С. 83-88.
 10. Шевчик-Шекера А.В. Приемальный пристрій для реєстрації випромінювання терагерцового та субтерагерцового діапазонів спектра /Ф. Ф. Сизов., С. Е. Духнин, А.В. Шевчик-Шекера, А. Г. Голенков, В.В. Забудський. //Патент України № U100696 від 10.08.2015.
 11. Шевчик-Шекера А.В. Предельные и реальные значения NEP приемников излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов/ Шевчик-Шекера А.В, Сизов Ф.Ф// X Міжнародна науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і перспективи”. Збірник тез доповідей/ НТУУ “КПР”. Приладобудівний факультет. – м. Київ. –2010 року.
 12. Шевчик-Шекера А.В. Построение изображений в терагерцовом диапазоне частот/ А.В. Шевчик-Шекера, В.В.Забудський, О.Г.Голенков, В.А. Петряков.// X Міжнародна науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і перспективи”. Збірник тез доповідей/ НТУУ “КПР”. Приладобудівний факультет. – м. Київ. –2010 року.
 13. Shevchik-Shekera A.V. Development of optical system for imaging in the sub-terahertz range wavelength /A. Shevchik-Shekera, F. Sizov, A. Golenkov, V. Zabudski, S. Bunchuk. //13 International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science, Taras Shevchenko National University. Збірник тез доповідей . – Київ, Україна. –2012. –С. 140-141.
 14. Шевчик-Шекера А.В. Залежність оптичної ампер-ватної чутливості приймача терагерцового випромінювання від імпедансів антени та польового транзистору / О. Г.Голенков , І. О.Лисюк , Ф. Ф., Сизов А.В. Шевчик-Шекера // 6-та Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології» (СЕМСТ-6). Збірник тез доповідей. –Одеса, Україна. – 2014.
 15. Shevchik-Shekera A. V. THz/sub-THz direct detector challenges: rectification and thermal detectors for active imaging / F. Sizov, V. Reva, O. Golenkov, V. Petriakov, A. Shevchik-Shekera, S. Korinets, M. Sakhno, V. Lysiuk, V. Zabudski, S. Bunchuk, S. Dvoretzkii //MIKON 2014, 20th Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications. Збірник тез доповідей. – Гданськ, Польща . – 2014. – С. 767-770.
 16. Шевчик-Шекера А.В. Дифракційні оптичні елементи міліметрового та субміліметрового діапазону/ А.В. Шевчик-Шекера // Збірник тез доповідей 13-тої міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”. НТУУ “КПР”.– м. Київ, Україна.– 23-24 квітня 2014 року.
 17. Shevchik-Shekera A. V. Possibility of the detection in IR and sub/THz spectral

- region using MCT thin layer receivers: design of the chip, optical elements and antenna pattern / Sizov F., Tsybrii Z., Zabudsky V., Sakhno M., Shevchik-Shekera A., Smoliy M., Dvoretzky S. // 2015 IEEE 15th Mediterranean Microwave Symposium (MMS).– Lecce, Italy. –2015.
18. Шевчик-Шекера А.В. Використання новітніх технологій для створення асферичних лінз субтерагерцового діапазону/ А.В. Шевчик-Шекера. // Збірник тез доповідей 14-тої міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ “КПІ”. –м. Київ, Україна. – 22-23 квітня 2015 року.
19. Шевчик-Шекера А.В. Створення дифракційних елементів для терагерцових/субтерагерцових систем бачення /А.В. Шевчик-Шекера, Є.А. Сірий, І. О. Кучугура. // Збірник тез доповідей 7-мої Української наукової конференції фізики напівпровідників УНКФН-7. – Дніпро, Україна.– 26-30 вересня 2016.
20. Шевчик-Шекера А.В. Використання технології методом пошарового наплавлення для створення лінз ТГц/суб-ТГц діапазонів / Шевчик-Шекера. А.В. //Збірник тез доповідей конференції молодих вчених з фізики напівпровідників "Лашкарьовські читання – 2017". –Київ. – 2-4 квітня 2017. –с. 103.

АНОТАЦІЯ

Шевчик-Шекера А.В. Дослідження та розробка терагерцової системи бачення на базі багатоелементного приймача випромінювання – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки. – Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова Національної Академії наук України, Київ, 2019.

Робота присвячена дослідженню та розробці терагерцової системи бачення на базі багатоелементного приймача випромінювання, що може бути використана для неруйнівного контролю і візуалізації вмісту листів та невеликих бандеролей.

Проведено адаптацію математичної моделі для ТГц системи бачення за аналогією з математичною моделлю для тепловізійних систем, що враховує особливості проходження сигналу в усіх функціональних блоках терагерцової системи «Випромінювач – об’єкт – оптична система – приймач – блок обробки сигналів – дисплей – оператор».

Показано, що для активних терагерцових систем бачення є можливим виготовлення дифракційної асферичної квазіоптики з використанням технології пошарового наплавлення по цифровій 3D-моделі з точністю до 100 мкм.

Розглянуті основні етапи технологічного процесу виготовлення ТГц лінз із гіперболічним профілем з фторопласту за допомогою станка з програмним числовим управлінням, надані рекомендації щодо режимів роботи станка для підвищення чистоти поверхонь лінз.

Дано оцінку основних параметрів розробленого ТГц приймача випромінювання на базі КМОН транзистора. Показано, що для 140 ГГц чутливість та потужність еквівалентна шуму таких приймачів складає $S=2,8 \times 10^5$ В/Вт, $NEP=4,3 \times 10^{-10}$ Вт/(Гц)^{-1/2}.

Проведено проектування та експериментальне дослідження роботи головних функціональних вузлів ТГц системи бачення. Впроваджено методики тестування основних вузлів ТГц системи бачення.

Розроблено макет ТГц системи бачення на базі 40-елементного КМОН транзистора, який використано для тестувань, та як базову модель для подальших розробок ТГц систем бачення для неруйнівного контролю і візуалізації вмісту листів та невеликих бандеролей. Отримані зображення різних предметів на частоті 140 ГГц, швидкості сканування 200 мм/с, часу сканування 1с.

Ключові слова: ТГц, система бачення, квазіоптика, асферика, КМОН транзистор, 3-D модель.

АННОТАЦІЯ

Шевчик-Шекера А.В. Исследование и разработка терагерцовой системы видения на базе многоэлементного приемника излучения - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – технология, оборудование и производство электронной техники. – Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева Национальной Академии наук Украины, Киев, 2019.

Работа посвящена исследованию и разработке ТГц системы видения на базе многоэлементного приемника излучения, которая может быть использована для неразрушающего контроля и визуализации содержимого писем и небольших бандеролей.

Проведено адаптацию математической модели для ТГц системы видения по аналогии с математической моделью для тепловизионных систем, учитывающей особенности прохождения сигнала во всех функциональных блоках ТГц системы видения «Излучатель – объект – оптическая система – приемник излучения – блок обработки сигналов – дисплей – оператор».

Показано, что для активных ТГц систем видения возможно изготовление дифракционной асферической квазиоптики с использованием технологии послойного наплавления по цифровой 3D-модели с точностью до 100 мкм.

Рассмотрены основные этапы технологического процесса изготовления ТГц линз с гиперболическим профилем из фторопласта с помощью станка с программным числовым управлением, даны рекомендации режимов работы станка для повышения чистоты поверхностей линз.

Дана оценка основных параметров разработанного ТГц приемника излучения на базе КМОП транзистора. Показано, что для 140 ГГц

чувствительность и мощность эквивалентная шуму таких приемников составляет $S=2,8 \times 10^5$ В/Вт, $NEP=4,3 \times 10^{-10}$ Вт/(Гц)^{-1/2}.

Разработан макет ТГц системы видения на базе 40-элементного кремниевого КМОП транзистора, который использован для тестирования и как базовая модель для дальнейших разработок ТГц систем видения для неразрушающего контроля и визуализации содержимого писем и небольших бандеролей. Полученные изображения различных предметов на частоте 140 ГГц, скорости сканирования 200 мм / с, времени сканирования 1с.

Ключевые слова: ТГц, система видения, квазиоптика, асферика, КМОП транзистор, 3-D модель.

SUMMARY

Shevchik-Shekera A.V. Research and development of the terahertz vision system based on a multi-element radiation detector - Manuscript.

Thesis of Candidate of Technical Sciences degree in specialty 05.27.06 - technology, equipment and production of electronic equipment. - V.E. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 2019.

The work is devoted to the research and development of the THz vision system based on a multi-element radiation detector for non-destructive testing and visualization of the contents of letters and small boxes.

The math model of thermal imaging systems had been taken and adapted for the THz vision system. The signal in all functional blocks of the THz vision system "Emitter – object – optical system – radiation receiver – signal processing unit – display –operator was reviewed.

It is shown that for active THz vision systems, it is possible to manufacture diffraction aspheric quasi-optics using the technology of layer-by-layer fusion using a digital 3D model with an accuracy of 100 μm.

The main stages of the technological process of manufacturing aspherical THz lenses with the help of a machine with numerical control were investigated. Recommendations of the machine operation modes are given to improve the cleanliness of the lens surfaces.

The estimation of the main parameters of the developed by the THz radiation detector based on a CMOS transistor was given. It is shown that for 140 GHz the sensitivity and noise-equivalent power of such receivers is $S=2,8 \times 10^5$ V/W, $NEP=4,3 \times 10^{-10}$ W/(Hz)^{-1/2}.

A model of a THz vision system based on a 40-cell CMOS transistor as a detector has been developed. This model can be used for further development of THz vision systems for non-destructive testing and visualization of the contents of letters and small wrappers. Images of various subjects at a frequency of 140 GHz, scan rates of 200 mm / s, scan time of 1 s were obtained.

Keywords: THz, vision system, quasi-optics, aspheric, CMOS transistor, 3-D model.