

УДК 681.7

**ВИКОРИСТАННЯ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ СТВОРЕННЯ АСФЕРИЧНИХ ЛІНЗ ТГЦ/СУБ-ТГЦ ДІАПАЗОНІВ***Шевчик-Шекера А.В., Духнін С.Е**Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, м. Київ, Україна**E-mail: [annashsh82@gmail.com](mailto:annashsh82@gmail.com)*

*В багатьох областях науки і техніки існує потреба в формуванні зображень терагерцового/субтерагерцового (ТГц/суб-ТГц) діапазонів спектру. Такі системи активно використовуються в навігації, біології, медицині, безпеки, а також для виявлення наркотичних та вибухових речовин. Одними з важливих компонентів ТГц/суб-ТГц техніки є оптичні елементи. На сьогодні запропоновано багато системи з використанням позаосьових дзеркал та лінз. Основною задачею залишається вибір матеріалу та технології виготовлення, з урахуванням оптимального співвідношення ціна-якість.*

*Робота присвячена розрахункам, виготовленню та тестуванню асферичних лінз для ТГц/суб-ТГц діапазонів спектру зі застосуванням новітніх технологій їх виготовлення.*

*Проведені дослідження якості розрахованих та виготовлених асферичних лінз із АВС пластику, за допомогою 3D друку, показали чітке відтворення форми сигналу та відповідність розмірів розрахункам функції розсіяння точки; зниження ціни виробу в декілька разів. Суттєвим недоліком таких лінз є зменшення сигналу випромінювання, що є головним при використанні приймачів з невеликою чутливістю. Для таких випадків запропоновано використання додаткових заходів по підвищенню коефіцієнта пропускання лінз.*

*Отримані результати показали можливість використання менш затратної 3-D технології друку для створення оптики ТГц/суб-ТГц діапазонів.*

**Ключові слова:** ТГц/суб-ТГц, асферичні лінзи, 3D друк.

**Введення. Постановка проблеми**

Питання реєстрації та візуалізації об'єктів в ТГц/суб-ТГц діапазонах спектру є актуальним для багатьох дослідників. ТГц/суб-ТГц випромінювання (3 – 0,03 мм / 1 – 0,1 мм) проникає крізь більшість діелектриків (дерево, пластмаса та ін.) та поглинається провідниками (метал, вода та ін.), окрім того, є неіонізуючим, тобто нешкідливим для живих організмів. Наявність таких властивостей дозволяє використовувати суб-ТГц випромінювання для томографії, - дослідження поверхневих ділянок шкіри, судин, м'язів; в системах безпеки, - сканування багажу, людей; контроль якості обладнання, продукції; збір інформації від астрофізичних об'єктів та багато іншого [1].

Оскільки в зазначених вище задачах, в першу чергу, йдеться про системи візуалізації об'єктів, то якість отримання зображення постає одним з ключових параметрів. Оптимальним є конструкція з використанням рефракційної оптики (об'єктива), що передає випромінювання від об'єкту спостереження в площину зображення. На сьогодні запропоновано багато оптичних системи з використанням позаосьових дзеркал та лінз, виготовлених класичним методом із використанням прецизійних токарних, полірувальних верстатів. Недоліком таких систем є достатньо висока ціна виробу [2,3,4]. Постійний пошук оптимального співвідношення ціна-якість вимагає дослідження нових матеріалів та технологій виготовлення оптичних елементів.

**Мета роботи:** розрахувати, виготовити та дослідити можливість створення дифракційно обмежених асферичних лінз для ТГц/суб-ТГц діапазонів спектру, використовуючи різні полімерні матеріали та технології виготовлення. Показати можливість використання менш затратної 3-D технології друку для виготовлення оптики ТГц/суб-ТГц діапазонів.

### Опис системи

Більшість існуючих суб-ТГц систем побудовано на активному баченні (із підсвіткою), оскільки значна частина випромінювання надходить від Сонця, яке значною мірою поглинається водяними парами атмосфери (рис. 1).

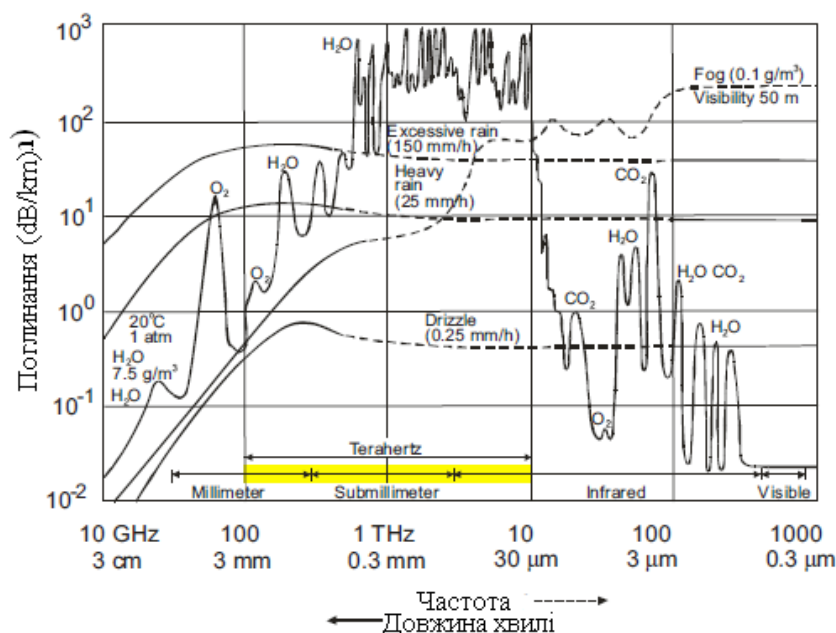


Рис. 1. Пропускання атмосфери Землі від видимого до радіодіапазону [5].

Основними частинами таких приладів є джерело випромінювання, оптика (фокусуюча система), приймач, та блок обробки сигналу. Оптична система допомагає зібрати необхідне випромінювання на приймачі, таким чином збільшуючи сигнал, та при наявності задачі побудови зображення, створити якісну картинку.

В процесі розробки оптичної системи для візуалізації ТГц/суб-ТГц випромінювання був вибран варіант із використанням асферичних лінз.

Асферична лінза має на всіх ділянках однакову оптичну силу, що дозволяє зфокусувати випромінювання в єдиний пучок та позбутися аберацій. На рис. 2. представлено розраховану оптичну схему з чотирьох асферичних лінз, дві з яких фокусують випромінювання від приймача на об'єкт спостереження, а інші дві на приймач ТГц/суб-ТГц випромінювання. В процесі розрахунку отримано дифракційно обмежену оптичну систему із чотирьох однакових плоско-випуклих лінз, асферичною поверхнею яких є гіперболоїд.

Відносний отвір лінз

$$\frac{D}{f} = \frac{60\text{мм}}{70\text{мм}}$$

Радіус кружка Ейрі

$$r = 1.22 \cdot \lambda \cdot \frac{D}{f} = 1.22 \cdot 2\text{мм} \cdot \frac{60\text{мм}}{70\text{мм}} = 2,1\text{мм},$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі.

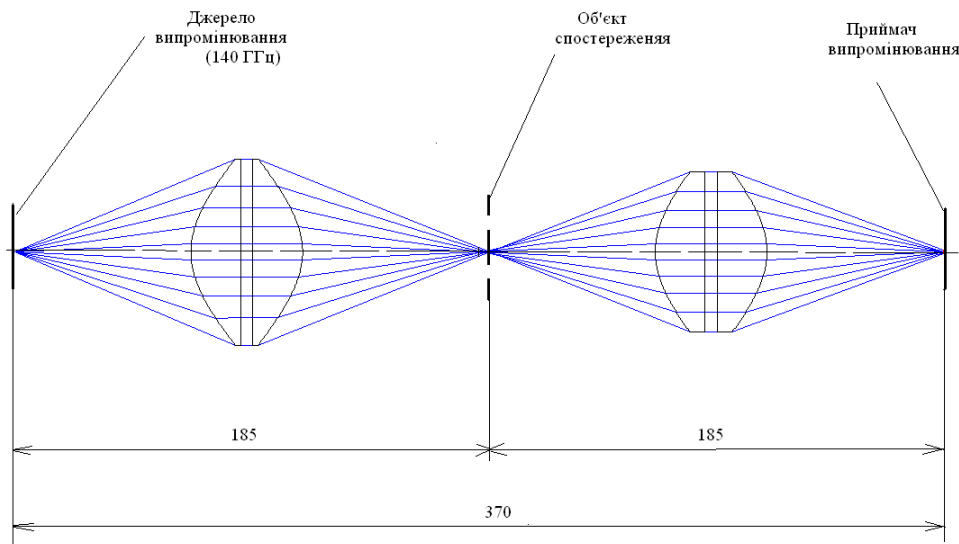


Рис. 2. Оптична схема для реєстрації ТГц випромінювання.

Класична технологія виготовлення оптичних елементів включає багатоетапність із використанням технологічного обладнання та матеріалів: прецизійні токарні верстати для попередньої обробки (торцювання, попереднє округлення) заготовок; сферотокарні верстати для обробки внутрішньої і зовнішньої поверхонь лінз; полірувальні верстати для зняття шорсткості і поліпшення чистоти сферичних поверхонь лінз; спеціальні верстати для полірування краю лінзи і виготовлення технологічної оснастки, поліруючі суспензії; наклеєні матеріали, які використовуються для закріплення і центрування заготовок лінз в процесі їх точіння; полірувальну тканину, та ін.

Для ТГц/суб-ТГц діапазону спектра розглянута можливість використання нової технології виготовлення оптичних елементів за допомогою 3D друку. 3D друк включає технологію пошарового створення фізичного об'єкта по цифровій 3D-моделі (швидке прототипування (Rapid Prototyping)). Широке розповсюдження 3D друку пов'язано з високою точністю відтворення деталей (від 100 мкм – 20 мкм) в поєднанні з високою якістю та доступною ціною.

Для порівняння вибрано два шляхи виробництва розрахованих лінз: на токарному станку з використанням заздалегідь прорахованого та виточеного різця (рис.3) та з використанням 3D принтера [Makerbot Replicator 2X](#) (рис. 4).

Матеріалом для виготовлення ТГц оптики вибрано клас полімерів, що мають відмінну прозорість для ТГц/суб-ТГц хвиль при відносно невеликому відбитті.



Рис. 3. Фотографія лінзи із фторопласту.



Рис. 4. Фотографія лінзи із АВС.

Найкращими матеріалами в цьому сенсі є поліметілпентен (TPX), поліетилен (PE) і політетрафлюоретілен (PTFE, фторопласт або тефлон). На рис. 5. представлено пропускання плівки PTFE, товщиною 0,1 мм. Пластмаси, найбільш поширені для 3D принтерів – арилонітрилбутадієнстирол (ABS), полілактід (PLA), та інші, мають високий коефіцієнт пропускання випромінювання в області частот від 0,01 ТГц до 0,6 ТГц (рис. 6).

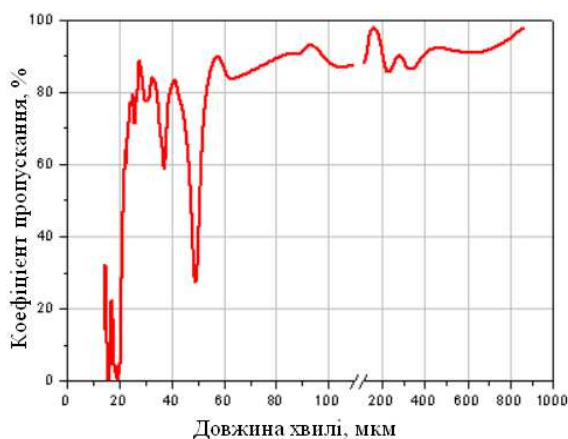


Рис. 5. Залежність коефіцієнта пропускання плівки PTFE 0,1 мм від довжини хвилі. ТГц діапазон.

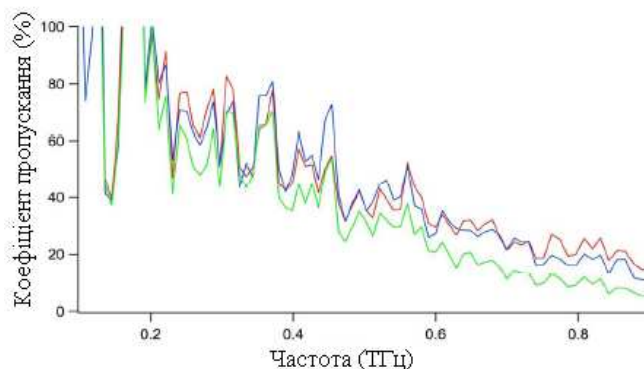


Рис. 6. Залежність коефіцієнта пропускання від частоти для VisyJet Crystal (синій), акриловий полімер (зелений) і ABS пластик (червоний) [4].

Важливим фактором є те, що всі пластмаси показують подібні характеристики і не має вагомого значення використання певних типів пластиків для принтерів різних комерційних категорій. Це доводить те, що оптичні властивості пластмас не залежить від їх механічних властивостей, принаймні, в цьому діапазоні.

### Результати

На стенді (рис. 7) були апробовані виготовлені лінзи. Від суб-ТГц джерела з робочою частотою 140 ГГц (довжина хвилі 2.14 мм) випромінювання проходить крізь модулятор, фокусується лінзами на приймачі – КРТ болометрі на гарячих електронах (НЕВ), підсилюється та реєструється.

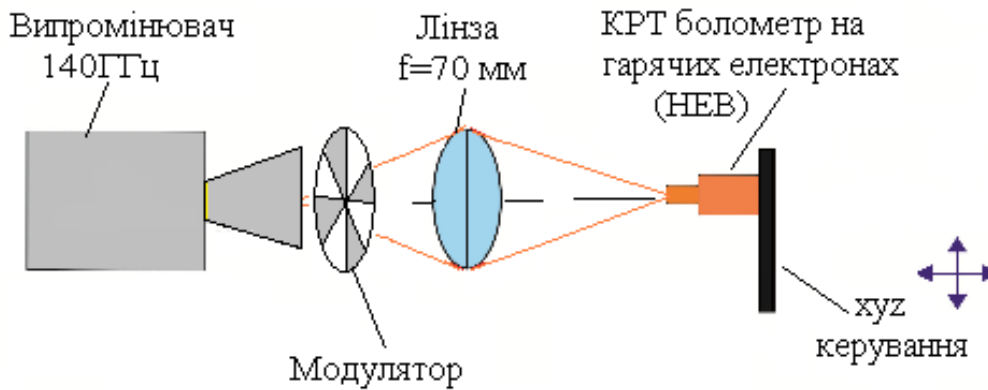


Рис.7. Стенд для контролю якості виготовлених лінз.

Отримані розподіли випромінювання від ТГц/суб-ТГц випромінювача в площині приймача (координати  $x, y$ ) з використанням, виготовлених за різними технологіями та матеріалами, лінз, представлені на рис. 8 та рис. 9. Розмір і форма отриманих розподілів асферичних лінз відповідає проведеним розрахункам. Сигнал від лінзи, виготовленої із АВС за допомогою 3D принтера менший майже на 60%, і складає 22 мкВ. Зменшення сигналу пов'язано із чистотою поверхні АВС лінзи і потребує подальшої обробки поверхні. З урахуванням затрат, пов'язаних із ціною закупки матеріалу для лінз та процесом їх виготовлення, більш привабливою за ціною (в декілька разів) є використання 3D друку та АВС або PLA пластика. Використання 3D принтерів є цікавим і перспективним, якщо підвищити точність виготовлення лінзи до 20-50 мкм, або провести додаткову обробку поверхні лінзи парами ацетону або іншими полірувальними методами.



Рис. 8. Розподіл потужності в фокальній плямі на приймачі по осі  $x$ .

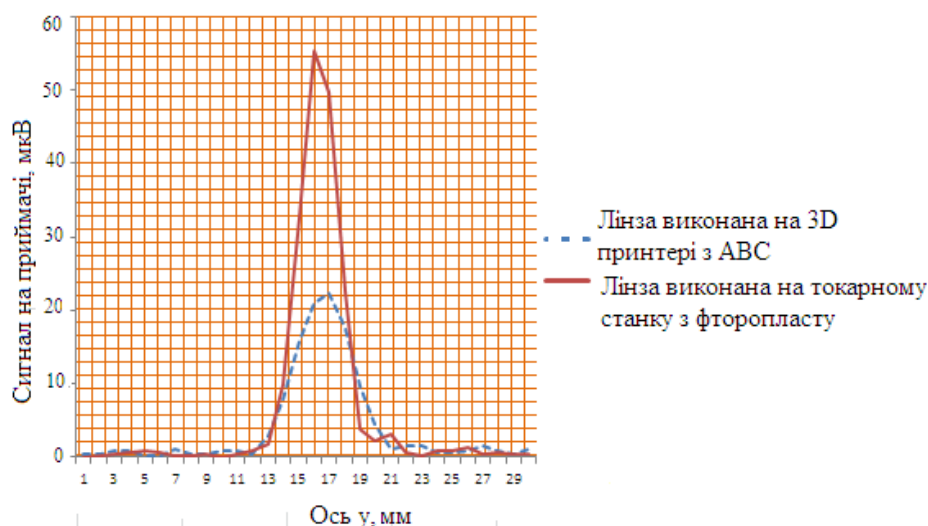


Рис. 9. Розподіл потужності в фокальній плямі на приймачі по осі у.

### Висновки

Пошук нових технологій та матеріалів для створення оптики ТГц/суб-ТГц діапазонів, показав перспективність використання 3D друку. Проведені дослідження з використання АВС пластику показали чітке відтворення форми сигналу та відповідність розмірів розрахункам функції розсіювання точки; зниження ціни виробу в декілька разів. Суттєвим недоліком є зменшення сигналу випромінювання, що є головним при використанні приймачів з невеликою чутливістю. Для таких випадків запропоновано використання додаткових заходів по підвищенню чистоти поверхні, шляхом використання 3D принтерів із шаровим наповненням пластиком 20-50 мкм, або додатковим поліруванням поверхні. Отримані лінзи, при умові збільшення їх коефіцієнта пропускання, можуть бути використані в задачах побудови зображень ТГц/суб-ТГц діапазонів.

### Література

1. Kai-Erik Peiponen, J. Axel Zeitler, Makoto Kuwata-Gonokami (Editors). Terahertz Spectroscopy and Imaging // Springer.– 2013.
2. Yat Hei Lo, Rainer Leonhardt, Víctor Torres, Victor Pacheco-Pena, Pablo Rodriguez-Ulibarri, Miguel Navarro-Cia, Miguel Beruete, Mario Sorolla, Nader Enghet. Aspheric lenses for terahertz imaging// Optics Express.– 2008.– Vol. 16.– No. 20.
3. [Florian Formanek](#), [Marc-Aurele Brun](#), [Tomoyuki Umetsu](#), [Shinji Omori](#) and [Akio Yasuda](#). Aspheric silicon lenses for terahertz photoconductive antennas // Appl. Phys. Lett.– 2009.– 94.– 021113.
4. A. D. Squires, E. Constable, and R. A. Lewis. 3D Printing of aspherical terahertz lenses and diffraction gratings// Infrared, Millimeter and Terahertz wave. – 2014. – P.1-2.
5. F. Sizov, A. Rogalski. THz detectors// Prog. Quantum Electron. –2010. – Vol. 34.–P. 278–347.

Надійшла до редакції  
18 березня 2015 року

© Шевчик-Шекера А.В., Духнін С.Е., 2015