

АНТЕНИ, ХВИЛЕВОДИ І КВАЗІОПТИЧНА ТЕХНІКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra25.03.240>

УДК 535.14, 537.862

М. І. ДЗЮБЕНКО, С. О. МАСАЛОВ, Ю. Ю. КАМЕНЄВ,
І. В. КОЛЄНОВ, В. П. ПЕЛИПЕНКО,
В. П. РАДІОНОВ, М. Ф. ДАХОВ

Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України,
вул. Акад. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна
E-mail: mid41@ukr.net

ПРОХОДЖЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ КРІЗЬ ОДНОВИМІРНІ ДРОТЯНІ РЕШІТКИ ПРИ РІЗНИХ КУТАХ ПАДІННЯ

Предмет і мета роботи: У квазіоптичній техніці при побудові функціональних пристроїв різного призначення широкого поширення набули одновимірні дротяні дифракційні решітки, закріплені на кільцевих рамках. У міліметровому діапазоні такі елементи детально розглянуті теоретично, досліджені експериментально і реалізовані в різноманітних конструкціях приладів і систем. Водночас ціла низка конструктивних і технологічних особливостей, які пов'язані з побудовою поляризаційних пристроїв, не завжди може бути врахована в теоретичних моделях і вимагає додаткових експериментів. Ця проблема є особливо актуальною в терагерцовому діапазоні, де має місце дефіцит експериментальних даних. Метою роботи є експериментальне дослідження властивостей одновимірних дротяних решіток в терагерцовому діапазоні при різних кутах падіння електромагнітної хвилі і точності їх юстування, а також розробка практичних рекомендацій щодо методики вимірювань і побудови поляризаційних пристроїв.

Методи і методологія: Розроблено і виготовлено вимірювальну установку, у якій в якості джерела випромінювання використано газорозрядний HCN-лазер (на довжині хвилі 337 мкм). Виконано дослідження дротяних решіток двох типів: решітка № 1 (діаметр провідників 70 мкм, період 400 мкм) та решітка № 2 (діаметр провідників 50 мкм, період 200 мкм). Решітки встановлювалися на поворотному стенді з можливістю їх повороту за допомогою крокового двигуна в діапазоні кутів $\pm 90^\circ$. Виміри виконувалися в автоматичному режимі з кроком 0.35° . Досліджувався коефіцієнт проходження випромінювання лазера крізь решітку в залежності від кута падіння і точності юстування. Результати: Аналіз отриманих даних показує, що експериментальні результати корелюють з теоретичними даними і найповніше характеризують властивості решіток з урахуванням їх конструктивних і технологічних особливостей, які у теоретичних розрахунках врахувати надзвичайно складно. Резонансні максимуми на залежностях потужності випромінювання, що пройшло крізь решітку, від кута його падіння відповідають розрахункам, що дозволяє розробити низку вимірювальних методик. Надано рекомендації щодо підвищення точності вимірювань і практичного використання отриманих результатів.

Висновок: Отримані експериментальні результати дозволяють врахувати додаткові характеристики і фізичні особливості дифракційних решіток, а також уточнити методичні аспекти вимірювань і розробки функціональних елементів в терагерцовому діапазоні.

Ключові слова: дротяна решітка, терагерцовий діапазон, лазер, коефіцієнт проходження

1. Вступ

У терагерцовому діапазоні частот широко застосовуються різні квазіоптичні поляризаційні пристрої та прилади. Одним з їх важливих елементів є одновимірна дротяна решітка, що має унікальні поляризаційні властивості [1, 2]. У деяких приладах решітка розташована під кутом до напрямку поширення електромагнітної хвилі. Причому у низці випадків кут

падіння хвилі може змінюватися в процесі роботи. Розрахунку параметрів металевих решіток присвячено низку фундаментальних робіт [3–7]. З цих робіт випливає, що при певних параметрах решітки, особливо коли їх період порівняний з довжиною хвилі, залежності коефіцієнтів відбиття і проходження від періоду і кута падіння електромагнітного випромінювання можуть мати виражений нелінійний ха-

ракти. У деяких резонансних зонах невелика зміна кута падіння призводить до істотної зміни коефіцієнтів проходження і відбиття. Цей фактор необхідно враховувати при проектуванні та розробці поляризаційних терагерцових приладів. Причому конструктивні особливості решіток і технологія їх виготовлення не завжди можуть бути враховані в теоретичних розрахунках, а реальні решітки за своїми параметрами можуть істотно відрізнятись від теоретичних моделей. Зокрема, у дротяних решітках, закріплених на кільцевій рамці, може послабитися натяг провідників, що призводить до їх провисання. Таке провисання не є однаковим по всій площині решітки і істотно залежить від довжини провідників: у центральній частині, де провідники найдовші, провисання досягає максимальних значень. Причому дуги викривлення провідників можуть мати різну просторову орієнтацію. У деяких випадках сусідні провідники можуть навіть дотикатися один до одного. Такі відхилення складно вимірювати і надзвичайно складно враховувати у теоретичних розрахунках. Тому доцільно порівнювати розрахункові дані з експериментальними у визначенні характеристик решіток. Це, зокрема, уможливило визначення допустимих відхилень параметрів, в межах яких можна використовувати теоретичні розрахунки у розробці та експлуатації реальних пристроїв [8–13], а також виявлення поправок, які слід вносити в теоретичні моделі решіток.

В роботі [9] експериментальні дослідження властивостей дротяних решіток з періодом, близьким до довжини хвилі, виконувалися на частотах 5 і 17 ГГц. В [14] подібні експерименти реалізовувалися на частоті 32 ГГц. Було виявлено зростання коефіцієнта проходження H -поляризованих хвиль для певних кутів падіння, що є проявом ефекту Малюжинця [15, 16].

Подібні експериментальні дослідження доцільно виконувати і на більш високих частотах, на яких застосовуються лазерні джерела випромінювання та використовуються квазіоптичні пристрої, що мають у своєму складі дротяні решітки.

Метою роботи є експериментальне дослідження властивостей одновимірних дротяних решіток у терагерцовому діапазоні для певних кутів падіння електромагнітної хвилі і точності їх юстування, а також розробка методики вимірювань і практичних рекомендацій щодо побудови поляризаційних пристроїв терагерцового діапазону.

2. Експериментальна установка

Для виконання досліджень була створена експериментальна установка з плавним регулюванням кута падіння електромагнітного випромінювання на досліджувану решітку. Блок-схема установки наведена на рис. 1. У якості джерела лінійно поляризованого випромінювання терагерцового діапазону був використаний газорозрядний HCN-лазер 1, що працює в одномодовому режимі (довжина хвилі – $\lambda = 337$ мкм, довжина резонатора – 1.2 м, потужність випромінювання – 6 мВт в безперервному режимі). В експериментах вимірювання виконувалися для випадку E -поляризації, тобто провідники решітки були орієнтовані паралельно вектору напруженості електричного поля. Налаштування на лінію випромінювання здійснювалося за допомогою механізму переміщення рухомого дзеркала, яким комплектуються подібні лазери [17]. Випромінювання реєструвалося піроелектричним приймачем 2. У даних експериментах не потрібне знання точного значення потужності випромінювання. Необхідно контролювати лише відносну її зміну. Піроелектричний приймач має достатні для цього швидкодію, стабільність і надійність, та дозволяє контролювати відносну зміну потужності випромінювання з похибкою порядку одного відсотка. Приймач 2 встановлений в порожнистому діелектричному хвилеводі 3 співвісно лазерному променю. Для виконання досліджень розроблено спеціальний поворотний стенд, розміщений у просторі між лазером і хвилеводом. До складу стенду входить поворотна платформа 4, на якій встановлена досліджувана решітка 5. За допомогою крокового двигуна механізм платформи допускає її поворот в площині, перпендикулярній до провідників решітки, в діапазоні кутів $\pm 90^\circ$ з кроком 0.35° . Вимірювання виконувалися покроково в автоматичному режимі.

Досліджувалися дві дротяні решітки (див. рис. 2), виготовлені з вольфрамового дроту, закріпленого на кільцевій металевій рамці з зовнішнім діаметром

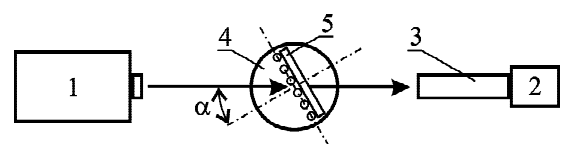


Рис. 1. Схема вимірювальної установки (вид зверху): 1 – HCN-лазер, 2 – піроелектричний приймач, 3 – діелектричний хвилевод, 4 – поворотна платформа, 5 – досліджувана решітка

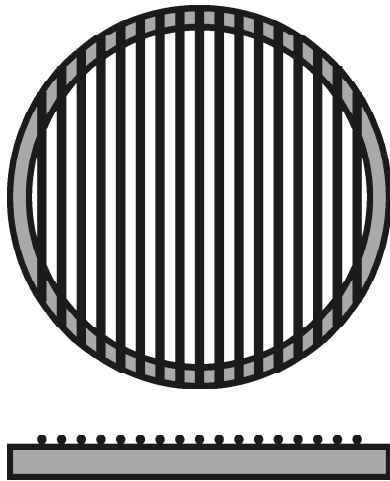


Рис. 2. Дротяна решітка на кільцевій рамці

ром 100 мм: решітка № 1 (діаметр провідників $d = 70$ мкм, період $l = 400$ мкм) і решітка № 2 ($d = 50$ мкм, $l = 200$ мкм).

3. Методика і результати вимірювань

У відповідності зі схемою установки (рис. 1) всі дослідження виконувалися для випадку E -поляризації, коли вектор напруженості електричного поля орієнтований паралельно провідникам решітки. При кожному повороті платформи 4 фіксувався кут падіння електромагнітного випромінювання α і автоматично здійснювався контроль потужності випромінювання, що пройшло крізь досліджувану решітку 5.

Результати вимірювань наведені на рис. 3, де показано залежності потужності випромінювання, що пройшло крізь решітку № 1 (рис. 3, а) та решітку № 2 (рис. 3, б), від кута падіння α .

Слід зазначити, що діаметр кільцевої рамки досліджуваних решіток приблизно в чотири рази перевищує діаметр хвилеводу, за яким лазерне випромінювання подається на прилади реєстрації. Тому рамка досліджуваної решітки не впливає на результати вимірювань принаймні при кутах падіння $-60^\circ < \alpha < 60^\circ$. Як можна бачити (рис. 3, а, б), залежність потужності випромінювання, що пройшло крізь решітку, від кута падіння α має нелінійний характер. При $\alpha = 0^\circ$ для обох випадків має місце провал потужності випромінювання. Водночас при кутах $\alpha = \pm 9^\circ$ і $\alpha = \pm 43^\circ$ для решітки № 1, а також при $\alpha = \pm 43^\circ$ для решітки № 2 спостерігається аномальне зростання потужності випромінювання. Ці піки потужності мають яскраво виражені гострі

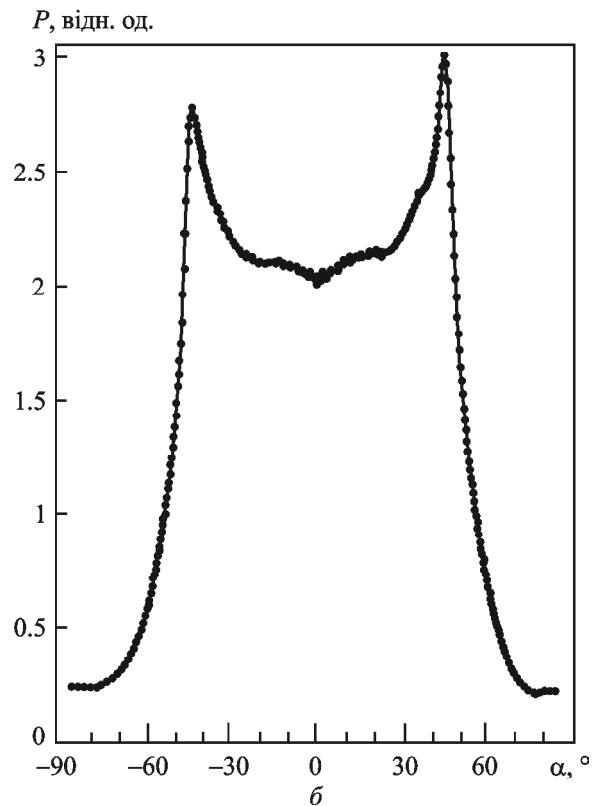
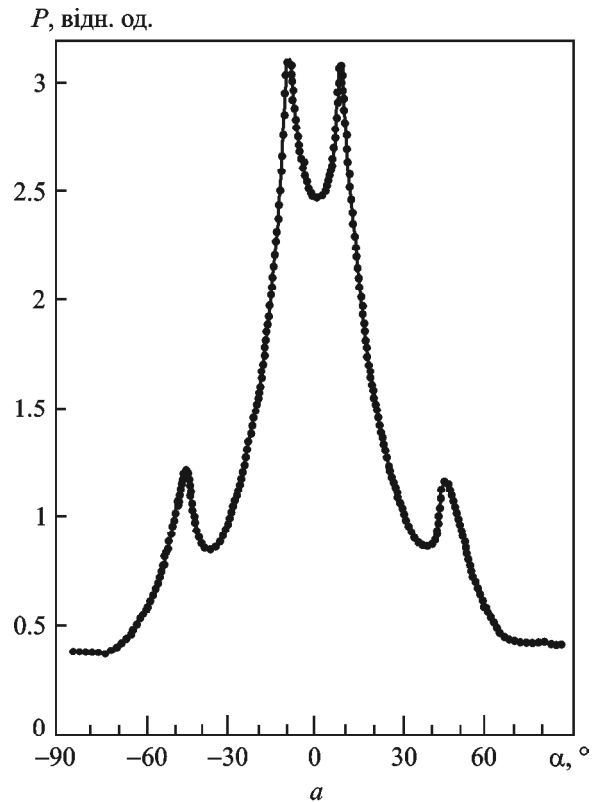


Рис. 3. Залежності потужності випромінювання, що пройшло крізь решітку № 1 (а) та решітку № 2 (б), від кута падіння електромагнітного випромінювання α

вершини і розташовані симетрично відносно прямої $\alpha = 0^\circ$ на графіку (випадок нормального падіння). Ця обставина може бути використана на практиці для прецизійного юстування дифракційних решіток.

Якщо юстування решітки виконано не досить ретельно, тобто вектор напруженості електричного поля падаючої хвилі не є паралельним до провідників решітки, то характер досліджуваних залежностей дещо змінюється. На рис. 4 наведено залежності потужності випромінювання, що пройшло крізь решітку № 1, від кута падіння α при різних кутах нахилу φ провідників решітки відносно напрямку вектора напруженості електричного поля падаючої хвилі. Кут φ змінювався дискретно поворотом решітки в спеціальній оправці: $\varphi = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$.

З наведених залежностей видно, що зі збільшенням кута φ аномальні максимуми потужності випромінювання, що пройшло крізь решітку, зміщуються у бік більших значень кута падіння $\pm\alpha$. На кривих 4, 5, що відповідають $\varphi = 30^\circ$ та

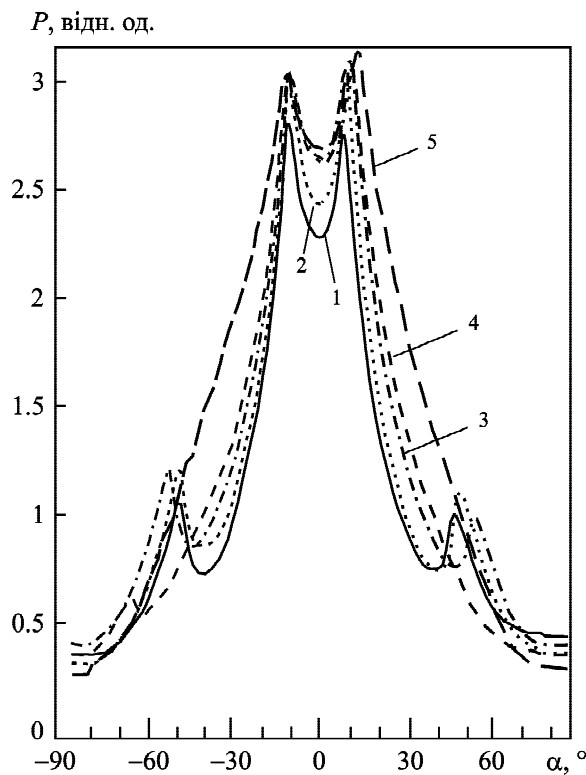


Рис. 4. Залежності потужності випромінювання, що пройшло крізь решітку № 1, від кута падіння α за різних значень кута нахилу φ : крива 1 – $\varphi = 0^\circ$, крива 2 – $\varphi = 10^\circ$, крива 3 – $\varphi = 20^\circ$, крива 4 – $\varphi = 30^\circ$, крива 5 – $\varphi = 40^\circ$

$\varphi = 40^\circ$, відсутні максимуми потужності в області кутів $\alpha = \pm 45^\circ$.

При виконанні вимірювань іноді спостерігаються резонансні явища, які, мабуть, є викликані взаємодією випромінювання з досліджуваними решітками та решіткою, яка служить вихідним дзеркалом лазера. При цьому з'являються деякі викривлення досліджуваних залежностей у вигляді окремих незначних "сплесків" або "провалів". Усунути такі резонансні явища вдається трьома шляхами: зміщенням решітки разом з механізмом повороту уздовж лазерного пучка, нахилом площини решітки щодо вертикалі або введенням додаткових втрат на ділянці між лазером і досліджуваними решітками.

4. Зіставлення результатів вимірювань з теоретичними розрахунками

Внаслідок дифракції плоскої електромагнітної хвилі на дифракційній решітці поля пройдені і відбиті хвилі можна представити у вигляді розкладання Релея, тобто у вигляді ряду дифракційних гармонік [7]. За певних умов у спектрах цих полів може відбуватися резонансне збільшення потужності – аномалія Вуда – в так званих "точках ковзання". Аналіз роботи [7] показує, що на залежності потужності E -поляризованої хвилі, що пройшла крізь решітку № 1 ($\kappa = l/\lambda = 1.19$), від кута падіння α мають спостерігатися два "сплески". Визначити кути падіння α (в градусах), яким відповідає збільшення коефіцієнта проходження, можна за формулою [7]:

$$\alpha = \arcsin(|\kappa - |n||/\kappa),$$

де n – номер гармоніки ($\pm 1, \pm 2, \dots$).

Аналіз роботи [7], а також представлених експериментальних результатів (рис. 3) показує, що на залежності потужності E -поляризованої хвилі, що пройшла крізь решітку № 1 ($\kappa = l/\lambda = 1.19$), від кута падіння α повинен спостерігатися "сплеск" потужності випромінювання при куті падіння $\alpha = 9^\circ$. Це відповідає "+1"-й гармоніці. Другий "сплеск" для цієї решітки спостерігається при $\alpha = 43^\circ$, що відповідає "-2"-й гармоніці. Для решітки № 2 ($\kappa = l/\lambda = 0.59$) має місце збільшення потужності при куті падіння $\alpha = 44^\circ$, що відповідає "-1"-й гармоніці.

Як видно з рис. 3, експериментально виміряні аномалії Вуда для різних решіток практично збі-

гаються з розрахунковими. Це вказує на те, що при визначенні резонансних точок взаємодії терагерцового випромінювання з дротяними решітками можна використовувати теоретичні дані. Водночас для визначення потужності випромінювання в точках ковзання доцільно використовувати тільки експериментальні результати, що пов'язано з тим, що на цей показник впливає більша кількість факторів і частина з них залежить від конструктивних особливостей реальних решіток.

Зміни, що відбуваються в характері досліджуваних залежностей зі зміною кута нахилу провідників решітки відносно напрямку вектора напруженості електричного поля (рис. 4), можна пояснити спільним впливом двох факторів. По-перше, з'являється складова електричного поля, перпендикулярна провідникам (H -поляризація). По-друге, проекція періоду решітки на фронт падаючої плоскої хвилі у цьому разі залежить не тільки від кута падіння α , а й від кута φ . Перший фактор впливає на рівень випромінювання, що пройшло, – поява H -компоненти електричного поля збільшує його рівень. Другий фактор впливає на розташування резонансних максимумів потужності на досліджуваних залежностях щодо їх положення у випадку E -поляризації ($\varphi = 0^\circ$) – зі збільшенням кута φ резонансні максимуми потужності “віддаляються” від положення нормального падіння $\alpha = 0^\circ$.

5. Рекомендації щодо прикладного використання отриманих результатів

Аналіз отриманих експериментальних результатів і зіставлення їх з теоретичними розрахунками дозволили розробити низку практичних рекомендацій і вимірювальних методик. Дослідження продемонстрували, що в точках резонансу рівень потужності випромінювання, що пройшло крізь решітки, має яскраво виражені максимуми. Ці максимуми можуть служити ключовими точками для виконання різних вимірів і регулювань. При цьому слід враховувати, що результати теоретичних розрахунків цих точок практично цілком збігаються з експериментальними даними. Отже, деякі компоненти, що входять до розрахункових формул, можуть бути визначені на підставі експериментальних даних. Наприклад, можна визначити довжину хвилі, знаючи період решітки, або визначити період, знаючи довжину хвилі. Те, що аномальні піки потужності

випромінювання, що пройшло, мають високу крутизну фронтів, дає підставу вважати, що точність таких вимірювань буде не гіршою ніж при використанні резонансних хвилемірів [18].

Корисним в прикладному використанні отриманих результатів може стати і той факт, що на досліджених залежностях резонансні максимуми розташовуються строго симетрично відносно положення нормального падіння плоскої хвилі на решітку. Ці максимуми є більш “гострими”, ніж центральний мінімум, що відповідає $\alpha = 0^\circ$. Отже, за розташуванням симетричних резонансних максимумів можна точно встановити положення нормального падіння, що може бути використано для юстування решіток. Принаймні це справедливо для розглянутих умов, коли період решіток можна порівняти з довжиною хвилі.

При виконанні різних маніпуляцій, пов'язаних з решіткою, слід враховувати і кут нахилу провідників щодо вектора напруженості електричного поля φ . Найраціональніше розташування решітки є тоді, коли цей кут дорівнює нулю. При такому положенні розрахунок резонансних максимумів є найпростішим. На досліджуваних залежностях вони знаходяться на мінімальній відстані від положення нормального падіння. Цей фактор також можна використовувати при юстуванні поляризаційних пристроїв.

6. Висновки

В роботі експериментально визначено залежності коефіцієнта проходження одновимірних дротяних решіток двох типів (решітка № 1 з діаметром провідників $d = 70$ мкм та періодом $l = 400$ мкм і решітка № 2 з діаметром провідників $d = 50$ мкм та періодом $l = 200$ мкм) від кутів падіння на них лазерного випромінювання ($\lambda = 337$ мкм). Виявлено нелінійне збільшення прохідного сигналу при кутах падіння, відмінних від нормального, що можна пояснити проявом аномалій Вуда. Виконано аналіз і порівняння результатів експериментів з теоретичними розрахунками. Спостерігається задовільний збіг експериментальних і теоретичних результатів, особливо у визначенні ключових точок резонансу. Водночас отримані експериментальні дані найповніше характеризують особливості реальних решіток з урахуванням їх конструктивних і технологічних особливостей, які у теоретичних дослідженнях врахувати надзвичайно

складно. Це дозволяє уточнити методичні аспекти вимірювань і розробки квазіоптичних функціональних елементів, які широко використовуються в приладах і системах терагерцового діапазону.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Квазиоптика*. Под ред. Б.З. Каценеленбаума, В.В. Шевченко. Москва: Мир, 1966. 504 с.
2. Киселев В. К., Костенко А. А., Хлопов Г. И., Яновский М. С. *Квазиоптические антенно-фидерные системы: Монография*. Под ред. Г. И. Хлопова. Харьков: Контраст, 2013. 408 с.
3. Вайнштейн Л. А. К электродинамической теории решеток. 1. Идеальная решетка в свободном пространстве. *Электроника больших мощностей*. Москва: Изд-во АН СССР, 1963. Вып. 2. С. 26–56.
4. Шестопалов В. П. *Метод задачи Римана-Гильберта в теории дифракции и распространения электромагнитных волн*. Харьков. Изд-во ХГУ, 1971. 400с.
5. Масалов С. А., Сологуб В. Г., Шестопалов В. П. Дифракция плоской электромагнитной волны на решетке из брусьев круглого сечения. *Препринт ИРЭ АН УССР*. Харьков, 1972. № 15. 38 с.
6. Шестопалов В. П., Литвиненко Л. Н., Масалов С. А., Сологуб В. Г. *Дифракция волн на решетках*. Харьков: Изд-во ХГУ, 1973. 288с.
7. Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. К. *Резонансное рассеяние волн. Т. 1. Дифракционные решетки*. Киев: Наукова думка, 1986. 227 с.
8. Volkov A. A., Gorshunov B. P., Irisov A. A., Kozlov G. V., and Lebedev S. P. Electrodynamical properties of plane wire grids. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*. 1982. Vol. 3, Is. 1. P. 19–43. DOI: 10.1007/BF01007199
9. Горшунув Б. П., Лебедев С. П., Масалов С. А. Использование металлических решеток в качестве фазовых пластинок субмм диапазона. *Журнал технической физики*. 1984. Т. 54, № 4. С. 825–827.
10. Каменев Ю. Е., Кулешов Е. М., Филимонова А. А. HCN-лазер с круговой поляризацией излучения. *Квантовая электроника*. 1990. Т. 17, № 10. С. 1305.
11. Каменев Ю. Е., Масалов С. А., Филимонова А. А. Измерение электродинамических параметров одномерных проволочных решеток в субмиллиметровом диапазоне *Радиофизика и электроника*. 2004. Т. 9, № 3. С. 615–618.
12. *Патент України № 6285*. Каменев Ю. Е., Масалов С. А., Филимонова А. А. Спосіб визначення електродинамічних характеристик одновимірних дротяних решіток. 17.07.2006.
13. Каменев Ю. Е., Масалов С. А., Филимонова А. А. HCN-лазер с адаптивным выходным зеркалом. *Квантовая электроника*. 2006. Т. 36, № 9. С. 849–852.
14. Басанов Б. В., Ветлужский А. Ю. Эффект Малюжинца в объемных дифракционных решетках. *Журнал радиоэлектроники*. 2008. № 4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr08/3/text.pdf> (дата обращения: 8.06.2020).
15. Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А. Принцип взаимности и некоторые физические зако-

- номерности рассеяния волн на дифракционных решетках. *Вестник АН УССР*. 1975. № 3. С. 8–18.
16. Масалов С. А., Сиренко Ю. К., Шестопалов В. П. Условия проявления эффекта Малюжинца в частотных решетках. *Письма в ЖТФ*. 1980. Т. 6, Вып. 16. С. 998–1001.
17. Дзюбенко М. И., Каменев Ю. Е., Радионов В. П. Газоразрядные лазеры терагерцового диапазона. *Радиофизика и электроника*. 2017. Т. 22, № 3. С. 58–80.
18. Валитов Р. А., Сретенский В. Н. *Радиотехнические измерения*. Москва: Сов. Радио, 1970. 705с.

REFERENCES

1. KATSENELENBAUM, B. Z. and SHEVCHENKO, V. V., 1966. *Quasi-Optics: Collection of Article*. Moscow, Russia: Mir Publ. (in Russian).
2. KISELEV, V. K., KOSTENKO, A. A., KHLOPOV, G. I. (ed) and YANOVSKY, M. S., 2013. *Quasi-optical antenna-feeder systems: Monograph*. Kharkiv, Ukraine: Kontrast Publ.
3. WEINSTEIN, L. A., 1963. To the electrodynamic theory of gratings. Part 1. The ideal grating in free space. In: *High Power Electronics*. Moscow, Russia: AS USSR Publ. vol. 2, pp. 26–56. (in Russian).
4. SHESTOPALOV, V. P., 1971. *The Method of the Riemann-Gilbert Problem in the Theory of Wave Diffraction and Propagation*. Kharkiv, Ukraine: KhGU Publ. (in Russian).
5. MASALOV, S. A., SOLOGUB, V. G. and SHESTOPALOV, V. P., 1972. Plane electromagnetic wave diffraction by circular bar grating. *Preprint*. Kharkiv, Ukraine: IRE, NAS of Ukraine. no. 15. (in Russian).
6. SHESTOPALOV, V. P., LITVINENKO, L. N., MASALOV, S. A. and SOLOGUB, V. G., 1973. *Wave diffraction by gratings*. Kharkiv, Ukraine: KhGU Publ. (in Russian).
7. SHESTOPALOV, V. P., KIRILENKO, A. A., MASALOV, S. A. and SIRENKO, YU. K., 1986. *Resonance scattering of waves. Vol. 1. Diffraction gratings*. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka Publ. (in Russian).
8. VOLKOV, A. A., GORSHUNOV, B. P., IRISOV, A. A., KOZLOV, G. V. and LEBEDEV, S. P., 1982. Electrodynamical properties of plane wire grids. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*. vol. 3, is. 1, pp. 19–43. DOI: 10.1007/BF01007199
9. GORSHUNOV, B. P., LEBEDEV, S. P. and MASALOV, S. A., 1984. Metal gratings application as phase plates for use at submm range. *Zh. Tekh. Fiz.* vol. 54, is. 4, pp. 825–827. (in Russian).
10. KAMENEV, YU. E., KULESHOV, E. M. and FILIMONOVA, A. A., 1990. HCN laser emitting circularly polarized light. *Sov. J. Quantum Electron.* Vol. 20, is. 10, p. 1213. DOI: 10.1070/QE1990v020n10ABEH007447
11. KAMENEV, YU. E., MASALOV, S. A. and FILIMONOVA, A. A., 2004. Measurement of Electrodinamic Parameters of One-Dimensional Wire Gratings in the Sub-Millimeter Wavelength Range. *Telecomm. Radio Eng.* vol. 63, is. 7-12, pp. 751–758. DOI: 10.1615/Telecom RadEng.v63.i8.90
12. KAMENEV, YU. E., MASALOV, S. A. and FILIMONOVA, A. A., 2006. *Method for determination of electro-*

- dynamic characteristics of one-dimensional wire grating.* Ukrainian Patent No. 6285. 17.07.2006.
13. KAMENEV, YU. E., KULESHOV, E. M. and FILIMONOVA, A. A., 1990. HCN laser with an adaptive output mirror. *Quantum Electron.* vol. 36, is. 9, pp. 849–852. DOI: 10.1070/QE2006v036n09ABEH013279
 14. BASANOV, B. V. and VETLUZHSHKII, A. YU., 2008. Malyuzhinets effect in bulk diffraction gratings. *Journal of Radio Electronics* [online]. April, vol. 4 (in Russian) [viewed 8 June 2020]. Available from: <http://jre.cplire.ru/jre/apr08/3/text.pdf>
 15. SHESTOPALOV, V. P., KIRILENKO, A. A. and MASALOV, S. A., 1975. Reciprocity principle and some physical patterns of wave scattering by diffraction gratings. *Bull. Acad. Sci. Ukrain. SSR.* no. 3, pp. 8–18. (in Russian).
 16. MASALOV, S. A., SIRENKO, YU. K. and SHESTOPALOV, V. P., 1980. Malyuzhinets effect manifestation conditions in multi-periodic gratings. *Pis'ma Zh. Tekh. Fiz.* vol. 6, is. 16, pp. 998–1001. (in Russian).
 17. DZYUBENKO, M. I., KAMENEV, YU. E. and RADIONOV, V. P., 2017. Gas-discharge lasers of the terahertz range. *Radiophys. Electron.* vol. 22, no. 3, pp. 58–80. (in Russian). DOI: 10.15407/rej2017.03.058
 18. VALITOV, R. A. and SRETENSKIY, V. N., 1970. *Radio Engineering Measurements.* Moscow, Russia: Sovetskoe Radio Publ. (in Russian).

M. I. Dzyubenko, S. A. Masalov, Yu. E. Kamenev, I. V. Kolenov, V. P. Pelipenko, V. P. Radionov, and N. F. Dahov

O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine, 12, Acad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

TRANSMISSION OF TERAHERTZ RADIATION THROUGH ONE-DIMENSIONAL WIRE GRATINGS AT DIFFERENT ANGLES OF INCIDENCE

Purpose: One-dimensional wire diffraction gratings, usually being mounted on ring frames, are often used in quasi-optical instruments under the construction of functional devices of different usage. Such gratings have been thoroughly studied theoretically and experimentally at the millimeter wavelengths, where

they are most widely used and realized in various constructions of instruments and systems. However, a number of design and technological features of such gratings, connected with making the polarizing devices cannot be always taken into account in theoretical models that requires additional experiments. This problem is especially relevant in the terahertz range, where there is a lack of experimental data. This work aims at experimental studying the properties of one-dimensional wire gratings in the terahertz range at different angles of incidence of electromagnetic waves and for different adjustment conditions, as well as practical recommendations concerning the measurement technique and the creation of various polarizing devices.

Design/Methodology/Approach: A measuring device has been developed and manufactured, in which a gas-discharge HCN laser (at the wavelength of 337 μm) is used as a radiation source. The study of one-dimensional wire gratings of two types was carried out: grating No. 1 (conductor diameter 70 μm , period 400 μm) and grating No. 2 (conductor diameter 50 μm , period 200 μm). The gratings were installed on a rotary stand. The stepper motor provided rotation within $\pm 90^\circ$. Measurements were made automatically with a 0.35° step. The coefficient of laser radiation transmission through the grating was investigated depending on the angle of incidence and the adjustment accuracy.

Findings: Analysis of the obtained data shows that the experimental results correlate with the theoretical data. Moreover, the experimental data more fully characterize the properties of the gratings, taking into account their design and technological features, which are very difficult to take into account theoretically. The resonance maxima in the experimental dependences of the transmitted power on the angle of incidence coincide with the calculated data that makes it possible to develop a number of new measuring techniques. Recommendations are given for improving the measurement accuracy and for the practical use of the obtained results.

Conclusions: The obtained experimental results allow taking into account some additional features of the diffraction gratings, as well as improving the measurement technique. This is useful for the development of new devices in the terahertz range.

Key words: wire grating, terahertz range, laser, transmission coefficient

Стаття надійшла до редакції 2.07.2020