

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

МОДЕЛЮВАННЯ ДИФРАКЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В
ПРИЛАДІ З ПОДВІЙНОЮ РЕШІТКОЮ
(тема)

Виконала:
студентка 2 курсу, групи ФТОІм-22-1
Богданова К.У.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та
оптоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. ФОЕТ Одаренко Є.М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Гнатенко О.С.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентці Богдановій Камілі Умарівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання дифракційного випромінювання в приладі з подвійною решіткою

затверджена наказом університету від « 23 » листопада 2023 р. № 1388 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 23 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

Фізичні основи та способи отримання дифракційного випромінювання; ефект Сміта-Парселла та його застосування; застосування додаткової верхньої діелектричної решітки; методи вимірювання діелектричної проникності матеріалів; частота випромінювання 77 ГГц.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Фізичні та конструктивні особливості діелектричних хвилеводів. Принципи їх функціонування. 2 Різновиди та характеристики дифракційних решіток. 3 Способи реалізації ефекта Сміта-Парселла з використанням електронних потоків та без них. 4 Застосування додаткової верхньої діелектричної решітки для керування напрямком дифракційного випромінювання. 5 Принципи побудови комп'ютерної моделі в пакеті COMSOL. 6 Кутові характеристики дифракційного випромінювання та їх зв'язок із параметрами системи.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Схема оптична структурна (Л1) – установка експериментальна

Демонстраційний матеріал – 12 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про дифракційне випромінювання та його застосування в науці та техніці	01.09.23–28.09.23	Виконано
2	Розроблення комп'ютерної моделі приладу на основі ефекта Сміта-Парселла	04.10.23–22.10.23	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків кутових характеристик дифракційного випромінювання та їх залежностей від матеріальних параметрів діелектричного хвилеводу	25.10.23–15.11.23	Виконано
4	Аналіз результатів чисельних розрахунків	21.11.23–04.12.23	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	05.12.23–27.12.23	Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	02.01.24–12.01.24	Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	14.01.24–19.01.24	Виконано
8	Проходження перевірки на плагіат	20.01.24–21.01.24	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	22.01.24–24.01.24	

Дата видачі завдання 01 вересня 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 45 с., 23 рис., 2 додатки, 16 джерел.

ДИЕЛЕКТРИЧНИЙ ХВИЛЕВІД, ДИФРАКЦІЙНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ПОДВІЙНА РЕШІТКА, ДИЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ, ПАКЕТ COMSOL MULTIPHYSICS.

Об'єкт дослідження – дифракційне випромінювання у системі з подвійною решіткою.

Мета роботи – моделювання дифракційного випромінювання з використанням діелектричного хвилеводу в якості електронного потоку та регулювання напрямку поширення хвилі за допомогою додаткової верхньої діелектричної решітки.

Метод дослідження – аналітичні та чисельні за допомогою пакету COMSOL Multiphysics.

У роботі були розглянуті загальні відомості про терагерцове випромінювання, про дифракційні елементи, дифракційні решітки та дифракційне випромінювання, про комп'ютерний пакет для моделювання – COMSOL Multiphysics. Розроблена двовимірною моделлю діелектричного хвилеводу з нижньою металевою відбивною гребінкою та додатковою верхньою діелектричною решіткою, визначені залежності кутових характеристик дифракційного випромінювання від діелектричної проникності хвилеводу.

ABSTRACT

Explanatory note of the attestation work: 45 pages, 23 figures, 2 applications, 16 sources.

DIELECTRIC WAVEGUIDE, DIFFRACTION RADIATION, DOUBLE GRATE, DIELECTRIC PERMEABILITY, COMSOL MULTIPHYSICS PACKAGE.

The object of research is diffracted radiation in a system with a double grating.

The purpose of the work is to simulate diffracted radiation using a dielectric waveguide as an electron flow and to regulate the direction of wave propagation using an additional upper dielectric grating.

The research method is analytical and numerical using the COMSOL Multiphysics package.

The paper considered general information about terahertz radiation, about diffraction elements, diffraction gratings and diffraction radiation, about the computer package for modeling – COMSOL Multiphysics. A 2D model of a dielectric waveguide with a lower metal reflective comb and an additional upper dielectric grating was developed, the dependences of the angular characteristics of diffracted radiation on the dielectric permittivity of the waveguide were determined.

ЗМІСТ

Вступ	7
1 Аналітичний огляд систем з дифракційним випромінюванням	8
1.1 Терагерцове випромінювання	8
1.2 Дифракційні елементи.....	10
1.3 Дифракційні решітки.....	12
1.4 Дифракційне випромінювання.....	18
1.5 Пакет мультифізичного комп'ютерного моделювання COMSOL	20
2 Моделювання дифракційного випромінювання з використанням додаткової решітки.....	27
2.1 Модель металевої гребінки та діелектричної решітки з діелектричним хвилеводом та розробка моделі в пакеті COMSOL	27
2.2 Аналіз результатів розрахунку.....	33
Висновки.....	43
Перелік джерел посилання	44
Додаток А Графічний матеріал	46
Додаток Б Демонстраційний матеріал	49

ВСТУП

Терагерцове (ТГц) випромінювання охоплює електромагнітне випромінювання в діапазоні частот відблизно від 0,1 ТГц до 10 ТГц, що відповідає довжинам хвиль від 3 мм до 30 мкм [1]. Ці частоти перебувають вище, ніж у радіохвиль і мікрохвиль, але нижче, ніж у оптичного випромінювання. Використання ТГц випромінювання розповсюджується на такі галузі, як спектроскопія, радіобачення та зв'язок, адже воно дозволяє отримувати інформацію про характеристики матеріалів, зокрема їх електронну та вібраційну природу.

Терагерцеві системи виявляють значний вплив від дифракційних елементів. Це зумовлено тим, що виготовлення таких елементів значно спрощене у порівнянні з оптичними діапазонами (інфрачервоним, видимим, ультрафіолетовим тощо) [2]. Терагерцеві дифракційні оптичні компоненти можна сприймати як структури, які виготовлені відповідно до хвильового підходу. Це дозволяє їм бути меншими та легшими у порівнянні з аналогічними заломлювальними структурами. Серед найбільш вживаних та відомих дифракційних елементів можна виділити решітки та дифракційні лінзи. Роль дифракційних решіток особливо важлива у дифракційній оптиці, оскільки їх можна використовувати у спектрометрах, монохроматорах та інших оптичних приладах. Ефект Сміта-Парселла, відомий також як дифракційне випромінювання, широко застосовується як джерело електромагнітного випромінювання у різних діапазонах частот [3, 4]. Дифракційне випромінювання служить одним з джерел ТГц діапазону. Його спектрально-кутовий розподіл характеризується важливим зв'язком між довжиною хвилі, кутом випромінювання, періодом решітки та швидкістю руху електронів.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ З ДИФРАКЦІЙНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

1.1 Терагерцове випромінювання

Терагерцове випромінювання розташоване в спектральній області від 0,1 ТГц до 10 ТГц ($3\text{ мм}–30\text{ мкм}$, $3\text{ см}^{-1}–300\text{ см}^{-1}$) між мікрохвильовою та інфрачервоною частинами електромагнітного спектра, як показано на рис. 1.1 [5]. На відміну від видимого або інфрачервоного світла, ТГц випромінювання може проникати через такі матеріали, як пластикова тканина або паперові вироби.

Ця функція може бути корисною для виявлення прихованих загроз всередині одягу, багажу, посилок і герметичних контейнерів. Оскільки ТГц випромінювання не проникає крізь метали, такий датчик доповнить, а не замінить звичайні рентгенівські та металодетектори. Було показано, що ТГц-системи візуалізації можуть бути використані для зображення загрозливих предметів, неметалева зброя може бути зображена, коли вона прихована під одягом, і було продемонстровано, що вибухові матеріали мають характерні ТГц-спектри.

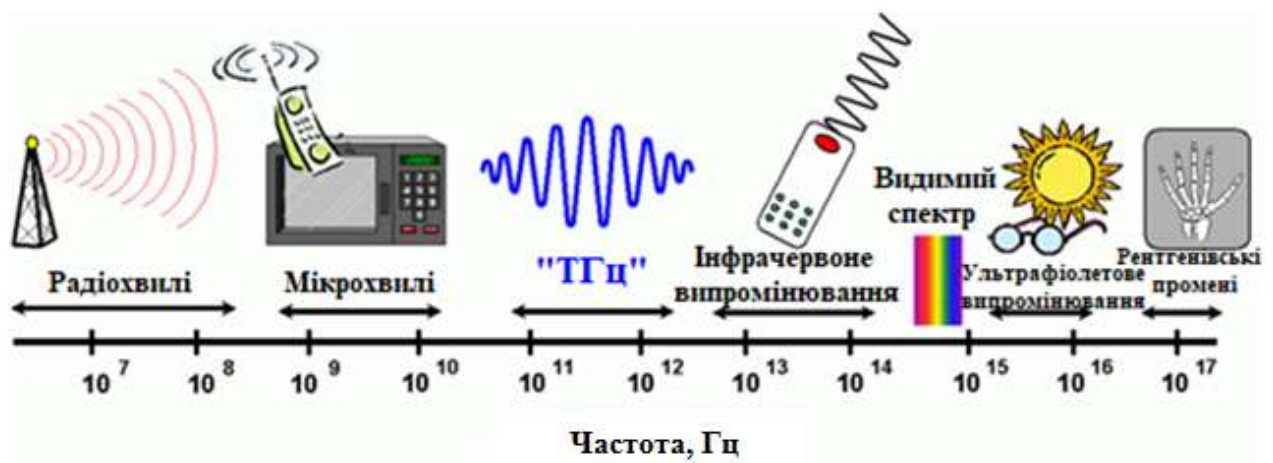


Рисунок 1.1 – Шкала електромагнітних хвиль

Терагерцове випромінювання дуже добре підходить для виявлення предметів, які людина носить під одягом або захованих у пакеті чи конверті. Існує значна колекція даних щодо передачі, поглинання та відображення різних матеріалів. Загалом передача зменшується зі збільшенням частоти. Однак у багатьох випадках цього достатньо для дистанційного виявлення прихованих об'єктів. Технічною перевагою є те, що ТГц хвилі, як і світлові хвилі, легко поширюються в просторі, відбиваються, фокусуються та заломлюються за допомогою ТГц оптики. Коротка довжина хвилі, набагато коротша, ніж у мікрохвиль, забезпечує просторову роздільну здатність, яка є достатньою для багатьох програм обробки зображень.

Багато біомолекул, білків, вибухових речовин або наркотиків також мають характерні лінії поглинання, так звані спектральні «відбитки», на частотах від 0,1 ТГц до 5 ТГц [6]. Отже, двома основними перевагами терагерцового випромінювання є проникнення через традиційно непрозорі матеріали, з одного боку, і висока хімічна вибірковість, з іншого боку.

Одним із найсильніших поглиначів терагерцового випромінювання є вода, яка – залежно від застосування – виявляється благом чи прокляттям: вологість повітря обмежує поширення терагерцового випромінювання кількома метрами, але навпаки, характерний відбиток пальця дозволяє висока точність вимірювань, чутливих до вологості. Рідка вода є навіть більш домінуючим поглиначем, ніж водяна пара.

На відміну від рентгенівських променів, хвилі терагерцового діапазону, завдяки низькій енергії фотонів (приблизно в мільйон разів менше, ніж у рентгенівських променів), не мають іонізуючого ефекту і, як правило, вважаються біологічно нешкідливими.

Терагерцове випромінювання важко передати через кабелі, але воно може передаватися повітрям, і тому підходить для зв'язку у вільному космосі [1]. Дифракція слабша, ніж у мікрохвильовій області, тому можуть утворюватися колімовані пучки без надмірних діаметрів. Однак на різних частотах молекули повітря (включаючи водяну пару) сильно поглинають терагерцові хвилі.

Швидка передача даних все ще можлива принаймні на короткі відстані, такі як кілька метрів або іноді більше 100 м.

Хоча пряма передача терагерцового сигналу через кабелі або волокна надзвичайно обмежена високими втратами, можна передавати оптичні сигнали через оптичні волокна, які несуть сигнали терагерцового діапазону у формі оптичної різниці частот. Згодом для генерації терагерцового випромінювання можна використовувати спеціальний тип фотозмішувача, наприклад для випромінювання через антену. І навпаки, модулятори плазмонної фази можна використовувати для перетворення терагерцових сигналів в оптичні сигнали.

1.2 Дифракційні елементи

Понад 50 років тому вчені встановили, що мала товщина, невелика вага та мінімізація втрат на поглинання є перевагами оптичних елементів [7]. Такі атрибути можуть бути досягнуті за допомогою підходу дифракційної оптики, де дизайн базується не на геометричній, а на хвильовій оптиці. Таким чином, розмір ознаки модельованого елемента має порядок довжини хвилі, і тому фазові зрушення, внесені окремими зонами, можна точно контролювати, щоб досягти конструктивної інтерференції. Це головна перевага дифракційних елементів перед їх заломлюючими аналогами. Тут явище дифракції, яке іноді може бути неприємним, дає можливість контролювати світло за допомогою розробки оптичних елементів, які вводять певні фазові зсуви випромінювання, що проходить. Останнім часом формування ТГц променя, візуалізація та зв'язок почали відігравати фундаментальну роль у розвитку технології ТГц.

Терагерцеві дифракційні оптичні елементи (ДОЕ) можна розуміти як структури, дизайн яких регулюється хвильовим підходом, що дозволяє їм бути меншими та легшими за відповідні заломлюючі структури. Найбільш популярними і відомими дифракційними елементами є решітки та дифракційні лінзи. Однак існує багато інших структур, що належать до сімейства ДОЕ, як-от масиви дифракційних лінз, передові дифракційні елементи, що формують різні

типи променів, дифракційні елементи, що динамічно відображаються на просторових терагерцових модуляторах, або голограми. Остання група дозволяє отримати довільне зображення в потрібній площині. Таке зображення може бути більшим за площу голограми, складатися з різних площин і, залежно від конструкції, створюватися на різних відстанях. Крім того, форму хвильового фронту, що падає, можна скорегувати, щоб сформувати справді бажане зображення. Додатковими групами елементів, які є тонкими і можуть розглядатися як свого роду нетрадиційні ДОЕ, є субхвильові структури та метаматеріали⁰. Однак ці інноваційні оптичні елементи вимагають інших методів проектування.

Для формування випромінювання у всіх спектральних діапазонах використовуються ДОЕ; проте кожен діапазон має свої особливості [8]. Вони обумовлені різною доступністю матеріалів і ступенем їх обробки. Таким чином, у кожному діапазоні випромінювань поширені та переважно використовуються різні типи ДОЕ. Навіть амплітудні структури з найменшою можливою ефективністю, такі як дифракційні елементи, зазвичай використовуються в УФ для фокусування випромінювання. Для цього діапазону частот бракує прозорих матеріалів, що вносять фазовий зсув.

Таким чином, існує потреба в оптимізації товщини дифракційних елементів (рис. 1.2). Іншим аспектом, який слід враховувати, є стійкість матеріалів до високої потужності падаючого випромінювання.

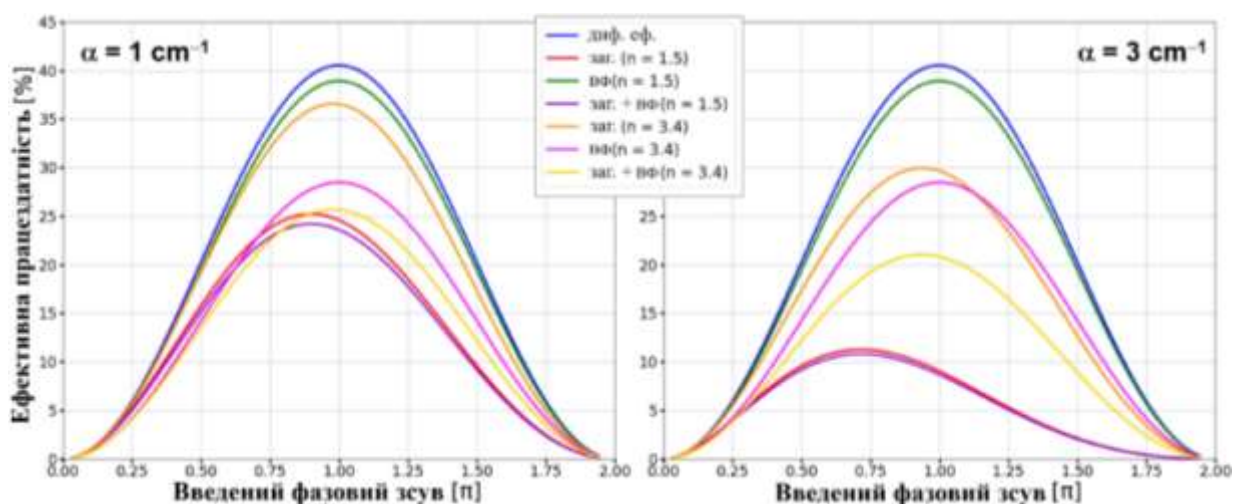


Рисунок 1.2 – Діаграми ефективності дифракційних елементів

На рис. 1.2 показана ефективність бінарного фазового дифракційного елемента для двох різних значень коефіцієнта поглинання: $\alpha = 1 \text{ см}^{-1}$ (ліва діаграма) та $\alpha = 3 \text{ см}^{-1}$ (права діаграма). Наведено результати розрахунку ефективності дифракційного елемента з урахуванням різних факторів, що впливають на цю характеристику: значень ефективності за припущення, що враховується тільки дифракційна ефективність; загасання, внесене товщиною структури в результаті значення коефіцієнта поглинання; втрати Френеля в результаті відбиття частини випромінювання від межі розділу між двома середовищами з різними показниками заломлення і враховуючи обидва фактори – вплив коефіцієнта загасання та втрати Френеля.

Можна помітити, що для матеріалів з більшим загасанням ефективна ефективність більша для структур з меншим фазовим зсувом, ніж результат теоретичної дифракційної ефективності через загасання матеріалу. Вплив френелівських втрат зростає зі збільшенням значення показника заломлення.

1.3 Дифракційні решітки

Дифракційні решітки – це широко використовувані оптичні компоненти з періодичними структурами, які дозволяють розсіювати світло в більш компактному та зручному форматі, ніж призма [9]. Вони працюють за

принципом інтерференції, щоб розділити широкосмугове світло на складові довжини хвилі та, як призма, розсіяти їх у просторі під різними кутами. Найпоширеніший тип ґратчастої структури використовує численні паралельні лінії на поверхні у спосіб, подібний до серії щілин, що призводить до суперпозиції хвиль, які дифрагують світло за довжиною хвилі, ефективно розділяючи його на кольори. Це не єдиний фундаментальний тип дифракційної решітки, але він став широко використовуваним стандартом для багатьох застосувань.

Існує багато типів дифракційних решіток, що може ускладнити процес вибору. Відбиття або пропускання є однією з найбільш фундаментальних відмінностей у термінології дифракційних решіток. По суті, відбивна решітка дифрагує світло назад у площину падіння, тоді як пропускна решітка пропускає розсіяне світло. Завдяки здатності краще компенсувати аберації, оптичні системи, виготовлені з пропускними решітками, мають порівняно низьку чутливість до юстування, що може бути значною перевагою для додатків, де дрібні помилки юстування або зміни температури можуть завдати шкоди результатам.

Дифракційні решітки, що пропускають або відбивають, можуть розділяти різні довжини хвилі світла за допомогою повторюваної структури, вбудованої в решітку [10]. Структура впливає на амплітуду та/або фазу падаючої хвилі, викликаючи перешкоди у вихідній хвилі. У трансмісійному випадку структуру, що повторюється, можна уявити як багато щільно розташованих тонких щілин. Розв'язуючи опромінення як функцію довжини хвилі та положення цієї багатощілинної конфігурації, ми отримуємо загальний вираз, який можна застосувати до всіх дифракційних ґраток, коли $\theta_i = 0^\circ$:

$$a \sin(\theta_m) = m\lambda, \quad (1.1)$$

відоме як рівняння решітки. Рівняння стверджує, що дифракційна решітка з періодом a буде відхиляти світло на дискретні кути (θ_m), залежно від значення

$m\lambda$, де m – порядок головних максимумів. Кут дифракції, θ_m , є вихідним кутом, виміряним від нормалі до поверхні дифракційної решітки. З рівняння (1.1) видно, що для даного порядку m різні довжини хвилі світла будуть виходити з решітки під різними кутами. Для джерел білого світла це відповідає безперервному, залежному від кута спектру.

Одним із популярних видів решіток є пропускна решітка. Зразок дифракційної решітки з канавками на поверхні, показаний на рис. 1.3, створюють шляхом подряпин або травлення прозорої підкладки з повторюваною серією борозен малої ширини, розділених відстанню a . Це створює зони, де світло може розсіюватися.

Світло падає на решітку під кутом θ_i , виміряним від нормалі до поверхні. Світло з дифракційним порядком m , що виходить із решітки, виходить під кутом θ_m відносно нормалі до поверхні. Використовуючи деякі геометричні перетворення та загальний вираз для решітки (1.1), отримаємо співвідношення для пропускної дифракційної решітки:

$$a [\sin(\theta_m) - \sin(\theta_i)] = m\lambda, \quad (1.2)$$

де обидва кути θ_i і θ_m є позитивними, якщо падаючий і дифрагований промені знаходяться на протилежних сторонах нормалі до поверхні решітки, як показано в прикладі на рис. 1.3. Якщо вони знаходяться на одній стороні нормалі решітки, тоді їх слід вважати негативними θ_m .

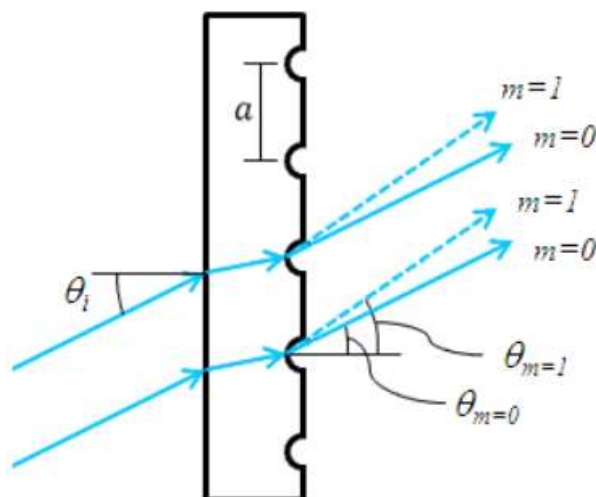


Рисунок 1.3 – Пропускна дифракційна решітка

Іншим дуже поширеним дифракційним елементом є відбивна решітка. Відбивна решітка традиційно виготовляється шляхом нанесення металевого покриття на оптичні елементи та створення паралельних канавок на поверхні. Світловідбиваючі решітки також можуть бути виготовлені з епоксидних та/або пластикових відбитків з майстер-копії. У всіх випадках світло відбивається від лінійної поверхні під різними кутами, що відповідають різним порядкам дифракції і довжинам хвиль. Приклад решітки, що відбиває, показаний на рис. 1.4. Використовуючи аналогічну геометричну установку, як описано вище, можна знайти рівняння решітки для відбивних решіток:

$$a [\sin(\theta_m) + \sin(\theta_i)] = m\lambda, \quad (1.3)$$

де θ_i є позитивним і θ_m – негативним, якщо падаючий і дифрагований промені знаходяться по різні боки від нормалі до поверхні решітки, як показано в прикладі на рис. 1.4. Якщо промені знаходяться по той самий бік нормалі до решітки, то обидва кути вважаються позитивними.

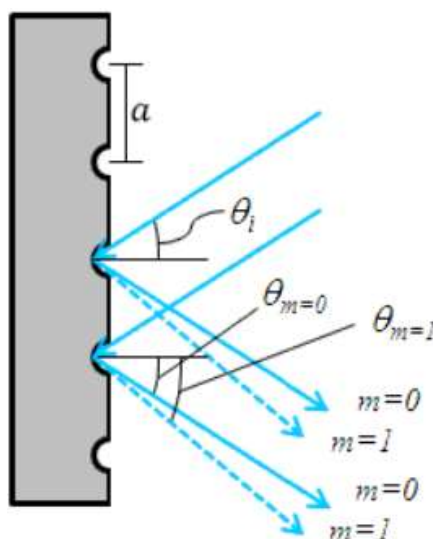


Рисунок 1.4 – Відбивна дифракційна решітка

Як відбивна, так і пропускна решітки страждають від того факту, що мода нульового порядку не містить дифракційної картини і виглядає як поверхневе відбиття або пропускання відповідно. Розв'язуванням рівняння (1.2) для цієї умови, $\theta_i = \theta_m$, ми знаходимо, що єдиним рішенням є $m = 0$, незалежно від довжини хвилі або відстані від дифракційної решітки. За цієї умови неможливо отримати інформацію, що залежить від довжини хвилі, і все світло втрачається через поверхневе відбиття або пропускання.

Цю проблему можна вирішити, створивши повторюваний малюнок поверхні, який створює іншу геометрію відбиття поверхні. Дифракційні решітки цього типу зазвичай називають лінійчатими ґратками.

Вибір дифракційної решітки зводиться до кількох ключових взаємопов'язаних факторів ефективності.

1. Ефективність: ефективність дифракційної решітки зазвичай виражається як відсоток падаючого світла, перетвореного в бажаний порядок дифракції як функцію довжини хвилі, при цьому більшість звичайних решіток дають асиметричні криві ефективності в загальному діапазоні довжин хвиль.

2. Роздільна здатність: роздільна здатність дифракційної решітки визначає її здатність просторово розділяти дві довжини хвилі та визначається в основному періодичною структурою решітки.

3. Діапазон довжин хвиль: спектральний діапазон дифракційної решітки стосується області електромагнітного випромінювання, яке вона може ефективно розсіювати, що також є характерним для структури.

Дифракційна решітка зазвичай складається з великої кількості вузьких щілин-штрихів однакової ширини [11]. Відстань між штрихами b (постійні ґрати) зберігається строго однакою. Ширина кожної щілини дещо перевищує довжину світлової хвилі у робочій області спектра.

Внаслідок дифракції світло від кожної щілини може поширюватися під будь-яким кутом до попереднього напрямку (до 180°). Паралельний світловий пучок після дифракції заповнює весь простір за кожною щілиною. Схема дії дифракційної решітки показана на рис. 1.5.

На схемі показано падіння плоскої світлової хвилі на решітку зліва. Передбачається, що виконуються умови для реалізації дифракції світла на цій структурі. В цьому випадку відбувається відхилення напрямку розповсюдження світла за решіткою відповідно до визначеного порядку дифракції.

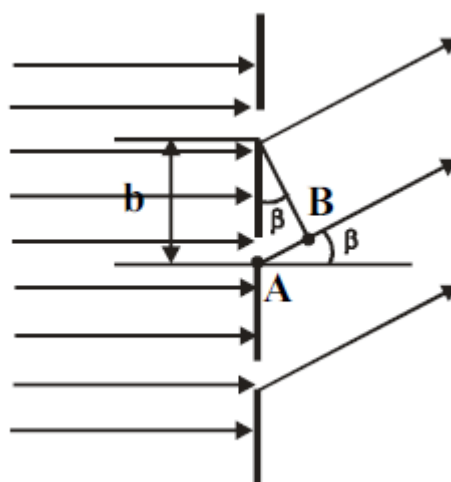


Рисунок 1.5 – Схема дії дифракційної решітки

За щілинами відбувається інтерференція світлових коливань, що пройшли через різні щілини. Хвилі, що розповсюджуються в одному напрямку від різних щілин, мають різні фази і тому гасять одна одну. У деяких напрямках різниця фаз світлових хвиль від усіх щілин дорівнює нулю (тобто фази відрізняються на ціле число періодів). У цих напрямках відбувається збільшення амплітуди та спостерігаються максимуми. Ці напрями для довжини хвилі λ знаходять із умови: $AB = m\lambda$, де AB – різниця ходу хвиль, що йдуть від відповідних точок сусідніх щілин, m – будь-яке ціле число; $AB = b \sin \beta$, тому маємо:

$$b \sin \beta = m\lambda. \quad (1.4)$$

Таким чином, максимуми виходять у тих напрямках, де різницю ходу для світлових коливань від відповідних точок сусідніх щілин становить ціле число довжин хвиль, а різниця фаз дорівнює нулю або, що те ж саме, цілому числу періодів. В інших напрямках світло від різних щілин надходить у різних фазах. Його гасіння буде тим повнішим, чим більше число щілин у решітках. Дифракційні решітки мають десятки і навіть сотні тисяч штрихів, тому інтенсивність максимумів велика за практично повного гасіння світла в інших точках простору.

1.4 Дифракційне випромінювання

Дифракційне випромінювання, також відоме як ефект Сміта-Парселла, широко розповсюджене як джерело електромагнітного випромінювання в різних діапазонах частот, починаючи з 1953 року, коли Сміт і Парселл виявили, що електрони, рухаючись над решіткою, не перетинаючи її, випромінюють електромагнітне випромінювання [12]. Як і більшість радіаційних процесів, що супроводжують рух заряджених частинок, його можна пояснити в результаті розсіювання кулонівського поля рухомих заряджених частинок на нерівностях

середовища. Це випромінювання можна описати також як результат динамічної поляризації періодично неоднорідної мішені полем пучка заряджених частинок.

Характерною особливістю ефекту Сміта-Перселла (ЕСП), враховуючи його спектрально-кутовий розподіл, є сильний зв'язок між довжиною хвилі λ , кутом випромінювання θ , періодом решітки d та зменшеною швидкістю електронів β :

$$\lambda m = d (\beta^{-1} - \cos\theta), m = 1, 2, \dots \quad (1.5)$$

Цей закон дисперсії є універсальним, він не залежить від матеріалу або профілю решітки і може бути отриманий безпосередньо з оптичних аналогій і законів збереження. Піки випромінювання досить вузькі, мають ширину, обернено пропорційну числу штрихів решітки; усі піки розподілені в площині, що містить траєкторію електронів і перпендикулярно до поверхні решітки, площина $(x z)$ на рис. 1.6.

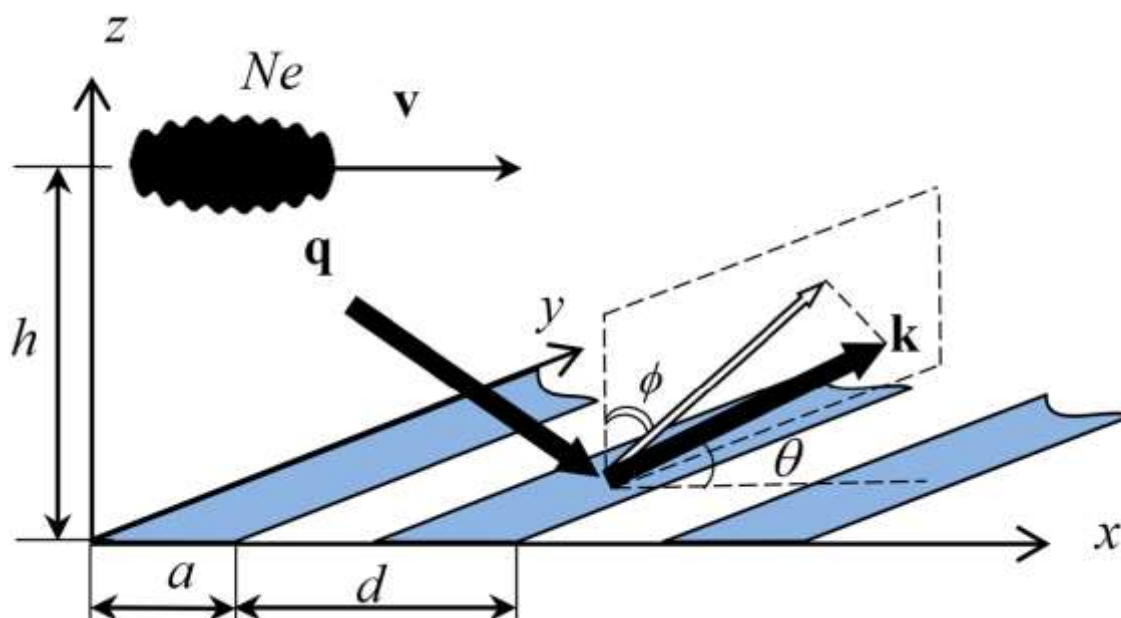


Рисунок 1.6 – Схема генерації випромінювання Сміта-Парселла

Важливо, що при ЕСП електрони не розсіюються в матеріалі мішені. З цієї причини потік заряджених частинок не пошкоджує мішень, забезпечуючи надійність і тривалий час життя практичних джерел випромінювання на основі ЕСП. Разом з тим, ЕСП надає дуже привабливу можливість неруйнівної діагностики, оскільки пучки не псуються в процесі випромінювання, приносячи інформацію про його параметри. Крім того, ЕСП відкриває прекрасні перспективи для реалізації так званих одноразових вимірювань не лише в пікосекундному, але потенційно й у фемтосекундному діапазонах.

У дифракційних антенах використовуються хвильові аналоги ЕСП, що є характерною рисою цього типу антенного обладнання. Ці пристрої були ключовими у вирішенні численних актуальних та практично значимих завдань, пов'язаних з дистанційним зондуванням Землі за допомогою аерокосмічних носіїв, а також у вирішенні задач спостереження за аеродромами та забезпечення безпеки периметрів аеропортів. Ці прилади також були ефективними у запобіганні зіткнень на автомобільному, річковому та морському транспорті, а також у розв'язанні проблеми "сліпої" посадки вертольотів та радіометрії.

1.5 Пакет мультифізичного комп'ютерного моделювання COMSOL

Компанія COMSOL є визнаним у всьому світі розробником програмного забезпечення для моделювання різних фізичних процесів [13]. Її програмні рішення дозволяють аналізувати та вивчати фізичні явища та їх взаємозв'язок в навколишньому середовищі, а також обробляти результати експериментів. Продукти компанії широко використовуються у дослідницьких інститутах, лабораторіях та на великих підприємствах. Додаткові модулі включають спеціальні інструменти для симуляції фізичних процесів у галузях будівельної механіки, хімічної інженерії, акустики, проектування систем теплопередачі, мікроелектромеханіки та інших. Рішення COMSOL сприяють проектуванню складних систем та пристроїв для різних професійних сфер.

COMSOL Multiphysics є універсальною платформою моделювання, що охоплює усі етапи процесу: від створення геометрії та визначення механічних характеристик матеріалів до опису фізичних явищ. Ця інтегрована платформа також включає в себе налаштування рішення та постобробку даних, сприяючи отриманню точних та надійних результатів.

Пакет програм COMSOL Multiphysics дозволяє ефективно моделювати різноманітні фізичні процеси, що можуть бути описані диференціальними рівняннями. Він включає різні вирішувачі, які сприяють швидкому розв'язанню навіть найскладніших задач, а проста структура програми надає зручність та гнучкість її використання. При моделюванні будь-якої задачі використовується чисельний метод розв'язання рівнянь в частинних похідних за допомогою методу кінцевих елементів. Обсяг задач, які можна успішно моделювати у цій програмі, надзвичайно великий.

Середовище розробки додатків надає можливість розширювати додатки за допомогою індивідуально створених користувацьких інтерфейсів, заснованих на власних моделях. Такий індивідуальний інтерфейс може включати спрощену версію моделі або відображати певні поля введення та виведення, які повинні бути доступні користувачу. Це можна зробити за допомогою вбудованих фізичних інтерфейсів (Physics Interfaces) та розширеної підтримки властивостей матеріалів. За їхньою допомогою можна налаштувати параметри моделі, такі як різноманітні характеристики матеріалів (щільність, пружність, навантаження, граничні умови, джерела тепла та тепловий потік). Інформацію про області твердих та рідких тіл, а також їх параметри на межах, ребрах та точках можна виразити через змінні, вирази або задані константи, незалежно від сітки розбиття. Після цього COMSOL компілює систему рівнянь, яка представляє всю модель.

За допомогою фізичних інтерфейсів можна проводити різні типи досліджень, включаючи:

- розрахунок усталеного і залежного від часу перехідного процесу;
- лінійні та нелінійні дослідження;

– дослідження власних частот, типів хвиль і частотних характеристик.

На рис. 1.7 наведено інтерфейс пакету програми. Він виконаний за стандартною схемою, що спрощує його освоєння для користувачів, які вже мають досвід використання інших пакетів для моделювання електромагнітних явищ.

У COMSOL Multiphysics існує кілька вбудованих продуктів, які можна розглядати в контексті кількох основних розділів відповідно до типу процесів, з якими вони пов'язані: електрика, механіка, рідини, хімія, багатофункціональні процеси та конструювання інтерфейсів. Слід відзначити, що ці вбудовані продукти поділені на два основних типи: одні входять до складу COMSOL Multiphysics, а інші – до COMSOL Server.

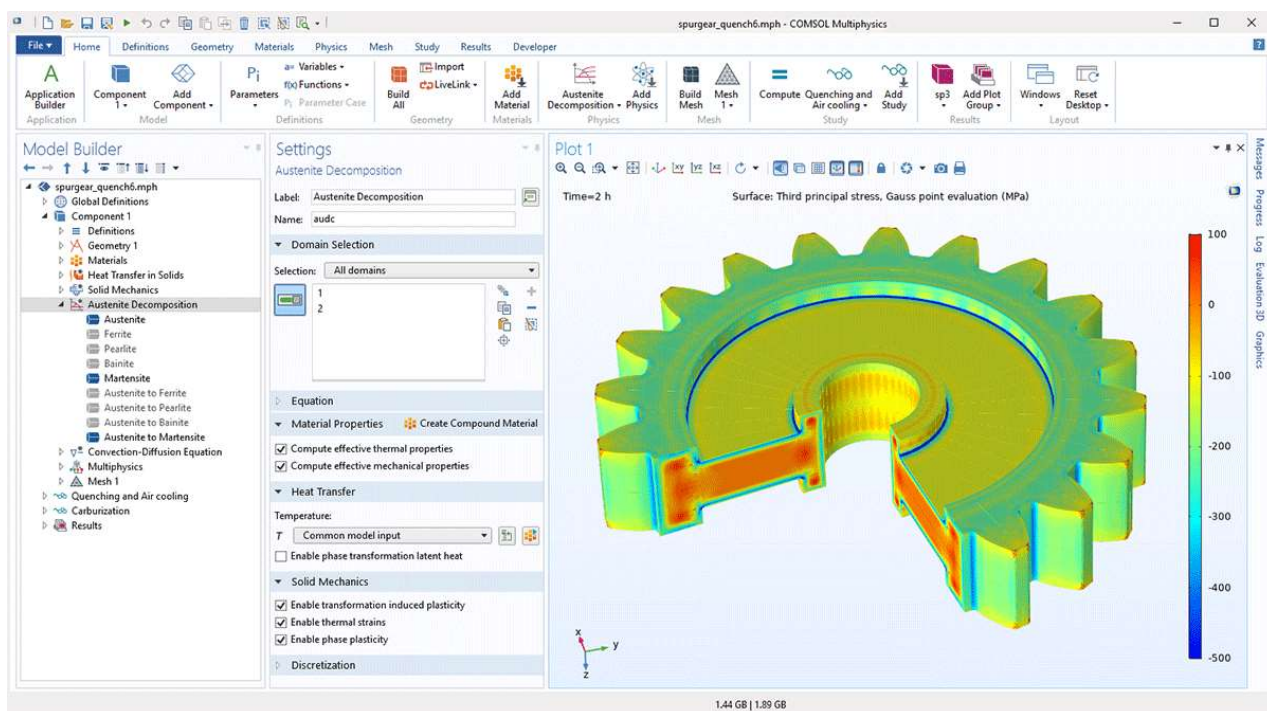


Рисунок 1.7 – Інтерфейс пакету COMSOL

Вбудовані продукти:

а) електрика:

– модуль AC/DC використовується для імітації електричних, магнітних та електромагнітних полів у стаціонарних і низькочастотних сценаріях;

- модуль радіочастот використовується при розробці антен, фільтрів, схем, резонаторів, перетворювачів постійного струму та матеріалів з метою;

- модуль хвильової оптики надає інструменти для аналізу поширення електромагнітних хвиль у лінійних та нелінійних оптичних середовищах. Цей модуль може бути використаний для моделювання високочастотних електромагнітних хвиль;

- модуль геометричної оптики призначений для моделювання розповсюдження електромагнітних хвиль у системах, де довжина хвилі значно менша, ніж найменша геометрична деталь в моделі;

б) мікроелектромеханічні системи (MEMS):

- модуль плазми призначений для моделювання та імітації джерел низькотемпературної плазми;

- модуль напівпровідників надає можливість проведення детального аналізу напівпровідників на фундаментальному фізичному рівні. Для цього використовуються ізотермальні та неізотермальні транспортні моделі;

в) структурні та акустичні:

- модуль структурної механіки спрямований на аналіз механічних структур, які піддаються впливу статичних чи динамічних навантажень. Він може застосовуватися для різноманітних видів аналізу, включаючи стаціонарний, тимчасовий, параметричний, квазістатичний, нестійкий та інші;

- модуль нелінійних структурних матеріалів розширює механічні можливості модуля структурної механіки та модуля MEMS за допомогою нелінійних моделей матеріалів, включаючи широкі можливості пластичної деформації;

- модуль геомеханіки є розширенням модуля структурної механіки і призначений для аналізу в геотехнічних застосуваннях, таких як тунелі, розкопки, стійкість схилів і підпірні споруди;

- модуль виснаженості призначений для аналізу виснаженості різноманітних структур;

- модуль багатотільної динаміки розширює функціонал модуля будівельної механіки, надаючи розширений набір інструментів для розробки та оптимізації структурних багатотільних систем механіки за допомогою аналізу методом скінченних елементів;

- модуль роторної динаміки є розширенням модуля структурної механіки і використовується для аналізу впливу бічних та торсійних вібрацій обертальних елементів;

- модуль акустики використовується для створення моделей пристроїв, які генерують, вимірюють і поглиблюють акустичні хвилі. Це включає в себе такі пристрої, як колонки, мікрофони, слухові апарати та гідроакустичні пристрої і т.д.;

г) рідини і температура:

- модуль динаміки рідин надає платформу для моделювання пристроїв і систем, що включають в себе високорівневі моделі руху рідини;

- модуль мікропотоків використовується для моделювання мікропотоків, електрокінетики, магнітокінетики та процесів струменевого друку;

- модуль підземних потоків призначений для інженерів, які бажають моделювати потік рідини під землею чи іншою пористою поверхнею. Він також дозволяє інтегрувати цей потік з іншими фізичними явищами, такими як еластичність пор, передача тепла, хімічні процеси та електромагнітні поля. Цей модуль може бути використаний для моделювання підземних рік, поширення забруднень через ґрунти, транспортування нафти та газу до родовищ і процесів розмивання ґрунту;

- модуль поширення тепла включає інструменти для дослідження механізмів передачі тепла, таких як конвекція, теплопровідність і випромінювання. Зазвичай використовується спільно з іншими фізичними

модулями, такими як структурна механіка, динаміка рідин, електромагнетизм та хімічні реакції;

д) хімія:

– модуль хімічних реакцій надає інструменти для моделювання переносу матеріалу, передачі тепла і реалізації різноманітних хімічних кінетик у різних типах середовищ: газах, рідинах, пористих середовищах, на поверхнях та всередині твердих тіл;

– модуль батарей та паливних елементів дозволяє моделювати поведінку електричного струму в електродах і електролітах батарей та паливних елементів;

– модуль корозії дозволяє інженерам і вченим вивчати процеси, що призводять до корозії, а також отримувати уявлення про те, наскільки швидко корозія може розвиватися протягом всього терміну служби конструкції;

– електрохімічний модуль включає в себе функціонал для моделювання електрохімічних механізмів реакцій, переносу маси і розподілу щільності струму. Цей модуль дозволяє ефективно моделювати різні застосування, такі як електроліз, електродіаліз, електроаналіз, електрохімічні датчики та біоелектрохімію;

ж) багатоцільові застосунки:

– модуль оптимізації представляє собою додатковий пакет, який може бути використаний у поєднанні з будь-яким продуктом COMSOL Multiphysics з метою оптимізації. Це загальний інтерфейс, який може бути використаний для визначення цільових функцій, визначення проектних змінних і налаштування обмежень;

– бібліотека матеріалів доступна для використання і містить дані для 2500 матеріалів, включаючи елементи, мінерали, металеві сплави, матеріали для теплоізоляції, напівпровідники і п'єзоелектричні матеріали;

– модуль трасування частинок розширює функціональні можливості середовища COMSOL для обчислення траєкторій частинок в рідині

або електромагнітному полі, включаючи взаємодію частинка-частинка, рідина-частинка і частинка-поле.

Для вирішення завдань цієї кваліфікаційної роботи використовувався радіочастотний модуль, який дозволяє отримувати весь спектр електродинамічних характеристик побудованої схеми в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ДИФРАКЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ДОДАТКОВОЇ РЕШІТКИ

2.1 Модель металевої гребінки та діелектричної решітки з діелектричним хвилеводом та розробка моделі в пакеті COMSOL

У даній роботі розглядається двовимірний модель дифракційного випромінювання, де електронний потік представляється як діелектричний хвилевід. Схематичне зображення моделі приведено на рис. 2.1.

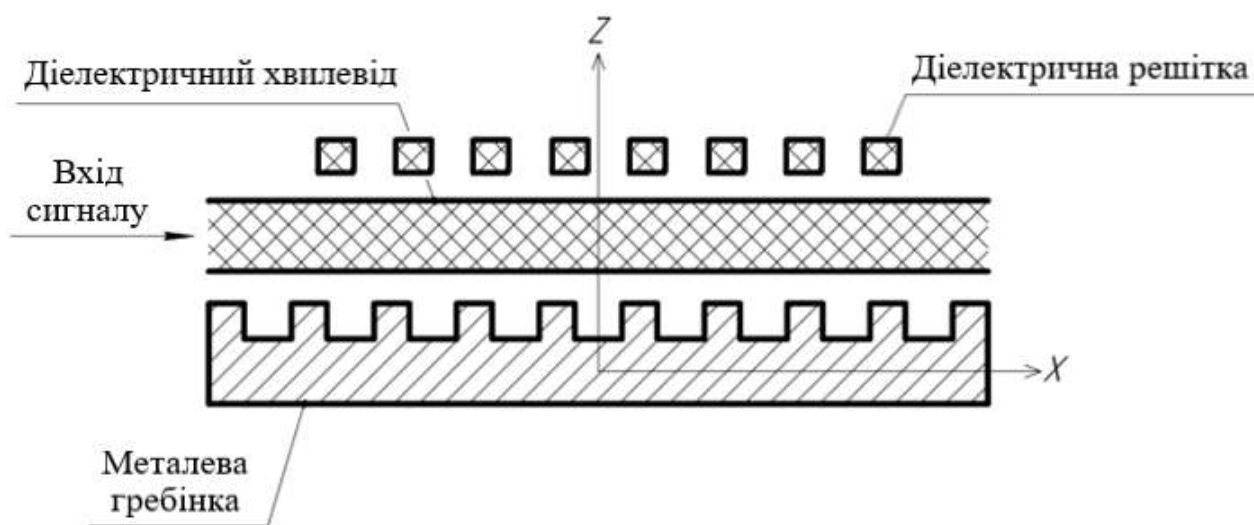


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення моделі

Схема включає в себе такі конструктивні елементи:

- діелектричний хвилевід;
- металева гребінка;
- діелектрична решітка.

Було виконане моделювання у площині з координатами (x, z) , що вказує на використання двовимірної моделі.

На вхід системи подається електромагнітна хвиля, яка проходить через хвилевід. Хвиля за межами хвилеводу розсіюється на відбивній металевій гребінці яка розташована на невеликій відстані від хвилеводу. Застосування

додаткової верхньої діелектричної решітки дозволяє регулювати характеристики дифракційного випромінювання. Розміри хвилевода обираються таким чином, щоб забезпечити однохвильовий режим.

Оскільки хвиля поширюється поза межами хвилеводу, вона дифрагує на гребінці та решітці. Ця схема може бути використана для моделювання ефекту Сміта-Парселла.

Для моделювання цієї моделі у пакеті COMSOL застосовуються такі програмні модулі: Electromagnetic Waves, FrequencyDomain (електромагнітні хвилі, частотна область).

Процес розробки моделі починається з моделювання діелектричного хвилеводу, який приведений на рис. 2.2.

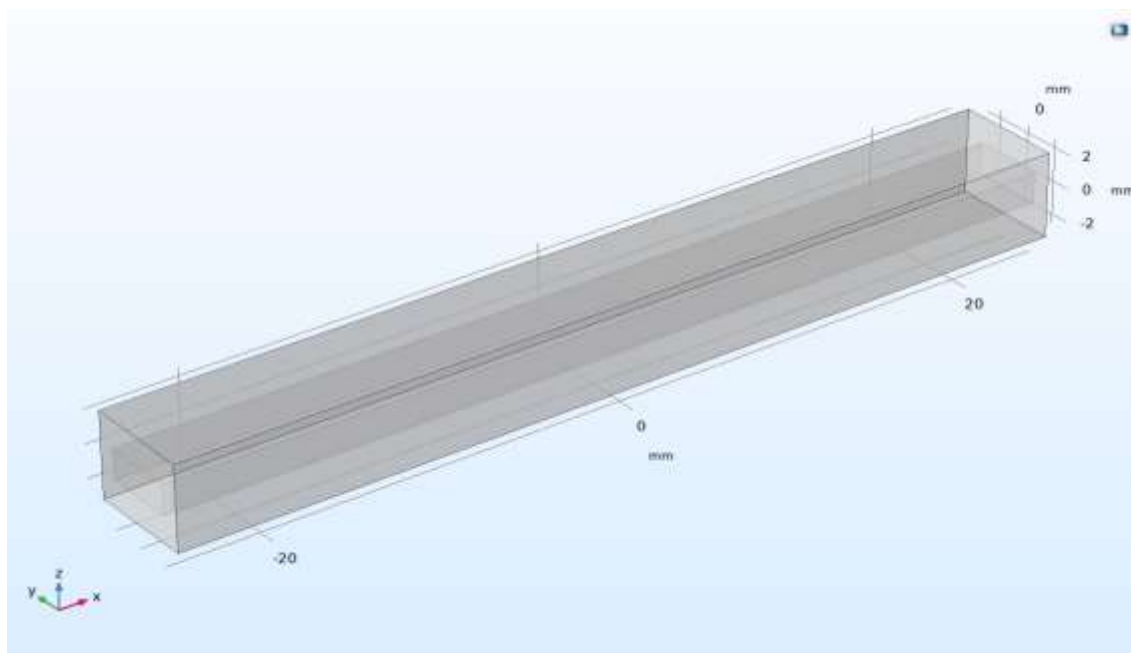


Рисунок 2.2 – Діелектричний хвилевід розроблений у пакеті COMSOL

Завдяки вбудованим інтерфейсам та розширеній підтримці властивостей матеріалів, задаємо відповідні фізичні параметри. Після цього COMSOL компілює систему рівнянь, що відображає всю модель.

Параметри хвилеводу з діелектричним середовищем:

- довжина хвилеводу дорівнює 50 мм;
- ширина хвилеводу дорівнює 4 мм;
- висота хвилеводу дорівнює 1,8 мм;
- довжина хвилі випромінювання дорівнює 3331 мкм;
- матеріал хвилеводу – кремній з показником заломлення 3,48.

Слід зазначити, що на відміну від металевих хвилеводів, в яких поле не виходить за межі лінії передачі, в діелектричних хвилеводах потрібно враховувати наявність поля за межами цього пристрою. Це призводить до деякого ускладнення процесу моделювання. Потрібно формувати спеціальну оболонку для хвилеводу, виконувати додаткові розрахунки для визначення робочої моди хвилеводу тощо.

На торцях хвилеводу задаються порти типу Numeric, один з яких є активним (рис. 2.3), другий – пасивним (рис. 2.4). Саме такий тип порту дозволяє визначати власні режими (моди) в перетині хвилеводної структури, які можна розглядати як результат збудження цієї структури зовнішнім джерелом випромінювання. Слід зазначити, що ця процедура потребує формування додаткового розрахункового вузла при розв'язанні задачі.

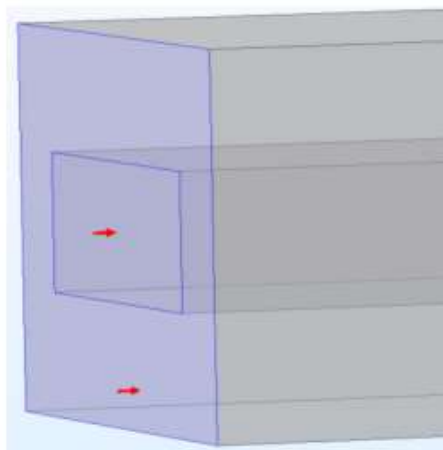


Рисунок 2.3 – Активний порт Numeric

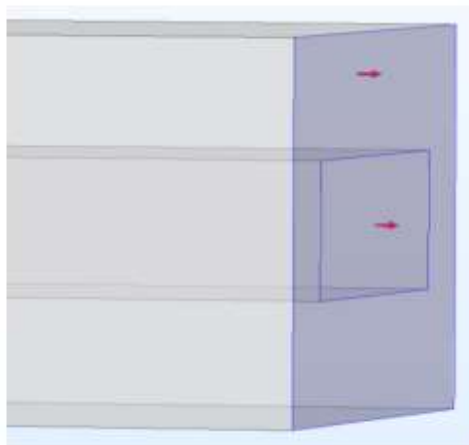


Рисунок 2.4 – Пасивний порт Numeric

Активний порт має засоби для створення збудження електромагнітної хвилі. Натомість, пасивний порт не включає в себе механізм збудження.

Хвилевід оточений спеціальною оболонкою, на поверхні якої застосовуються граничні умови Scattering Boundary Condition. Ці граничні умови є необхідними для визначення умов на нескінченності та уникнення відбиття випромінювання від меж розрахункової області.

Параметри оболонки, що оточує хвилевід:

- довжина оболонки дорівнює 50 мм;
- ширина оболонки дорівнює 6 мм;
- висота оболонки дорівнює 5,2 мм.

Для наступних обчислень у методі кінцевих елементів модель вкривається розрахунковою сіткою. Її структуру зображено на рис. 2.5.

Після створення геометрії моделі необхідно згенерувати кінцево-елементну сітку. Ця сітка розбиває розрахункову область на багато невеликих кінцевих елементів, що відображають рішення задачі в обраних точках, відомих як вузли.

Ця процедура часто називається операцією дискретизації. Вона включає перехід від пошуку рішення в області незалежних змінних, яка є неперервною, до пошуку рішення задачі лише в обраних вузлах розрахункової сітки.

Дискретизація розрахункової області полягає в поділі цієї області за допомогою сітки на велику кількість простих геометричних об'єктів. Кожен з цих об'єктів може бути підданий вирішенню відповідного рівняння, що описує його стан.

У чисельних обчисленнях рішення знаходяться тільки для вузлових точок, які складають цю сітку.

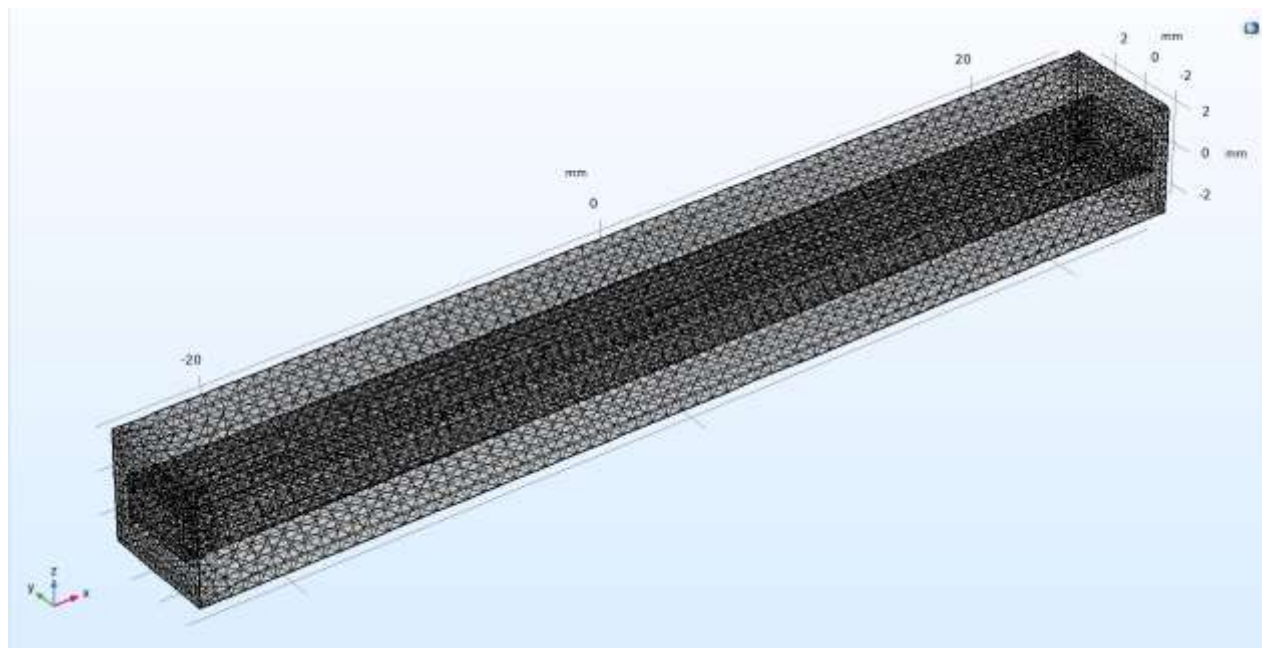


Рисунок 2.5 – Хвилевід, вкритий розрахунковою сіткою

Усі характеристики полів обчислюються в кожному вузлі розрахункової сітки. Для забезпечення точності отриманих результатів у деяких областях модель вкривається більш щільною розрахунковою сіткою, особливо в області хвилеводу, оскільки в межах діелектричного хвилеводу довжина хвилі зменшується. Слід зазначити, що при чисельних розрахунках сітковими методами вважається, що для отримання вірогідних результатів розрахунків на довжині хвилі випромінювання в середовищі повинні розміщуватися не менш, ніж п'ять вузлів розрахункової сітки.

Далі, у програмі COMSOL виконується моделювання металевої гребінки, яка виключається з розрахунку, оскільки у середині металу електромагнітне поле дорівнює нулю.

Параметри металевої гребінки:

- довжина гребінки дорівнює довжині діелектричного хвилеводу поділена на 1,3. Це приблизно дорівнює 38,46 мм;
- ширина гребінки дорівнює 2 мм;
- висота гребінки дорівнює 1,4 мм;
- період дорівнює 2,49 мм;
- кількість періодів дорівнює 15;
- довжина канавки дорівнює 1,25 мм;
- ширина канавки дорівнює 2 мм;
- висота канавки дорівнює 0,832 мм.

Під час моделювання відстань від діелектричного хвилеводу до металевої гребінки становить 0,25 мм.

На рис. 2.6 представлено візуалізацію конструкції діелектричного хвилеводу з металевою гребінкою, розробленої за допомогою пакету COMSOL.

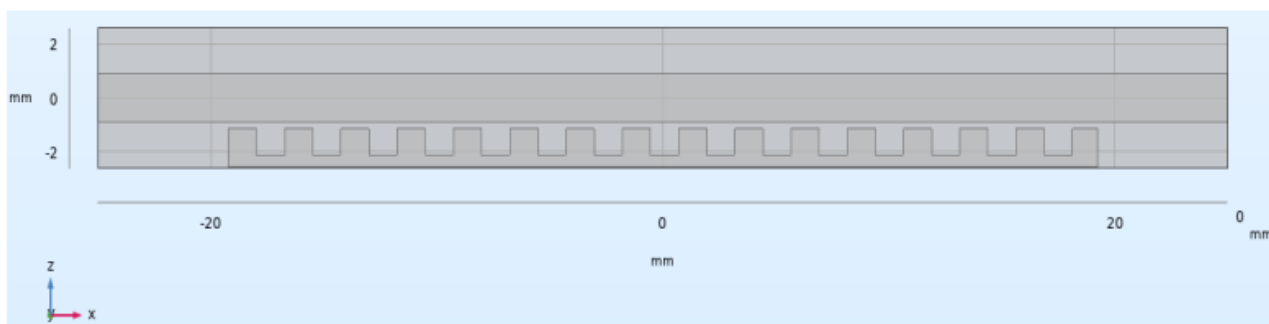


Рисунок 2.6 – Діелектричний хвилевід з металевою гребінкою

Потім виконується моделювання діелектричної решітки у пакеті COMSOL.

Параметри діелектричної решітки:

- ширина решітки дорівнює 2 мм;
- висота решітки дорівнює 0,8 мм;
- період дорівнює 2 мм;
- кількість періодів дорівнює 19;
- довжина канавки дорівнює 0,3 мм.

На рис. 2.7 наведено зображення моделі діелектричного хвилеводу з металевою гребінкою та діелектричною решіткою, яка розроблена у пакеті COMSOL.

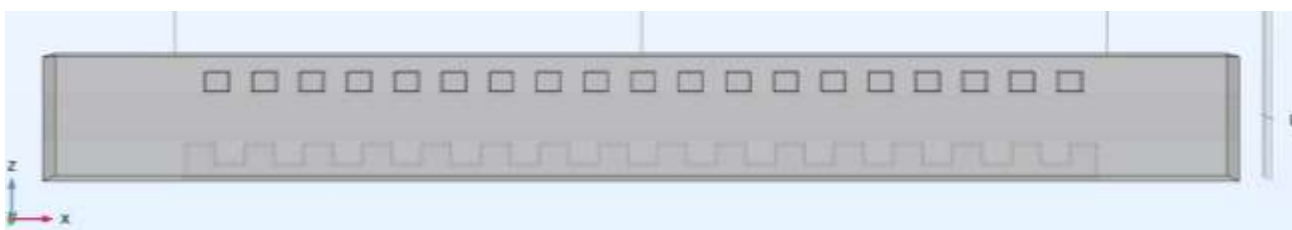


Рисунок 2.7 – Діелектричний хвилевід з металевою гребінкою та діелектричною решіткою

2.2 Аналіз результатів розрахунку

Розрахунковий проект, розроблений в рамках цієї роботи, може служити для визначення параметрів дифракційного випромінювання і обчислення діелектричної проникності матеріалу діелектричного хвилеводу на основі цих результатів [14].

Відомо, що фазова швидкість хвилі в діелектричному хвилеводі залежить від діелектричної проникності його матеріалу. У цьому випадку швидкість менша у $n = \sqrt{\epsilon}$ разів, ніж швидкість світла у вакуумі. Фазова швидкість хвилі в розрахунковій моделі, представленій у даній роботі, відповідає швидкості електронного потоку, який проходить над металевою гребінкою. Таким чином, змінюючи показник заломлення матеріалу, з якого виготовлений діелектричний хвилевід, фактично змінюється швидкість віртуального електронного потоку.

Розглянемо відомий вираз для кута дифракційного випромінювання, який виникає внаслідок проходження електронного потоку за межами хвилеводу, який розсіюється на відбивній металевій гребінці:

$$\cos \theta = \frac{c}{v} - \frac{\lambda}{L} m, \quad (2.1)$$

де θ – кут випромінювання, який відхиляється від напрямку руху електронного потоку, або, іншими словами, від поздовжньої осі діелектричного хвилеводу;

c – швидкість світла у вакуумі;

v – фазова швидкість хвилі в хвилеводі;

λ – довжина хвилі випромінювання;

L – період дифракційної решітки;

m – номер просторової гармоніки.

Перший доданок у правій частині виразу (2.1) представляє собою коефіцієнт сповільнення хвилі або показник заломлення матеріального середовища. Таким чином, формулу для кута дифракційного випромінювання можна переписати наступним чином:

$$\theta = \arccos \left(\sqrt{\varepsilon} - \frac{\lambda}{L} m \right). \quad (2.2)$$

Очевидно, що зі збільшенням значення діелектричної проникності відбувається зменшення кута дифракційного випромінювання. Таким чином, за допомогою вимірювання цього кута можна досить легко визначити діелектричну проникність матеріалу, з якого виготовлено хвилевід. Це можна здійснити, використовуючи пряму формулу:

$$\varepsilon = \left(\frac{\lambda}{L} m + \cos \theta \right)^2. \quad (2.3)$$

На рис. 2.8 показані залежності кута дифракційного випромінювання від значення діелектричної проникності матеріалу хвилевода для різних довжин хвилі випромінювання ($\lambda = 2; 2,5; 3; 4; 5$ мм). Розрахунки виконані для першої просторової гармоніки. Видно, що ці функціональні залежності взагалі є нелінійними. У той же час для вимірювань зручніше використовувати лінійні залежності між характерними параметрами [15]. З рис. 2.8 видно, що представлені залежності є практично лінійними у визначених діапазонах зміни діелектричної проникності матеріалу хвилевода, тобто фазової швидкості хвилі в ньому. Саме в цих діапазонах найзручніше виконувати вимірювання.

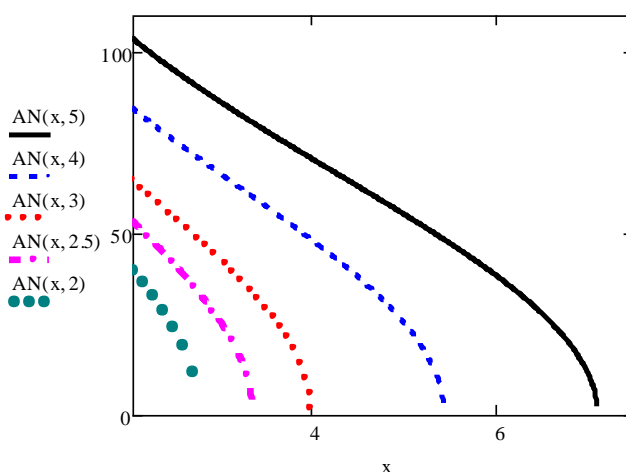


Рисунок 2.8 – Залежності кута дифракційного випромінювання від діелектричної проникності хвилевода для різних значень довжини хвилі випромінювання

Розглянемо розрахункову модель, яка зображена на рис. 2.1. Вхідну електромагнітну хвилю, з частотою 77 ГГц та потужністю 1 Вт, подають у діелектричний хвилевід прямокутного перетину, який має діелектричну проникність 2,3. Верхня решітка – діелектрична з проникністю 12 (кремній або арсенід галію), нижня ґратка – металева. Металева нижня решітка відбиває хвилю за межами хвилеводу. Застосування додаткової верхньої діелектричної решітки дозволяє регулювати напрям дифракційного випромінювання. Для

хвилеводу обрано параметри та розміри, що дозволяють реалізувати одномодовий режим його роботи. Період металевої гребінки складає 2,49 мм, а діелектричної решітки – 2 мм.

Були проведені числові розрахунки для різних співвідношень значень періодів верхньої решітки P_b та нижньої ґратки P .

На рис. 2.9 представлено просторовий розподіл напруженості магнітного поля в системі, та на рис. 2.10 – кутова діаграма потоку потужності дифракційного випромінювання. Коли періоди додаткової решітки та металевої гребінки співпадають, то дифракційне випромінювання спрямоване практично перпендикулярно до площини гребінки.

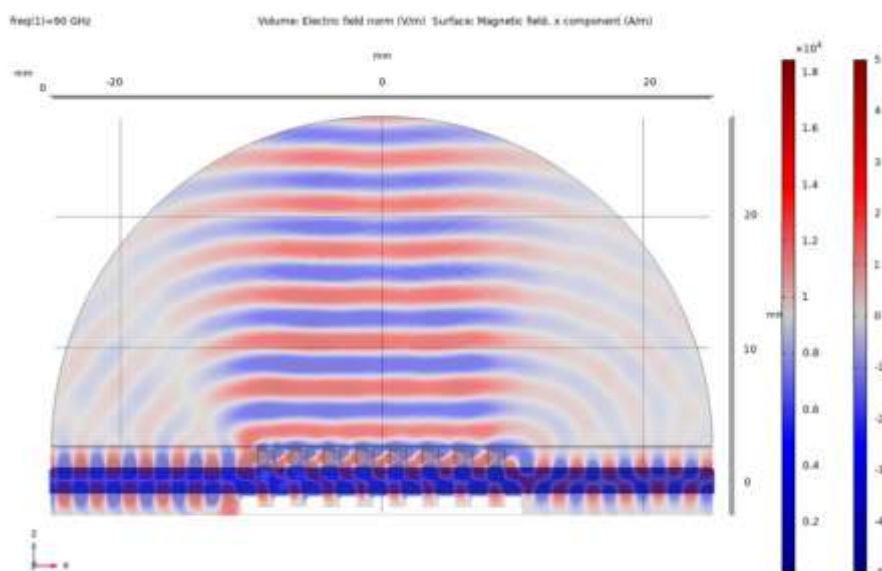


Рисунок 2.9 – Просторовий розподіл напруженості магнітного поля для випадку однакових періодів додаткової діелектричної решітки та металевої ґратки

З рисунку видно, що при проходженні хвилі через діелектричний хвилевід та розсіювання поля цієї хвилі на дифракційній ґратці виникає практично плоска хвиля. Ця хвиля поширюється від хвилеводу вгору. Нормаль до хвильового фронту цієї хвилі утворює певний кут (майже прямий) із

поздовжньою віссю хвилевода. Зрозуміло, що ця хвиля представляє дифракційне випромінювання.

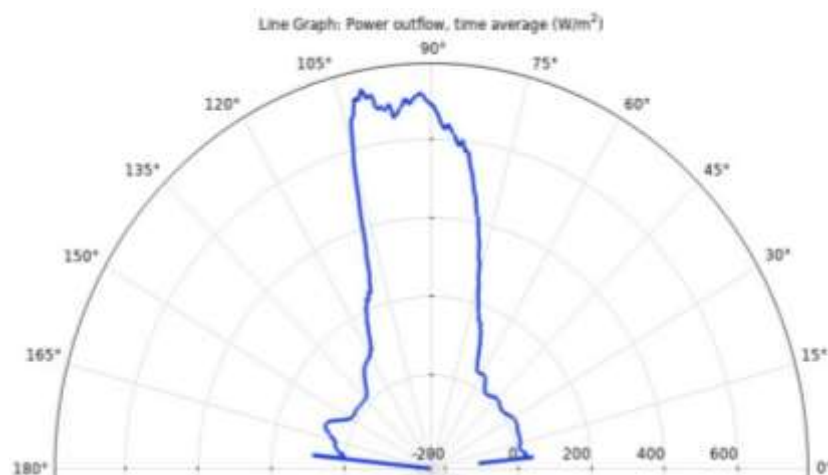


Рисунок 2.10 – Кутовий розподіл потоку потужності електромагнітного поля для випадку $P_b = P$

З рис. 2.9 та 2.10 також видно, що дифракційне випромінювання локалізоване в області простору над решітками і фактично представляє собою Гауссовий хвильовий пучок. Це добре відома та вивчена конфігурація формування дифракційного випромінювання, яка використовується в генераторних приладах.

Зміна періоду додаткової решітки призводить до суттєвих змін в кутовому розподілі потоку електромагнітної потужності. Це видно з рисунків 2.11 і 2.12, де показані результати розрахунків для випадку, коли періоди верхньої решітки P_b та нижньої гребінки P не співпадають ($P_b = 0,6P$).

В цьому випадку дифракційне випромінювання досить суттєво змінює свій напрямок. На рис. 2.12 видно, що кут випромінювання стає від'ємним. Поздовжня складова хвильового вектору цього випромінювання спрямована назустріч хвильовому вектору хвилі в діелектричному хвилеводі, тобто назустріч віртуальному електронному потоку. Крім того, фазовий фронт дифракційного випромінювання вже не є плоским. Слід відзначити, що

результати розрахунків свідчать про збільшення середнього потоку потужності у випадку, коли напрямок дифракційного випромінювання відхиляється від нормалі до поздовжньої осі діелектричного хвилевода.

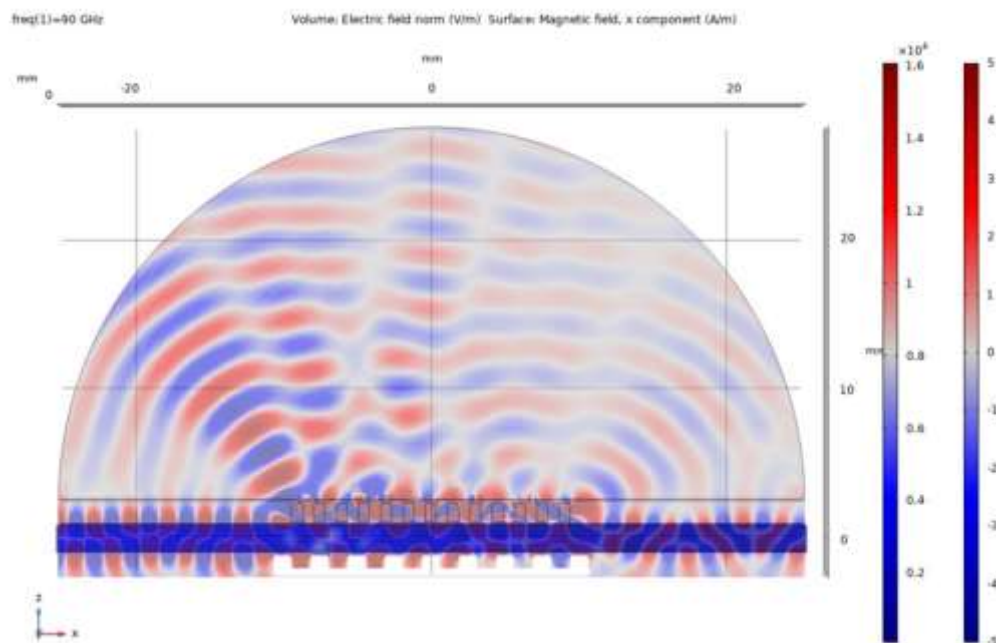


Рисунок 2.11 – Просторовий розподіл напруженості магнітного поля ($P_b = 0,6P$)

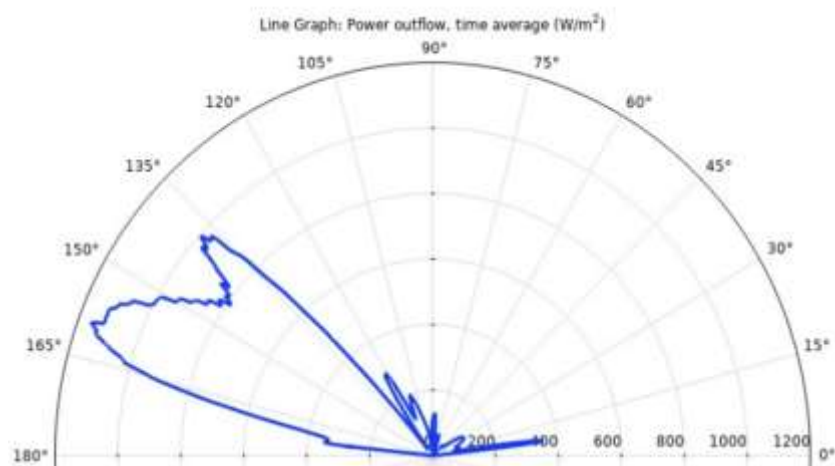


Рисунок 2.12 – Кутовий розподіл потоку потужності електромагнітного поля ($P_b = 0,6P$)

На рис. 2.13 та 2.14, показані результати розрахунків для випадку, коли період верхньої решітки P_b є більшим за період нижньої ґратки P ($P_b = 1,3P$).

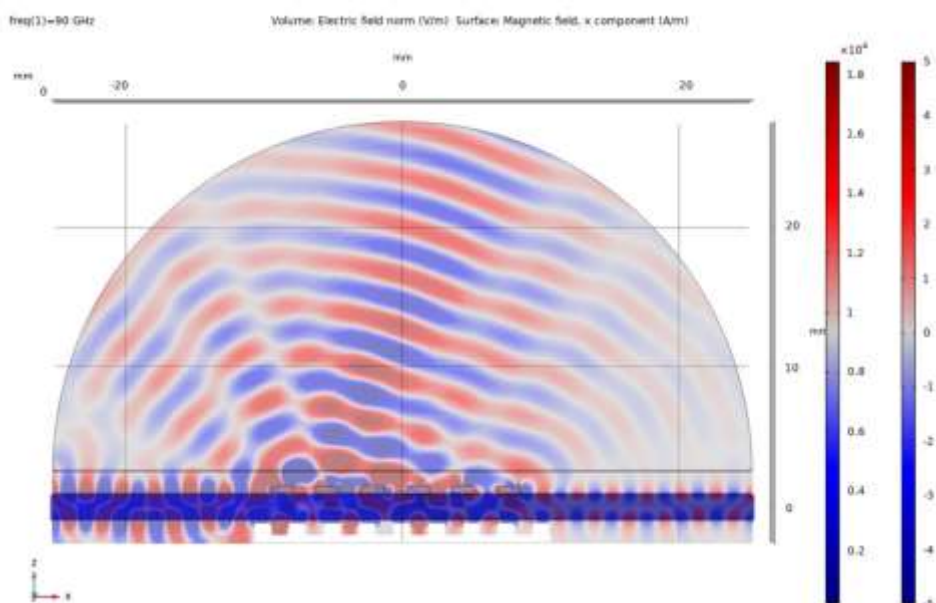


Рисунок 2.13 – Просторовий розподіл напруженості магнітного поля для випадку $P_b = 1,3P$

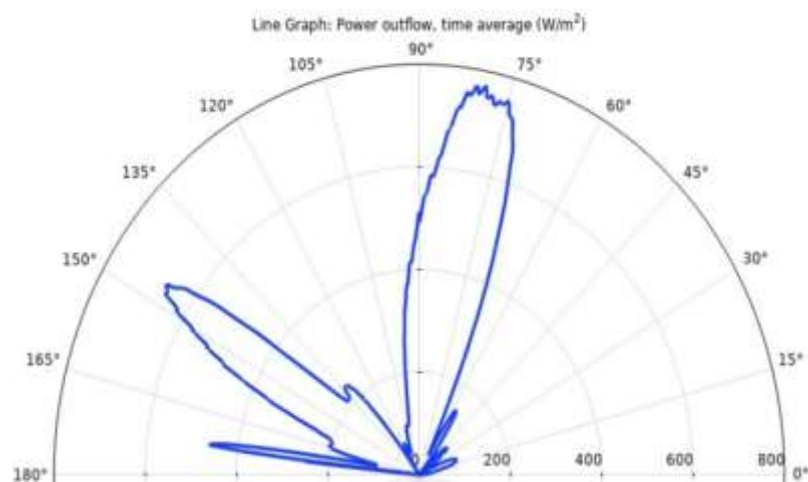


Рисунок 2.14 – Кутовий розподіл потоку потужності електромагнітного поля для випадку $P_b = 1,3P$

Цей випадок є більш складним, оскільки тут виникає кілька максимумів діаграми спрямованості дифракційного випромінювання. Цілком природньо, що кут випромінювання основної, більш потужної пелюстки на діаграмі спрямованості є додатним. Але поряд із цим виникає також випромінювання з від'ємним кутом.

Отже, можна припустити, що одна з цих пелюсток відповідає дифракційному випромінюванню в результаті розсіювання поля діелектричного хвилеводу на металевій відбивній ґратці, а інша відповідає одному з дифракційних порядків при розсіюванні дифракційного випромінювання на діелектричній решітці.

Слід звернути увагу на те, що з рис. 2.13 витікає, що поля в двох пелюстках випромінювання є протифазними. Отже, можна зробити висновок про відмінність фізичних процесів при формуванні розподілів поля для різних співвідношень між періодами діелектричної решітки та металевої відбивної ґратки.

Тому представляє інтерес розгляд характеристик дифракційного випромінювання для режиму, який є проміжним між тими, які розглянуті вище. На рис. 2.15 представлено просторовий розподіл магнітного поля для випадку, коли співвідношення між періодами діелектричної решітки та металевої ґратки є таким: $P_b = 0,8P$.

З рис. 2.15 видно, що у цьому випадку спостерігається ситуація, подібна до розглянутої раніше для рис. 2.13. Існує два максимуми випромінювання, поля в яких є протифазними. Це означає, що зміні співвідношення між періодами діелектричної решітки та металевої ґратки відбувається трансформація не тільки амплітудного розподілу поля в розрахунковій області, а й фазового.

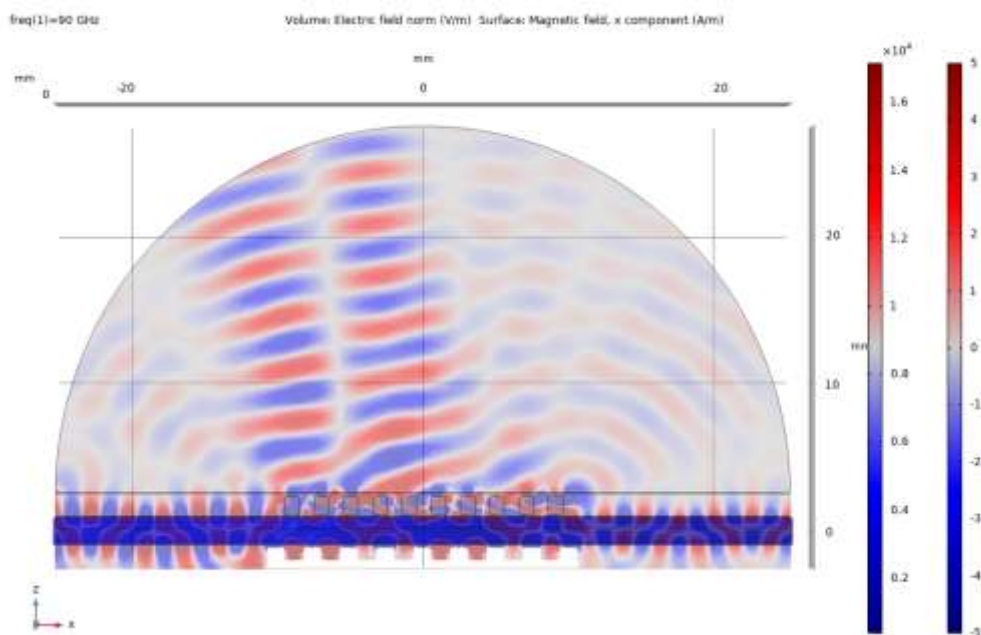


Рисунок 2.15 – Просторовий розподіл напруженості магнітного поля для випадку $P_b = 0,8P$

Слід зауважити, що на рис. 2.15 ми бачимо два практично паралельних пучка випромінювання, які формуються на різних ділянках періодичних структур. Видно, що вони започатковуються з одного пучка дифракційного випромінювання, який розповсюджується під від’ємним кутом до поздовжньої осі діелектричного хвилеводу. Після розсіювання на лівому кінці діелектричної решітки цей пучок розділяється на два, які до того ж отримують різні фазові зсуви.

На рис. 2.16 представлено результати розрахунків діаграми спрямованості випромінювання для випадку $P_b = 0,8P$. Як і передбачалося, в даній ситуації реалізуються дві пелюстки діаграми спрямованості, які відповідають різним кутам випромінювання. Кутова ширина цих максимумів діаграми спрямованості є досить невеликою, що узгоджується з просторовим розподілом поля, представленим на рис. 2.15. Видно, що розрахунки діаграми спрямованості забезпечують більш точне визначення кута розповсюдження дифракційного випромінювання порівняно із просторовим розподілом поля.

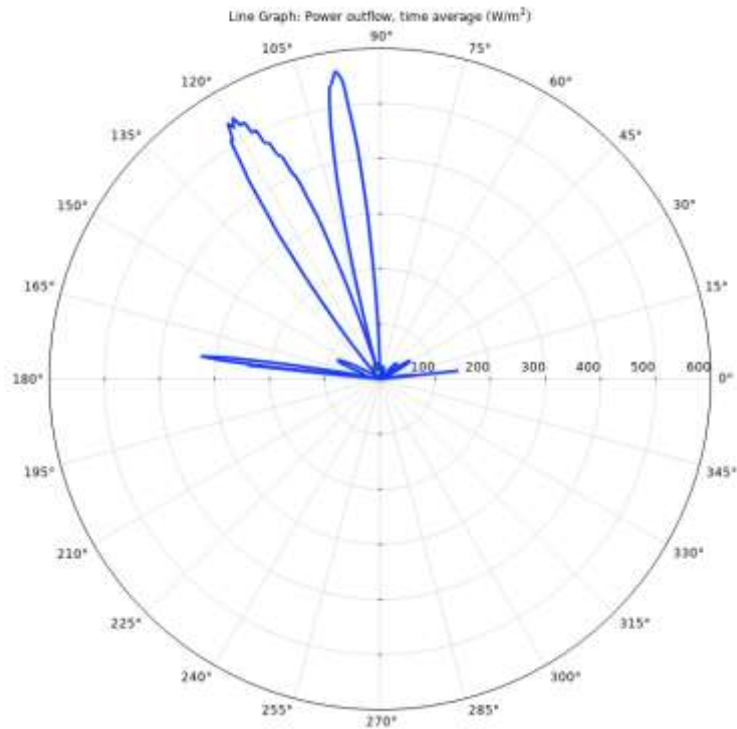


Рисунок 2.16 – Кутовий розподіл потоку потужності електромагнітного поля ($P_b = 0,8P$)

Слід також відзначити наявність додаткових максимумів випромінювання на рис. 2.16, які спрямовані під невеликими кутами до поздовжньої осі діелектричного хвилеводу. З одного боку, походження цих максимумів може бути фізичним і пов'язаним із розсіюванням поля діелектричного хвилеводу на системі з двох періодичних структур з різними періодами.

З іншого боку, ці результати можуть бути обумовлені похибками чисельних розрахунків електродинамічних характеристик системи. Тому це питання потребує подальшого розгляду.

ВИСНОВКИ

Виконано аналітичний огляд науково-технічної літератури, що стосується загальних аспектів діелектричних хвилеводів, їхніх видів і мод, а також дифракційних решіток та дифракційного випромінювання.

Детально розглянуто пакет мультифізичного комп'ютерного моделювання COMSOL Multiphysics, проведено дослідження основних принципів та алгоритмів побудови обчислювальних моделей у цьому програмному забезпеченні.

Проведено дослідження двовимірної моделі дифракційного випромінювання, де електронний потік представлений як діелектричний хвилевід. Для побудови моделі використано пакет COMSOL. На вхід системи подається електромагнітна хвиля, яка проходить через хвилевід. За межами хвилеводу хвиля розсіюється на відбивній металевій гребінці. Застосування додаткової верхньої діелектричної решітки дозволяє регулювати напрям дифракційного випромінювання.

Розраховані просторові розподіли напруженості магнітного поля та кутові діаграми потоку потужності дифракційного випромінювання для різних значень періоду додаткової діелектричної дифракційної решітки. При співпадінні періодів додаткової решітки та металевий гребінки спостерігається спрямоване практично перпендикулярно до площини гребінки дифракційне випромінювання. Зміна періоду додаткової решітки призводить до значних змін у кутовому розподілі потоку електромагнітної потужності. Таким чином, розглянута схема може використовуватися для керування просторовим розподілом дифракційного випромінювання в терагерцовому та субтерагерцовому діапазонах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Paschotta R. Terahertz Radiation // RP Photonics Encyclopedia 2006.
URL: https://www.rp-photonics.com/terahertz_radiation.html (дата звернення 18.09.2023).
2. Siemion A. Terahertz Diffractive Optics-Smart Control over Radiation // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2019. Vol. 40. P. 477–499.
URL: <https://doi.org/10.1007/s10762-019-00581-5> (дата звернення 20.09.2023).
3. Odarenko E. N., Shmat'ko A. A., Udintcev P. V. Physical nature of the Smith-Purcell effect and its simulation // 18th Int. Conf. Microwave & Telecommunication Technology. 2008, 08-12 Sept, Sevastopol, Ukraine, 2008. URL: <https://doi.org/10.1109/CRMICO.2008.4676349> (дата звернення 20.10.2023).
4. Odarenko, E. N., Shmat'ko A. A., Yudintcev P. V. Self-consistent theory of Smith-Purcell effect at harmonics of BWO frequency in the double-mode parametric oscillator // 20th Int. Conf. Microwave & Telecommunication Technology. 2010. 13-17 Sept, Sevastopol, Ukraine.
URL: <https://doi.org/10.1109/CRMICO.2010.5632599> (дата звернення 20.10.2023)
5. Development of Spintronic Antennas for Terahertz Emission Enhancement.
URL: https://www.dlr.de/pf/en/desktopdefault.aspx/tabid-833/1333_read-2400/ (дата звернення 20.10. 2023)
6. Terahertz Properties Between microwaves & infrared. URL: <https://www.toptica.com/technology/technical-tutorials/terahertz/terahertz-properties> (дата звернення 02.10.2023).
7. Siemion A. Terahertz Diffractive Optics–Smart Control over Radiation // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. Poland, Warsaw. 2019. Vol. 40. P. 477–499.
8. Siemion A. The Magic of Optics–An Overview of Recent Advanced Terahertz Diffractive Optical Elements // *Sensors*. 2021. Vol. 21, No 1. P. 100 URL: <https://doi.org/10.3390/s21010100> (дата звернення 02.10.2023).

9. What Are the Types of Diffraction Gratings? // Wasatch Photonics. URL: <https://wasatchphotonics.com/technologies/types-diffraction-gratings/> (дата звернення 15.11.2023)
10. Sautbekov S., Sirenko K., Sirenko Y. Diffraction Radiation Phenomena: Physical Analysis and Applications // Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics. 2016. P. 387–442.
11. Оптика спектральних апаратів. Дифракційна решетка. URL: <https://ukrintech.com.ua/spektralnyj-analiz-v-nerazrushayushchem-kontrole/120-glava-4-optika-spektralnykh-apparatov/432-glava-4-optika-spektralnykh-apparatov-glava-4-2-difraktsionnaya-reshetka> (дата звернення 18.12.2023).
12. Sergeeva D.Y., Potylitsyn A.P., Tishchenko A.A., Strikhanov M. N. Smith-Purcell radiation from periodic beams. Issue 21 // Optics Express. 2017. Vol. 25. P. 26310–26329.
13. comsol.ru. Посібник з програмного забезпечення для мультифізичного моделювання. URL: <https://www.comsol.ru/> (дата звернення: 24.09.2023).
14. Sashkova Y.V., Odarenko E.N., Shmat'ko A.A., Shevchenko N.G. Analysis of Slow Wave Modes in Modified Photonic Crystal Waveguides Using the MPB Package // IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. 2018, July 2–5 Kyiv, Ukraine. P. 164–167.
15. Shmat'ko A.A., Kazanko A.V., Mizernik V.N., Odarenko E.N. Surface Plasmon Polariton Resonances of Diffraction Metamaterial Grating // 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. September 4–7, Odessa. 2018. Ukraine. P. 190–193.
16. Методичні рекомендації та вимоги щодо оформлення пояснювальної записки атестаційної роботи магістрантів денної форми навчання спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» спеціалізацій «Лазерна і оптоелектронна техніка» та «Фотоніка та оптоінформатика» / Упоряд.: Гнатенко О.С, Крючков А.І., Чернишова Н.М. Харків: ХНУРЕ, 2017. 48 с.