

О.О. Гаврилюк, О.Ю. Семчук

## МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ СПЕКТРІВ ПЕРІОДИЧНИХ СТРУКТУР ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ РІЗНИЦЬ В ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ

Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка Національної академії наук України  
вул. Генерала Наумова, 17, Київ, 03164, Україна, E-mail: gavrylyuk.oleksandr@gmail.com

Метою даної статті є представлення теоретичних розрахунків оптичних спектрів періодичних кремнієвих наноструктур в залежності від їх довжини. Для проведення розрахунків моделювалась структура з кремнієвими нанонитками зі сталими діаметром та періодом. Діаметр нанониток складає 80 нм, а період структури 100 нм. При цьому досліджувалась залежність спектрів поглинання, відбиття і пропускання в залежності від довжини нанониток (500–5000 нм). Для проведення теоретичних досліджень розв'язувались рівняння Максвелла методом скінчених різниць у часовій області (FDTD). Цей метод може бути точно застосований до загальних електромагнітних структур, включаючи частинки довільної форми. Перевагою цього методу є простота і можливість отримати результати для широкого спектра довжин хвиль за один розрахунок, а також можливість задавати властивості матеріалів в будь-якій точці розрахункової сітки, що дозволяє розглядати анізотропні, дисперсні і нелінійні середовища. В той же час метод FDTD може бути дуже ресурсовитратним, особливо при моделюванні складних структур. Цей метод потребує від 10 до 30 точок на довжину хвилі, а малі довжини хвиль світла визначають дуже густу частоту дискретизації. Це призводить до громіздких розрахунків, особливо в трьох вимірах. Для спрощення розрахунків розв'язки шукались у двовимірному наближенні. Показано, що при даних параметрах структури коефіцієнт відбиття не залежить від довжини нанониток, хоча на 30 % менший, ніж в суцільній кремнієвій пластині. Коефіцієнт пропускання зі збільшенням довжини нанониток зменшується, хоча для всіх розрахованих довжин хвиль залишається вищим, ніж в кремнієвій пластині. При цьому показано, що у видимій області спектра коефіцієнт поглинання суттєво вищий і зі збільшенням довжини нанониток спостерігається розширення спектрів поглинання, що вказує на збільшення діапазону поглинання сонячного світла. Показано, що використання кремнієвих наноструктур як сонячні елементи є актуальним і перспективним напрямком досліджень.

**Ключові слова:** нанонитки, сонячні елементи, метод FDTD, оптичні спектри

### ВСТУП

На сьогоднішній день сонячна енергетика – це перспективний напрямок досліджень. Незважаючи на великі досягнення, зниження витрат і підвищення ефективності роботи сонячних елементів завжди будуть двома великими завданнями в цій галузі.

Використання ультратонких плівок c-Si завтовшки в кілька мікрон може знизити вартість сонячного модуля. Однак виникає проблема, що супроводжується зменшенням товщини. Вона полягає в недостатньому поглинанні спектра сонячного випромінювання в ближній інфрачервоній області. Таким чином, широке впровадження ультратонкого c-Si для майбутніх сонячних елементів в першу чергу залежить від нових методів поліпшення поглинання світла [1]. Для підвищення ефективності поглинання

сонячного випромінювання почали широко досліджуватись сонячні елементи з різними наноструктурами на поверхні підкладки. Такими наноструктурами можуть бути масиви нанониток.

Посилення поглинання світла можна віднести до трьох основних механізмів. По-перше, структура масиву з нанониток має надзвичайно малий коефіцієнт відбивання завдяки великій відкритій ділянці на фронтальній поверхні. По-друге, кожна окрема нанонитка є нанорозмірним циліндричним резонатором, який може вловлювати світло шляхом багатократного внутрішнього відбивання. По-третє, сильне розсіювання світла між нанонитками викликає подальше захоплення світла, оскільки діаметр і період масивів нанониток зазвичай мають порядок, співрозмірний з

оптичною довжиною хвилі. Ці механізми досить чутливі до структурних параметрів масиву нанониток [2].

Для знаходження оптимальних форм, розмірів і інших параметрів масивів наноструктур потрібно провести безліч експериментальних досліджень, що викличе багато труднощів. Тому, для оптимізації дослідної роботи, на першому етапі доцільно використовувати теоретичні розрахунки, які потім можна перевірити експериментально. Інструментом для таких досліджень є метод скінченних різниць в часовій області (FDTD), за допомогою якого можна розв'язати рівняння Максвелла і отримати оптичні спектри досліджуваних структур.

Метод FDTD – це потужний чисельний алгоритм для безпосереднього розв'язання рівнянь Максвелла. Перевагою цього методу є простота і можливість отримати результати для широкого спектра довжин хвиль за один розрахунок, а також можливість задавати властивості матеріалів в будь якій точці розрахункової сітки, що дозволяє розглядати анізотропні, дисперсні і нелінійні середовища. Цей метод може бути точно застосований до загальних електромагнітних структур, включаючи частинки довільної форми [3, 4]. В той же час метод FDTD може бути дуже ресурсовитратним, особливо при моделюванні складних структур. Цей метод потребує від 10 до 30 точок на довжину хвилі, а малі довжини хвиль світла визначають дуже густу частоту дискретизації. Це призводить до громіздких розрахунків, особливо в трьох вимірах. Тому в наших розрахунках ми використовуватимемо два виміри.

Метою цієї статті є представлення теоретичних розрахунків оптичних спектрів періодичних структур з нанониток в залежності від їх довжини при сталих діаметрі і періоді структури.

### ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Реалізація методу FDTD є дискретною як в просторі, так і в часі. Крок часу вибирається для забезпечення числової стійкості і пов'язаний з розміром сітки [5]. Представлені структури описуються на дискретній сітці, що складається з Yee комірок (рис. 1), а рівняння Максвелла розв'язується дискретно за часом на цій сітці. Сітки електричного і

магнітного полів зміщені по відношенню один до одного на половину кроку дискретизації по кожній з просторових змінних і за часом. В результаті вузли, які відповідають компонентам  $E$ , розташовані таким чином, що кожен з них оточений чотирма компонентами  $H$ , і навпаки. Для розрахунку значень  $E$  на часовому кроці  $n+1/2$  використовуються значення  $H$  на кроці  $n$ . Аналогічним чином значення  $H$  на кроці  $n+1$  розраховуються з використанням значень  $E$  на кроці  $n+1/2$ . Так послідовно розраховуються значення всіх полів. Таким чином скінченно-різницеві рівняння дозволяють визначити електричні і магнітні поля на даному часовому кроці на підставі відомих значень полів на попередньому, і при заданих початкових умовах обчислювальна процедура дає рішення в часі від початку відліку з заданим часовим кроком.

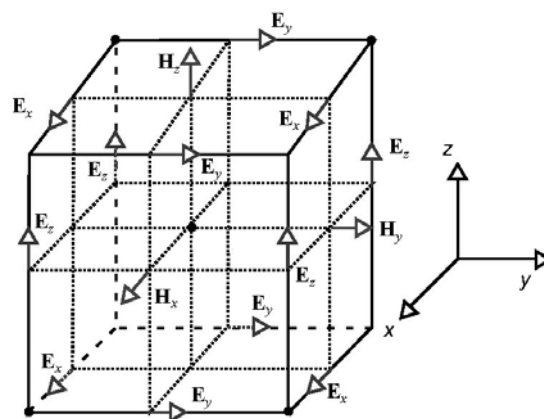


Рис. 1. Комірка Yee

Будь-яка зміна поля  $E$  в часі пов'язана з будь-якою зміною поля  $H$  через простір і навпаки, що є основою реалізації методу FDTD. Цей метод є повністю векторний, що дає інформацію про часову і частотну області, використовуючи перетворення Фур'є, тобто коли широкосмуговий імпульс використовується як джерело, відгук системи на широкий діапазон довжин хвиль може бути отриманий за один прохід, так що багато величин можуть бути отримані подібно комплексному вектору Пойнтінга або коефіцієнту пропускання / відбивання світла.

Для розрахунків оптичних спектрів використаємо наступні рівняння Максвелла [6]:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} (\nabla \times \vec{H}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{E}), \quad (2)$$

де  $E$  і  $H$  – електричні і магнітні поля, відповідно,  $\mu$  – магнітна проникність середовища,  $\varepsilon$  – діелектрична проникність середовища.

Алгоритм розрахунків даних рівнянь методом FDTD полягає в наступному:

1. Визначення розрахункової області, сітки і граничних умов;
2. В розрахунковій області задаються матеріальні тіла, які складають структуру, що нас цікавить;
3. Визначення джерела випромінювання;
4. Визначення «детектора», що відслідковує зміни полів в потрібних точках;
5. Джерело генерує електромагнітну хвилю потрібного діапазону, хвиля падає на тіла і розсіюється на них. Історія поширення хвилі фіксується детекторами.

Для усунення нефізичного перевідбивання електромагнітної хвилі від межі обчислювальної області і моделювання таким чином виходу хвилі на нескінченність в FDTD методі повинні використовуватися особливі поглинаючі граничні умови. В даний час найбільш успішною реалізацією цих умов є розміщення уздовж межі обчислювальної області тонкого шару спеціального матеріалу, так званого ідеально узгодженого шару (Perfectly Matched Layer – PML). Цей матеріал в ідеалі повністю поглинає всі падаючі на нього хвилі без будь-якого відбивання незалежно від кута падіння і довжини хвилі. PML – це просто область, що має анізотропні і комплексно-значні діелектричну та магнітну проникності. Хоча PML-шари чисто теоретичні і є невідбиваючими, але, тим не менш, вони виявляють деякі відбиваючі властивості через помилки при чисельній дискретизації задачі: сітки розбиття. Щоб мінімізувати це відображення, необхідно застосовувати таке розбиття PML, яке враховує анізотропію властивостей матеріалу.

Робота такого шару ґрунтується на необхідності розділення вихідних полів  $E$  і  $H$  на дві компоненти, для кожної з яких повинні вирішуватися свої рівняння. Згодом були

запропоновані вдосконалені формулювання PML, еквівалентні первісному формулюванню Жаном Беренженом. Так, в одновісному PML (Uniaxial PML) використовується анізотропний поглинаючий матеріал, що дозволяє не вводити додаткові змінні і залишитися в рамках вихідних рівнянь Максвелла [7]. Однак одновісний PML, як і PML в формулюванні Беренже, незручні тим, що в них відсутнє поглинання згасаючих хвиль, що не дозволяє поміщати PML близько до розсіюючого тіла. Цього недоліку позбавлений оборотний PML (Convolutional PML), заснований на аналітичному продовженні рівнянь Максвелла в комплексну площину таким чином, що їх рішення експоненціально загасає [8]. CPML також зручніший в обмеженні нескінченних провідників і дисперсних середовищ. Крім цього, математичне формулювання CPML має більшу наочність і доступність для розуміння.

До вертикальних областей розрахункової області нами були застосовані граничні умови типу Блоха. Граничні умови типу Блоха дуже схожі до періодичних граничних умов, які копіюють поля на одній межі області моделювання і повторно використовують їх на іншій межі. Але граничні умови Блоха під час копіювання таких полів застосовують фазову корекцію, що дає можливість більш точного моделювання поставленої задачі.

За теоремою Блоха, для періодичної структури компоненти поля мають наступні властивості:

$$\vec{\Psi}(\vec{r} + \vec{R}, t) = \Psi(\vec{r}, t) e^{i\vec{k}\vec{r}}, \quad (3)$$

де  $\vec{R}$  – вектор ґратки,  $\vec{k}$  – хвильовий вектор.

Для даного випадку, поле всередині періодичної структури приймає таку ж симетрію та періодичність, як і сама структура:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{A}(\vec{r}) e^{i\vec{k}\vec{r}}, \quad (4)$$

де  $\vec{E}(\vec{r})$  – загальне поле,  $\vec{A}(\vec{r})$  – огибаюча амплітуда з такою ж періодичністю і симетрією, що і сама структура.

Для структури, що має періодичність по координаті  $x$  з періодом  $P_x$ , теорема Блоха може бути переписана наступним чином:

$$\vec{E}(x \pm P_x) = \vec{E}(x) e^{\pm i\beta_x P_x} \quad (5)$$

Як джерело випромінювання була використана плоска хвиля. Джерела плоских хвиль використовуються для подачі поперечно-однорідної електромагнітної енергії з одного боку області джерела. В двовимірному моделюванні джерело плоских хвиль задається вздовж лінії. В наших розрахунках використовувався діапазон довжин хвиль 300–1240 нм.

На рис. 2 зображено схему, яка використовувалась для проведення теоретичних розрахунків ( $d$  – діаметр наноніток,  $l$  – висота наноніток,  $P$  – період наноструктури), а на рис. 3 представлено SEM зображення таких структур.

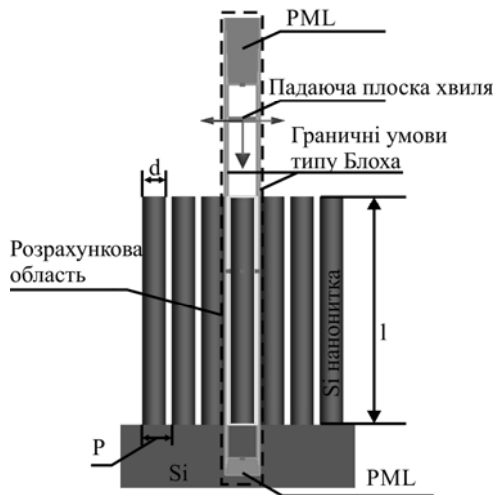


Рис. 2. Розрахункова модель періодичних наноструктур

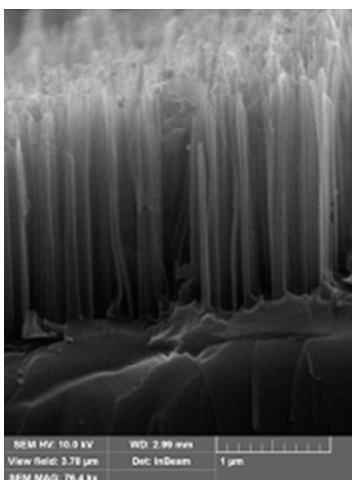


Рис. 3. SEM зображення кремнієвих наноніток [9]

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Розглянемо розраховані оптичні спектри для періодичних наноструктур з кремнієвими нанонітками в залежності від їх довжини (рис. 4–6). Відбивання від суцільної кремнієвої пластинки складає ~30% і починає зростати при наближенні до прямого міжзонного переходу (3.4 eV), якому відповідають піки 280 і 370 нм (рис. 4). Як видно з рисунка, в наноструктурах ці два піки також проявляються, але вони зсуваються у довгохвильову область. При сталих діаметрі і періоді не спостерігається суттєвих відмінностей в величині коефіцієнта відбиття при зміні довжини наноніток. При цьому слід зауважити, що інтенсивність відбиття періодичною структурою значно менша, ніж в кремнієвій пластині, на всьому діапазоні розрахованих довжин хвиль (рис. 4).

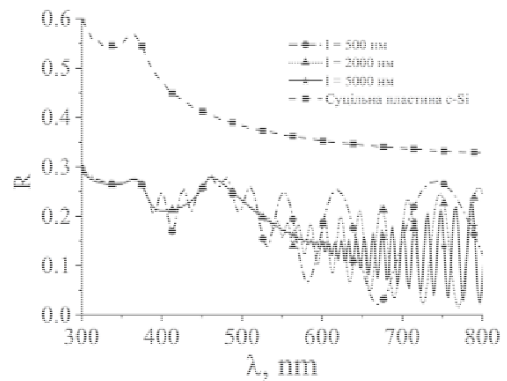


Рис. 4. Спектри відбивання для кремнієвих наноніток різної довжини  $l$  з діаметром  $d = 80$  нм і періодом  $P = 100$  нм

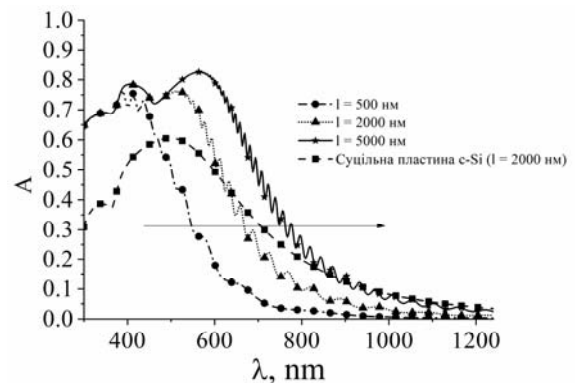


Рис. 5. Спектри поглинання для кремнієвих наноніток різної довжини  $l$  з діаметром  $d = 80$  нм і періодом  $P = 100$  нм

Велика площа кремнієвих нанониток призводить до багаторазового розсіювання сонячного світла між нанонитками, що також збільшує коефіцієнт поглинання (рис. 5). Як бачимо (рис. 5), структури з нанонитками набагато краще за суцільні кремнієві пластини поглинають хвилі видимого спектра, але так само погано поглинається інфрачервоне випромінювання. В області низьких енергій довжина світлової хвилі набагато більша за період наноструктур, тому випромінювання може легко проникати крізь кремнієві наноструктури і взаємодіяти з кремнієвою підкладкою. В області високих енергій, коли довжина хвилі стає близька до періоду наноструктур, поглинання світла буде посилено через сильний ефект розсіювання, що збільшує довжину оптичного шляху [10–12]. Зі збільшенням довжини нанониток збільшується коефіцієнт поглинання і розширюється діапазон хвиль, які ефективніше поглинаються.

Нанонитки можуть демонструвати посилене поглинання за рахунок резонансної передачі енергії з квантових точок, розташованих поблизу поверхні напівпровідника. Через більшу площу поверхні, в порівнянні з плоскими зразками, цей перенос енергії може суттєво вплинути на поглинання [13].

Для фотонів з енергією, яка близька до ширини забороненої зони, поглинання суттєво зменшується для всіх типів наноструктур через те, що кремній має непрямозонну заборонену зону, а оптичне поглинання потребує фонованого доповнення [14]. Зі зменшенням довжини хвилі поглинання в структурі збільшується і досягає свого максимуму в діапазоні довжин хвиль 400–700 нм, що суттєво вище (70–85 %), ніж в кремнієвій пластинці (50–60 %).

Більший коефіцієнт пропускання нанониток (рис. 6) не компенсується низьким коефіцієнтом відбиття, що призводить до недостатнього поглинання низькоенергетичних фотонів. І навпаки, практично нульовий коефіцієнт пропускання в високоенергетичній області і низький коефіцієнт відбиття сприяє підвищенню коефіцієнта поглинання високоенергетичних фотонів.

З рис. 6 видно, що зі збільшенням висоти нанониток коефіцієнт пропускання зменшується, хоча залишається вищим, ніж у суцільній структурі.

При довжинах хвиль понад 500 нм на спектрах спостерігаються резонанси Фабрі-Перо. Умова резонансу Фабрі-Перо полягає в тому, що моди Блоха не змінюються після циркуляції відбиття між нитками. На більш коротких довжинах хвиль ми бачимо зменшення резонансів. Це можна пояснити збільшенням поглинання об'ємним кремнієм, який гасить резонанси, але забезпечує, що все світло, яке надходить в масив, поглинається в один прохід [15].

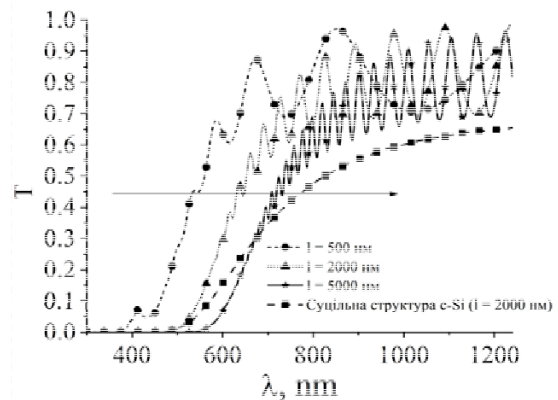


Рис. 6. Спектри пропускання для кремнієвих нанониток різної довжини  $l$  з діаметром  $d = 80$  нм і періодом  $P = 100$  нм

Підвищення поглинання, яке спостерігається в короткохвильовій області, може відбуватись через антивідбиваючий ефект. У довгохвильовій області спектра спостерігаються піки поглинання зі складною нерегулярною формою. Підвищення поглинання в даному діапазоні довжин хвиль можна очікувати від дифракційного захоплення падаючого світла та резонансними модами, що відносяться до масиву нанониток [16].

Інтерференційні ефекти можна також пояснити збільшенням концентрації поля всередині нанониток і збудженням хвильових резонансних мод.

## ВИСНОВКИ

Теоретичні дослідження показали, що в напівпровідникових наноструктурах в умовах розсіювання світла можуть зростати поглинання світла і ефективність фотогенерації носіїв заряду, що може бути використано для підвищення ефективності сонячних елементів. Було проведено порівняння різних

напівпровідникових нанониток і показано, що світло краще поглинається періодичними наноструктурами, ніж суцільними

кремнієвими пластинками. При цьому геометричні розміри наноструктур суттєво впливають на оптичні спектри.

## Modeling optical spectra of periodic structures using the finite-difference time domain method

O.O. Havryliuk, O.Yu. Semchuk

*Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine  
17 General Naumov Str., Kyiv, 03164, Ukraine, gavrylyuk.oleksandr@gmail.com*

*The purpose of this article is to present theoretical calculations of the optical spectra of periodic silicon nanostructures dependent on their length. For calculations, the structure with silicon nanowires with a constant diameter and period was simulated. The diameter of the nanowires is 80 nm, and the structure period is 100 nm. The dependence of absorption, reflection and transmission spectra on the length of nanowires (500–5000 nm) was investigated. For theoretical studies, the Maxwell equation was solved by the finite difference method in the time domain (FDTD). This method can be applied precisely to general electromagnetic structures, including free-form particles. The advantage of this method is the simplicity and the capability to obtain results for a wide range of wavelengths in single calculation, as well as the capability to specify the properties of materials at any point of the calculation grid, which allows us to consider anisotropic, dispersive and nonlinear environments. At the same time, the FDTD method can be very resource-intensive, especially when simulating complex structures. This method requires from 10 to 30 points per wavelength, and small wavelengths determine the very high sampling frequency. This leads to cumbersome calculations, especially in three dimensions. To simplify calculations, the problem was carried out in two-dimensional form. It is shown that for these parameters of the structure, the reflection coefficient does not depend on the length of the nanowires, although by 30 % it is smaller than that in the solid silicon plate. The transmission coefficient decreases with the increase in the length of the nanowires, although at all calculated wavelengths it remains higher than that in the silicon wafer. It is shown that in the visible region of the spectrum, the absorption coefficient is significantly higher and with the increase of the length of nanowires, an expansion of absorption spectra is observed, indicating an increase in the absorption range of sunlight. It is shown that the use of silicon nanostructures as solar cells is an important and perspective direction of research.*

**Keywords:** nanowires, solar cells, FDTD method, optical spectra

## Моделирование оптических спектров периодических структур с помощью метода конечных разностей во временной области

А.А. Гаврилюк, А.Ю. Семчук

*Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко Национальной академии наук Украины  
ул. Генерала Наумова, 17, Киев, 03164, Украина, gavrylyuk.oleksandr@gmail.com*

*Целью данной статьи является представление теоретических расчетов оптических спектров периодических кремниевых наноструктур в зависимости от их длины. Для проведения расчетов моделировалась структура с кремниевыми нанонитями с постоянными диаметром и периодом. Диаметр нанонитей составляет 80 нм, а период структуры 100 нм. При этом исследовалась зависимость спектров поглощения, отражения и пропускания в зависимости от длины нанонитей (500–5000 нм). Для проведения теоретических исследований решались уравнения Максвелла методом конечных разностей во временной области (FDTD). Этот метод может быть точно применен к общим электромагнитным структурам, включая частицы произвольной формы. Преимуществом этого метода является простота и возможность получить результаты для широкого спектра длин волн за один расчет, а также возможность задавать*

свойства материалов в любой точке расчетной сетки, что позволяет рассматривать анизотропные, дисперсные и нелинейные среды. В то же время, метод FDTD может быть очень ресурсозатратным, особенно при моделировании сложных структур. Этот метод требует от 10 до 30 точек на длину волны, а малые длины волн света определяют очень густую частоту дискретизации. Это приводит к громоздким расчетам, особенно в трех измерениях. Для упрощения расчетов исследования проводились в двумерном виде. Показано, что при данных параметрах структуры коэффициент отражения не зависит от длины нанонитей, хотя на 30 % меньше, чем в сплошной кремниевой пластине. Коэффициент пропускания с увеличением длины нанонитей уменьшается, хотя для всех рассчитанных длин волн остается выше, чем для кремниевых пластин. При этом показано, что в видимой области спектра коэффициент поглощения существенно выше и с увеличением длины нанонитей наблюдается расширение спектров поглощения, что указывает на увеличение диапазона поглощения солнечного света. Показано, что использование кремниевых наноструктур в качестве солнечных элементов является актуальным перспективным направлением исследований.

**Ключевые слова:** нанонити, солнечные элементы, метод FDTD, оптические спектры

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Hongzhe W., Zixu S., Weiqiang H. et al. Efficient light trapping in low aspect-ratio honeycomb nanobowl surface texturing for crystalline silicon solar cell applications // *Appl. Phys. Lett.* – 2013. – V. 103, N 25. – P. 153105.
2. Hua B., Xiulin R. Optical absorption enhancement in disordered vertical silicon nanowire arrays for photovoltaic applications // *Opt. Lett.* – 2010. – V. 35, N 20. – P. 3378–3380.
3. Wenbo S., Qiang F., Zhizhang C. Finite-difference time-domain solution of light scattering by dielectric particles with a perfectly matched layer absorbing boundary condition // *Appl. Opt.* – 1999. – V. 38, N 15. – P. 3141–3151.
4. Sullivan D., Liu J., Kuzyk M. Three-dimensional optical pulse simulation using the FDTD method // *IEEE transactions on microwave theory and techniques.* – 2000. – V. 48, N 7. – P. 1127–1133.
5. Taflove A., Hagness S.C. *Computational Electrodynamics: the finite-difference time-domain method* 2nd ed. – Boston, Ma: Artech House, 2000. – 866 p.
6. Hirigoyen F., Crocherie A., Vaillant J., Cazaux Y. FDTD-based optical simulations methodology for CMOS image sensor pixels architecture and process optimization // *SPIE-IS&T.* – 2008. – V. 6816. – P. 681609-1.
7. Боголюбов А.Н., Белокопытов Г.В., Домбровская Ж.О. Моделирование спектральных зависимостей для двумерных фотонно-кристаллических волноводных систем // *ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия.* – 2013. – № 5. – С. 8–13.
8. Deinega A., Valuev I. Long-time behavior of PML absorbing boundaries for layered periodic structures // *Computer Physics Communications.* – 2011. – V. 182, N 1. – P. 149–151.
9. Pylypova O.V., Evtukh A.A., Parfenyuk P.V. et al. Influence of Si nanowires on solar cell properties: effect of the temperature // *Appl. Phys. A.* – 2018. – V. 124, N 11. – P. 773.
10. Li J., Yu H.Yu., Wong S.M. et al. Si nanopillar array optimization on Si thin films for solar energy harvesting // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – V. 95, N 3. – P. 033102.
11. Li J., Wong S.M., Li Y., Yu H.Yu. High-efficiency crystalline Si thin film solar cells with Si nanopillar array textured surfaces // *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference.* – 2010. – <https://doi.org/10.1109/PVSC.2010.5614445>.
12. Li J., Yu H. Yu., Li Y. et al. Low aspect-ratio hemispherical nanopit surface texturing for enhancing light absorption in crystalline Si thin film-based solar cells // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – V. 98, N 2. – P. 021905.
13. Garnett E.C., Brongersma M.L., Cui Y., McGehee M.D. Nanowire Solar Cells // *Annu. Rev. Mater. Res.* – 2011. – V. 41. – P. 269–295.
14. Hu L., Chen G. Analysis of optical absorption in silicon nanowire arrays for photovoltaic applications // *Nano Lett.* – 2007. – V. 7, N 11. – P. 3249–3252.
15. Avakyants L.P., Bokov P.Yu., Cheryakov A.V. et al. Interference effects in the electroreflectance and electroluminescence spectra of InGaN/AlGaIn/GaN light-emitting-diode heterostructures // *Semiconductors.* – 2010. – V. 44, N 8. – P. 1090–1095.

16. Sturmberg B.C.P., Dossou K.B., Botten L.C. et al. Modal analysis of enhanced absorption in silicon nanowire arrays // *Opt. Express*. – 2011. – V. 19, N S5. – P. A1067.

#### REFERENCES

1. Hongzhe W., Zixu S., Weiqiang H., Junshuai L., Jichun Ye. Efficient light trapping in low aspect-ratio honeycomb nanobowl surface texturing for crystalline silicon solar cell applications. *Appl. Phys. Lett.* 2013. **103**(25): 153105.
2. Hua B., Xiulin R. Optical absorption enhancement in disordered vertical silicon nanowire arrays for photovoltaic applications. *Opt. Lett.* 2010. **35**(20): 3378.
3. Wenbo S., Qiang F., Zhizhang C. Finite-difference time-domain solution of light scattering by dielectric particles with a perfectly matched layer absorbing boundary condition. *Appl. Optics*. 1999. **38**(15): 3141.
4. Sullivan D., Liu J., Kuzyk M. Three-dimensional optical pulse simulation using the FDTD method. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*. 2000. **48**(7): 1127.
5. Taflove A., Hagness S.C. *Computational Electrodynamics: the finite-difference time-domain method*. 2nd ed. (Boston, Ma: Artech House, 2000).
6. Hirigoyen F., Crocherie A., Vaillant J., Cazaux Y. FDTD-based optical simulations methodology for CMOS image sensor pixels architecture and process optimization. *SPIE-IS&T*. 2008. **6816**: 681609-1.
7. Bogolubov A.N., Belokopytov G.V., Dombrovskaya Z.O. Modelling of spectral dependencies for 2D photonic crystal waveguide systems. *Moscow University Physics Bulletin*. 2013. **5**: 8. [in Russian].
8. Deinega A., Valuev I. Long-time behavior of PML absorbing boundaries for layered periodic structures. *Computer Physics Communications*. 2011. **182**(1): 149.
9. Pylypova O.V., Evtukh A.A., Parfenyuk P.V., Korobchuk I.M., Havryliuk O.O., Semchuk O.Yu. Influence of Si nanowires on solar cell properties: effect of the temperature. *Appl. Phys. A*. 2018. **124**(11): 773.
10. Li J., Yu H.Yu., Wong S.M., Zhang G., Sun X., Lo P.G.Q., Kwong D.L. Si nanopillar array optimization on Si thin films for solar energy harvesting. *Appl. Phys. Lett.* 2009. **95**(3): 033102.
11. Li J., Wong S.M., Li Y., Yu H.Yu. High-efficiency crystalline Si thin film solar cells with Si nanopillar array textured surfaces. In: *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 2010. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2010.5614445>.
12. Li J., Yu H. Yu., Li Y., Wang F., Yang M., Wong S.M. Low aspect-ratio hemispherical nanopit surface texturing for enhancing light absorption in crystalline Si thin film-based solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 2011. **98**(2): 021905.
13. Garnett E.C., Brongersma M.L., Cui Y., McGehee M.D. Nanowire Solar Cells. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2011. **41**: 269.
14. Hu L., Chen G. Analysis of optical absorption in silicon nanowire arrays for photovoltaic applications. *Nano Lett.* 2007. **7**(11): 3249.
15. Avakyants L.P., Bokov P.Yu., Chervyakov A.V., Chuyas A.V., Yunovich A.E., Vasileva E.D., Bauman D.A., Uelin V.V., Yavich B.S. Interference effects in the electroreflectance and electroluminescence spectra of InGaN/AlGaIn/GaN light-emitting-diode heterostructures. *Semiconductors*. 2010. **44**(8): 1090.
16. Sturmberg B.C.P., Dossou K.B., Botten L.C., Asatryan A.A., Poulton C.G., de Sterke C.M., McPhedran R.C. Modal analysis of enhanced absorption in silicon nanowire arrays. *Opt. Express*. 2011. **19**(S5): A1067.

Надійшла 29.01.2019, прийнята 21.05.2019