

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ПРИГОДНОСТИ МОДЕЛИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ШИФРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

*Ефремова Александра Юрьевна,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

E-mail: al617e13@gmail.com

*Алефиренко Виктор Михайлович,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

E-mail: alefirenko@bsuir.by

Аннотация. Данная статья посвящена разработке вычислительной модели для шифрования с использованием спектров поглощения квантовых точек. В статье описывается последовательность разработки модели. Особое внимание уделено анализу пригодности модели для последующего исследования.

Ключевые слова: шифрование информации квантовые точки, спектры поглощения, моделирование, COMSOL Multiphysics, оптический отклик.

В условиях роста вычислительных возможностей и развития квантовых технологий все более актуальным становится поиск новых подходов к защите данных.

В частности, интерес представляют методы, в которых защита информации связана с уникальными характеристиками оптического сигнала, материала или среды распространения. Такой подход позволяет рассматривать физическую систему не только как средство передачи информации, но и как дополнительный элемент защиты.

Одним из перспективных направлений является использование квантовых точек (КТ) – наноразмерных полупроводниковых структур, обладающих дискретным спектром энергетических уровней и оптическими характеристиками, которые позволяют формировать уникальные спектральные сигнатуры, применимые в задачах шифрования и аутентификации.

Шифрование с использованием квантовых точек можно рассматривать как физически обусловленный подход к защите информации. В отличие от

классического шифрования, где ключ представляет собой цифровую последовательность, в данном случае источником ключевой информации может выступать спектральный отклик материала, формирующийся при взаимодействии падающего излучения с системой квантовых точек [1].

В простейшем случае на образец, содержащий квантовые точки, направляется излучение заданного спектрального диапазона. Часть излучения отражается, часть проходит через образец, а часть поглощается. В результате можно получить зависимость поглощения от длины волны [2]:

$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda)$$

где $A(\lambda)$ – коэффициент поглощения;
 λ – длина волны падающего излучения;
 $R(\lambda)$ – коэффициент отражения;
 $T(\lambda)$ – коэффициент пропускания.

Экспериментальная реализация шифрования с использованием спектров поглощения квантовых точек требует применения специализированного оборудования. Такое оборудование является сложным, дорогостоящим и не всегда доступным на начальном этапе исследования.

В связи с этим проведение полноценного физического эксперимента может быть ограничено техническими и экономическими условиями.

Поэтому в качестве основного инструмента исследования используется среда COMSOL Multiphysics.

Далее на рисунке 1 представлена схема проведения исследования.

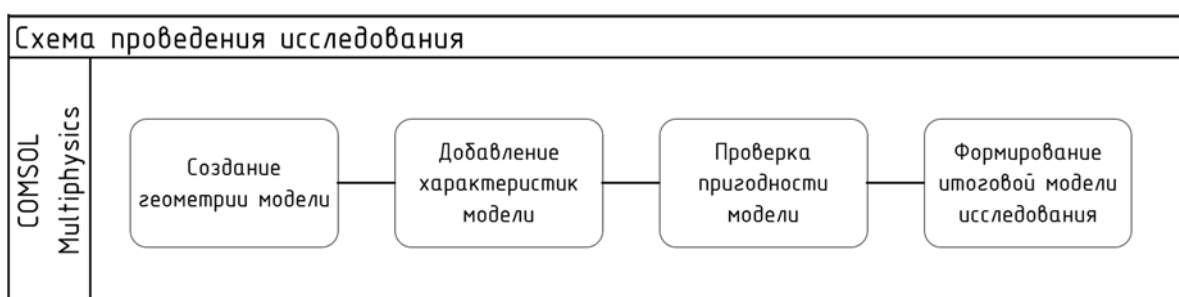


Рис. 1 Схема проведения исследования

С помощью метода решений задач Electromagnetic Waves, Frequency Domain в COMSOL Multiphysics было проведено первичное исследование пригодности модели.

В соответствии с предложенной схемой первым этапом стало построение геометрии модели – упрощенной структуры, включающей основные элементы, необходимые для моделирования взаимодействия электромагнитного излучения с областью квантовых точек. Геометрия модели включает воздушные области,

SCIENCE TIME

слой квантовых точек и подложку, что позволяет описать прохождение падающего излучения через исследуемую структуру и последующее формирование оптического отклика. Основные элементы созданной геометрии представлены на рисунке 2.

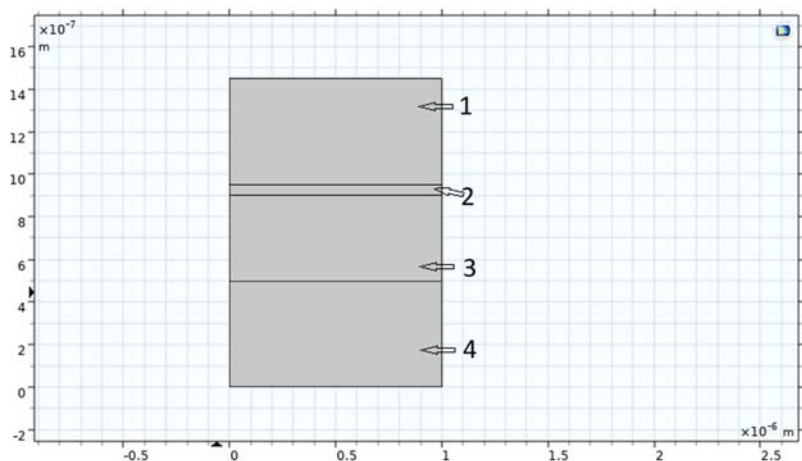


Рис. 2 Геометрия модели:
1,4 – блоки воздуха, 2 – блок КТ, 3 – блок-подложка

Далее были заданы необходимые характеристики: материалы блоков, порты для измерения оптического отклика, длина волны (в данном случае был выбран промежуток $[0,5; 0,7]$ с шагом $0,02$). В качестве материалов подложки и квантовых точек были выбраны кварц и селенид кадмия соответственно.

После настройки сетки на каждый из участков геометрии были получены результаты моделирования в виде таблицы со значениями $A(\lambda)$, $R(\lambda)$ и $T(\lambda)$, а также графика спектральных кривых, показанного на рисунке 3.

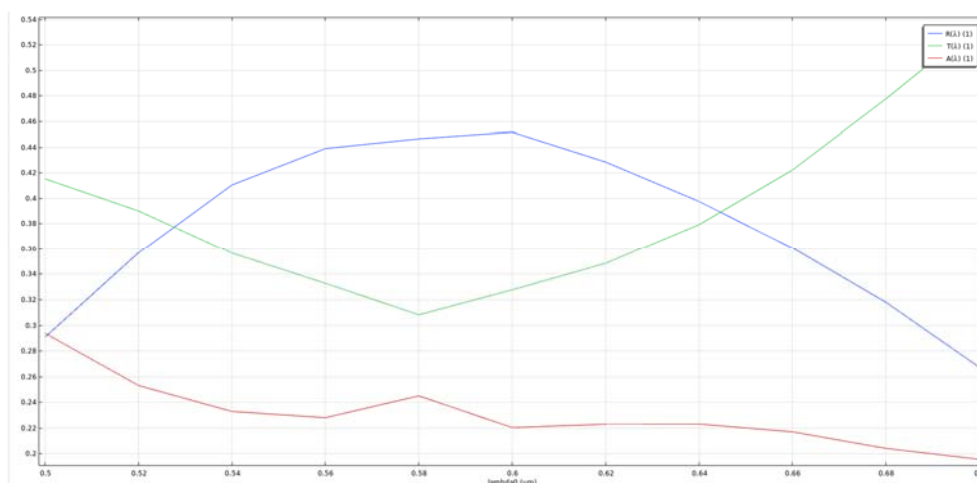


Рис. 3 Зависимости коэффициентов отражения $R(\lambda)$, пропускания $T(\lambda)$ и поглощения $A(\lambda)$ от длины волны λ

В таблице 1 представлены значения коэффициентов, полученных в результате моделирования.

Таблица 1

Значения коэффициентов

λ	$R(\lambda)$	$T(\lambda)$	$A(\lambda)$
0,5	0,290883531	0,4153195	0,293796969
0,52	0,356750751	0,390057184	0,253192064
0,54	0,410525094	0,35648526	0,232989646
0,56	0,439074792	0,332788919	0,228136289
0,58	0,446641272	0,308234327	0,245124401
0,6	0,451843673	0,327695093	0,220461234
0,62	0,428501249	0,348447294	0,223051457
0,64	0,39758209	0,379227601	0,223190309
0,66	0,360625568	0,422241098	0,217133334
0,68	0,318031327	0,477712923	0,20425575
0,7	0,267429959	0,536801392	0,195768649

Полученные результаты моделирования показывают, что в исследуемом диапазоне длин волн коэффициенты отражения изменяются неравномерно. Это свидетельствует о наличии выраженного спектрального отклика модели, что является важным условием для дальнейшего использования такой структуры в задачах шифрования.

Особое значение имеет зависимость $A(\lambda)$, демонстрирующий взаимодействие падающего излучения со слоем квантовых точек. Полученные значения показывают, что поглощение изменяется в исследуемом диапазоне длин волн, а значит, модель может быть использована для дальнейшего анализа спектрального отклика структуры.

Таким образом, проведенное первичное моделирование подтверждает предварительную пригодность разработанной модели для дальнейшего исследования шифрования с использованием спектров поглощения квантовых точек. Модель позволяет получать спектральные зависимости, необходимые для оценки оптического отклика, и может быть использована как основа для последующего этапа работы.

Литература:

1. Ефремова, А. Ю. Комплексное сравнение качественных показателей надежности при моделировании системы шифрования с использованием квантовых точек / А. Ю. Ефремова, В. М. Алефиренко // Современные средства связи : материалы XXX Международной научно-технической конференции, Минск, 30–31 октября 2025 года / Белорусская государственная академия связи [и др.] ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2025. – С. 100–102.

2. Relation of emittance to other optical properties // Journal of Research of the National Bureau of Standards–C. Engineering and Instrumentation. – 1963. – Vol. 67C. – No. 3.