

*А.Ю. Ефремова,
ассистент,
В.М. Алефиренко,
канд.техн.наук., доц.,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

АНАЛИЗ ПРИГОДНОСТИ ГЕОМЕТРИЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ КАРТИН В ШИФРОВАНИИ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Аннотация: статья посвящена оценке влияния геометрии модели на пространственное распределение электромагнитного поля. Рассмотрены вопросы актуальности исследования предметной области. Особое внимание уделено анализу пригодности компоновок геометрии моделей для моделирования системы шифрования с использованием спектров поглощения квантовых точек.

Ключевые слова: информационная безопасность, шифрование, квантовые точки, моделирование, COMSOL Multiphysics, электромагнитное поле.

В вопросах обеспечения информационной безопасности возрастает интерес к методам, в которых криптографический ключ может формироваться не только с помощью программных алгоритмов, но и на основе индивидуальных физических свойств материалов как источника уникальности. Среди них особенно примечательными являются полупроводниковые материалы, из которых могут быть изготовлены квантовые точки (КТ).

Квантовые точки – это полупроводниковые наночастицы, спектральные свойства которых зависят от их размера, состава и структуры. Их спектры поглощения могут использоваться для генерации данных, применяемых в криптографическом преобразовании информации [1].

Однако практическая реализация данного метода требует

специализированного оборудования для получения квантовых точек и регистрации их спектрального отклика, что усложняет проведение экспериментального исследования и повышает его стоимость. Поэтому в условиях отсутствия доступа к лабораторной установке наиболее рациональным решением является использование компьютерного моделирования. Такой подход позволяет исследовать поведение спектров поглощения, оценить влияние параметров материала на формирование спектрального ключа и предварительно проверить применимость метода в задачах криптографического преобразования информации.

В данном случае моделирование проводится в программе COMSOL Multiphysics [2].

В рамках данной работы существовала задача определить: какая из трех геометрий является наиболее подходящей для моделирования системы шифрования с использованием спектров поглощения квантовых точек. Выводы строились по графику распределения электромагнитного поля в модели.

В контексте выбранной предметной области под моделированием подразумевается создание модели системы с участием квантовых точек, подложки и воздуха. Основное отличие заключалось в интерпретации ансамбля КТ [2].

В первой компоновке ансамбль квантовых точек представляет собой сплошной прямоугольник с однородным материалом.

Во второй компоновке ансамбль квантовых точек представляет собой сплошной прямоугольник с круглыми вкраплениями разных размеров. Материал представлял собой неоднородную структуру, разделенную на 4 состояния.

В третьей компоновке ансамбль квантовых точек представляет собой сложную структуру, состоящую из двух одинаковых прямоугольников сверху и снизу – ансамбль пленок КТ и тринадцати прямоугольников разных размеров между ними, которым соответствовали разные состояния. Материалы и параметры для внутренних прямоугольников КТ также отличались.

На рисунках 1-3 представлены распределения нормы электрического поля при одинаковой длине волны для трех

вариантов компоновки области квантовых точек.

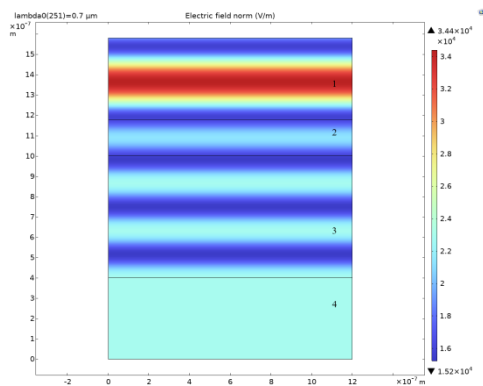


Рисунок 1 – Распределение электрического поля модели с первой компоновкой: 1,4 – блоки воздуха, 2 – блок КТ, 3 – блок-подложка

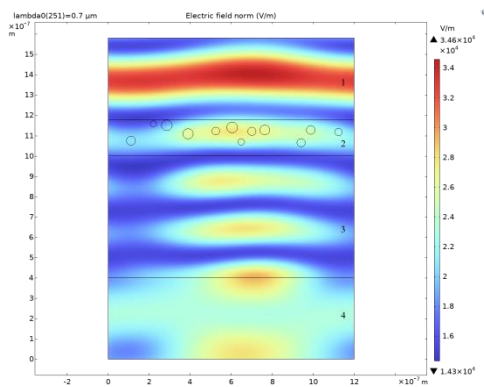


Рисунок 2 – Распределение электрического поля модели со второй компоновкой: 1,4 – блоки воздуха, 2 – блок КТ, 3 – блок-подложка

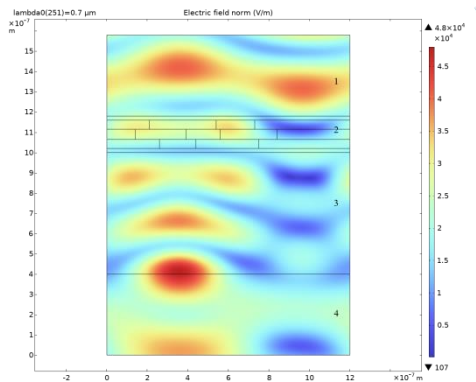


Рисунок 3 – Распределение электрического поля модели с третьей компоновкой: 1,4 – блоки воздуха, 2 – блок КТ, 3 – блок-подложка

В первой конфигурации распределение электрического поля формируется в виде горизонтальных интерференционных областей, что указывает на преимущественное формирование поля за счет интерференции на границах раздела сред. Латеральные возмущения практически отсутствуют: модель показывает распределение поля без выраженного влияния неоднородной активной области.

Во второй конфигурации общий характер распределения поля сохраняется, однако в зоне расположения включений КТ появляются локальные искажения, что свидетельствует о том, что квантовые точки выступают как области с отличающимися оптическими параметрами и вызывают перераспределение поля вблизи активного слоя.

Третья конфигурация демонстрирует наиболее выраженную пространственную неоднородность. Распределение электрического поля не ограничивается горизонтальными интерференционными областями: появляются крупные зоны локального усиления и ослабления поля. Это указывает на более сильное влияние внутренней структуры активного слоя и на нарушение латеральной однородности поля.

Таким образом, усложнение структуры активной области

повышает информативность электромагнитного отклика с точки зрения последующего использования спектров в задачах шифрования. Первая конфигурация не является оптимальной для задач шифрования, поскольку ее электромагнитный отклик остается сравнительно регулярным и содержит ограниченное количество индивидуальных признаков. Вторая конфигурация демонстрирует влияние отдельных доменов квантовых точек и уже позволяет получить более различимый спектральный отклик. Третья конфигурация является наиболее перспективной для криптографического применения, так как усиленная неоднородность активной области приводит к более сложному пространственному распределению поля и, следовательно, к формированию более вариативного спектрального отпечатка, который может использоваться как основа последующего шифрования информации или спектральной маски при преобразовании данных.

Список использованных источников и литературы:

[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] Ефремова А.Ю. Разработка и анализ пригодности модели для моделирования шифрования с использованием спектров поглощения квантовых точек / А.Ю. Ефремова, В.М. Алефиренко // Science Time: электронный журнал. – 2026. – №4. – С. 88-91.

© А.Ю. Ефремова, В.М. Алефиренко, 2026