

УДК 621.375.826

DOI: 10.17223/00213411/68/11/4

## Алгоритм восстановления голографических изображений дефектов на основе модернизированного быстрого преобразования Фурье\*

В.В. Дёмин<sup>1</sup>, Н.Н. Юдин<sup>1,2,3</sup>, И.Г. Половцев<sup>1</sup>, М.М. Зиновьев<sup>1,2,3</sup>, В.С. Кузнецов<sup>1,2</sup>,  
М.М. Кулеш<sup>1</sup>, Е.С. Слюнько<sup>1,2</sup>, С.Н. Подзывалов<sup>1,2</sup>, Х. Баалбаки<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>ООО «Лаборатория оптических кристаллов», г. Томск, Россия

<sup>3</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

Разработан прототип голографической камеры, позволяющий определять местоположение и размеры объемных дефектов в полупроводниковых материалах. Для эффективной работы голографической камеры, помимо оптимизации оптической схемы, был разработан алгоритм ускорения процесса восстановления изображений дефектов из цифровых голограмм, поскольку объем получаемых голографических данных значителен и требует существенного повышения производительности обработки голографических изображений. Разработанный алгоритм основан на быстром преобразовании Фурье со смешанным основанием, что позволяет более чем в 2 раза сократить время восстановления цифровых голографических изображений по сравнению со стандартными алгоритмами.

**Ключевые слова:** цифровая голография,  $ZnGeP_2$ , объемные дефекты, полупроводниковые материалы, быстрое преобразование Фурье.

### Введение

Цифровая голография используется для обнаружения, идентификации и измерения частиц различной природы в различных средах. Макет голографической камеры был разработан для регистрации цифровых голограмм объема оптических и/или полупроводниковых материалов, содержащих объемные дефекты; последующей послойной, с заданным шагом, численной реконструкции голографических изображений поперечных сечений исследуемого объема; обнаружения сечений, содержащих сфокусированные изображения дефектов (продольная цифровая фокусировка, аналогичная фокусировке в микроскопии), и определения продольных, поперечных координат, размеров, форм частиц и их распознавания.

Цифровая голограмма представляет собой дискретный двумерный массив оцифрованных значений интенсивности картины интерференции опорной и предметной волн, которые в осевой голографии частиц представляют собой рассеянную на частицах и нерассеянную часть излучения, просвечивающего объем с частицами [1]. Этот массив принимается за распределение (с точностью до константы) поля в плоскости голограммы. Это распределение используется в качестве исходного, а численный расчет [2] дифракционного интеграла позволяет рассчитать распределение поля (а затем интенсивности) в плоскости на заданном расстоянии от плоскости голограммы, т.е. в соответствующем поперечном сечении исследуемого объема. При этом появляется возможность идентифицировать плоскость расположения дефекта в трехмерном пространстве.

Для эффективной работы такой голографической камеры, помимо оптимизации оптической схемы устройства, оптимального подбора лазерного источника и матричного приемника [3], имеется потребность в алгоритмах, способных значительно ускорить процесс восстановления изображений частиц из цифровых голограмм, так как объем получаемых голографических данных весьма значителен и требует кратного увеличения производительности обработки голографических изображений.

Для вышеупомянутого расчета дифракционного интеграла применяются алгоритмы прямого дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и обратного (ОДПФ). В ДПФ количество требуемых операций имеет степенную зависимость от размерности вычисляемого массива данных (в нашем случае оцифрованных значений интенсивности в плоскости записи голограммы), для восстановления изображения частицы из цифровой голограммы, записанной ПЗС-матрицей с высоким разрешением, требуется значительное число операций [4, 5]. Поэтому на практике часто используют различные алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ). Данные алгоритмы требуют значи-

\* Результаты получены (выполнены) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-557 от 25.04.2024).