

---

ПОЛУПРОВОДНИКОВОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ  
SEMICONDUCTOR MATERIALS

---

ЛАЗЕРНАЯ ИНТРОСКОПИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН

З.Т.Азаматов<sup>1,□</sup>, И.А. Кулагин<sup>1</sup>, К.П. Абдурахманов<sup>2</sup>, Н.А. Акбарова<sup>3</sup>, М.Р. Бекчанова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Ташкентский университет информационных технологий, Ташкент, Узбекистан

<sup>3</sup>Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

□e-mail: [zakir.azamatov@mail.ru](mailto:zakir.azamatov@mail.ru)

*Аннотация.* Показана возможность обнаружения дефектов кремниевых пластин на основе Фурье анализа цифровых изображений, полученных с помощью лазерной интроскопии.

*Ключевые слова:* интроскопия, Фурье анализ, дефект, кремниевая пластина, полупроводниковый материал.

LASER TESTING OF SILICON WAFERS

Z.T.Azamatov<sup>1,□</sup>, I.A. Kulagin<sup>1</sup>, K.P.Abdurakhmanov<sup>2</sup>, N.A. Akbarova<sup>3</sup>, M.R.Bekchanova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at NUUz, Tashkent, Uzbekistan,

<sup>2</sup>Tashkent University of Information Technologies, Tashkent, Uzbekistan.

<sup>3</sup>National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

□e-mail: [zakir.azamatov@mail.ru](mailto:zakir.azamatov@mail.ru)

*Abstract.* The possibility of detection of defects in silicon wafers by Fourier analysis of digital images obtained by laser introscopy is shown.

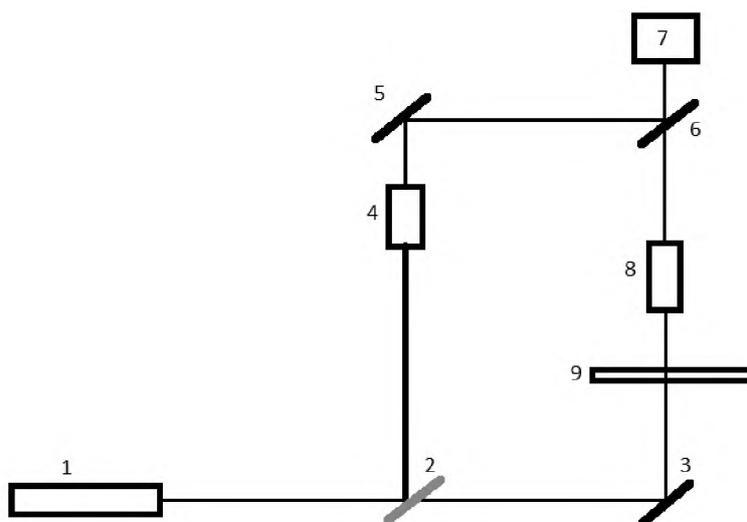
*Key words:* introscopy, Fourier analysis, defect, silicon plate, semiconducting material.

Интроскопия - это неразрушающее исследование внутренней структуры непрозрачного объекта и протекающих в нём процессов с помощью звуковых волн, электромагнитного излучения, постоянного и переменного электромагнитного поля или потоков элементарных частиц. В последнее время для развития элементной базы фотоники все более актуальной становится разработка методов неразрушающей диагностики и контроля на всех технологических этапах: контроль исходных материалов, полуфабрикатов и готовых изделий, а также анализ причин отказов, возникающих в процессе испытаний и эксплуатации.

По сравнению с электронно-зондовыми методами оптическая диагностика в инфракрасном диапазоне позволяет визуализировать объемные электрически нейтральные дефекты, такие как кислородные и металлические преципитаты, дефекты упаковки, дислокации, линий скольжения и пустоты в пластинах кремния, арсенида галлия, германия и в изделиях на их основе, а также визуализировать существующие в них различные микрополя. Значительная глубина проникновения ИК-излучения в

полупроводниковых материалах в сочетании с регистрацией сигналов-откликов различной физической природы позволяет реализовать комплексную диагностику микроэлектронных изделий и материалов с применением компьютерной и аппаратурной томографии. Таким образом, для визуализации и анализа структуры оптических материалов и изделий фотоники большую важность приобретает задача создания многофункционального оборудования и технологии диагностики, рассмотрения физических особенностей формирования контраста изображений электронейтральных дефектов и элементов в полупроводниковых кристаллах и применение полученных результатов для решения научных и практических задач.

Разработанная схема интроскопа представлена на рисунке 1. Схема состоит из 2х каналов хода лазерного излучения, которые формируются на разделительном клине 2. В канале излучения, отраженного от клина 2, формируется опорный пучок, в канале излучения, прошедшего через клин, формируется объектный пучок. В полном объеме схема работает как голографическая система с разным увеличением вплоть до увеличения микроскопа. В режиме съемки голограмм Френеля схема позволяет послойно восстанавливать изображение микрообъектов внутри полупроводниковых пластин. В ходе развития программного обеспечения восстановления цифровых голографических изображений схема может работать как микроскоп –интроскоп.



1- лазер, 2,6 – оптический клин, 3,5-зеркало, 4,8-объектив,  
7-камера, 9-пластина кремния

Рис. 1. Оптическая схема интроскопа

В качестве исследуемых объектов были выбраны пластины кремния, отличающиеся толщиной и степенью полировки поверхности. Проведенные исследования показали, что внутренние точечные дефекты пластины играют роль микролинз и создают точечные изображения. Для получения более полной информации о внутренних дефектах пластин для каждой электронной фотографии тестируемой пластины программным образом строился Фурье образ изображения, рассеянного на дефектах лазерного излучения, который служил критерием дефектности пластины.

Рассмотрим математические особенности обработки цифровых голограмм. Распределение интенсивности  $I(x,y)$  в плоскости записи голограммы  $(x,y)$  определяется квадратом модуля суммы комплексных амплитуд объектной  $O(x,y)$  и опорной  $R(x,y)$  волн, а именно

$$I(x,y) = |R(x,y)|^2 + |O(x,y)|^2 + R(x,y)O^*(x,y) + R^*(x,y)O(x,y) \quad (1)$$

Последние два члена уравнения (1) содержат информацию, соответствующую амплитуде и фазе объектной волны.

Для реконструкции (восстановления изображения объекта) цифровой голограммы, представляющей собой трехмерный массив данных  $A \times B \times D$ , где  $A \times B$  - размер приемного элемента в пикселах, а  $D$  - индекс дискретизации данных каждого пиксела (определяется возможностями компьютера и приемного элемента), может быть использована компьютерная симуляция сходящегося опорного пучка, либо симуляция линзы, разделяющей изображения в фокальной плоскости. В цифровой интерпретации для достижения результата достаточно применить двумерное Фурье-преобразование к зарегистрированному массиву. В данном случае размер массива по поперечным координатам  $x,y$  равен  $A \times B$ , амплитуда  $A(x,y)$  равна амплитуде записи изображения.

После прямого Фурье преобразования массива:

$$F(k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x,y) \exp(-i(k_x x + k_y y)) dx dy \quad (2)$$

получается Фурье спектр голограммы с четырьмя локализованными спектрами пространственных частот, которые соответствуют членам уравнения (1). Первые два члена образуют нулевой порядок спектра, который локализован в центре двумерной Фурье плоскости. Третий и четвертый члены уравнения (2) образуют два сопряженных спектра, локализованных симметрично относительно центра и соответствуют комплексной амплитуде объектной волны.

Таким образом, осуществление прямого преобразования Фурье позволяет выделять на полученном пространственном спектре наиболее информативную область. После выделения (отфильтровывания) одной из областей локализованного спектра и использования обратного Фурье преобразования:

$$A_f(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_y) \exp(i(k_x x + k_y y)) dk_x dk_y \quad (3)$$

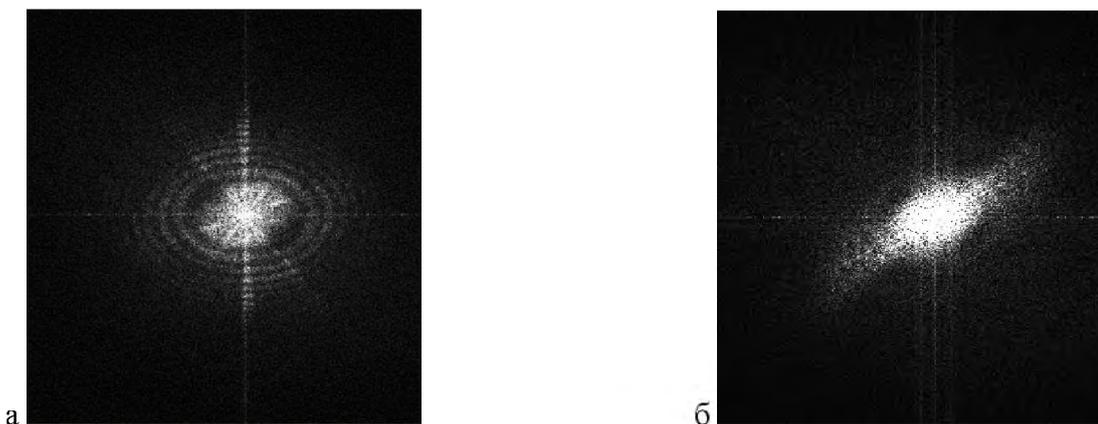
можно получить распределение комплексной амплитуды  $A_f(x,y)$ . Проводя анализ этой комплексной амплитуды, можно восстановить фазовый фронт объектной волны (реальный или сопряженный в зависимости от выбранной области фильтрации) в плоскости изображения объекта:

$$\varphi(x,y,z_i) = \arctg \frac{\text{Im}[A_f(x,y,z_i)]}{\text{Re}[A_f(x,y,z_i)]} \quad (4)$$

здесь  $z_i$  обозначает, что фаза определяется на определенном расстоянии от голограммы.

Таким образом, применяя прямое и обратное Фурье преобразование, наряду с фильтрацией пространственных частот возможно определение распределения фаз в заданной плоскости.

На рис.2 представлены изображения Фурье образов двух кремниевых пластин. Толщина данных пластин составляла 0,5 мм. Пластина, Фурье образ которой представлен на рис.2. а, была полирована с одной стороны, тогда как другая пластина была полирована с двух сторон (рис.2,б).



*Рис.2. Фурье образы изображений для двух кремниевых пластин*

Таким образом, проведенные исследования показали перспективность использования развитой методики анализа Фурье образов интрограмм для диагностики кремниевых пластин.

### *Литература*

1. З.Т.Азаматов, В.С.Гуревич, М.Е.Гусев, Ю.Н.Захаров, И.А.Кулагин, В.И.Редкоречев. В сб: Международной конференции “Когерентная и Нелинейная Оптика” (Петербург. 2010), С. 2.
2. В.Е.Гапонов, З.Т.Азаматов, А.М.Исаев, В.И.Редкоречев. В: 2-международной конференции «Оптика и фотоника-2013» (Самарканд, Узбекистан, 25-27 сентября 2013), С. 5.
3. FAP 00886 от 31.03.2014, И.А.Хусаинов, В.И.Редкоречев, И.А.Кулагин, З.Т.Азаматов.

*The text of the article is translated by Editorial of journal of “Semiconductor Physics and Microelectronics”. For more information contact: [ispm\\_uz@mail.ru](mailto:ispm_uz@mail.ru)*

Introspecty is a non-destructive study of the internal structure of an opaque object and the processes taking place in it using sound waves, electromagnetic radiation, a constant and alternating electromagnetic field, or fluxes of elementary particles. Recently, for the development of the photonics elemental base, the development of non-destructive diagnostics and control methods at all technological stages has become more and more relevant: control of raw materials, semi-finished products and finished products, as well as analysis of the causes of failures that arise during testing and operation.

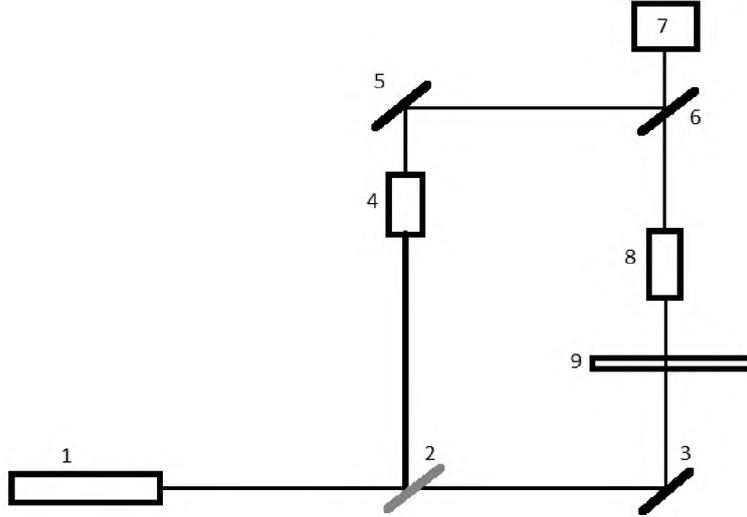
Compared to electron probe methods, optical diagnostics in the infrared range make it possible to visualize volumetric electrically neutral defects, such as oxygen and metal precipitates, stacking faults, dislocation, slip lines and voids defects in silicon wafers, gallium arsenide, germanium, and products based on them, and also visualize the various microfields existing in them. The significant penetration depth of infrared radiation in semiconductor materials, combined with the registration of response signals of various physical nature, allows for the comprehensive diagnosis of microelectronic products and materials using computer and apparatus tomography. Thus, for visualization and analysis of the structure of optical materials and photonics products, the task of creating multifunctional equipment and diagnostic technology, examining the physical features of contrast formation of images of electrically neutral defects and elements in semiconductor crystals, and applying the obtained results to solving scientific and practical problems is of great importance.

The developed scheme of the introscope is shown in Figure 1. The scheme consists of 2 channels of laser radiation that are formed on the dividing wedge 2. A reference beam is formed in the radiation channel reflected from wedge 2, and an object beam is formed in the radiation channel transmitted through the wedge. In full, the circuit operates as a holographic system with different magnifications up to the magnification of the microscope. In the mode of shooting Fresnel holograms, the circuit makes it possible to layer by layer restore the image of micro-objects inside semiconductor wafers. During the development of digital holographic image recovery software, the circuit can work as a microscope - introscope.

Silicon wafers differing in thickness and degree of surface polishing were chosen as the objects under study. Studies have shown that the internal point defects of the plate play the role of microlenses and create point images. A Fourier image of the image scattered by the laser radiation defects was constructed using the program. It allowed to obtain more complete information about the internal defects of the wafers, for each electronic photograph of the tested wafer. It served as a criterion for the defectiveness of the wafer.

Consider the mathematical features of processing digital holograms. The intensity distribution  $I(x, y)$  in the recording plane of the hologram  $(x, y)$  is determined by the squared modulus of the sum of the complex amplitudes of the object  $O(x, y)$  and the reference  $R(x, y)$  waves, namely

$$I(x, y) = |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + R(x, y)O^*(x, y) + R^*(x, y)O(x, y) \quad (1)$$



1-laser, 2.6 - optical wedge, 3.5-mirror, 4.8-lens, 7-chamber, 9-silicon plate

**Fig. 1.** The optical scheme of the introscope

The last two terms of equation (1) contain information corresponding to the amplitude and phase of the object wave.

Computer simulations of a converging reference beam, or a simulation of a lens separating images in the focal plane, should be used for reconstruction (restoration of the image of an object) of a digital hologram, which is a three-dimensional data array  $A \times B \times D$ , where  $A \times B$  is the size of the receiving element in pixels and  $D$  is the data sampling index of each pixel (determined by the capabilities of the computer and the receiving element). In the digital interpretation, to achieve the result, it is enough to apply the two-dimensional Fourier transform to the registered array. In this case, the size of the array along the transverse coordinates  $x, y$  is equal to  $A \times B$ , the amplitude  $A(x, y)$  is equal to the amplitude of the image recording.

After the direct Fourier transform of the array:

$$F(k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x, y) \exp(-i(k_x x + k_y y)) dx dy \quad (2)$$

it turns out the Fourier spectrum of the hologram with four localized spectra of spatial frequencies that correspond to the terms of equation (1). The first two terms form the zeroth order of the spectrum, which is localized in the center of the two-dimensional Fourier plane. The third and fourth terms of equation (2) form two conjugate spectra localized symmetrically with respect to the center and correspond to the complex amplitude of the object wave.

Thus, the implementation of the direct Fourier transform makes it possible to single out the most informative region on the resulting spatial spectrum. After isolating (filtering) one of the regions of the localized spectrum and using the inverse Fourier transform:

$$A_f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_y) \exp(i(k_x x + k_y y)) dk_x dk_y \quad (3)$$

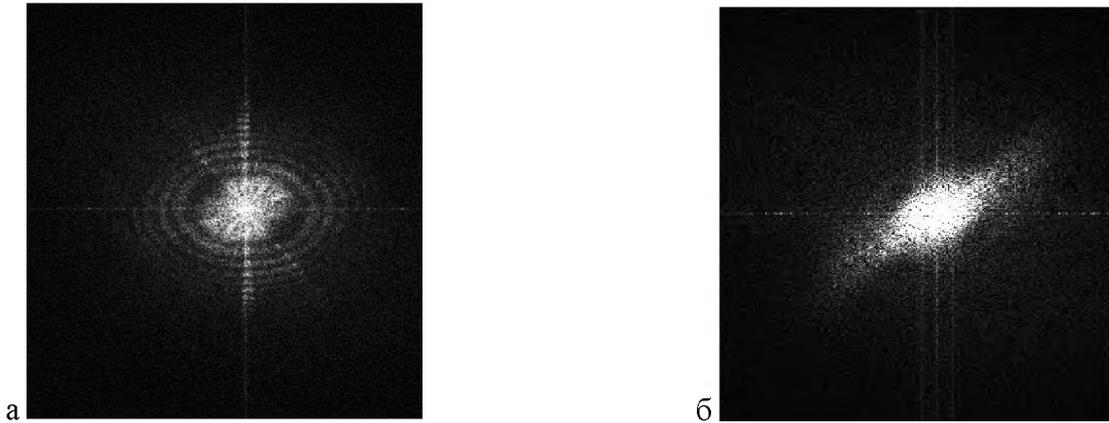
we can obtain the distribution of the complex amplitude  $A_f(x, y)$ . By analyzing this complex amplitude, you can restore the phase front of the object wave (real or conjugate depending on the selected filtering area) in the image plane of the object:

$$\varphi(x, y, z_i) = \text{arctg} \frac{\text{Im}[A_f(x, y, z_i)]}{\text{Re}[A_f(x, y, z_i)]} \quad (4)$$

here  $z_i$  means that the phase is determined at a certain distance from the hologram.

Thus, using the direct and inverse Fourier transform, along with filtering the spatial frequencies, it is possible to determine the phase distribution in a given plane.

Figure 2 shows the Fourier images of the images of two silicon wafers. The thickness of these plates was 0.5 mm. The plate, the Fourier image of which is shown in Fig. 2. a, was polished on one side, while the other plate was polished on both sides (Fig. 2, b).



*Fig. 2. Fourier image images for two silicon wafers*

Thus, the conducted studies have shown the promise of using the developed method of Fourier analysis of introgram images for the diagnosis of silicon wafers.