

---

**ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ: ОБРАЗОВАНИЕ,  
ВОСПИТАНИЕ, РАЗВИТИЕ ЧЕЛОВЕКА**  
**PEDAGOGICAL COORDINATE SYSTEM: EDUCATION, UPBRINGING,  
HUMAN DEVELOPMENT**

Экономические и социально-гуманитарные исследования. 2022. № 3 (35). С. 162—173.

Economic and Social Research. 2022. No. 3 (35). P. 162—173.

Научная статья

УДК 53.01

doi: 10.24151/2409-1073-2022-3-162-173

**Метод Фурье как основа цифровой обработки микроэлектронных  
изображений<sup>1</sup>**

*Н. А. Богданова<sup>1</sup>, О. В. Подорожний<sup>2</sup>*

<sup>1-2</sup> *Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия*

<sup>1</sup> *bogdanova\_nadejda@inbox.ru*

<sup>2</sup> *podorozhniy\_oleg@rambler.ru*

**Аннотация.** В 2022 г. исполняется 200 лет со дня выхода монографии «Аналитическая теория тепла» выдающегося французского математика Жана Батиста Жозефа Фурье. В работе рассмотрены исторические аспекты, математические основы и развитие метода Фурье от идеи до эффективной цифровой реализации. Идея Фурье, реализованная в XX в. на цифровых устройствах для обработки больших массивов данных, стала одним из драйверов технологической революции, начавшейся на рубеже третьего тысячелетия, стремительное развитие которой мы наблюдаем по сегодняшний день. В работе обсуждается практика применения методов цифровой обработки изображений новейших материалов и структур, полученных с помощью современной электронной микроскопии.

**Ключевые слова:** преобразование Фурье, спектральный анализ, растровая электронная микроскопия, РЭМ, просвечивающая растровая электронная микроскопия, ПРЭМ, цифровое изображение

**Благодарности.** В данной работе метод Фурье применен для обработки микроэлектронных изображений различных материалов микро- и наноэлектроники, полученных в лаборатории электронно-микроскопических изображений (ЛЭМИ НИУ МИЭТ) под руководством профессора Н. И. Боргардта [8]. Использованные в работе образцы германиевых нанонитей получены в НИЛ ТНМ, НИУ МИЭТ научным сотрудником И. К. Мартыновой.

---

<sup>1</sup> Статья подготовлена по материалам доклада авторов на международной научно-практической конференции «VIII Декартовские чтения — Век XXI. Цифровизация: вызовы, риски, перспективы» (Москва, Зеленоград, 28.04.2022).

Авторы выражают глубокую признательность всем сотрудникам ЛЭМИ, принявшим участие в получении экспериментальных данных.

Авторы также благодарят организаторов и участников VIII Декартовских чтений за возможность доложить полученные научные результаты, плодотворные дискуссии и интересные точки зрения на проблему глобальной цифровизации.

*Для цитирования:* Богданова Н. А., Подорожний О. В. Метод Фурье как основа цифровой обработки микрорелектронных изображений // Экономические и социально-гуманитарные исследования. 2022. № 3 (35). С. 162—173. <https://doi.org/10.24151/2409-1073-2022-3-162-173>

#### Original article

## Fourier method as the basis of digital processing of microelectronic images

*N. A. Bogdanova<sup>1</sup>, O. V. Podorozhny<sup>2</sup>*

*<sup>1-2</sup> National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

*<sup>1</sup> bogdanova\_nadejda@inbox.ru*

*<sup>2</sup> podorozhniy\_oleg@rambler.ru*

**Abstract.** The year 2022 marks the 200<sup>th</sup> anniversary of the publication of the monograph “Analytical Theory of Heat” by the outstanding French mathematician Jean-Baptiste-Joseph Fourier. In this work, historical aspects, mathematical foundations and the development of the Fourier method from an idea to an effective digital implementation are considered. Fourier’s idea, implemented in the 20<sup>th</sup> century in digital devices for processing large amounts of data, became one of the drivers of the technological revolution that began at the turn of the third millennium, the rapid development of which we are witnessing to this day. The authors have discussed the practice of applying methods of digital image processing of the latest materials and structures obtained using modern electron microscopy.

**Keywords:** Fourier transform, spectral analysis, scanning electron microscopy, SEM, transmission scanning electron microscopy, TSEM, digital image

**Acknowledgements.** In this work, Fourier method has been applied to process microelectronic images of various micro- and nanoelectronic materials obtained in Laboratory of electron microscope image at National Research University of Electronic Technology (LEMI MIET) under the authority of Prof. N. I. Borgardt [8]. The specimens of germanium nanowires used in this work have been obtained at MIET Research Laboratory TNM by research scientist I. K. Martynova.

The authors express sincere appreciation to all LEMI workers who took part in obtaining experimental data.

The authors also thank the hosts and participants of 8<sup>th</sup> Reading from Descartes for the possibility to report the obtained research results, for fruitful discussions and interesting outlook on the problem of global digitalization.

**For citation:** Bogdanova N. A., Podorozhny O. V. Fourier method as the basis of digital processing of microelectronic images. *Economic and Social Research*, 2022, no. 3 (35), p. 162—173. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/2409-1073-2022-3-162-173>

**Введение.** В XVII в. Р. Декарт [4] в своих работах задал эпохальное понятие — «система координат». В XX в. А. Эйнштейн [7] в своих работах 1905 г. сформулировал специальную теорию относительности. В рамках этой теории появилось новое понятие — «система отсчета». Каждое событие предлагалось идентифицировать четырьмя цифровыми индексами — тремя пространственными координатами плюс время. Дальше благодаря фундаментальным работам в различных областях физики, математики и их инженерной реализации в конце второго тысячелетия закрутилось колесо глобальной цифровизации. В результате на рубеже тысячелетий зародилась цифровая индустрия, захватившая все сферы человеческой деятельности и радикально изменившая облик современного общества. Бурное ее развитие продолжается по сей день, меняя не только привычный уклад жизни человека, но и политическую структуру общества, возникла «цифровая экономика».

Но нельзя забывать, что фундаментом всех этих общественных трансформаций являются естественно-научные законы, понятые учеными и исследователями и далее доведенные до практической реализации руками инженеров, промышленников, финансистов, без преувеличения, всего человеческого сообщества.

**Преобразование Фурье и спектральный анализ.** Метод Фурье является одним из самых

весомых, фундаментальных кирпичиков в глобальном здании цифровизации [10].

Преобразование Фурье позволяет осуществить переход от временной области к частотной (так называемое обратное пространство), в которой многие вычислительные операции выполняются принципиально значительно легче, а затем вернуться обратно благодаря формулам обращения.

Математическая идея, выдвинутая Фурье, была принята мировым сообществом не сразу. Только в XX в., через 100 лет после выхода монографии Фурье эти идеи получили признание. Радио, связь, новая наука кибернетика, первые ЭВМ, а также необходимость обработки больших массивов данных сделали идеи Фурье сверхвостребованными. Появившийся в 1965 г. алгоритм быстрого преобразования Фурье и его техническая реализация заложили основу глобальной цифровой индустрии и последовавшей технологической революции рубежа III тысячелетия [1; 9].

В настоящей работе рассмотрено применение метода Фурье при обработке микроэлектронных изображений новейших материалов и структур, полученных с использованием электронной микроскопии последнего поколения с помощью специальных математических инструментов пакета IPT (Image Processing Toolbox) вычислительной среды МАТЛАБ [2].

Прямое Фурье-преобразование	Обратное Фурье-преобразование
Непрерывная функция	
$F(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-i2\pi ux} dx$	$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(u)e^{i2\pi ux} du$
Дискретное преобразование Фурье (ДПФ)	
$F(u) = \sum_{n=0}^{N-1} f(x)e^{-i2\pi ux/N}$	$f(x) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} F(u)e^{i2\pi ux/N}$
Двумерное дискретное преобразование Фурье	
$F(u, v) = \sum_x^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y)e^{-i2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}$	$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_u^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v)e^{i2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}$

Частотная область представляет собой пространство, в котором принимают значения переменные ( $u, v$ ) Фурье-преобразования. Частоты в Фурье-преобразовании связаны с вариацией яркости на изображении. Наиболее медленно меняющаяся (постоянная) частотная составляющая ( $u = v = 0$ ) совпадает со средней яркостью изображения. Низкие частоты, отвечающие точкам вблизи начала координат Фурье-преобразования, соответствуют медленно меняющимся компонентам изображения. По мере удаления от начала координат более высокие частоты начинают соответствовать все более и более быстрым изменениям яркости, которые суть границы объектов и другие детали изображения, характеризующиеся резкими изменениями яркости, такие как шум.

**Основы фильтрации в частотной области.** Основой фильтрации в частотной области служит теорема о свертке:

$$f(x, y) \otimes h(x, y) \Leftrightarrow H(u, v)F(u, v).$$

Ее можно записать и в обратном порядке:

$$f(x, y)h(x, y) \Leftrightarrow H(u, v) \otimes F(u, v),$$

где  $f(x, y)$  — функция изображения,  $h(x, y)$  — маска, по которой производится свертка,  $F(u, v)$  и  $H(u, v)$  — их Фурье-преобразования соответственно.

Символ  $\otimes$  означает операцию свертки двух функций.

Таким образом, первое выражение означает, что свертка двух пространственных функций находится путем вычисления обратного преобразования Фурье от произведения их прямых Фурье-преобразований.

Множитель  $H(u, v)$  называется фильтром, поскольку он подавляет определенные частоты преобразования, оставляя другие без изменения.

Рассмотрим способы применения методов частотной фильтрации цифровых изображений на практике.

**Применение микроэлектронных изображений.** В данной работе использовался образец с германиевыми нанонитями, толщиной 90—100 нм, полученный методом катодного осаждения из водного раствора, содержащего оксид германия.

Для получения образца использовали титановую фольгу толщиной 50 мкм, на поверхность которой наносили массивы наночастиц индия в виде тонкой пленки с навеской в 35 мг с помощью термического испарения. После нанесения металла образец отжигали в вакууме при температуре 400 °С в течение часа.

Электролит, используемый в процессе осаждения в объеме 100 мл, состоял из 0,1 М янтарной кислоты в качестве буферной добавки, 0,5 М  $K_2SO_4$  в качестве проводящей соли, а также 0,05 М  $GeO_2$ . Сам процесс проводился при температуре, равной 10 °С, в гальваностатическом режиме при плотности тока в 0,2 мА/см<sup>2</sup> в течение 3300 секунд.

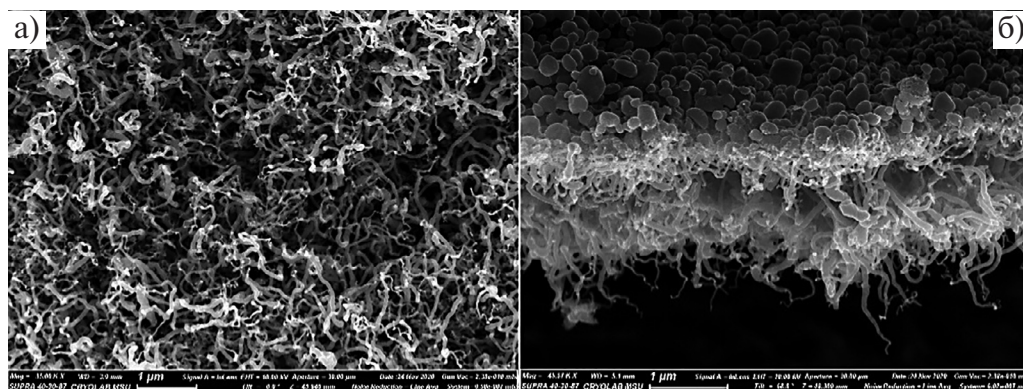


Рис. 1. РЭМ-изображения образцов, содержащих германиевые нанонити: а — с увеличением  $\times 75000$  под углом в  $0^\circ$ ; б — с увеличением  $\times 45000$  под углом в  $68,8^\circ$



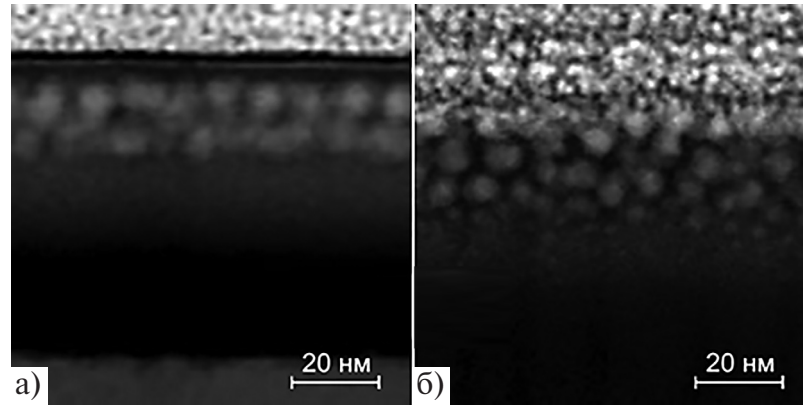


Рис. 2. ПРЭМ-изображения поперечных срезов образцов, подвергшихся облучению 30 кэВ Ga+ — ФИП: а — кремний Si; б — диоксид кремния SiO<sub>2</sub>

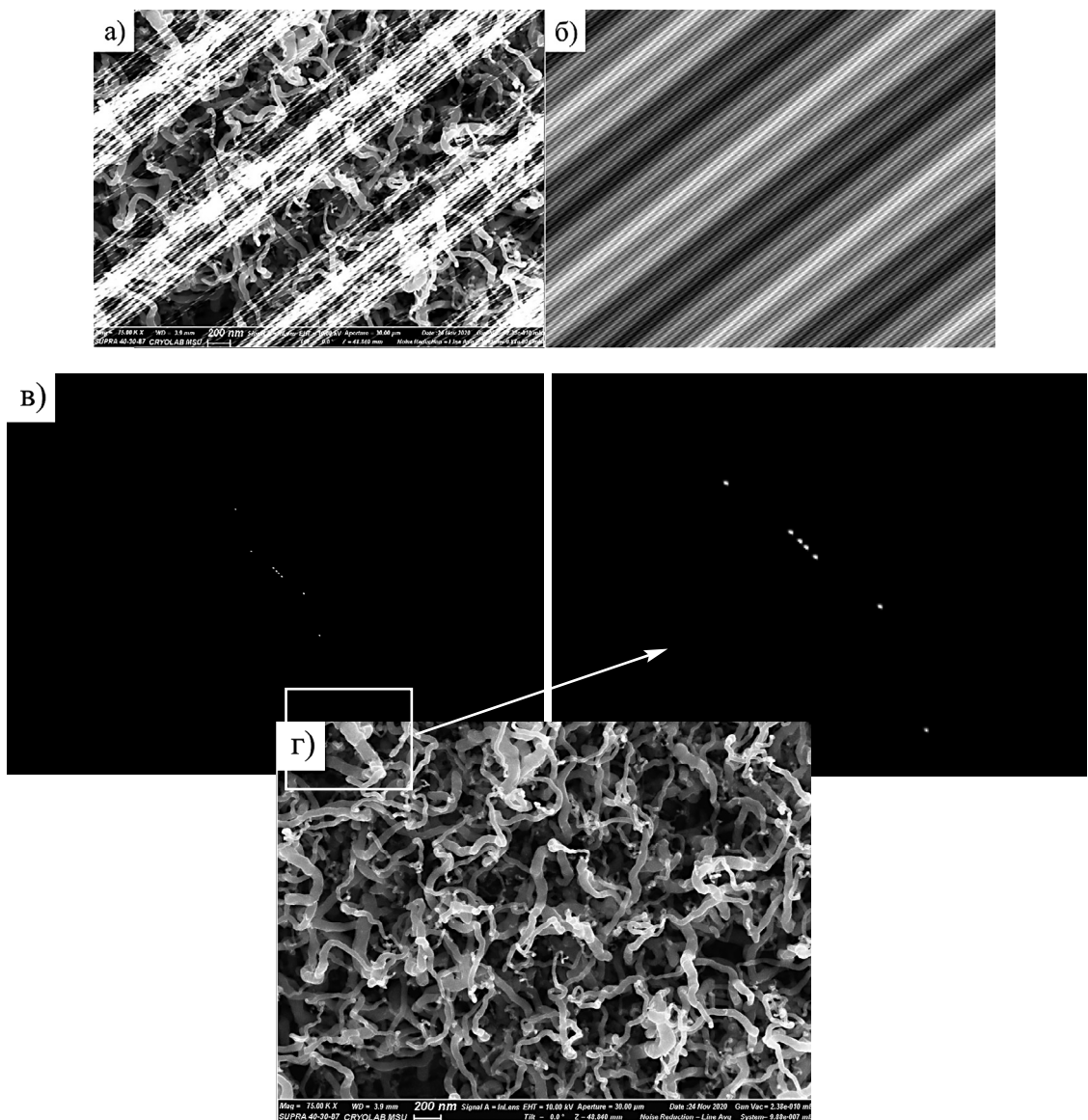


Рис. 3. Микроэлектронное изображение германиевых нанонитей: а — зашумленное изображение; б — изображение периодического шума; в — Фурье-спектр шума; г — отфильтрованное изображение

Изображения были получены двумя способами:

– при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ) [6], энергия электронов пучка 10 кэВ; (рис. 1 а, б, в);

– при помощи просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ) (облучение производится под нормальным углом к поверхности фокусированным пучком ионов галлия с энергией 30 кэВ. Доза ионов —  $10^{17}$  ионов/см<sup>2</sup>).

Особенностью изображений на рис. 2 является то, что на них видны размытые очертания преципитатов галлия.

**Подавление периодических шумов с помощью частотной фильтрации.** На рис. 3 (в) видны ярко выраженные локальные очаги, которые соответствуют повышенным значениям амплитуд, а именно по таким очагам выявляются периодические составляющие шумов.

Из приведенного примера видно, что метод высокочастотной фильтрации позволяет получать свободные от периодического шума изображения, практически не отличающиеся от исходных даже в тех случаях, когда изображение становится совершенно неразличимым из-за наложенного шума.

**Фильтрация в частотной области с использованием оператора Собеля.** Оператор Собеля [3] аппроксимирует градиент яркости изображения и состоит из двух частей, вертикальной и горизонтальной, или же  $x$  и  $y$  компонент:

$$h_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}; \quad h_x = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}.$$

Если  $g_x = h_x f$ ;  $g_y = h_y f$  — изображения, содержащие значения приближенных градиентов по  $x$  и  $y$  соответственно, то полное значение градиента яркости можно вычислить следующим образом:

$$g = \sqrt{g_x^2 + g_y^2}.$$

В результате действия данного оператора получается двумерная карта градиента яркости изображения, на которой участки с большим значением яркости, например грани, будут выглядеть как белые линии. Таким образом, фильтрация с помощью оператора Собеля как в пространственной, так и в частотной области позволяет выделить границы объектов на изображении.

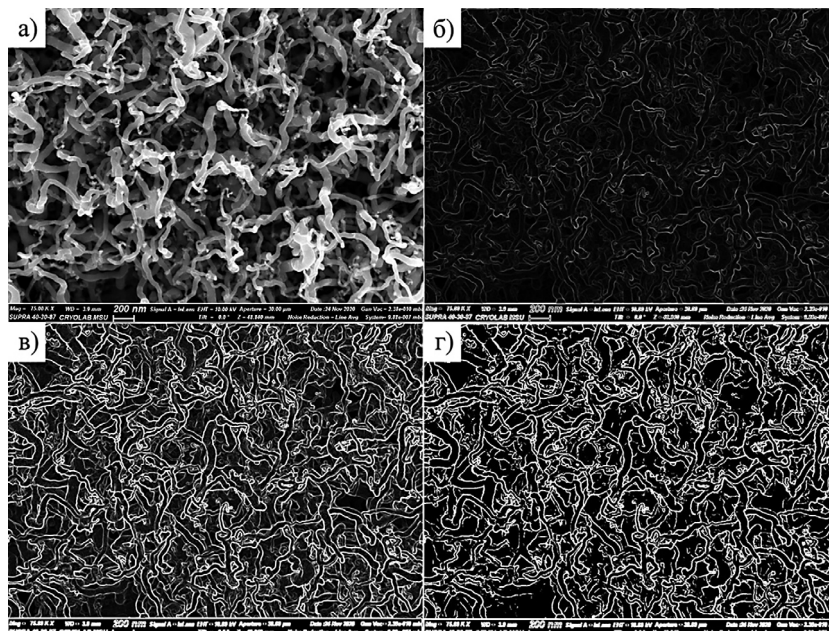


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение германиевых нанонитей (а), обработанное оператором Собеля в частотной области: изображение с double-значениями пикселей (б); восьмибитное изображение (в); изображение после порогового преобразования (г)

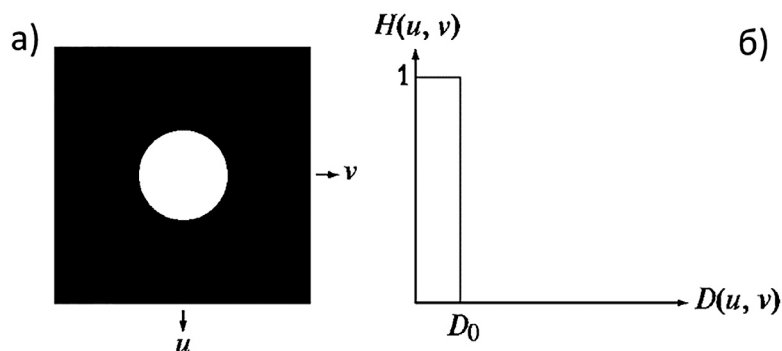


Рис. 5. Представление идеального низкочастотного фильтра в виде изображения (а), радиальный профиль фильтра (б)

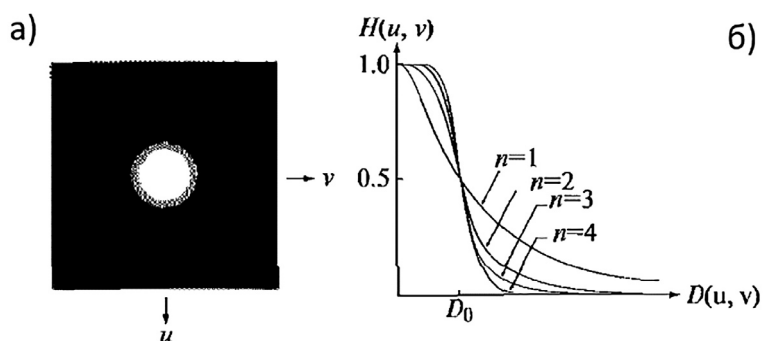


Рис. 6. Полутоновое изображение низкочастотного фильтра Баттерворта (а), радиальные профили фильтров порядка от 1 до 4 (б)

**Низкочастотная фильтрация.** Резкие перепады яркости (например, контуры, шумы) вносят значительный вклад в высокочастотную часть Фурье-преобразования изображения. Следовательно, при помощи ослабления высокочастотных компонент определенного диапазона Фурье-образа можно добиться сглаживания данного изображения.

Рассмотрим три типа низкочастотных фильтров.

Суть работы *идеального низкочастотного фильтра* заключается в том, что он «срезает» (т. е. умножает на ноль) все компоненты Фурье-преобразования исходного изображения  $F$ , лежащие вне данной окружности, и оставляет неизменными (т. е. умножает на единицу) все компоненты, которые находятся внутри или на границе окружности.

*Фильтр Баттерворта* характеризуется параметром, называемым порядком фильтра. При низких значениях порядка он является гладким фильтром, схожим с гауссовым, а при высоких — резким и приближается по форме к идеальному. Таким образом, фильтр Баттерворта представляет собой промежуточный вариант между идеальным и гауссовым — очень гладким фильтром.

Одним из примеров использования низкочастотной фильтрации может служить *подавление импульсного шума*, приведенного на изображении образца (рис. 8.). Видно, что низкочастотный фильтр позволяет избавиться от шума ценой четкости и резкости изображения, что может быть полезно, когда точные границы объектов не являются необходимыми.



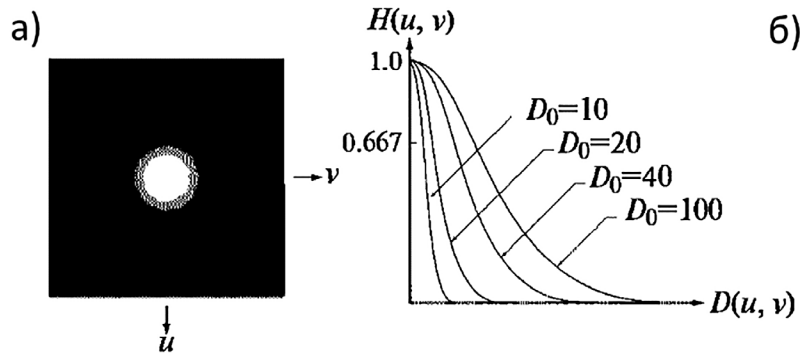


Рис. 7. Полутонное изображение низкочастотного гауссова фильтра (а), радиальные профили фильтров для различных значений  $D_0$  (б)

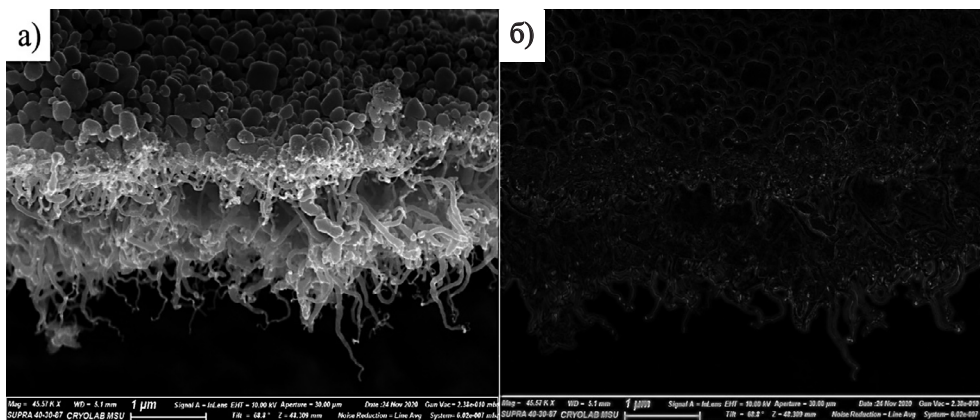


Рис. 8. Электронно-микроскопическое изображение образца с германиевыми нанонитями (а), зашумленное случайным импульсным шумом, обработанное идеальным низкочастотным фильтром (б)

**Высокочастотная фильтрация.** Высоко-частотные фильтры предназначены для выполнения операции, в точности противоположной той, что осуществлялась при помощи низкочастотных фильтров. Частоты, ослабляемые низкочастотным фильтром, пропускаются высокочастотным, и наоборот.

**Гомоморфная фильтрация.** В основе данного метода лежит разложение изображения на составляющие, связанные с освещенностью и коэффициентом отражения. После этого гомоморфный фильтр  $H(u, v)$  действует по отдельности на каждую из составляющих.

На рис. 11 представлен профиль такого фильтра. Если параметры  $\gamma_H$  и  $\gamma_L$  будут подобраны таким образом, чтобы  $\gamma_H > 1$  и  $\gamma_L < 1$ , то такой фильтр будет ослаблять вклад, вно-

симый низкими частотами (освещенностью), и усиливать вклад высоких частот (коэффициента отражения), что в результате и приведет к одновременному сжатию динамического диапазона и усилению контраста.

Рис. 12 и 13 иллюстрируют применение метода гомоморфной фильтрации. При обработке микроэлектронных фотографий сильно неоднородных образцов данный метод позволяет четко выделить различные слои, отличающиеся по своей структуре или составу.

**Быстрое преобразование Фурье.** При обработке больших массивов данных, например изображений, наличие мнимой части коэффициентов ДПФ настолько усложняет вычисления, что исключается возможность его применения [5].



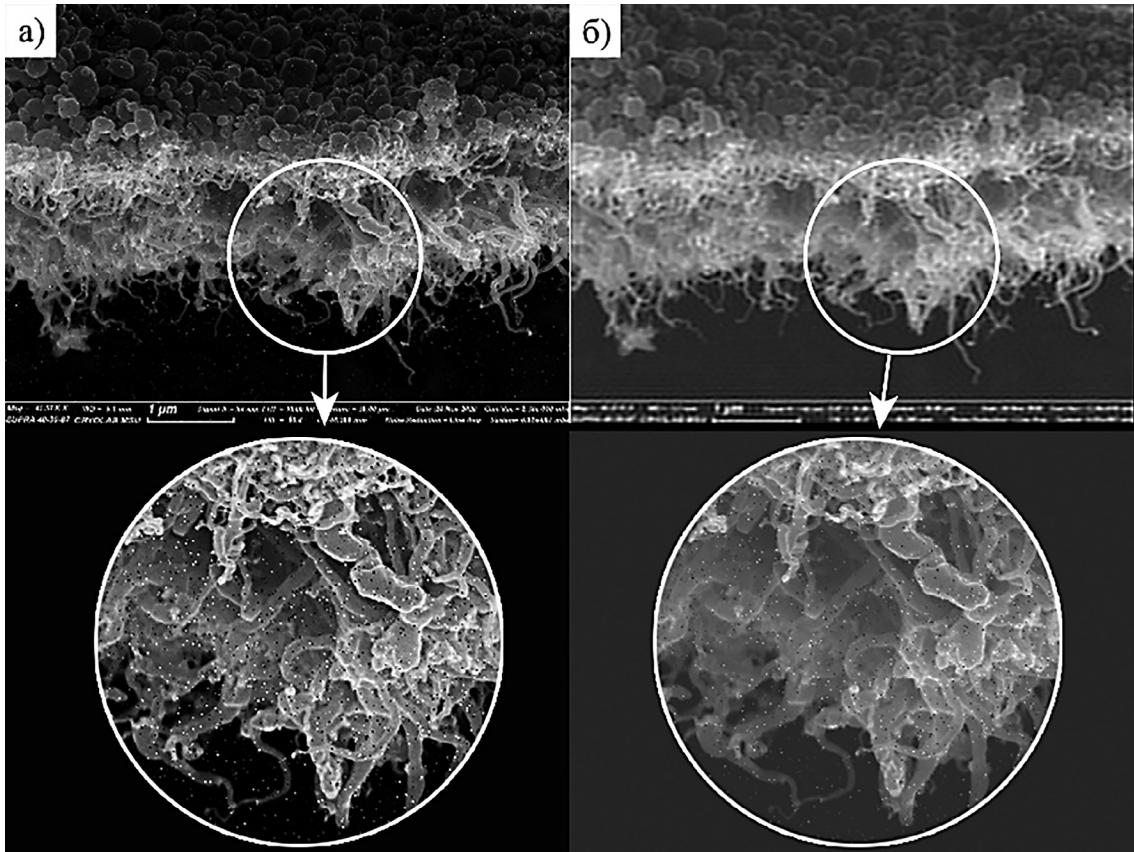


Рис. 9. Электронно-микроскопическое изображение образца с германиевыми нанонитями (а), обработанное гауссовым высокочастотным фильтром (б)

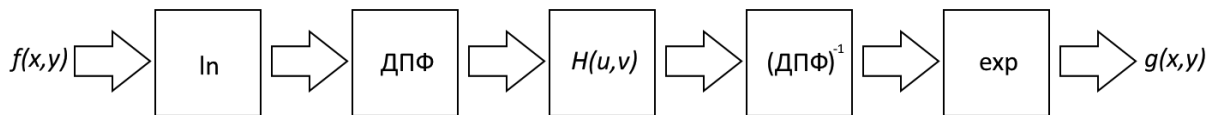


Рис. 10. Схема метода гомоморфной фильтрации для обработки изображений в частотной области

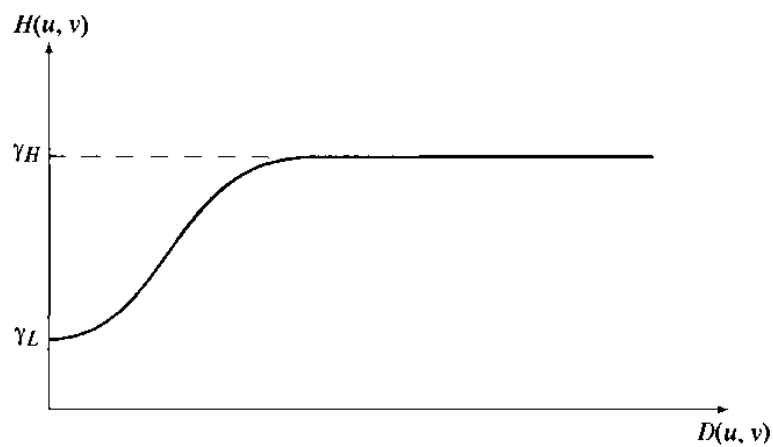


Рис. 11. Профиль центрально-симметричной передаточной функции гомоморфного фильтра

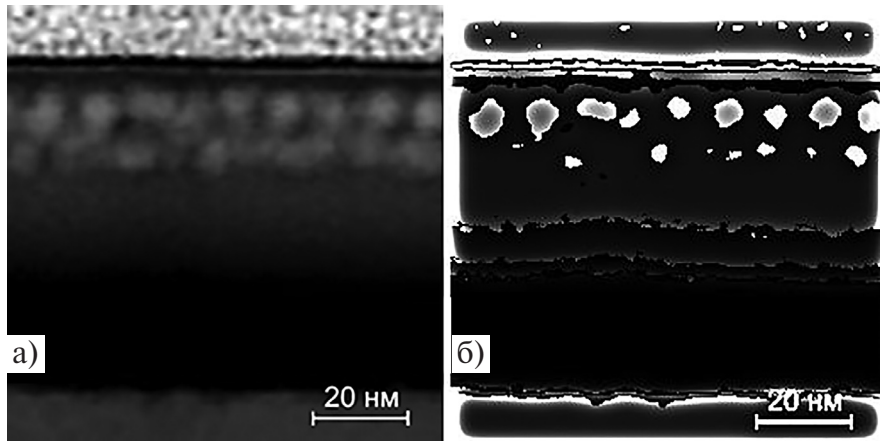


Рис. 12. ПЭМ-изображения образца Si: а — исходное; б — обработанное при помощи гомоморфной фильтрации

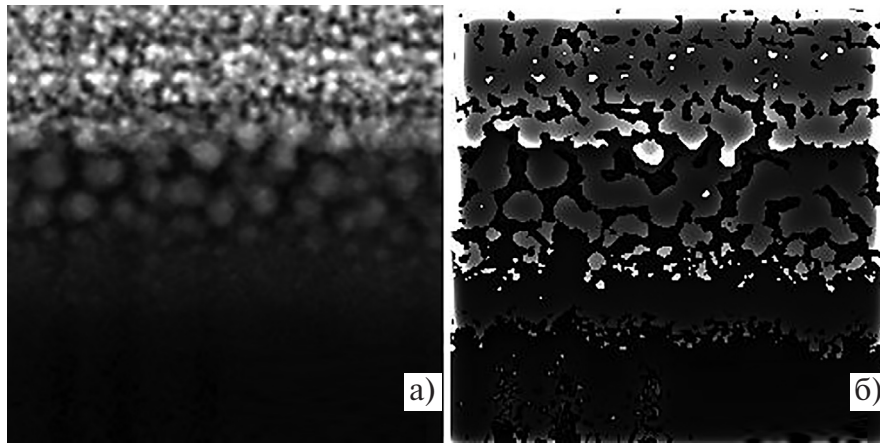


Рис. 13. ПЭМ-изображения образца SiO<sub>2</sub>: а — исходное; б — обработанное при помощи гомоморфной фильтрации

Возможность сокращения числа операций основывается на представлении одномерного ДПФ в виде многомерного. Такой метод называется быстрым преобразованием Фурье (БПФ) — Fast Fourier Transformation (англ. FFT). Можно считать, что при вычислении всех  $N$  коэффициентов БПФ требуется около  $N \log_2 N$  вычислительных операций вместо  $N^2$  при прямом вычислении.

Например, при  $N=10^6 \approx 2^{10}$ ,  $\log_2 N \approx 20$

Число операций при методе ДПФ:  
 $N^2 \approx 10^{12}$ ;

Число операций при методе БПФ:  
 $N \log_2 N^2 \approx 2 \cdot 10^7$ ;

Выигрыш составляет  $5 \cdot 10^4$ .

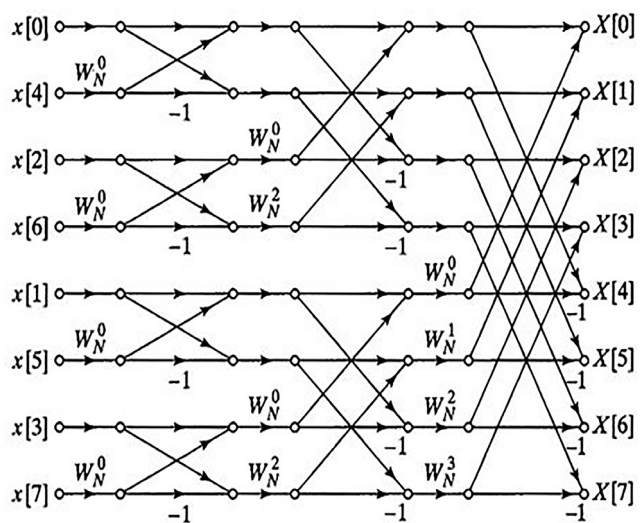


Рис. 14. Алгоритм Кули — Тьюки быстрого преобразования Фурье с прореживанием по времени

**Выводы.** Преобразование Фурье лежит в фундаменте великого множества важных практических приложений.

Благодаря разработке быстрого преобразования Фурье, эффективного алгоритма вычисления дискретного преобразования, стала возможной обработка и интерпретация огромной совокупности данных во всех сферах человеческой деятельности от медицинской диагностики до новейших электронных средств связи.

#### Список литературы и источников

1. **Богданова Н. А.** Преобразование Фурье. От классического к квантовому // Студия онлайн-контента МИЭТ [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://miet.study/w/eeFqNSEG1WmzCFrkZqxL8V> (дата обращения: 20.08.2022).

2. **Богданова Н. А.** Математическая обработка микроэлектронных изображений с использованием вычислительной среды MATLAB // Студия онлайн-контента МИЭТ [Электронный ресурс]. 2021. Режим доступа: авторизация. URL: <https://bo.miet.ru/~EcJdx> (дата обращения: 20.08.2022).

3. **Гонсалес Р., Вудс Р. Эддинс С.** Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. 616 с. (Мир цифровой обработки).

4. **Декарт Р.** Сочинения: в 2 т. / сост., ред. В. В. Соколова; пер. с лат. и фр. С. Я. Шейнман-Топштейн и др. М.: Мысль, 1989—1994.

5. **Нуссбаумер Г.** Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток / пер. с англ. Ю. Ф. Касимова, И. П. Пчелинцева; под ред. В. М. Амербаева, Т. Э. Кренкеля. М.: Радио и связь, 1985. 248 с.

6. **Румянцев А. В., Приходько А. С., Боргардт Н. И.** Исследование аморфизации кремния ионами галлия на основе сопоставления расчетных и экспериментальных электронно-микроскопических изображений // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. № 9. С. 103—108. <https://doi.org/10.31857/S1028096020090174>

7. **Эйнштейн А.** Собрание научных трудов: в 4 т. / под ред. И. Е. Тамма и др. Т. 1. М.: Наука, 1965. 700 с. (Классики науки).

8. **Borgardt N. I., Romyantsev A. V.** Prediction of surface topography due to finite pixel spacing in FIB milling of rectangular boxes and trenches // Journal of Vacuum Science & Technology B. 2016. Vol. 34. Iss. 6. Art. No. 061803. <https://doi.org/10.1116/1.4967249>

9. **Cooley J. W., Tukey J. W.** An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // Math. Comp. 1965. Vol. 19. P. 297—301. <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1>

10. **Fourier J.-B.-J.** Théorie analytique de la chaleur. Paris: Firmin Didot Père et Fils, 1822. 639 p.

#### References

1. Bogdanova N. A. Fourier transform. From classical to quantum. *Studiya onlayn-kontenta MIET* [Web]. 2021. Available at: <https://miet.study/w/eeFqNSEG1WmzCFrkZqxL8V> (accessed: 20.08.2022).

2. Bogdanova N. A. Mathematical processing of microelectronic images using MATLAB computational environment. *Studiya onlayn-kontenta MIET* [Web]. 2021. Access mode: authorization. Available at: <https://bo.miet.ru/~EcJdx> (accessed: 20.08.2022).

3. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L. *Digital Image Processing Using MATLAB*. London, Pearson Education, 2004. 620 p.

4. Descartes R. *The Philosophical Works of Descartes*, in 2 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1911.

5. Romyantsev A. V., Prikhodko A. S., Borgardt N. I. Study of gallium induced silicon amorphization by matching of experimental and simulated electron microscopy images. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*, 2020, no. 9, pp. 103—108. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S1028096020090174>

6. Nussbaumer H. J. *Fast Fourier Transform and Convolution Algorithms*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1981. 248 p.

7. Einstein A. *The Albert Einstein Collection*, vol. 1. S. l., Philosophical Library/Open Road, 2016. 386 p.

8. Borgardt N. I., Romyantsev A. V. Prediction of surface topography due to finite pixel spacing in FIB milling of rectangular boxes and trenches. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2016, vol. 34, iss. 6, art. no. 061803. <https://doi.org/10.1116/1.4967249>

9. Cooley J. W., Tukey J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. Comp.*, 1965, vol. 19, pp. 297—301. <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1>

10. Fourier J.-B.-J. *Théorie analytique de la chaleur*. Paris, Firmin Didot Père et Fils, 1822. 639 p.

#### **Информация об авторах**

**Богданова Надежда Александровна** — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент Института физики и прикладной математики, Национальный исследовательский университет «МИЭТ» (Россия, 124498, Москва, пл. Шокина, 1).

**Подорожний Олег Викторович** — магистрант, Национальный исследовательский университет «МИЭТ» (Россия, 124498, Москва, пл. Шокина, 1).

#### **Information about the authors**

**Nadezhda A. Bogdanova** — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Associate Professor of the Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Shokin sq., 1).

**Oleg V. Podorozhny** — Master's Student, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Shokin sq., 1).

Статья поступила в редакцию 16.09.2022.

The article was submitted 16.09.2022.