[8]. Ikramov, A., Polatov, A., Pulatov, S., Zhumaniyozov, S. Computer Simulation of Two-Dimensional Nonstationary Problems of Heat Conduction for Composite Materials Using the FEM. AIP Conference Proceedings, 2022, 2637, 040006.

[9]. Polatov, A.M., Ikramov, A.M., Razmukhamedov, D.D. Finite element modeling of multiplyconnected three-dimensional areas. Advances in Computational Design, 2020, 5(3), pp. 277–289.

[10]. Polatov, A., Gaynazarov, S., Ikramov, A., Jumaniyozov, S. Algorithms for Constructing a Finite Element Mesh of Compound Domains. AIP Conference Proceedings, 2024, 3004(1), 060016.

Muxtarov Erkinjon Kobiljonovich (Andijon davlat universiteti "Umumiy fizika" kafedarasi dotsenti; e-mail: erkinmuxtarov@yahoo.com)

KUKUNLI TEXNOLOGIYA ORQALI OLINGAN POLIKRISTALL KREMNIYNING FURYE-IQ SPEKTROSKOPIYASI

Annotatsiya. *Maqolada kukunli texnoligiya asosida olingan polikristall kremniyning strukturaviy xususiyatlarini aniqlash va elektr xususiyatlariga ta'sir etuvchi nuqsonlar va xususiyatlarni aniqlash uchun Furye infraqizil spektroskopiyasidan foydalanish ko'rib chiqiladi.*

Kalit so'zlar: *tebranishlar, kremniy, nurlanish, kristall, to'lqin soni, elektr o'tkazuvchanlik, spektr.*

Мухтаров Эркинжон Кобилжонович (Андижанский государственный университет, доцент; e-mail: erkinmuxtarov@yahoo.com)

ФУРЬЕ-ИК СПЕКТРОСКОПИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ПО ПОРОШКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Аннотация. *В статье рассматривается применение Фурье-ИК спектроскопии для анализа поликристаллического кремния, полученного методом порошковой металлургии, с целью выявления его структурных характеристик и выявления потенциальных дефектов и особенностей, влияющих на его электрофизические свойства.*

Ключевые слова: *колебания, кремний, излучение, кристалл, волновое число, электропроводность, спектр.*

Mukhtarov Erkinjon Kobiljonovich (Andijan State University; e-mail: erkinmuxtarov@yahoo.com)

FOURIER-IR SPECTROSCOPY OF POLYCRYSTALLINE SILICON PRODUCED BY POWDER TECHNOLOGY

Annotation. *Polycrystalline silicon, produced by powder technology, is widely used in various fields, including solar panels and semiconductor devices. One of the effective methods for analyzing the properties of such materials is Fourier-IR spectroscopy, which allows the investigation of the molecular and structural features of silicon derived from powder. This paper discusses the application of Fourier-IR spectroscopy to analyze polycrystalline silicon produced by powder metallurgy, with the aim of identifying its structural characteristics and detecting potential defects and features that affect its electrophysical properties.*

Keywords: *vibrations, silicon, radiation, crystal, wavenumber, electrical conductivity, spectrum.*

Введение. Поликристаллический кремний (ПК) является основным материалом для производства солнечных панелей, полупроводниковых компонентов и других электронных устройств [1; 113–114 с.]. Технологии получения кремния, такие как порошковая металлургия, позволяют значительно снизить стоимость материала по сравнению с традиционными методами. Однако структура и свойства поликристаллического кремния, полученного таким способом, могут значительно отличаться от кремния, полученного путем кристаллизации. Это, в свою очередь, влияет на его характеристики, такие как электропроводность, механическая прочность и оптические свойства [2;392–394 с.].

Для глубокой оценки этих характеристик и понимания влияния различных технологических процессов на качество кремниевых образцов часто используется Фурье-ИК спектроскопия. Этот метод позволяет изучать молекулярные вибрации и определять функциональные группы, а также выявлять структурные особенности, такие как дефекты и напряжения в материале [3;84 с.].

Цель данной работы – рассмотреть возможности Фурье-ИК спектроскопии для анализа поликристаллического кремния, полученного порошковым методом, и оценить влияние межкристаллических границ на его физико-химические и электрофизические свойства.

Анализ литературы. Фурье-ИК спектроскопия (Фурье-ИКС) основана на измерении поглощения инфракрасного излучения в молекулах вещества [5;1066–1067 с.]. Когда инфракрасное излучение проходит через образец, молекулы поглощают излучение на определенных частотах, что связано с колебаниями химических связей в молекулах. В случае поликристаллического кремния, спек-

троскопия позволяет выявить особенности кристаллической решетки, а также структурные дефекты, такие как дислокации, межкристаллические границы и другие аномалии, которые могут влиять на его физические свойства [6;58–59 с.].

Фурье-ИК спектроскопия позволяет получить спектр, который отражает взаимодействие материала с инфракрасным излучением в определенном диапазоне длин волн. Преобразование Фурье используется для обработки данных, полученных в ходе измерений, что позволяет получить более точные и детализированные результаты [7;45 с.].

Поликристаллический кремний состоит из множества мелких кристаллов (зерен), что создает неоднородную структуру. Они могут являться источником различных дефектов, влияющих на проводимость и механические свойства материала. Фурье-ИК спектроскопия позволяет исследовать структуру, дефекты, напряжения и загрязнения в материале, а также выявить характерные спектральные линии, связанные с зернами, их границами и дефектами, такими как межзеренные дефекты [8;69–71 с.].

Методика эксперимента. Для исследования использовался поликристаллический кремний, полученный порошковой технологией. Образцы кремния были получены методом агломерации и спекания кремниевых порошков при температуре 1000°C и 1300°C [4;1402–1403 с.]. После получения образцов был проведен ряд исследований с использованием Фурье-ИК спектроскопии для анализа структуры и дефектов, а также с целью выявления влияния межкристаллических границ.

Спектроскопия проводилась в диапазоне 4000–400 см$^{-1}$ с использованием FTIR-спектрометра. Для каждого образца были сняты спектры поглощения, которые затем анализировались с учетом специфики межкристаллических границ и дефектов.

Результаты и обсуждение. Время или частотная зависимость сигнала, полученного в процессе эксперимента, может быть преобразована с использованием Фурье-преобразования. Во временной области сигнал $S(t)$ можно записать как:

$$S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}(\nu) e^{i2\pi\nu t} d\nu$$

где: $S(t)$ – сигнал во временной области, $\tilde{S}(\nu)$ – спектр сигнала в частотной области, ν – частота, t – время. Тогда обратное преобразование Фурье (чтобы получить спектр $\tilde{S}(\nu)$ в частотной области) имеет вид:

$$\tilde{S}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\nu) e^{-i2\pi\nu t} d\nu$$

Это позволяет переходить от временной области к частотной и наоборот.

Спектр, получаемый с помощью Фурье-ИК спектроскопии, обычно представлен как зависимость поглощения от частоты или волнового числа [9;824–827 с.].

Формула для поглощения в ИК-спектре может быть записана как:

$$A(\nu) = log\left(\frac{I_0(\nu)}{I(\nu)}\right)$$

где: $A(\nu)$ – интенсивность поглощения на частоте ν, $I_0(\nu)$ – интенсивность исходного излучения на частоте ν, $I(\nu)$ – интенсивность прошедшего через образец излучения на частоте ν.

В Фурье-ИК спектроскопии спектр часто отображается не в терминах частоты ν, а в терминах волнового числа $\tilde{\nu}$, которое определяется как:

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c}$$

где: $\tilde{\nu}$ – волновое число в см$^{-1}$, ν – частота в Гц, c – скорость света.

Наглядная связь величин, используемых в ИК-спектроскопии, представлена на рис. 1.

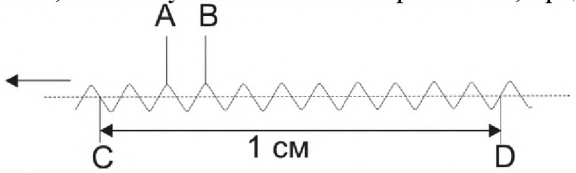


Рис. 1. Длина волны соответствует расстоянию AB; волновое число – числу волн, приходящимся на 1 см, отрезку CD; частота – числу волн, проходящих через фиксированную точку C за единицу времени.

Внешний вид ИК-Фурье спектрометра Nicolet 6800 показан на рис. 2.

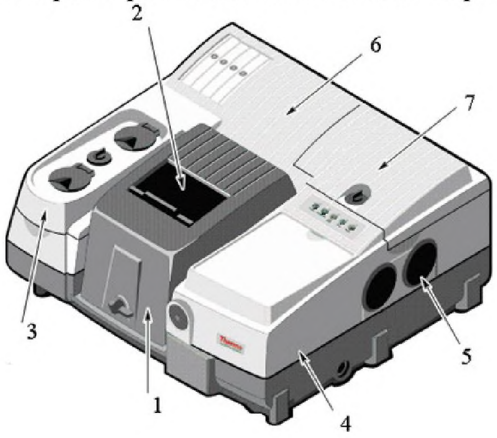


Рис. 2. Внешний вид ИК-Фурье спектрометра Nicolet 6800. Рабочий диапазон: 9000–50 см$^{-1}$ (1,1 – 200 мкм). 1 – кюветное отделение спектрометра; 2 – крышка кюветного отделения; 3 – отсек детекторов; 4 – место расположения оптической системы; 5 – дополнительная оптика; 6 – интерферометр и источник монохроматического излучения (He–Ne лазер); 7 – камера с разделителями световых лучей.

В ходе эксперимента был получен Фурье-спектр поглощения инфракрасного излучения для поликристаллического кремния, изготовленного из порошкового сырья без предварительной термообработки (ТО). Спектры были измерены в диапазоне длин волн, характерных для поглощения ИК-излучения в материалах, на основе кремния. Результаты показали наличие нескольких характерных полос поглощения, которые соответствуют вибрационным колебаниям атомов и молекул в материале (рис.3). В частности, были идентифицированы области поглощения, ассоциированные с колебаниями кремниевых связей в кристаллической решетке, а также с дефектами и примесями в структуре порошка. Поликристаллическая структура кремния без термообработки показала выраженные признаки дефектности, что отразилось на характере и интенсивности поглощения в ИК-спектре.

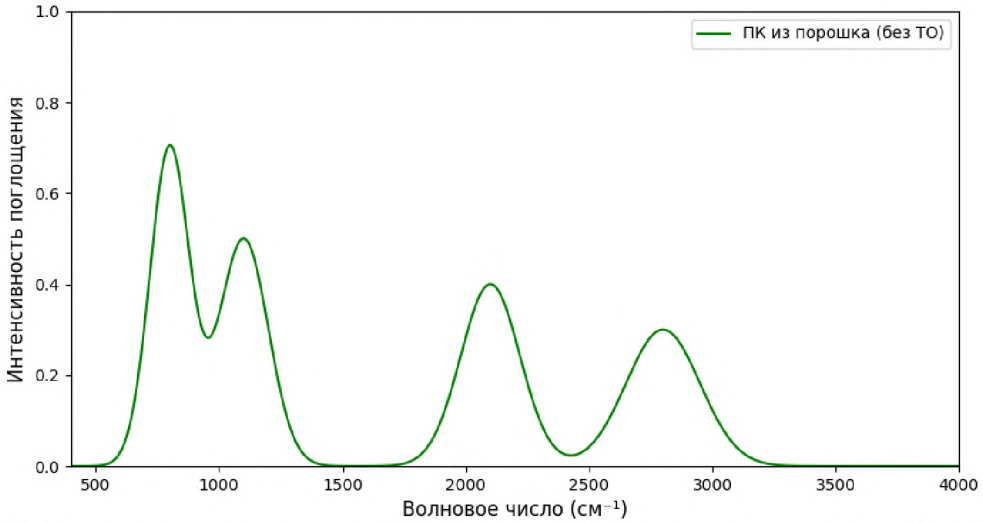


Рис 3. Фурье–спектр поглощения ИК – излучения ПК из порошкового сырья (без ТО).

Для образца поликристаллического кремния, прошедшего термообработку, спектр поглощения ИК-излучения демонстрирует более четкие и выраженные полосы, что свидетельствует о улучшении кристаллической структуры и уменьшении дефектности материала по сравнению с исходным сырьем (рис.4, красная линия). В частности, наблюдаются характерные пики, соответствующие симметричным и асимметричным колебаниям кремниевых связей в кристаллической решетке. Эти пики имеют более узкую форму и высокую интенсивность, что указывает на более высокую степень кристаллизации и уменьшение аморфных фаз.

Сравнение с образцом из Германии (Poly-Si IKZ) показывает схожесть спектров, однако образец Poly-Si IKZ, вероятно, имеет более высокую степень очистки и меньшую дефектность, что

проявляется в более выраженных и резких пиках поглощения, а также в более широком диапазоне поглощения в инфракрасной области (рис.4, синяя линия). Эти различия могут свидетельствовать о различиях в методах получения и термообработки, а также о применяемых технологиях, направленных на улучшение качества кремниевых пленок.

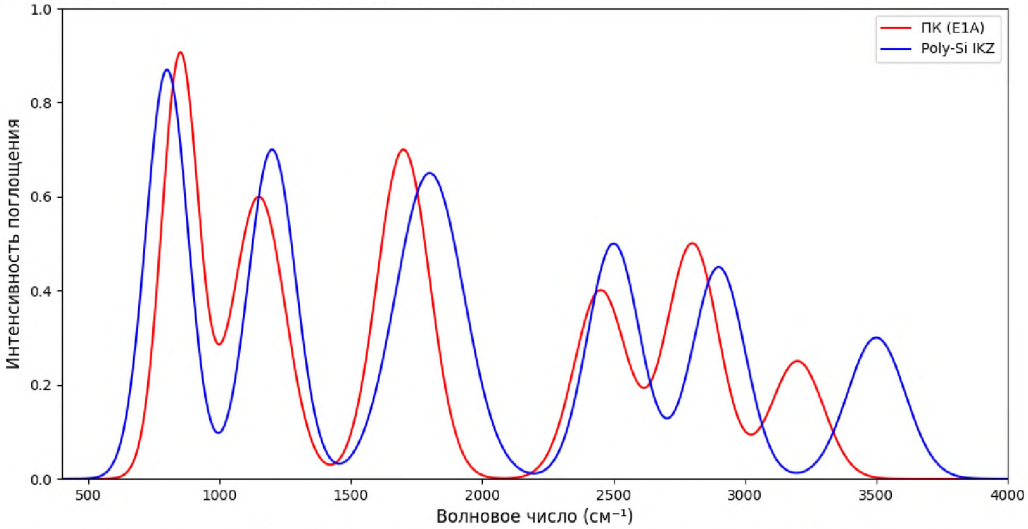


Рис. 4. Сопоставительные Фурье-спектры поглощения ИК-излучения ПК из порошкового сырья после ТО (E1A) и образца из Германии (Poly-Si IKZ).

Таким образом, термообработка порошкового кремния оказывает положительное влияние на его микроструктуру, что подтверждается изменениями в Фурье-спектре поглощения ИК-излучения. Однако образец Poly-Si IKZ демонстрирует более высокое качество материала, что может быть обусловлено более совершенными технологическими процессами и высоким качеством исходного сырья.

Заключение. Измерения Фурье-ИК спектров показали, что межкристаллические границы в поликристаллическом кремнии играют значительную роль в поглощении ИК-излучения. На спектре наблюдаются характерные пики, соответствующие колебаниям химических связей кремний-кислород (Si-O), а также дефектные состояния, возникающие на границах зерен. Пиковая интенсивность в области 800–1000 $см^{-1}$, связанная с вибрациями кремниевых связей, была изменена в зависимости от условий синтеза, что указывает на влияние межкристаллических дефектов на структуру материала.

Фурье-ИК спектроскопия является инструментом для исследования поликристаллического кремния, полученного порошковой технологией. Этот метод позволяет эффективно анализировать влияние межзеренных границ и дефектов на структуру и электрофизические свойства материала. Результаты исследования показывают, что дефекты, возникающие на межкристаллических границах, оказывают значительное влияние на поглощение ИК-излучения, что в свою очередь связано с его проводимостью и механической прочностью.

Данные исследования могут быть полезны для разработки новых методов синтеза поликристаллического кремния с улучшенными эксплуатационными характеристиками, а также для оптимизации условий производства в микроэлектронной и солнечной энергетике.

Список использованной литературы:

[1]. C.Becker and others. Polycrystalline silicon thin-film solar cells: Status and perspectives. Solar Energy Materials and Solar Cells. Volume 119, December 2018, pp. 112–123. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.05.043

[2]. Абдурахманов Б.М., Кадыров А.Л. Опыт получения вторичного литого поликристаллического кремния и полупроводниковых приборов на его основе. Uzbek Journal of Physics. 2019, Vol. 21 (№6), pp.391–396.

[3]. Селезнев Б.И., Федоров Д.Г. ИК-спектроскопия пленок диоксида кремния, полученных низкотемпературными методами. Вестник Новгородского государственного университета, 2017, №5 (103).

[4]. Aliev R., Mukhtarov E. Influence of Technological Modes of Obtaining of Silicon Wafers on their Electro Physical Properties. Aspects Min Miner Sci. 12(3). AMMS. 000787. 2024. DOI: 10.31031/AMMS.2024.12.000787

[5]. Derkacheva O.Y., Tsypkin D.O. Lignin content in paper fibers assessed using IR reflectance spectroscopy. J. App. Spectroscopy, 2017, vol. 84, № 6, pp. 1066 –1071.

[6]. Дуйкова М.В., Шконда С.Э., Казаков С.А. Научное приборостроение, 2020, том 30, №4, с. 52–62.

[7]. Александров В.А. Преобразование Фурье. Учеб. пособие. Новосибирск, НГУ, 2002, 62 с.
[8]. Fatemeh Faghihzadeh &oth. Fourier transform infrared spectroscopy to assess molecular-level changes in microorganisms exposed to nanoparticles. Nanotechnol. Environ. Eng. (2016) 1:1 DOI 10.1007/s41204-016-0001-8
[9]. Meyers R.A. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. Encyclopedia of Analytical Chemistry. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2000, pp. 815–837.

Matchonov Kuvonchbek (PhD student National University of Uzbekistan;
e-mail: kuvonchbekmatchonov@gmail.com)

ONE-DIMENSIONAL RELATIVISTIC CONFINED ATOM

Annotation. *In this work we consider the model of one-dimensional atom. One-dimensional relativistic atom is studied for the confined case using the Dirac equation. We also consider the confined Dirac particle in a constant uniform electric field. Furthermore, a calculation method of the energy eigenvalues and critical charge are given for the nucleus of one-dimensional relativistic atom.*

Key words: *Dirac equation, unitary transformation, one-dimensional box, boundary condition, confined Dirac particle, critical charge, Coulomb potential.*

Matchonov Quvonchbek Po'lat o'g'li (O'zbekiston Milliy universiteti tayanch doktoranti;
e-mail: kuvonchbekmatchonov@gmail.com)

BIR O'LCHOVLI RELYATIVISTIK CHEGARALANGAN ATOM

Annotatsiya. *Ushbu ishda biz bir o'lchovli atom modelini ko'rib chiqamiz. Bir o'lchovli relyativistik atom Dirak tenglamasi yordamida chegaralangan holat uchun o'rganildi. Bir jinsli elektrik maydondagi chegaralangan Dirak zarrachasini ham ko'rib chiqildi. Shuningdek, bir o'lchovli relativistik atom yadrosi uchun kritik zaryad va sathlarga mos energiya qiymatlarini hisoblash usuli keltirilgan.*

Kalit so'zlar: *Dirak tenglamasi, unitar almashtirish, bir o'lchovli quti, chegaraviy shart, chegaralangan Dirak zarrachasi, kritik zaryad, Kulon potensiali.*

Матчанов Кувончбек Пулат-оглы (опорный докторант НУУ;
e-mail: kuvonchbekmatchonov@gmail.com

ОДНОМЕРНЫЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ОГРАНИЧЕННЫЙ АТОМ

Аннотация. *В данной работе рассматривается модель одномерного атома. Одномерный релятивистский атом изучается для ограниченного случая с использованием уравнения Дирака. Мы также рассматриваем ограниченную Дираковскую частицу в постоянном однородном электрическом поле. Кроме того, для ядра одномерного релятивистского атома дается метод расчета собственных значений энергии и критического заряда.*

Ключевые слова: *уравнение Дирака, унитарное преобразование, одномерный ящик, граничное условие, ограниченная Дираковская частица, критический заряд, Кулоновский потенциал.*

Introduction. In relativistic quantum mechanics, the motion of particles is described by equations that incorporate the principles of special relativity. The most common equation for spin ½ particles is the Dirac equation. The electron's motion is governed by relativistic equations like the Dirac equation (in one spatial dimension), which accounts for spin and relativistic energy-momentum relations. The relativistic energy levels are quantized, but they differ significantly from the non-relativistic Schrödinger equation solutions. For a confined relativistic atom, the energy spectrum is computed by solving the Dirac equation with the chosen potential and boundary conditions. The quantized energy levels differ from the non-relativistic case. A one-dimensional relativistic confined atom in quantum mechanics extends the concept of the one-dimensional relativistic atom by introducing confinement to the system. This confinement typically restricts the motion of the particle (e.g., an electron) within a finite spatial region, modeling scenarios where the atom or particle is trapped inside a bounded region, such as a quantum well, potential box, or finite domain. This model is particularly useful for studying relativistic quantum effects in finite systems and has applications in condensed matter physics, quantum optics, and the study of low-dimensional materials.

Literature review. The low-energy spectrum of a typical one-dimensional (1D) Dirac material is described by a single-particle matrix Hamiltonian,

$$\widehat{H} = v_F \begin{pmatrix} 0 & \hat{p}_x - i\hbar m \\ \hat{p}_x + i\hbar m & 0 \end{pmatrix} + U(x) \qquad (1)$$

where v_F is the Fermi velocity, $2\hbar v_F|m|$ represents the band gap, and the momentum operator $\hat{p}_x$ acts along the axis of the effectively 1D system [1].

Applying the following unitary transformation to Eq. (1),