

2. Esman, A. K. A terahertz receiver based on electromagnetic materials / A. K. Esman, V. K. Kuleshov, G. L. Zykov // Measurement Techniques. – 2013. – Vol. 56, № 7. – P. 813–816.

3. Esman, A. K. Terahertz radiation sensor of the antenna type / A. K. Esman, V. K. Kuleshov, G. L. Zykov, V. B. Zalesski, V. M. Kravchenko // Proceedings 3d International Workshop on THz Radiation: Basic Research & Applications, September 4–5, 2011, Kharkov, Ukraine. – Kharkov, 2011. – Paper tera-001. – P. 1–3.

4. Angelust, A. A. Characteristic responses of biological and nanoscale systems in the terahertz frequency range / A. A. Angelust // Quantum Electronics, 2014. – V. 44, № 7. – P. 614–632.

УДК 37.01:378.4 (476)

**Научные методы исследования в лабораторном физическом
практикуме студентов технических специальностей**

Юркевич Н. П., Савчук Г. К.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В работе рассмотрены научные методы исследования твердых тел, используемые при обучении студентов технических специальностей курсу общей физики. Показана важность внедрения новейших методов при проведении лабораторного физического практикума. Разработаны новые лабораторные задания для эффективного изучения кристаллического строения твердых тел, определения химического состава веществ в процессе обучения студентов технического вуза.

Современные физические методы исследования кристаллического строения твердых тел, наличия в твердых телах дефектности, взаимосвязи физических свойств со свойствами микро- и макроструктуры основаны на изучении характера взаимодействия излучения или потока частиц с твердым телом. В методах используются потоки электронов, фотонов (например, рентгеновские), нейтральных частиц (например, нейтронов) и т. д.

Для определения и анализа особенностей кристаллической структуры [1], химического состава [2–5] твердых тел используются методы рентгеноструктурного и рентгенофазового анализов. Качественный и количественный анализ химического состава твердых тел как простых, так и сложных соединений может быть проведен также с помощью методов спектрального анализа [6]. Спектральный анализ основан на изучении

строения спектров, которые излучаются или поглощаются анализируемым веществом.

Студентам технических специальностей в будущей профессии необходимы навыки определения качества сырья, изучения свойств и состава цемента, песка, полимеров, резины, горных пород и т. д. Для того, чтобы компетентно решать в будущем профессиональные задачи в процессе обучения студенту необходимо ознакомиться как можно с большим числом существующих физических методов. Это позволит будущему специалисту качественно и количественно определить состав в сложной пробе, установить характер изменения требуемых свойств материалов в зависимости от их структурных параметров, химического состава, условий получения.

Данная работа посвящена изучению научных физических методов, которые могут эффективно быть использованы при проведении физического лабораторного практикума в техническом вузе.

Для специальностей строительного профиля предлагается компьютерная лабораторная работа по изучению взаимосвязи физических свойств песка с особенностями кристаллического строения элементарной ячейки.

Песок представляет собой двуокись кремния SiO_2 и существует в десяти кристаллографических модификациях, каждая из которых обладает своими физико-химическими свойствами. Для изучения в лабораторном физическом практикуме были использованы данные по кристаллическим структурам песка, имеющего кубическую (β -кristобалит) (табл. 1) и тетрагональную (стишовит) (табл. 2) сингонии, для которых характерны примитивная, объемноцентрированная и гранецентрированная элементарные ячейки.

Таблица 1

Характеристики примитивной кубической элементарной кристаллической ячейки β -кristобалита

№ п/п	Атом	Валентность A	Заселенность m	Тепловой фактор B_i	Координат		
					x	y	z
1	Si	+4	1	0	0	0	0
2	O	-2	1	0	0	0	0,5

Характеристики примитивной элементарной
кристаллической ячейки стишовита

№ п/п	Атом	Валент- ность A	Заселен- ность <i>m</i>	Тепло- вой фактор <i>B_i</i>	Координаты		
					<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
1	Si	+4	0,9998	0	0	0	0
2	O	-2	0,9999	0	0,3062	0,3062	0
3	Si	+4	0,0002	0	0,0023	0,0023	0,0042
4	O	-2	0,0001	0	0,0036	0,0036	0,0065

Для SiO₂ (β-кristобалит) кубической сингонии параметры примитивной кристаллической элементарной ячейки (рис. 1) составляют: $a = 13,402 \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Для модификации SiO₂ стишовит атом кремния находится в октаэдрической координации (рис. 2) тетрагональной сингонии параметры элементарной ячейки и углы между ее ребрами имеют значения: $a = b = 4,1772 \text{ \AA}$, $c = 2,6651 \text{ \AA}$ и $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.

При помощи разработанной программы вычисляются межплоскостные расстояния и относительные интенсивности дифракционных пиков в зависимости от значения углов дифракции. По полученным данным студент самостоятельно может построить штрих-диаграммы (рис. 1, *a* и рис. 2, *a*) и изобразить элементарные ячейки с расположенными в ней атомами кремния Si и кислорода O согласно заданным координатам ((рис. 1, *б* и рис. 2, *б*).

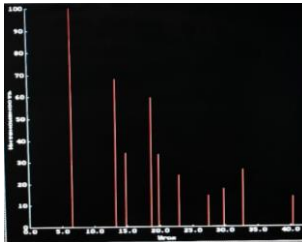
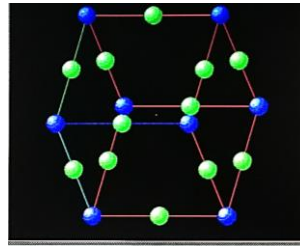
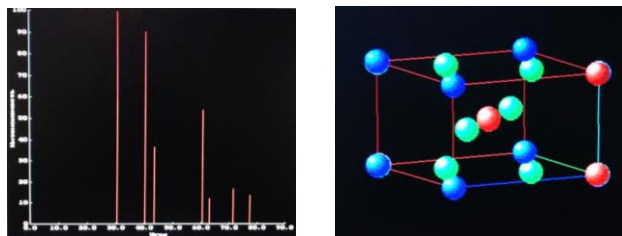
*a**б*

Рис. 1. Модификация β-кristобалит кубической сингонии:
a – штрих-диаграмма; *б* – элементарная ячейка с расположением
атомов Si (синий цвет) и O (зеленый цвет)



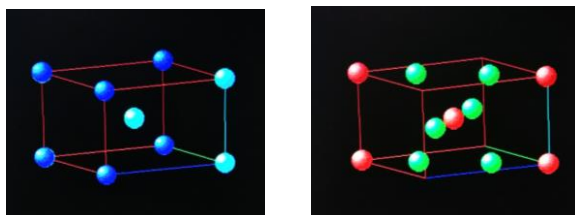
a

б

Рис. 2. Модификация стишовит с примитивной кристаллической ячейкой тетрагональной сингонии:

a – штрих-диаграмма; *б* – элементарная ячейка с расположением атомов кремния Si (синий цвет) и кислорода O (зеленый и красный цвета)

Атомы кремния Si и кислорода O показываются разными цветами и будут расположенными в элементарной ячейке в соответствии с их координатами (табл. 1 и табл. 2). Более того, программа позволяет разделить изображения атомов различных химических элементов, чтобы более точно увидеть их расположение к элементарной ячейке (рис. 3).



a

б

Рис. 3. Примитивная кристаллическая ячейка стишовита тетрагональной сингонии с расположением:

a – атомов кремния Si (синий и голубой цвета); *б* – атомов кислорода O (зеленый и красный цвета)

Таким образом, можно наглядно увидеть различные кристаллические структуры песка и сделать выводы об особенностях физико-химических свойств песком различных модификаций.

Наличие микродеформаций и областей когерентного рассеяния в строительных материалах [7, 9] может быть определено методом двойных мо-

ментов или с использованием формулы Шеррера, связывающей размеры частиц с шириной дифракционных пиков [7, 10–11]. Студентам предлагается исследовать несколько типов керамических материалов, полученных с использованием высокого давления в условиях холодного прессования. Задача обучающихся состоит в том, чтобы установить в каких материалах существуют микронапряжения и какова их величина и сделать вывод о том, как данные микронапряжения в последствии могут повлиять на качество готового изделия.

Исследования проводятся на образцах керамических материалов, полученных с использованием давлений: 1,5 ГПа, 2,5 ГПа и 3,0 ГПа, для которых на рентгеновском дифрактометре предварительно снимаются дифракционные пики для кристаллографических плоскостей с индексами Миллера одного порядка (100) и (200), (111) и (222) с шагом $0,01^\circ$ и временем экспозиции в точке 10 с. Пик (100) прописан в диапазоне углов (20° – 25°), пик (111) – (36° – 38°), пик (200) – (43° – 45°) и пик (222) – (61° – 62°).

Согласно разработанному алгоритму проведения физического практикума на основе данных, полученных при помощи компьютерного приложения [3, 5], студентам необходимо вычислить значения средней относительной микродеформации в каждом образце в зависимости от давления, а также определить величину областей когерентного рассеяния, которые характеризуют размеры частиц (зерен) керамических материалов.

Таким образом, имея данные о размерах зерен и областях микронапряжений студенты могут сделать вывод о влиянии давления на микроструктуру и наличие остаточных микродеформаций в материалах.

Химический состав соединений может определяться не только с помощью рентгенофазового анализа, но с помощью спектрального анализа, который является универсальным методом. С помощью спектрального анализа можно определять практически любые элементы в самых разнообразных объектах: твердых, жидких, газообразных.

Студентам предлагается изучить состав химических элементов, заполняющих энергосберегающие современные лампы, которые еще широко используются на производстве. Алгоритм исследования [11] включает в себя градуировку монохроматора по спектру излучения ртутной лампы, определение химического состава неизвестного источника излучения путем сравнения набора длин волн спектральных линий с другими известными химическими элементами. При выполнении исследования студенты должны удостовериться, что неизвестными источниками излучения являются: пары ртути и инертного газа неона (рис. 4).

Во всех предлагаемых к использованию в лабораторном физическом практикуме работах важнейшим элементом является интерпретация получаемых результатов. Возможность проведения глубокого анализа и само-

стоятельных выводов позволяет студентам получать новые знания и развивать способность к аналитическому мышлению.

Данная работа выполнена в рамках научно-исследовательской темы

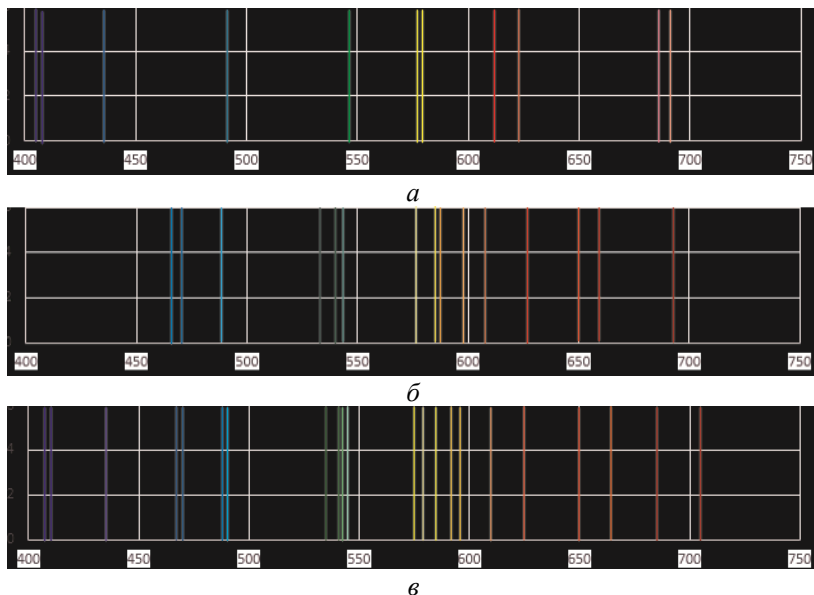


Рис. 4. Спектры излучения:
a – ртути; *б* – неона; *в* – энергосберегающей лампы

кафедры «Физика» Белорусского национального технического университета 21-246 «Информационные и образовательные технологии в инновационном обучении студентов физике в техническом ВУЗе» и изложенный материал можно рассматривать как один из этапов решения задач по внедрению инноваций в учебный процесс.

Литература

1. Савчук, Г. К. Обучение студентов инженерно-строительного профиля основам рентгеновской дифрактометрии с использованием компьютерной структурной кристаллографии / Г. К. Савчук, Н. П. Юркевич // Физическое образование в вузах. – 2005. – Т. 11. – № 2. – С. 56–65.
2. Sauchuk, G. K. The teaching of students of the construction engineering specializations using the modern computational structural crystallography /

G. K. Sauchuk, N. P. Yurkevich // *Scientific Light*. – 2018. – Vol. 1, № 19. – P. 15–20.

3. Юркевич, Н. П. Компьютерное приложение для изучения микродеформаций и микронапряжений в твердых телах по дифракционным пикам / Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук // *Вода. Газ. Тепло. 2020: матер. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-лет. БНТУ 100-лет. каф. «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика», 90-лет. каф. «Теплогазоснабжение и вентиляция», Минск, 8–10 окт. 2020.* – Минск, 2020. – С. 329–332.

4. Есман, А. К. Изучение деформированного состояния твердых тел: пособие / А. К. Есман, Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук [и др.]. – Минск: БНТУ, 2021. – Ч. 2. – 44 с.

5. Yurkevich, N. P. Determination of micro deformations and coherent scattering regions in ceramic materials / N. P. Yurkevich, G. K. Sauchuk // *Sciences of Europe*. – 2022. – Vol. 1, № 86. – P. 59–66. DOI: 10.24412/3162-2364-2022-86-1-59-66

6. Нефедов, В.И. Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений / Нефедов В. И. – М.: Химия, 1984. – 256 с.

7. Головинский, П. А. Определение структуры дисперсных систем по рассеянию рентгеновского излучения / П. А. Головинский, Е. В. Алексеева // *Научный вестник воронежский государственный архитектурно-строительный университет Серия: Физико-химические проблемы строительного материаловедения и высокие технологии.* – 2011. – № 3–4. – С. 3–13.

8. Лазарев, Д. А. Об определении размеров областей когерентного рассеяния кристаллов кварца в глинистых системах / Д. А. Лазарев, О. Н. Каныгина // *Вестник ОГУ.* – 2012. – № 4. – С. 221–224.

9. Акимов, А. И. Керамические материалы (диэлектрические, пьезоэлектрические, сверхпроводящие): условия получения, структура, свойства / А. И. Акимов, Г. К. Савчук. – Минск: изд. центр БГУ, 2012. – 256 с.

10. Клопотов, А. А. Основы рентгеноструктурного анализа в материаловедении / А. А. Клопотов, Ю. А. Абзаев, А. И. Потехаев, О. Г. Волокитин. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2012. – 276 с.

11. Есман, А. К. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом: пособие / А. К. Есман, Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук [и др.]. – Минск: БНТУ, 2021. – Ч. 2. – 48 с.