

ЗАХИРИДДИН
МУҲАММАД БОБУР
НОМИДАГИ АНДИЖОН
ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ANDIJAN STATE
UNIVERSITY NAMED
AFTER ZAKHIRIDDIN
MUKHAMMAD BABUR

ИЛМИЙ ХАБАРНОМА

Физика-математика
Тадқиқотлари
(Махсус сон)

SCIENTIFIC BULLETIN

Physical and
Mathematical Research
(Special Issue)

Андижон
2023 йил

Муассис

Захириддин Мухаммад Бобур номидаги Андижон давлат университети

**ИЛМИЙ ХАБАРНОМА.
ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА
ТАДҚИҚОТЛАРИ**

Журнал бир йилда 2 марта чоп этилади.

Андижон вилояти ахборот ва оммавий коммуникациялар бошқармаси
томонидан 2019-йил 26 декабрда
0452 рақам билан рўйхатга олинган.

Нашр индекси: 344

Нашр учун масъул:
А.Й.Бобоев

Босишга рухсат этилди:
27.12.2019.

Қоғоз бичими: 60x81 1/8

Босма табоғи: 13,5

Офсет босма. Офсет қоғози.

Адади: 110 дона.

Баҳоси келишилган нарҳда.

Буюртъа №: 165.

“Мухаррир” нашриёти манбаа бўлимида чоп этилди.
Тошкент шаҳри, Сўгалли ота кўчаси 7-уй

Таҳририят манзили:

170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129. Телефон: +998911602043.

Факс: (374) 223-88-30

E-mail: adu_xabarnoma@mail.ru Расмий сайт: uzjournals.edu.uz/adu

**Сборник статей международной научно-практической конференции по
«Полупроводниковая опто- и наноэлектроника, альтернативные
источники энергии и их перспективы» Андижан, 12-13 октября 2023 года**

ОГЛАВЛЕНИЕ

С.З. ЗАЙНАБИДИНОВ, А.Й. БОБОЕВ, Б.М. ЭРГАШЕВ Механизмы формирования квантово-размерных нанообъектов в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe.....	7
М.Х. АШУРОВ, Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР, С.Х. СУЛЕЙМАНОВ, С.Е. МАКСИМОВ, З.И. КАРИМОВ, Н.Н. НИКИФОРОВА, Ф.А. ИСКАНДАРОВА Современные аспекты радиационной деградации твердых тел и биообъектов.....	10
М.Т. НОРМУРАДОВ, Е.Н. ВЛАСОВА, К.Т. ДОВРАНОВ, Д.А. НОРМУРОДОВ, Х.Т. ДАВРАНОВ Измерение оптических параметров, диэлектрических материалов, созданных низкоэнергетическим ионно-плазменным методом.....	15
Е.С. РЕМБЕЗА, Т.В. СВИСТОВА, Н.Н. КОШЕЛЕВА, М.Б. РАСУЛОВА Гетероструктуры металлооксид-кремний, как перспективные структуры для создания солнечных элементов.....	24
О.О. МАМАТКАРИМОВ, В.Х. QUHQAROV, М.А. ERGASHEV, А.А. XOLMIRZAYEV Yarimo'tkazgich moddalariga asoslangan konvertorlarni ishlab chiqishda va uning asl parametrlarini saqlanishini o'rganish xossalari.....	28
S.Z. ZAINABIDINOV, H.J. MANSUROV, N.YU. YUNUSALIEV Photoelectric Properties of n-ZnO/p-Si Heterostructures.....	34
Х.Б. АШУРОВ, А.А. ЗАРИПОВ, А.А. РАХИМОВ, У.Ф. БЕРИДЕВ, И.Ж. АБДИСАИДОВ, М.М. АДИЛОВ Методы синтеза никелевого нанокатализатора для получения углеродных нанотрубок.....	39
Н.Ф. ЗИКРИЛЛАЕВ, М.М. ШОАБДУРАХИМОВА Особенности автоколебаний тока в компенсированном кремнии и их применение в электронике.....	46
Ш.Б. УТАМУРАДОВА, Ж.Ж. ХАМДАМОВ, В.Ф. ГРЕМЕНОК, К.А. ИСМАЙЛОВ, Х.Ж. МАТЧОНОВ, Х.Ю. УТЕМУРАТОВА Комбинационное рассеяние света в монокристаллическом Si, легированного атомами Gd.....	54
N.N. ABDURAZAKOV, R. ALIEV Power load forecasting using linear regression method of machine learning: Andijan regional case.....	58
И. Н. КАРИМОВ, М. ФОЗИЛЖОНОВ, А.Э. АБДИКАРИМОВ Вольт-фарадные характеристики SOI FINFET структуры.....	63
О.А. АБДУЛХАЕВ, А.З. РАХМАТОВ Низковольтные ограничители напряжения на основе структур с эффектом смыкания.....	67
SH.X. YO'LCHIYEV, B.D. G'ULOMOV, J.A. O'RINBOYEV ZnO va ZnO:Al yuqqa plyonkalarini sintez qilish va ularni fizik xossalari o'rganish.....	75
Ш.Т. ХОЖИЕВ, С.Ф. КОВАЛЕНКО, С.Е. МАКСИМОВ, В.М. РОТШТЕЙН, О.Ф. ТУКФАТУЛЛИН, Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР, Ш.К. КУЧКАНОВ Кластеры Y_n^+ и $Y_nO_m^+$, распыленные ионной бомбардировкой: эксперимент и теоретические аспекты.....	79

M. RASULOVA	
Application of Solution of the Quantum Kinetic Equations for Renewable Energy problem.....	85
A.A.МИРЗААЛИМОВ, Р.АЛИЕВ, Н.А.МИРЗААЛИМОВ	
разработка высокоэффективных и ресурсосберегающих конструкций кремниевых высоковольтных фотоэлектрических устройств.....	89
D.G' KHAJIBAEV, B.Ya. YAVIDOV	
On correlation of T_c and Cu-O _{apex} distance in single layered cuprates.....	97
A. АБДУЛВАХИДОВ, С.ОТАЖОНОВ, Р.ЭРГАШЕВ	
Фоточувствительность солнечных элементов гетероструктуры p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe с глубокими примесными уровнями.....	102
М.К. КУРБАНОВ, К.У. ОТАБАЕВА, Д.У. ХУДОЙНАЗАРОВА	
Распыление пленок льда при бомбардировке ионами Ag+.....	107
H.O. QO'CHQAROV S.B. FAZLIDDINOV B.B.BURXONJANOV	
Simmetrik bo'lgan silikon diodning statik parametrlarini hisoblash p-n-uch nuqtali zaryadlangan nuqsonlarning δ -qatlami o'tish.....	113
N.Yu. SHARIBAYEV, B.M. BAXROMOV R.M. JALALOV A.A. YUSUFJONOV	
Study of electrophysical properties of semiconductor materials based on lead-selenium.....	120
Ш.К.КУЧКАНОВ, Х.Б.АШУРОВ, Б.М.АБДУРАХМАНОВ, С.Е.МАКСИМОВ, О. Э. КИМИЗБАЕВА, Ш.А.МАХМУДОВ	
О роли структурных дефектов в процессах генерации при нагреве эдс и носителей заряда в эпитаксиальных плёночных кремниевых p-n-структурах.....	125
S.Z. ZAYNABIDINOV, I.M. SOLIYEV, SH.K. AKBAROV	
Kremniy monokristallarida elektro noaktiv nikel va kislorod atomlarining o'zaro tasirlashuvi.	128
M.A.MUYDINOVA, G.J. MAMATOVA	
Yarimo'tkazgich plastinalar sirti va p-n strukturalarning optik xususiyatlari va ularni takomillashtirish usullari.....	132
L.O.OLIMOV, I.I. ANARBOYEV	
Kremniy granulari asosida termoelektrik material samaradorligini oshirish mexanizimi.....	136

Комбинационное рассеяние света в монокристаллическом Si, легированного атомами Gd

Ш.Б.Утамурадова¹, Ж.Ж.Хамдамов¹, В.Ф.Гременок², К.А.Исмаилов³, А.Х. Хаитбаева¹
Х.Ж.Матчонов¹, Х.Ю.Утемуратова³

¹ НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз, Ташкент, Узбекистан

² Научно-практический центр материаловедения Национальной академии наук Беларуси

³ Каракалпакский государственный университет имени Бердаха

Аннотация: В данной работе приведены результаты приповерхностные состояния атомов гадолиния в кремнии методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). С использованием спектрометра SENTERRA II Bruker исследованы образцы кремния, легированного примесями гадолиния. Проведена регистрация и идентификация как кристаллической, так и аморфной фазовых составляющих в образцах.

Ключевые слова: Кремний, гадолиний, диффузия, спектр, кристаллической решетки, легирование..

В последние годы интенсивно развиваются фундаментальные и прикладные исследования в области низкоразмерных структур. При микро-и нанообработке и в процессе роста кристаллов неизбежно возникают различные дефекты и повреждения в структуре кристаллов, в том числе изменения микроструктуры, остаточные деформации и дислокации и т. д. [1-2]. Эти дефекты и повреждения оказывают значительное влияние на механические, оптические или электрофизические характеристики материалов.

Хорошо разработанная технология выращивания монокристаллического кремния, планарная технология создания интегральных приборов на его основе, принципиально новая технология создания объектов пониженной размерности в кремнии, модификация свойств различными методами, а также обнаружение новых физических явлений, не характерных для объемного кремния, привлекают пристальное внимание исследователей во всём мире в аспекте его использования в качестве активного материала для нужд нанотехнологий. В последнее время широко применяется неупругое рассеяние рентгеновских лучей и комбинационное рассеяние света (КР).

Применение спектроскопии КР для изучения полупроводников описано в огромном количестве работ. Но традиционно фиксируют лишь положение линии, не обращая внимания на ее ширину и асимметрию. При нормальных условиях (стандартное давление и температура) кремний кристаллизуется в структуру решетки алмаза [3-4]. Алмазная структура кремния допускает наличие только одного рамановского активного фона первого порядка, расположенного в центре зоны Бриллюэна (ЗБ), что соответствует волновому вектору фона $520,0 \pm 1,0 \text{ см}^{-1}$ с полной шириной на полувысоте (FWHM) $3,5 \text{ см}^{-1}$ [5-7].

В данной работе нами рассматриваются спектры одно- и двухфононного комбинационного рассеяния света в монокристаллическом кремнии, легированном одним из редкоземельных элементов - гадолинием Gd.

Спектры комбинационного рассеяния изучались с помощью рамановского спектрометра SENTERRA II Bruker. Этот полностью автоматизированный прибор сочетает в себе превосходную чувствительность и высокое разрешение $4,0 \text{ см}^{-1}$. Калибровка Senterra выполнялась автоматически и была привязана к стандартам NIST, ацетаминофену и кремнию, что привело к точности измерения длины волны $0,2 \text{ см}^{-1}$. Эксперименты проводились при помощи лазера с длиной волны $\lambda_0 = 532 \text{ nm}$, максимальной мощностью $P_{\text{max}} = 25 \text{ mW}$, временем получения 100 с и сложением двух спектров. Этот прибор

позволяет получать спектры в диапазоне от 50 до 4265 см⁻¹. Спектры комбинационного рассеяния света подверглись специальной обработке, чтобы иметь возможность сравнивать соотношения интенсивностей между образцами. Перед нормализацией спектров на пике при 510 см⁻¹, который соответствовал наиболее интенсивному пику в спектральной области 4265-50 см⁻¹, мы вычли базовую линию для каждого спектра.

Для исследования были выбраны образцы n-Si и p-Si с исходным удельным сопротивлением от 0,3 до 20 Ом·см. Перед легированием образцы подвергались тщательной кислотно-перекисной отмывке, при этом оксидные слои с поверхности образцов удаляли с использованием раствора HF. После тщательной очистки поверхности образцов, на чистые поверхности Si с помощью вакуумного напыления наносились пленки примесей гадолиния особой чистоты (99.999%). Вакуумные условия в объеме рабочей камеры порядка 10⁻⁷-10⁻⁸ тор обеспечивались безмасляной системой вакуумной откачки.

Перед диффузионным отжигом образцы помещались в откачанные кварцевые ампулы. Легирование образцов примесями Gd осуществлялось диффузионным методом при температуре 1200°C в течение 20 часов с последующим быстрым охлаждением. Для исследования взаимодействия примесных атомов в кремнии, необходимо не только равномерное легирование материала, но и максимальная концентрация. В связи с этим, нами учитывались оптимальные условия легирования кремнии этими примесными атомами.

Известно, что постоянные кристаллической решетки Gd и Si отличаются, поэтому если на подложке из одного материала (Si) сверху выращивается другой (Gd) появляются встроенные упругие напряжения в слоях Gd, Si, а также в многослойных структурах Gd-Si [6]. Упругие напряжения при этом оказываются столь значительными, что существенным образом влияют на зонную структуру носителей заряда и спектры фононов. Величины рассогласования кристаллических решеток во многом определяют и качество структур, поскольку напряжения порождают образование структурных дефектов и в ряде случаев сильно ограничивают возможности создания совершенных гетерокомпозиций. В случае, когда материалом слоя является твердый раствор, рассогласование решеток становится меньше, чем в случае структуры из чистых Si и Gd состава, деформации материала меняют кристаллическую структуру, и тем самым проявляются в изменениях колебательных, фононных спектров. Одним из методов структурного анализа, позволяющим исследовать фононные спектры и их изменения, является спектроскопия комбинационного рассеяния света. Исследован спектр КРС твердого раствора Gd_xSi_{1-x}, (x = 0,25) выращенного на подложке Si ориентации (100). Толщина слоя твердого раствора составляет 5 мкм. Это означает, что такой слой является релаксированным. Отсюда следует, что постоянная решетки слоя Gd_xSi_{1-x} будет лежать в интервале между постоянными решетки Gd и Si. В твердом растворе присутствуют связи Si-Si, Gd-Gd и Gd-Si. Поэтому следует ожидать рассеяние света с участием этих колебательных мод. Если бы содержание одного из компонентов твердого раствора (например, Gd) было равно нулю, частота моды Si-Si совпадала бы с частотой оптического фонона в Si. Но при увеличении содержания второго компонента раствора частоты таких мод уменьшаются.

КРС-спектры эпитаксиальных пленок твердых растворов Gd-Si с различным содержанием Gd и Si, выращенных на подложках Gd в случае малого процентного содержания Si, и на Si — в случае малого процента Gd. Хорошо виден связанный с изменением величин деформаций сдвиг пиков локальных колебаний Gd-Gd и Si-Si. В КРС-спектрах можно выделить три диапазона частот КРС-сдвига, определяемых массами входящих элементов и коэффициентами упругости присутствующих связей — это колебания атомов связей Gd-Gd (около 238 см⁻¹), связей Gd-Si (783 см⁻¹) и Si-Si (510 см⁻¹). Значительное влияние на положение линий в спектрах оказывают встроенные напряжения, вызванные существенным отличием постоянных кристаллической решетки Gd и Si.

Известно, что [7-8] при выращивании на подложке слоя с другой постоянной решетки

сначала выращиваемый слой растет с постоянной решетки подложки (т.е. деформированным), но, начиная с некоторой толщины слоя, энергетически выгодно образование дислокаций, после этого слой растет дальше со своей постоянной решетки. Такие слои называются релаксированными или ненапряженными

Изменение объема элементарной ячейки Si является причиной сдвига частоты оптического фонона кристалла. Величину сдвига легко оценить, воспользовавшись соотношением Грюнайзена [8]:

$$\frac{\nu_0}{\nu} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^\gamma,$$

где V_0 — объем недеформированной элементарной ячейки кремния, V — объем элементарной ячейки кремния в твердом растворе, ν_0 — частота оптического фонона в объемном недеформированном материале, ν — частота оптического фонона того же материала в твердом растворе, γ — параметр Грюнайзена. Соотношение Грюнайзена часто используется для оценки величины деформации элементарной ячейки в слое по сдвигу линий КРС. При этом считается, что сдвиг частоты связан с изменением объема элементарной ячейки в слоях, обусловленным гидростатическим (всесторонним) сжатием (или растяжением).

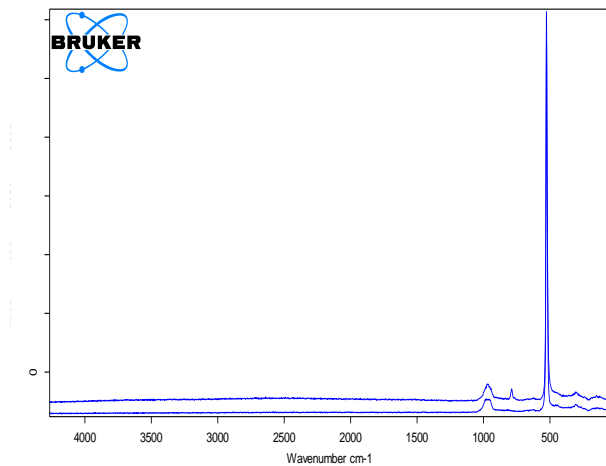


Рис.1. Спектр КР кремния р-типа, легированного примесями Gd: 1- спектр КР образцов $Si_{исход}$, 2- спектр КР образцов $p-Si<Gd>$, $\rho_{исх.}=0,3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

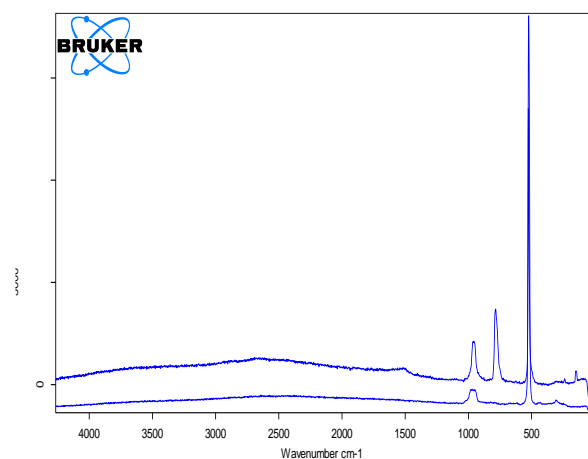


Рис.2. Спектр КР кремния n-типа, легированного примесями Gd: 1- спектр КР образцов $Si_{исход}$, 2- спектр КР образцов $n-Si<Gd>$, $\rho_{исх.}=10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

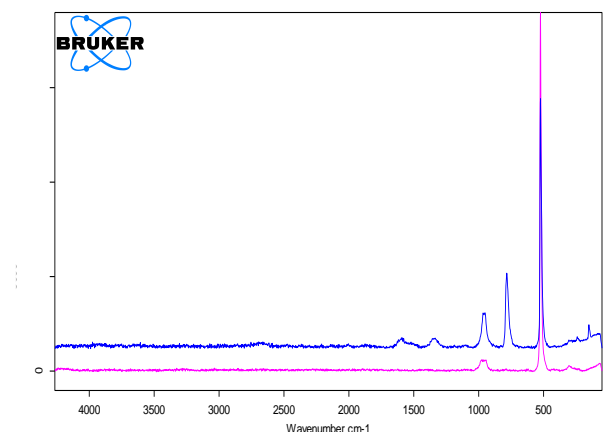
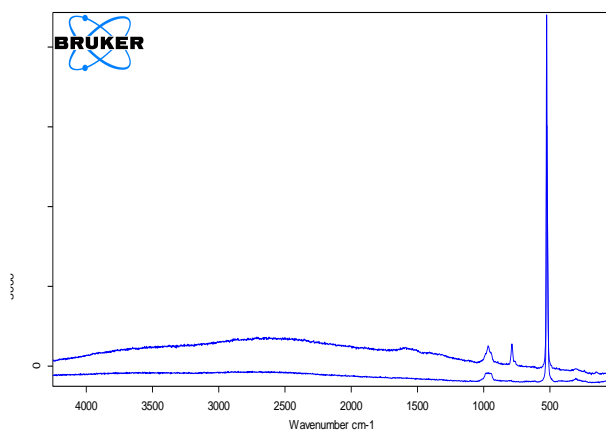


Рис.3. Спектр КР кремния n-типа, легированного примесями Gd: 1- спектр КР образцов $Si_{исход}$, 2- спектр КР образцов Gd_xSi_{1-x} , $\rho_{исх.}=15 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Рис.4. Спектр КР кремния n-типа, легированного примесями Gd: 1- спектр КР образцов $Si_{исход}$, 2- спектр КР образцов Gd_xSi_{1-x} , $\rho_{исх.}=40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

При анализе спектров в качестве внутреннего стандарта выбирали интенсивную полосу асимметричных валентных колебаний $\nu_{as}(\text{Si}-\text{O})$ при 1067 см^{-1} . Базисную линию проводили через минимумы поглощения при волновых числах 4000 и 755 см^{-1} . Сопоставление анализируемых образцов осуществляли по показателю относительной оптической плотности характеристических полос в приведенном виде к величине оптической плотности полосы внутреннего стандарта.

Вместе с тем, на всех изученных КР-спектрах в зависимости от $\rho_{исх.}=0.3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис.1), $\rho_{исх.}=10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис.2), $\rho_{исх.}=15 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис.3) и $\rho_{исх.}=40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис.4) появляются новые сигналы различной интенсивности, которые отражают образование новых типов связи. Так, если посмотреть на полученные спектры $\rho_{исх.}$ ($0.3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $13 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $15 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и $40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ соответственно), при повышении значения удельного сопротивления от $\rho_{исх.}=0.3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ до $\rho_{исх.}=40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ появляются, а также, увеличиваются интенсивности новых сигналов в области: 68 , 148 , 238 , 305 , 784 , 954 , 1340 и 1610 см^{-1} . Наблюдаемая наиболее существенная полоса при 784 см^{-1} , в нашем случае соответствует валентным колебаниям связи Gd – Si.

Таким образом, обнаруженные изменения в КР-спектрах образцов кремния, легированного гадолинием позволяют предположить, что в исследуемом образце осуществляется связь между атомами гадолиния и атомами кремния.

Литература

1. S.B. Utamuradova, S.Kh. Daliev, E.M. Naurzalieva, X.Yu. Utemuratova, "Investigation of Defect Formation in Silicon Doped with Silver and Gadolinium Impurities by Raman Scattering Spectroscopy," East Eur. J. Phys. 3, 430 (2023), <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-3-47>.
2. K.P. Abdurakhmanov, Sh.B. Utamuradova, Kh.S. Daliev, S.G. Tadjy-Aglavaeva, and R.M. Érgashev, "Defect-formation processes in silicon doped with manganese and germanium," Semiconductors, **32**(6), 606–607 (1998). <https://doi.org/10.1134/1.1187448>.
3. Iatsunskyi, G. Nowaczyk, S. Jurga, V. Fedorenko, M. Pavlenko, V. Smyntyna, "One and two-phonon Raman scattering from nanostructured silicon" Optik. 126, 18 (2015), <https://doi.org/10.1016/j.jilleo.2015.05.088>.
4. И.А. Белогорохов, Е.В. Тихонов, М.О. Бреусова, В.Е. Пушкарев, А.В. Зотеев, Л.Г. Томилова, Д.Р. Хохлов, "Комбинационное рассеяние света в полупроводниковых структурах на основе молекул моно- и трифталцианина, содержащих ионы эрбия," Физика и техника полупроводников. 41, 11 (2007).
5. Л.А. Фальковский "Исследования полупроводников с дефектами методом комбинационного (рамановского) рассеяния света" УФН. 174, 3 (2004).
6. А. С. Качко, В. Н. Ваховский, В. А. Володин, "Анггармонизм фононов в кремнии: исследование методом спектроскопии комбинационного рассеяния света," Вестник НГУ. Серия: Физика. 5, 1 (2010).
7. K.J. Kingma, and R.J. Hemley, "Raman spectroscopic study of microcrystalline silica," American Mineralogist, **79**(3-4), 269-273 (1994). https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-pdf/79/3-4/269/4209223/am79_269.pdf
8. Б.Д.Сандитов, Ш.Б.Цыдыпов, Д.С. Сандитов. Взаимосвязь параметром Грюнайзена и коэффициентом пуассона стеклообразных систем. Акустический журнал, 2007, том 53, №5, с.678-681.