



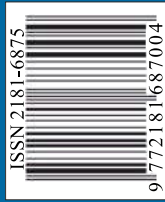
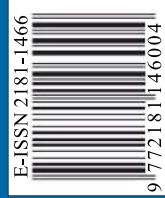
BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI ILMIY AXBOROTI



Научный вестник Бухарского государственного университета
Scientific reports of Bukhara State University

4(1)/2026

4(1)/2026



@buxdu_uz



@buxdu1



@buxdu1



www.buxdu.uz

BIOLOGIYA *** BIOLOGY *** БИОЛОГИЯ		
Umurkulova F.S., Yusufova D.R., Asatova N.R., Chorshanbiyeva R.A., Axmatova S.S.	Insonning ratsional ovqatlanishga bo'lgan gigiyenik talablarini tahlil qilish	221
Ҳасанов И.Ҳ.	Яйловлар самарадорлигини ошириш чоралари	228
KIMYO *** CHEMISTRY *** ХИМИЯ		
Мустафакулов А.А., Арзикулов Ф.Ф., Санакулова М., Хожиев Ш.Т., Ганиев Б.Ш.	Технология выращивания и исследования синтетического пьезоэлектрического кварца	233
ИНФОРМАТИКА *** INFORMATICS *** ИНФОРМАТИКА		
Холжигитов Д.Х.	Рақамли таълим шароитида математик тизимлар билан ишлаш компетенциялари	243
Turdimatov M.M., Maxsudov A.Y.	Kiberxavfsizlikda "zero trust" modelini mahalliyashtirish zaruriyati va istiqbollari	249
Rahmonov E.S., Xurramov A.X.	Ta'lim jarayonini matematik modernizatsiya qilish	256
Мусадинава Д.А., Ильхомова М.Ш.	Использование биоинформатических методов в оценке структурной конформации белковой молекулы	260
EKOLOGIYA *** ECOLOGY *** ЭКОЛОГИЯ		
Кудратов М.М., Хамраев О.С.	Стратегическое развитие водопользования АО «НГМК»	264

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КВАРЦА

Мустафакулов Асрор Ахмедович,
профессор Джизакского политехнического института
asrormustafakulov@gmail.com

Арзикулов Фазлиддин Фахриддин угли,
ассистент Ташкентского государственного медицинского университета
arzikulovfazliddin1997@gmail.com

Санакулова Мукаддас,
ассистент Джизакского политехнического института
sanakulova.m97@gmail.com

Хожиев Шерали Тешаевич,
профессор Ташкентского государственного медицинского университета

Ганиев Бахтиёр Шукуруллоевич,
доцент Бухарского государственного университета
asrormustafakulov@gmail.com

Аннотация. Работа представляет собой результаты исследования вопросов радиационного материаловедения. Фундаментом современной науки и техники является получение материалов с прогнозируемыми свойствами. Экспериментальные данные по росту кристаллов на облучённых затравках, по установлению взаимосвязи между структурой затравки и характеристиками выросшего слоя представляет большой интерес для специалистов, занимающихся созданием с помощью радиационных технологий материалов с заданными свойствами. В связи с этим большое внимание уделяется к вопросам, связанным с синтезом и ростом кристаллических веществ. Поэтому в данной работе приводятся данные о выращивании кристаллов кварца, на облучённых нейтронами затравках, исторические сведения о гидротермальном росте кристаллических материалов.

Работа посвящена выращиванию и исследованию кристаллов кварца на облучённых затравках с целью получения новых кристаллических веществ с заданными структурными и радиационно-оптическими характеристиками. Произведён расчёт доли объёма кристаллов кварца, покрытого «пиками смешения» при разных флюенсах нейтронов, с учётом присоединения к ним точечных дефектов. Установлено, что в нейтронно-облучённых затравках и выращенных на них кристаллах кварца существуют дефектные центры, принадлежащие к β -фазе кварца. Зависимости концентрации этих центров и β - фазы от флюенса нейтронов хорошо коррелируют между собой. Получено прямое доказательство механизма α - β -перехода в кварце при нейтронном облучении.

Исследованы структурные дефекты-центры окраски выращенных кристаллов кварца на облучённых нейтронным потоком затравках методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Приводятся результаты исследования влияния облучения нейтронным потоком в интервале доз 10^{16} - $8 \cdot 10^{20}$ н/см² на люминесцентные характеристики в температурном интервале 77-300 К в синтетических-выращенных кристаллов кварца (I тип) и в кристаллах кварца, выращенных на облучённых нейтронным потоком затравках (II тип). На основе анализа люминесцентных свойств изучена природа собственных дефектов структуры кристаллов кварца, их роль в образовании центров окраски и свечения. На основе анализа экспериментальных данных, исследованием люминесцентных свойств кристаллов кварца определено свойства различных центров свечения и образования центров окраски кристаллического кварца.

Ключевые слова: кристаллический кварц, β -фаза кварца, автоклав, затравка, радиация, нейтрон, люминесценция, T-центр.

SINETIK PIEZOELEKTRIK KVARTSNI YETISHTIRISH VA TADQIQ ETISH
TEKNOLOGIYASI

Annotatsiya. Ushbu ish radiatsion materialshunoslik masalalarini tadqiq qilish natijalariga bag'ishlangan. Zamonaviy fan va texnikaning poydevori oldindan belgilangan xususiyatlarga ega materiallar olishdan iboratdir. Nurlantirilgan urug' kristallarida kristallarning o'sishi, urug' kristali strukturasi va uning

ustida o'stirilgan qatlam xususiyatlari o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni aniqlash bo'yicha eksperimental ma'lumotlar radiatsion texnologiyalar yordamida berilgan xossalarga ega materiallar yaratish bilan shug'ullanuvchi mutaxassislar uchun katta qiziqish uyg'otadi. Shu munosabat bilan, kristal moddalarning sintezi va o'sishi bilan bog'liq masalalarga katta e'tibor qaratilmoqda. Shu sababli, mazkur ishda neytronlar bilan nurlantirilgan urug' kristallarida kvars kristallarini o'stirishga doir ma'lumotlar, shuningdek, kristal materiallarning gidrotermal o'sishi haqidagi tarixiy ma'lumotlar keltirilgan.

Mazkur ish oldindan belgilangan strukturaviy va radiatsion-optik xususiyatlarga ega bo'lgan yangi kristal moddalarni olish maqsadida nurlantirilgan urug' kristallarida kvars kristallarini o'stirish va tadqiq etishga bag'ishlangan. Neytronlarning turli flyuenslarida, nuqtaviy nuqsonlarning qo'shilishini hisobga olgan holda, "aralashish piklari" bilan qoplangan kvars kristallari hajmining ulushi hisoblab chiqildi. Neytron bilan nurlantirilgan urug' kristallarida va ularda o'stirilgan kvars kristallarida kvarsning β -fazasiga tegishli nuqsonli markazlar mavjudligi aniqlandi. Ushbu markazlar konsentratsiyasining va β -fazaning neytronlar flyuensiga bog'liqligi o'zaro yaxshi korrelyatsiyalanadi. Kvarsda neytron nurlanishi ta'sirida α - β o'tish mexanizmi to'g'ridan-to'g'ri isbotlandi.

Neytron oqimi bilan nurlantirilgan urug' kristallarida o'stirilgan kvars kristallarining strukturaviy nuqsonlari – rang markazlari elektron paramagnit rezonans (EPR) usuli yordamida tadqiq qilindi. Neytron oqimi bilan 10^{16} – $8 \cdot 10^{20}$ n/sm² doza intervalida nurlantirishning sintetik o'stirilgan kvars kristallari (I tur) va neytron oqimi bilan nurlantirilgan urug' kristallarida o'stirilgan kvars kristallari (II tur)ning 77–300 K harorat oralig'idagi lyuminesstent xarakteristikalariga ta'sirini o'rganish natijalari keltirilgan. Lyuminesstent xususiyatlar tahlili asosida kvars kristallari strukturasiidagi xususiy nuqsonlarning tabiati, ularning rang va nur taratish markazlari hosil bo'lishidagi o'rni o'rganildi. Eksperimental ma'lumotlar tahlili va kvars kristallarining lyuminesstent xususiyatlarini tadqiq qilish asosida turli nur taratish markazlarining xossalari va kristal kvarsda rang markazlarining hosil bo'lishi aniqlandi.

Kalit so'zlar: kristal kvars, kvarsning β -fazasi, avtoklav, urug' kristali, radiatsiya, neytron, lyuminesstensiya, T-markaz.

TECHNOLOGY FOR THE GROWTH AND INVESTIGATION OF SYNTHETIC PIEZOELECTRIC QUARTZ

Abstract. This work presents the results of research on radiation materials science. The foundation of modern science and technology is the creation of materials with predictable properties. Experimental data on crystal growth on irradiated seed crystals and on establishing the relationship between the structure of the seed and the characteristics of the grown layer are of great interest to specialists involved in creating materials with specified properties using radiation technologies. In this regard, much attention is given to issues related to the synthesis and growth of crystalline substances. Therefore, this work provides data on the growth of quartz crystals on neutron-irradiated seed crystals, as well as historical information on the hydrothermal growth of crystalline materials.

This work is dedicated to the growth and study of quartz crystals on irradiated seed crystals to obtain new crystalline substances with specified structural and radiation-optical characteristics. A calculation was made of the volume fraction of quartz crystals covered by "displacement spikes" at various neutron fluences, taking into account the attachment of point defects to them. It has been established that in neutron-irradiated seed crystals and the quartz crystals grown on them, there are defect centers belonging to the β -phase of quartz. The dependencies of the concentrations of these centers and the β -phase on neutron fluence correlate well with each other. Direct proof of the α - β transition mechanism in quartz under neutron irradiation has been obtained.

Structural defects—the color centers of quartz crystals grown on seed crystals irradiated with a neutron flux—were investigated using the electron paramagnetic resonance (EPR) method. The results of a study on the effect of neutron flux irradiation in the dose range of 10^{16} – $8 \cdot 10^{20}$ n/sm² on the luminescent characteristics in the temperature range of 77–300 K are presented for synthetically grown quartz crystals (Type I) and for quartz crystals grown on neutron-irradiated seed crystals (Type II). Based on an analysis of the luminescent properties, the nature of the intrinsic structural defects of quartz crystals and their role in the formation of color and luminescence centers were studied. Based on an analysis of the experimental data from studying the luminescent properties of quartz crystals, the properties of various luminescence centers and the formation of color centers in crystalline quartz were determined.

Keywords: *crystalline quartz, β -phase quartz, autoclave, seed crystal, radiation, neutron, luminescence, T-center.*

Введение. В настоящее время влияние структурных неоднородностей кристалла, представленных β - и метамиктными фазами кварца, а также точечными дефектами и различными примесями, на кинетику фазовых превращений, происходящих в кристаллах кварца при облучении нейтронными потоками, остаётся недостаточно изученным. Как известно [1], β -фаза кварца не сохраняется в стабильном состоянии при обычных условиях, а её дефектная структура остаётся малоизученной. В данной работе рассматривается вероятность передачи радиационно-индуцированной β -фазы и точечных дефектов от затравочного кристалла к нарощенному слою выращенного кварцевого кристалла, а также закономерности их распределения по толщине образца методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). В настоящее время среди спектральных методов, применяемых для исследования природы дефектных центров и их принадлежности к различным фазам кристаллов, метод ЭПР считается наиболее информативным. Кроме того, на основе анализа люминесцентных свойств была изучена природа собственных дефектов структуры кварцевых кристаллов, а также их роль в формировании центров окраски и свечения. В 1902 году французский исследователь О. Вернейль впервые получил искусственный монокристалл рубина массой 20 карат (1 карат = 0,2 г), тем самым положив начало выращиванию синтетических аналогов природных драгоценных камней и монокристаллов в целом [1]. В настоящее время в развитых странах сформирована целая индустрия по выращиванию монокристаллов, находящихся широкое применение в различных отраслях промышленности, таких как оптика, радиотехника, приборостроение, металлообработка, полупроводниковая и квантовая электроника, а также средства связи и другие. Бесцветный кварц, являясь одним из самых распространённых и недорогих минералов на Земле, долгое время оставался вне сферы интересов предпринимателей и учёных. Хотя чистые прозрачные кристаллы горного хрусталя всегда ценились. Ещё в глубокой древности из них вырезали линзы, с помощью которых жрецы зажигали «божественный огонь»- костры жертвенников. Считалось, что горный хрусталь избавляет от страшных бед и не даёт погибнуть в мороз. Такое поверье, видимо, объясняется внешним сходством минерала со льдом. Да само название «хрусталь» возникло от греческого «кристаллос» - лёд. В античные времена думали, что прозрачный кварц – затвердевший лёд. До 1940-х годов выращивание чистых кварцевых кристаллов не представляло интереса ни для ювелиров, ни для промышленности. Однако затем практически одновременно во всех индустриально развитых странах начались активные исследования в области синтеза кварцевых кристаллов [2]. Стремительный рост интереса к этому бесцветному минералу объяснялся его уникальными свойствами. Дело в том, что кварцевые кристаллы обладают пьезоэлектрическим эффектом: находясь в переменном электрическом поле, они начинают вибрировать с высокой стабильностью частоты [3]. Это свойство сделало кварцевые пластины незаменимыми компонентами высокостабильных генераторов высокой частоты – ключевых устройств радиотехники, что привело к резкому увеличению спроса на кварцевые кристаллы. В ходе исследований выяснилось, что идеально чистые и структурно совершенные кристаллы кварца в природе встречаются крайне редко, а по сути, практически отсутствуют. Даже внешне безупречные природные образцы имеют дефекты, которые ограничивают их использование в радиоаппаратуре [2-3]. В России работы по выращиванию кварца начались ещё до Великой Отечественной войны. К 1950-м годам в Институте кристаллографии АН СССР удалось получить достаточно крупные кристаллы, при этом их пьезоэлектрические свойства практически не отличались от характеристик природного кварца. Для ускорения исследований и организации промышленного производства кристаллов был создан специализированный институт – ВНИИСИМС. Вскоре после этого промышленность получила первый синтетический пьезокварцевый кристалл, выращенный в городе Александрове. Сегодня институт (ВНИИСИМС) занимается не только выращиванием кварца, но и производством исландского шпата, асбестов, синтетической слюды и других материалов. Самую большую популярность ВНИИСИМС принесли получаемые кварц и его ювелирные разновидности: аметист, цитрин, морион, которые вряд ли чем уступают естественным, созданным природой. Себестоимость же их во много раз ниже. Искусственный кварц играет важную роль в современных оптических приборах. Он используется для изготовления призм спектрографов, монохроматоров, а также линз, применяемых в ультрафиолетовой оптике. Пьезокварц по-прежнему остаётся ключевым материалом в радиотехнике. Из него производят пьезоэлектрические стабилизаторы частоты, фильтры, резонаторы, а также пьезоэлектрические

пластинки, используемые в ультразвуковых установках. Без синтетического кварца было бы невозможно создание радиоэлектронной аппаратуры, кварцевых часов, современных телевизоров и сотовых телефонов. Кроме того, благодаря этому минералу появились искусственные самоцветы – аметисты и цитрины, которые по своим характеристикам настолько близки к природным, что даже опытный ювелир не сможет их отличить. Синтетический кристалл формируется в условиях «свободного роста» в какой-либо полости – кристаллизаторе – автоклаве. В природе ими нередко оказываются полости пегматитовых жил. Но при этом на больших глубинах, где преобладают высокие давления и температура. Для других минералов нужны совсем иные условия образования. Алмаз, например, возникает на больших глубинах, где господствуют высокие температуры и огромные давления (P-T условия). Кристаллы кварца природа создаёт в водных растворах различных минерализаторов-кристаллизаторов. Об этом исследователи узнали, анализируя состав включений в минералах естественного происхождения. Правильно поняв «подсказку», специалисты разработали способ, отчасти моделирующий природные процессы. В естественных условиях кристаллы растут значительно медленные - сотни лет. Всё зависит от того, в каких природных условиях идёт рост кристалла, на какой глубине, при каких давлениях, какова концентрация растворов, многое другое. Изучив различные кварцевые месторождения, учёные создают в автоклаве оптимальные условия для синтеза, благодаря чему скорость роста кристаллов достигает высокой величины [4] - до 1 мм в сутки. В качестве исходного сырья используется кремнезём, представленный в виде обычного жильного кварца молочно-белого цвета. В щелочном растворе он разрушается до молекулярного состояния, после чего из молекул кремнезёма формируются совершенные кристаллы. Их выращивают на специальных затравках, которые помещают в автоклав. Затравка представляет собой бесцветную тонкую пластинку, вытянутую в длину. В настоящее время в производстве применяются синтетические кварцевые кристаллы. В процессе синтеза молекулы окиси кремния выстраиваются на затравках в строгом соответствии с их кристаллическим строением. Для успешного роста кристаллов необходим температурный градиент: раствор в нижней части автоклава должен быть горячее, чем в верхней. Это создаёт конвекционный перенос вещества — более лёгкие горячие потоки ассоциации кремнезёма поднимаются вверх, оседая на затравочных пластинах. Это процесс называется гидротермальный рост кристалла. В опытах используются маленькие 25-литровые автоклавы. Для серийного крупномасштабного производства требовались более надёжное оборудование, гораздо большие рабочие объёмы. В городе Александров (Россия) смонтировали автоклавы с рабочими объёмами от двухсот до нескольких тысяч литров. Партия кристаллов, выращенных на автоклаве - гиганте, непривычно большая - сотни штук. Все кристаллы до единого оказались высокого качества, с совершенно одинаковыми свойствами. Их можно использовать в качестве датчиков [5]. Большие автоклавы позволили получать кристаллы уникальные по величине и идеального строения. В природе столь совершенных пьезоэлектрических кристаллов нет. Одним из актуальных задач кристаллографии является выращивание кристаллических материалов с заранее заданными параметрами, также разработка путей целенаправленного изменения их физико-химических и технологических свойств. До сих пор в практике для решения этой задачи не было использовано сочетание радиационных методов с традиционными способами гидротермального выращивания кристаллических веществ. По этому целью данной работе являлось изучение влияния структурных особенностей затравки, дефектов структуры, радиационного происхождения и других факторов на физико-химические свойства выращиваемых материалов.

Методы исследования. Кристаллы были выращены во ВНИИСИМС (г. Александров, Россия) гидротермальным методом. В качестве затравочных образцов использовались кварцевые кристаллы, которые подвергались нейтронному облучению в разных дозах в Институте Ядерной Физики АН РУз (г. Ташкент, Узбекистан). Исследование ЭПР-спектров кварцевых кристаллов, выращенных на затравках после нейтронного облучения, выполнялось с помощью спектрометра ER-420 при длине волны $\lambda = 3$ см. Перед анализом образцы предварительно облучали γ -лучами с дозой 10^5 Гр. Гаммалюминесценционные (ГЛ) спектры регистрировались при температурах 77 и 300 К с использованием монохроматора SPM, а свечение фиксировалось фотоумножителем ФЭУ-39. Возбуждение ГЛ осуществлялось γ -лучами изотопа ^{60}Co с мощностью 1700 Р/с. Для исследования термолюминесцентных (ТЛ) спектров и температурных кривых термовысвечивания (ТВ) кристаллы подвергались γ -облучению ^{60}Co с дозой 10^7 Р при температурах 77 и 300 К. Кривые ТВ фиксировались при постоянной скорости нагрева 8 град/мин в температурном диапазоне 77–650 К, а свечение измерялось фотоумножителем ФЭУ-39. Спектры ТЛ для различных температурных пиков ТВ регистрировались спектрометром MPF-2A в диапазоне 200–700 нм.

Результаты исследования. Исследованием в [6] методом ЭПР было установлено, что в искусственных и природных кварцевых кристаллах, подвергшихся отжигу при температуре $T = 970$ К, после γ -облучения с дозой $D = 10^6$ Гр и последующего нагрева до $T = 570$ К, формируется новый парамагнитный Т-центр. Согласно классификации парамагнитных центров в различных кристаллических пространственных группах [7], Т-центры могут присутствовать в высокотемпературной β -фазе кварца, которая характеризуется пространственной группой $R6_22$. По мнению исследователей, наиболее вероятным механизмом их образования является формирование внутри кремнекислородных тетраэдров, содержащих вакансии кремния. На основе этих данных можно предположить, что в кварцевых кристаллах, выращенных на облучённых нейтронным потоком затравках, также должны присутствовать Т-центры. Наши экспериментальные результаты подтверждают это предположение: во всех таких кристаллах обнаружены Т-центры (см. рис.1). Анализ изменения интенсивности сигнала Т-центров в зависимости от флюенса нейтронного облучения показал, что при увеличении флюенса интенсивность сигнала возрастает. Сравнительное исследование выявило, что концентрация Т-центров во всех случаях значительно выше в дымчатых тёмных кристаллах, чем в безцветных-прозрачных (рисунок 1). Данные о росте концентрации Т-центров с увеличением флюенса облучения затравок качественно согласуются с результатами рентгеноструктурного анализа [8] и люминесцентных исследований [9]. Однако важно отметить, что между объёмом β -фазы кварца и концентрацией Т-центров отсутствует прямая количественная корреляция, так как Т-центры формируются в кристаллической структуре кварца в высокотемпературной β -фазе.



Рисунок 1. Спектры ЭПР Т-центра для двух типов кварцевых кристаллов, выращенных на нейтронно-облучённых затравках: (а) окрашивающиеся кристаллы, (б) неокрашивающиеся кристаллы

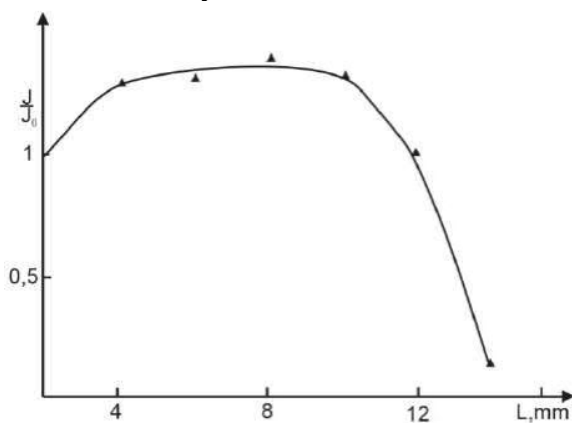


Рисунок 2. Распределение количество дефектных центров ЭПР Т-центра по толщине нарощего слоя выращенного кристалла

Дымчатая окраска кристаллического кварца обусловлена присутствием дырочного $[AlO_4]$ -центра, который формируется в результате изоморфного замещения ионов Si^{4+} примесными ионами Al^{3+} [10]. Согласно исследованиям [11–12], наличие Al^{3+} способствует появлению E^1 -центров в кристаллах SiO_2 под влиянием ионизирующего излучения. Учитывая модель Т-центра [6] и данные из работ [10, 12], можно сделать вывод, что различное содержание $[AlO_4]$ – и E^1 -центров определяет количественные различия в

концентрации Т-центров между прозрачными и тёмными образцами кварцевых кристаллов. Спектроскопический анализ методом ЭПР показал, что в темных кристаллах интенсивность сигналов от $[AlO^4]$ – и E^1 -центров выше, чем в прозрачных – бесцветных кристаллах. Для выявления закономерностей формирования Т-центров были исследованы ЭПР-спектры обычных кварцевых кристаллов, подвергшихся нейтронному облучению, а также кристаллов, выращенных на нейтронно-облученных затравках и дополнительно облученных нейтронами. В стандартных нейтронно-облученных кристаллах, несмотря на наличие β - фазы, Т-центры не обнаружены. Дополнительное нейтронное облучение кристаллов, выращенных на нейтронно-облученных затравках, приводит к снижению концентрации Т-центров. При флюенсе дополнительного облучения 10^{18} н/см² спектр ЭПР Т-центра перестаёт регистрироваться. Как показано в [6], в природных кварцевых кристаллах Т-центры формируются в областях, которые кристаллизовались при температурах, близких к температуре α - β -перехода, тогда как в низкотемпературных участках Т-центры не образуются. В ходе нашего исследования распределение Т-центров по толщине кристалла анализировалось методом ЭПР на пластинках толщиной 2 мм, вырезанных параллельно затравке из выросшего слоя. Установлено, что концентрация Т-центров достигает максимума на определённой глубине, после чего начинает снижаться. Структурный анализ кварцевых кристаллов, выращенных на облученных нейтронным потоком затравках, проведённый методами рентгеноструктурного анализа [13] и люминесцентных исследований [14–15], показал уменьшение содержания β - фазы с увеличением толщины выросшего слоя. В кристаллах, выращенных на затравках, облученных флюенсом 5×10^{19} н/см², содержание β -фазы в первой пластинке (2–4 мм от затравки), вырезанной из выросшего слоя, составляет 48% от объёма кристалла. В третьей пластинке (6–8 мм от затравки) этот показатель снижается до 13%, а в пятой (10–13 мм от затравки) β -фаза уже не обнаруживается [13]. Отметим, что кварцевые кристаллы, выращенные на нейтронно-облученных затравках, формировались в стандартных Р-Т-условиях роста кварца. При этом в затравке присутствуют как α -, так и β -фазы кварца, различающиеся по своим физико-химическим и структурным характеристикам [6]. Таким образом, изменение фазового состава затравки может оказывать влияние на Р-Т-условия роста кристалла. Предполагается, что снижение концентрации Т-центров связано с изменением этих условий при увеличении содержания β -фазы кварца, что может приводить к модификации дефектной структуры растущего кристалла.

Изучение спектров люминесценции и ЭПР позволяет установить их зависимость от количества β - фазы в исследуемых кристаллах. Результаты этих исследований играют важную роль при изучении влияния структурных неоднородных кристаллов, в виде смеси α - и β -фаз, на протекание таких элементарных процессов как перенос заряда и энергии различными видами электронных возбуждений, преобразование локальных центров под действием ионизирующих излучений. При решении этих вопросов, исследование спектрального состава люминесценции, зависимости интенсивностей полос свечений от температуры возбуждения γ -лучами в интервале 77-300 К, установление областей термической стабильности полос свечений имеют важное значение, поскольку в этой области температуры наблюдаются автолокализованные экситоны (АЛЭ) [9,14,15] различных дырочных центров свечения и люминесцентные преобразования локальных центров [15]. Надо отметить, что в настоящее время относительно природы полос свечений, наблюдаемых в области 77-300 К существуют разные мнения [14,15]. В работах предполагают, что свечение АЛЭ обуславливает появление полосы 440 нм, по мнению авторов свечение АЛЭ приводит к появлению полос 477 и 490 нм соответственно. Существует мнения о том, что полосы свечения в области 470-490 нм обусловлены электронно-дырочной рекомбинацией вблизи примесных алюминиевых тетраэдров [14-15]. Исследование ЭПР кристаллов кварца, облученных затравках является необходимым результатом при установлении природы дефектов структуры и их принадлежности к различным модификациям кристаллического кварца. В данной работе изучены спектры ЭПР, и распределение центров ЭПР по толщине выросшего кристалла в необлученных и дополнительно облученных нейтронами кристаллах кварца, выращенных на нейтронно-облученных затравках флюенсами 10^{18} , $5 \cdot 10^{18}$ и 10^{19} н/см². Исследованы кинетика полос ГЛ и зависимость их интенсивностей от температуры возбуждения в обычных номинально чистых, примесных (Al, Ge, Fe, Co, Ga) кристаллах и в кристаллах кварца, выращенных на затравках, облученных флюенсами нейтронов 10^{17} , 10^{18} и $5 \cdot 10^{19}$ н/см², а также в кристаллах, подвергнутых воздействию высокотемпературного электролиза электрообработки (ЭО) на воздухе [14-15]. Исследование ГЛ кристаллов кварца, выращенных на нейтронно-облученных затравках флюенсами 10^{17} , 10^{18} и $5 \cdot 10^{19}$ н/см² показали, что в интервале

температур 77-200 К наблюдается полоса с максимумом при 490 нм. На рисунке 4 приведена зависимость интенсивности полосы от температуры возбуждения. Её интенсивность уменьшается с увеличением флюенса нейтронов (рисунок 5). Изучение зависимости интенсивности полосы 490 нм в обычных нейтронно-облучённых кристаллах показало, что с увеличением флюенса нейтронов её интенсивность также уменьшается (рисунок 6).

Обсуждение результатов исследования. Анализ литературных данных показывает, что относительно природы центров свечения полосы 490 нм в кристаллах кварца существуют разные мнения. В [15] сделано предположение, что полоса 490 нм обусловлена свечением АЛЭ, образующихся рекомбинационным путём. Показано, что в кристаллах существуют различные типы центров дымчатой окраски с различными энергиями активации. Это, по-видимому, обусловлено наличием различных одновалентных катионов у алюмоокислородных тетраэдров. На основе этих данных в [14] предполагают, что наблюдаемые в интервале температур 80-800 К полосы рентгенолюминесценции (РЛ) возникают за счёт рекомбинации электронов с дырками, захваченными у различных алюмоокислородных тетраэдров.

Исследование методом ЭПР показало, что в кристаллах, облучённых при температурах выше 145 К образуются $[AlO_4]$ -центры и атомарный кислород [6-7]. Допускается, что при этом происходит распад $[AlO_4/H]$ -центра за счёт ухода водорода. Если температура облучённого при 77 К образца поднимается до температур 130 К, то происходит термическое освобождение электронов от уровней захвата, образованных водородом и резкое уменьшение количества $[AlO_4]^\circ$ -центров. Это показывает, что области температур 77-130 К $[AlO_4]^\circ$ -центры могут участвовать в качестве центров свечения. Необходимо также отметить, что в области 77-200 К в качестве центров свечения могут вступать $[AlO_4/M]^+$ (М-металл)-центры [9,15]. При температурах ниже 200 К за счёт радиационно-стимулированной диффузии наблюдается уход щелочного металла и он преобразуется в дырочный $[AlO_4]^\circ$ -центр [15]. Для выяснения возможности дырочных $[AlO_4]^\circ$ -центров вступать в качестве центров свечения полосы 490 нм исследованы ГЛ номинально чистых, природных и искусственных кристаллов с примесями Al. При этом кристаллы с Al облучались гамма-лучами до насыщения дымчатой окраски при 77 и 300 К, а затем при 77 К снимались спектры ГЛ. Исследование показало, что при этом интенсивность полосы 490 нм уменьшается. Это показывает, что дымчатая окраска не является центрами свечения полосы 490 нм. При этом следует отметить, что в γ -облучённых кристаллах наблюдается полоса поглощения с максимумом 460-490 нм и уменьшение интенсивности полосы 490 нм происходит из-за реабсорбции свечения. Целью выяснения возможной роли $[AlO_4]^\circ$ -центров, образующихся за счёт разрушения $[AlO_4/H]$ -центров, исследовали ГЛ кристаллов, подвергнутых воздействию электрообработки (ЭО) на воздухе при высоких температурах, где количество $[AlO_4/H]$ -центров заведомо намного больше, чем в необработанных кристаллах. Сравнение интенсивности полосы 490 нм измеренных при 77 К в необработанных и электрообработанных кристаллах показало, что после обработки интенсивность полосы уменьшается примерно на порядок. Однако исследование инфракрасных (ИК) - спектров поглощения не позволило установить корреляцию между изменением интенсивностей 3385 см^{-1} , обусловленных $[AlO_4/H]$ -центром [14-15], и полосы ГЛ с максимумом 490 нм. Установлено, что в номинально чистых кристаллах интенсивности полосы 490 нм больше, чем в других примесных кристаллах. Вышеприведённые данные позволяют утверждать, что полоса 490 нм является собственной и не возникает за счёт рекомбинации электрона с дыркой, захваченной $[AlO_4]^\circ$ -центром. Известно, что в окрашивающихся кристаллах существуют различные ловушки для дырок, образующихся, в основном, у примесных атомов и имеющие различные энергии активации. При гамма облучении в кристаллах кварца образуется нерелаксированные и релаксированные дырки, которые является подвижными в широкой области температуры. В процессе облучения идёт конкуренция между двумя процессами-захват нерелаксированных дырок активаторами и центрами свечения. Увеличение количества примеси приводит к росту вероятности захвата ими дырок, что обуславливает падение интенсивности полосы 490 нм. Уменьшение полосы 490 нм при гамма и нейтронном облучении по видимому, обусловлено:

- а) препятствием радиационно-наведенных дефектов к подходу дырок к центрам свечения;
- б) уменьшением вероятности захвата дырок центрами свечения за счет их разрушения или преобразования.

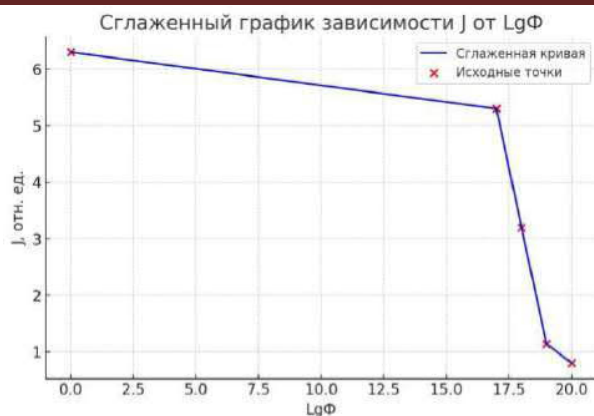


Рисунок 3. Зависимость интенсивности полосы 490 нм от флюенса нейтронного облучения затравок в кристаллах, выращенных на облучённых нейтронным потоком затравках, при температуре 77 К

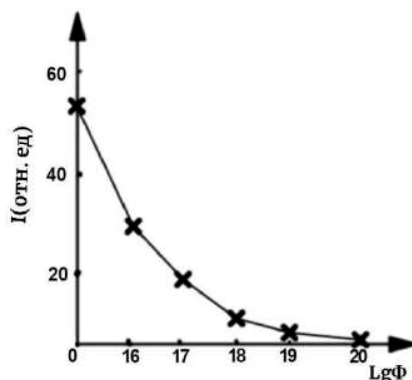


Рисунок 4. Зависимость интенсивности полосы 490 нм от облучения нейтронного потока при температуре 77 К

В кристаллах, выращенных на облученных нейтронным потоком затравках, наследованные дефекты структуры и β -фаза, сформировавшиеся в нарощем слое, препятствуют миграции дырок к центрам свечения. В результате этого наблюдается снижение интенсивности люминесцентной полосы на 490 нм с увеличением дозы облучения затравки (рисунок 4). Примечательно, что аналогичная зависимость интенсивности полосы 490 нм от флюенса нейтронного облучения отмечается как в обычных кристаллах I-типа, так и в кристаллах, выращенных на облученных нейтронным потоком затравках- П-типа. Этот факт дополнительно подтверждает структурное сходство между ними и свидетельствует о передаче нарощему слою дефектов структуры затравочного кристалла (рисунки 3 и 4).

Исследование ГЛ кристаллов кварца, синтезированных на облученных затравках нейтронным потоком, показали что выше температуры 200 К наблюдается тушение полосы 490 нм и возникает полоса с максимумом примерно 420 нм. Её интенсивность уменьшается с температурой возбуждения и при температуре 300 К она исчезает (рисунок 4). Облучение кристаллов гамма лучами при 300 К дозой $5 \cdot 10^4$ Гр и флюенсом нейтронов 10^{17} см^{-2} приведёт к исчезновению полосы 420 нм. Для выяснения природы полосы 420 нм исследованы ГЛ при температуре 200 К обычных номинально чистых, искусственных и природных кристаллов с примесями Al, Ge, Fe. При этом в кристаллах с примесью Al также выше температур 200 К обнаружена полоса свечения с максимумом 490 нм и полоса свечения 420 нм (рисунок 5 и рисунок 6).

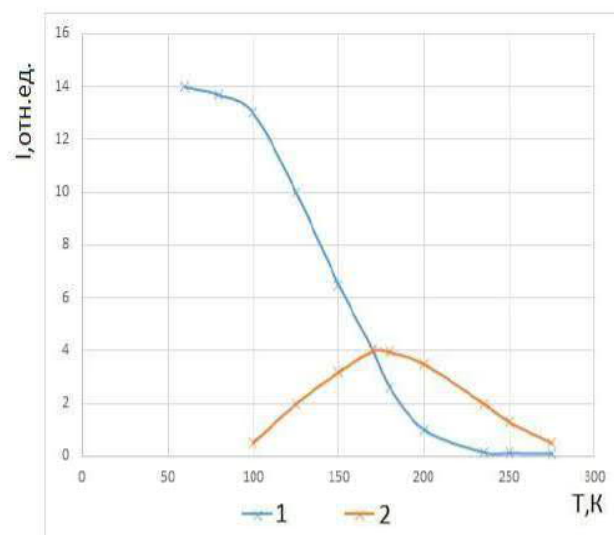


Рисунок 5. Зависимость интенсивности полос ГЛ 490 нм -1 и 420 нм -2 в кристаллах SiO₂:Al от температуры возбуждения

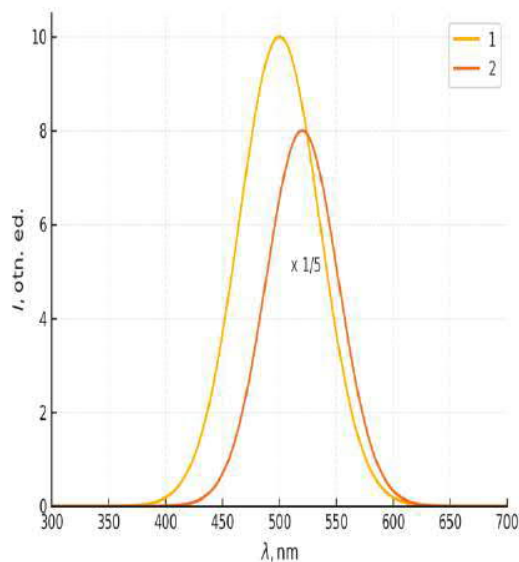


Рисунок 6. Спектры низкотемпературного ГЛ кристаллов SiO₂:Al: 1-при 77 К; 2-при 210 К

Следует отметить, что отжиг гамма облучённых кристаллов при 570 К приводит к восстановлению центров свечения при 420 нм. В настоящее время природа полосы свечения в области 420-430 нм не установлена. В [16] обнаружена полоса рентгенолюминесценции (РЛ) 430 нм и предполагается, что она возникает за счёт рекомбинации электрона с дыркой, захваченной на [AlO₄]^o- центре. Исследование РЛ номинально чистого кварца в интервале температур 80-300 К также показало, что наряду с полосами 380 нм и 440 нм наблюдается полоса с максимумом 425 нм [16-17]. Полоса 425 нм термически тушится в области температур 170-210 К. По мнению авторов, полоса 425 нм не возникает за счёт электронно-дырочной рекомбинации вблизи ионов алюминия. При исследовании низкотемпературной фотолюминесценции природного кристаллического кварца, возбуждаемой фотонами с энергией выше 6 эв (примерно 210 нм), обнаружена широкая полоса с максимумом около 3 эв (примерно 413 нм). Предполагается, что центры люминесценции не связаны с алюминием, находящимся в тетраэдрическом положении. Центры свечения содержат примесь алюминия, ионов щелочных металлов, протонов и, возможно, собственные дефекты. Известно, что примесь Al в ассоциации с вакансией кислорода не образует центр дымчатой окраски. Сравнение показывает, что характеристики центров свечения полосы

413 нм близки характеристиками F-центров в адекватно-окрашенном лейкосапфире. Возможно, что вхождение Al в SiO₂ обуславливает появление дефекта, структура которой схожа со структурой F-центра в Al₂O₃. Различие температурной зависимости времени затухания F-центров и центров свечения полосы 413 нм, по-видимому, обусловлено вхождением в структуру кристаллов кварца ионов компенсаторов.

Выводы. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что в кристаллах, синтезированных на облучённых нейтронным потоком затравках, радиационно-наведённая β-фаза, унаследованная нарощим слоем, обладает дефектной структурой. Образование парамагнитного T-центра связано с изменением P-T-условий роста. Таким образом, экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности получения кварцевых кристаллов, содержащих стабильную β- фазу кварца при нормальных условиях, при их выращивании на облучённых затравках.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kolobov A.Yu. Sycheva G.A. *Quartz glass obtained from Ramenskii sand on dinur plasma torches: Features of crystallization on polished surface. Phys.Solid State*, 2019, vol.61, №.12, P.2359–2362.
2. Песков А.В., Алекина Е.В., Тарасова Е.Ю. *Типоморфные особенности кварца // Успехи современного естествознания.* – 2020. – № 11. – С. 95-100;
3. Кокурин Ю.А., Морозова Е.А., Муратов В.С. *Кварц. Анализ естественных свойств // Фундаментальные исследования.* – 2009. – № 5. – С. 55-56;
4. Panasiuk G., Izotov A., Danchevskaia M., Belan V., Semenov E., Kozerozhets I. (2018). *Increasing the Crystallization Rate during the Growth of Quartz Single Crystals. Doklady Akademii nauk* 481(1), pp.45-46 DOI: 10.31857/S086956520000049-6
5. Х Цзян, К Ким, С Чжан, Дж Джонсон, Г Салазар - Датчики, 2013 - *mdpi.com*. *Высокотемпературное пьезоэлектрическое зондирование.*
6. Раков Л.Т., Плескова М.А., Моисеев Б.М. *Парамагнитный центр в термообработанном кварце. Докл. АН СССР.*-1986.Т.289.№4.с.962—965.
7. Дугиева Д. А. *Изучение пьезоэлектрического эффекта в кварце / Д. А. Дугиева. // Молодой ученый.* 2020. № 34 (324). С. 4-6.
8. Mustafakulov Asror, et al. *Свойства синтетических кристаллов кварца. Физико-технологическое образование.* 3 (2021).
9. Юлдашев У., Мустафакулов А. (2023). *Природа центров люминесценции кристаллов кварца, выращенных на нейтронно-облучённых затравках. «Узбекский физический журнал», 25(1).*
10. Мустафакулов А.А., Туропов У.У., Маллаев О.У. (2018). *Научно-практич. журн. "Высшая школа" Пьезоэлектрический эффект в выращенных кристаллах кварца", (6), 30.*
11. P.Kh. Khabibullaev, Sh.A. Vakhidov, E.M. Gasanov, J.D. Ibragimov, A.A. Mustafakulov, "Radiation Inheritance Of Structure Defects In Quartz Crystals, Grown On Neutrino-Irradiated Inoculations", *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 55:9 (1985), 1837–1838
12. N. Tokuda, M. Murata, and D. Hoja, *J. Appl. Phys. Jpn.*, 40, No. 9B, 5547-5550 (2001).
13. Vakhidov S. (1987). *Neutron irradiation influence on crystalline quartz structure and properties. Cryst. Lattice Defects Amorphous Mater.*, 13(3), 241-244.
14. Mustafakulov A.A., Olimov O., Porсахонов А., Akhmedov A., Nurillaev O. *Study of the luminescence of SiO₂ crystals. III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022) Russia (March 3-6, 2022).*
15. Mustafakulov, A. (2024). *Radiation modification of quartz and its spectral characteristics. In E3S Web of Conferences (Vol. 508, p. 07011). EDP Sciences*
16. Hohinav W. *Phys. Stat. Sol.(a)*.88, 1, 267, 1985
17. P.Qalandarov et all. *ICECAE-2022. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1142 (2023) 012052. *IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1142/1/012052*