

**Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева
Национальной академии наук Кыргызской Республики**

ISSN 1694-6634

www.iopjournal.org

эл.почта: info@iopjournal.org

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ФИЗИКА

ИЛИМИЙ ЖУРНАЛЫ

2021, №1

Кыргызстан, г. Бишкек

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ ФИЗИКА

Учредитель:

Институт физики им. академика
Ж.Жеенбаева Национальной
академии наук Кыргызской
Республики

Журнал зарегистрирован в
Министерстве юстиции
Кыргызской Республики.
Свидетельство о регистрации
№1418 от 13 июня 2008г.
ISSN 1694-6634

Редакционная коллегия:

Главный редактор, д.ф.-м.н.,
профессор **Жеенбаев Н.Ж.**
Зам. главного редактора, д.ф.-м.н.,
профессор **Касмамытов Н.К.**
Ответственный секретарь,
к.ф.-м.н. **Мамытбеков У.К.**

Члены редколлегии:

А.Ж. Жайнаков	Академик НАН КР	(Кыргызстан)
А.А. Кутанов	Академик НАН КР	(Кыргызстан)
Т.С. Рамазанов	Академик НАН РК	(Казахстан)
М.М. Кидибаев	Член-корр. НАН КР	(Кыргызстан)
Э.М. Мамбетакунов	Член-корр. НАН КР	(Кыргызстан)
Б.В. Шульгин	д.ф.-м.н., профессор	(Россия)
Т.Н. Нурахметов	д.ф.-м.н., профессор	(Казакстан)
С. Джуманов	д.ф.-м.н., профессор	(Узбекистан)
М. Имаев	д.ф.-м.н., профессор	(Россия)
А.А. Назаров	д.ф.-м.н., профессор	(Россия)
В.Н. Фоломеев	д.ф.-м.н., профессор	(Кыргызстан)
Р.М. Султаналиева	д.ф.-м.н., профессор	(Кыргызстан)
Н.К. Джаманкызов	д.ф.-м.н., профессор	(Кыргызстан)
Г.Дж. Кабаева	д.ф.-м.н., профессор	(Кыргызстан)
А.Т. Татыбеков	д.т.н.	(Кыргызстан)
В.Ю. Иванов	к.ф.-м.н.	(Россия)
К.Х. Хайдаров	к.ф.-м.н.	(Кыргызстан)
К.К. Талыпов	к.т.н.	(Кыргызстан)
Дж.А. Исмаилов	к.т.н.	(Кыргызстан)
Б.Б. Саякбаева	к.ф.-м.н.(техн.секр-рь)	(Кыргызстан)

Адрес редакции:

720071, Кыргызская Республика,
г.Бишкек, проспект Чуй, 265-а

Тел.: +(312)64-62-90
Факс: +(312)43-11-69, 43-11-71
E-mail: ulan-mk@bk.ru

УДК: 621.373.826

ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ СФОРМИРОВАНИЕМ РЕЛЬЕФА НА ДВУХСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЕ a-Si/Ag

А.А. Кутанов, Н. Сыдык уулу, И.А. Снимщиков

*Институт физики им. академика Ж.Ж. Жеенбаева НАН КР,
г.Бишкек, проспект Чуй 265-а*

Аннотация. В данной работе представлены результаты прямой лазерной записи на двухслойной структуре a-Si/Ag (аморфный кремний/серебро), нанесенной на стеклянную подложку методом магнетронного напыления. Исследованы спектры поглощения пленок a-Si различной толщины, и стеклянной подложки. Предложен метод прямой лазерной записи микроструктур сфокусированным излучением одномодового полупроводникового лазера с длиной волны $\lambda = 405$ нм на двухслойной среде a-Si/Ag со стороны стеклянной подложки. Исследовано формирование рельефа на пленке серебра при прямой записи импульсами полупроводникового лазера с $\lambda = 405$ нм на подслое a-Si.

Ключевые слова: *прямая лазерная запись, аморфный кремний, слой серебра, излучение полупроводникового лазера, электронный микроскоп.*

DIRECT LASER RECORDING BY FORMING A RELIEF ON A TWO-LAYER STRUCTURE a-Si/Ag

A.A. Kutanov, N. Sydyk uulu, I.A. Snimshikov

*Institute of Physics academician J.J. Zheenbaeva, NAS KR,
Bishkek, Chui Avenue 265-a*

Annotation. This paper presents the results of direct laser recording on a two-layer a-Si / Ag structure (amorphous silicon / silver) deposited on a glass substrate by magnetron sputtering. The absorption spectra of a-Si films of various thicknesses and a glass substrate are investigated. A method is proposed for direct laser recording of microstructures by focused radiation of a single-mode semiconductor laser with a wavelength of $\lambda = 405$ nm on a two-layer a-Si / Ag medium from the side of a glass substrate. Abstract — The formation of a relief on a silver film by direct recording by semiconductor laser pulses with $\lambda = 405$ nm on a-Si sub layer is investigated.

Key words: *direct laser recording, amorphous silicon, silver layer, semiconductor laser radiation, electron microscope.*

Основой современных методов защиты продукции, товаров, документов и ценных бумаг являются оптические и голографические защитные технологии. Требуется разработка новых методов записи голограмм и микроструктур, материалов, упрощающих технологичность, идентификацию и проверку подлинности. Создание национальных средств защиты документов, ценных

бумаг и особо ценных объектов является одной из важных государственных задач, обеспечивающих ее национальную и экономическую безопасность.

Целью настоящей работы является исследование нового метода прямой лазерной записи с формированием рельефа на двухслойной структуре аморфный кремний/серебро, нанесенной на стеклянную подложку, при воздействии сфокусированным лазерным излучением на слой аморфного кремния со стороны подложки.

1. Двухслойная структура a-Si/Ag нанесенная на стеклянную подложку

Ранее методом магнетронного нанесения на распылительной установке были получены однородные пленки аморфного кремния и интерференционные спектральные фильтры и исследована прямая лазерная запись на них [1,2].

На полученные пленки аморфного кремния проводили лазерную запись на различных длинах волн. Экспериментально установлено, что под действием лазерного излучения аморфный кремний переходит в поликристаллический при локальном увеличении объема среды [3,4].

Когда аморфный кремний переходит в поликристаллическое состояние, перестраивается решетка и в пленке образуются выпуклости за счет локального увеличения объема среды при воздействии сфокусированного лазерного излучения. Для исследования возможностей прямой лазерной записи на двухслойной структуре a-Si/Ag изготавливались образцы, структура которых представлена на рис. 1.

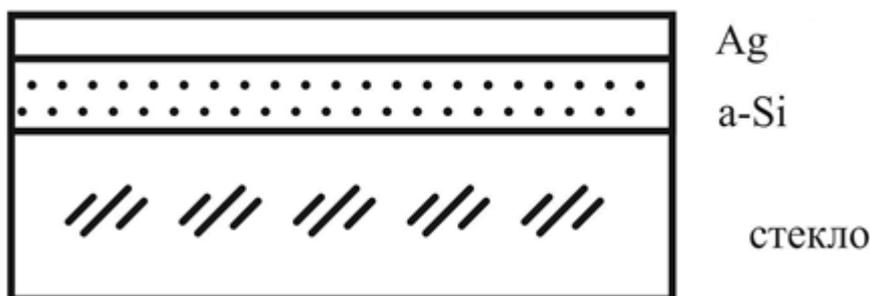


Рис.1. Структура двухслойной среды аморфного кремния и серебра, нанесенных на стеклянную подложку

2. Поглощение света в тонких пленках α-Si

Для измерения спектров поглощения в тонких пленках α-Si использован двухлучевой спектрофотометр РУЕ UNICAM 100. Основные элементы оптической схемы прибора показаны на рис. 2. Она содержит источник света, перестраиваемый в диапазоне длин волн $\lambda = 200 \dots 800$ нм, переключатель лучей, попеременно подающий лучи в два измерительных оптических канала, а также зеркала, направляющие оба луча в фотоприемник. Верхний по схеме канал назовем опорным, а нижний – предметным.

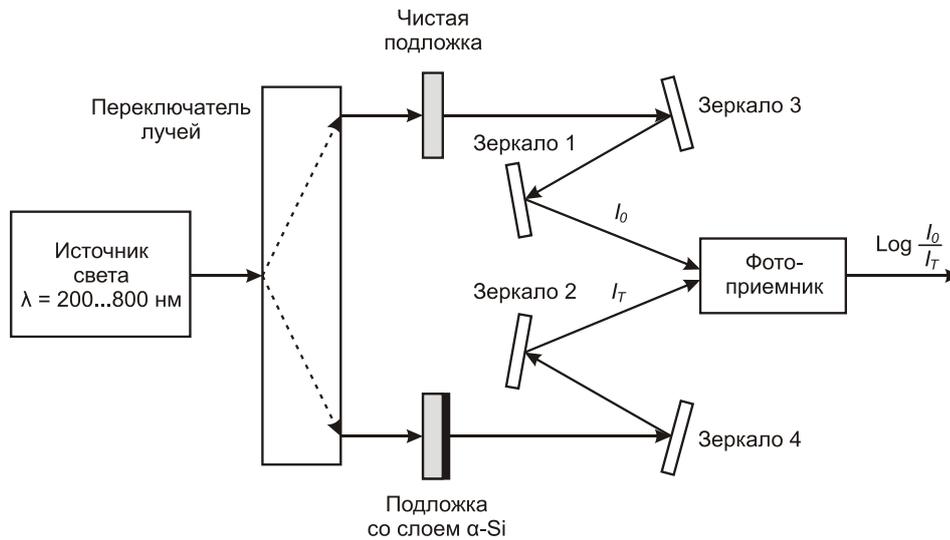


Рис.2. Схема для измерения спектров поглощения материалов

Электронная схема, обрабатывающая сигналы с выхода фотоприемника, вычисляет десятичный логарифм отношения интенсивности света из опорного канала (I_0) к интенсивности света из предметного канала (I_T)

$$K_T = \log \frac{I_0}{I_T}$$

Исследуемая стеклянная подложка со слоем α -Si помещалась в предметный канал. Для того, чтобы из результата измерения вычесть величину поглощения в подложке, в опорный канал помещалась идентичная чистая подложка.

Исследованы образцы с различной толщиной слоя α -Si. Полученные спектры поглощения показаны на рис. 3.

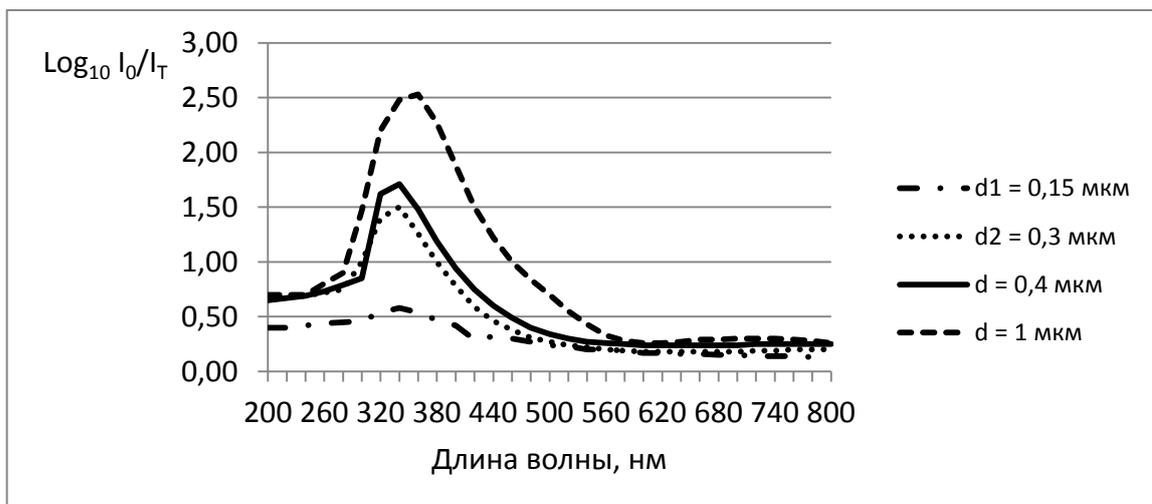


Рис.3. Спектры поглощения в пленках α -Si различной толщины

Видно, что максимум поглощения света приходится на область длин волн 340...360 нм. Как следует из графика на рис.3, излучение полупроводникового лазера с длиной волны $\lambda = 405\text{нм}$, также будет хорошо поглощаться пленкой аморфного кремния с толщиной 1мкм.

3. Поглощение света в стеклянной подложке

Схема для измерения спектра поглощения стеклянной подложки идентична схеме на рис. 2, с той лишь разницей, что одна чистая подложка помещена в предметный канал спектрофотометра. Толщина подложки составляет 1,35 мм. Спектр поглощения чистой подложки показан на рис. 4.



Рис.4. Спектр поглощения стеклянной подложки

Видно, что в диапазоне длин волн 360...800 нм поглощение света в подложке практически постоянно и минимально. На основе исследованных спектров поглощения тонких слоев аморфного кремния и стеклянной подложки, сделан вывод о возможности прямой лазерной записи на слое a-Si со стороны стеклянной подложки полупроводниковым лазером с $\lambda = 405\text{нм}$.

4. Прямая лазерная запись на двухслойной структуре a-Si/Ag

Воздействие на двухслойную пленочную структуру a-Si/Ag сфокусированным лазерным излучением проводили через стеклянную подложку. Нано размерный слой серебра был нанесен с целью создания проводящего слоя и возможности создания плазмона. При связывании энергии фотона со свободными электронами металла создается субволновой колебательный режим, известный как плазмон.

Лазерное воздействие проводили со стороны стеклянной подложки излучением полупроводникового лазера с длиной волны $\lambda = 405\text{нм}$, с фокусировкой на слое аморфного кремния. Диаметр сфокусированного пятна зависит от длины волны лазерного излучения и числовой апертуры объектива NA

$$d = \lambda / NA \quad (1)$$

Так как под действием лазера происходит фазовый переход от аморфного к поликристаллическому состоянию среды, при локальном увеличении объема кремния и продавливании пленки серебра (рис. 5).

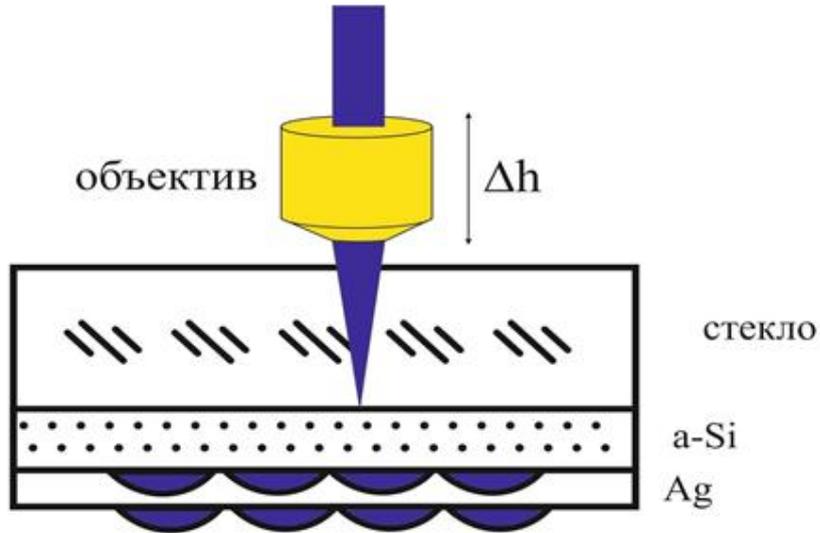


Рис.5. Прямая лазерная запись на двухслойной структуре a-Si/Ag со стороны стеклянной подложки

Результаты прямой лазерной записи микроструктур с формированием рельефа на поверхности на двухслойной структуре a-Si/Ag, нанесенной на стеклянную подложку приведены на рис.6. Фотографии были сняты на микроскопе (MICRO 200T-01).

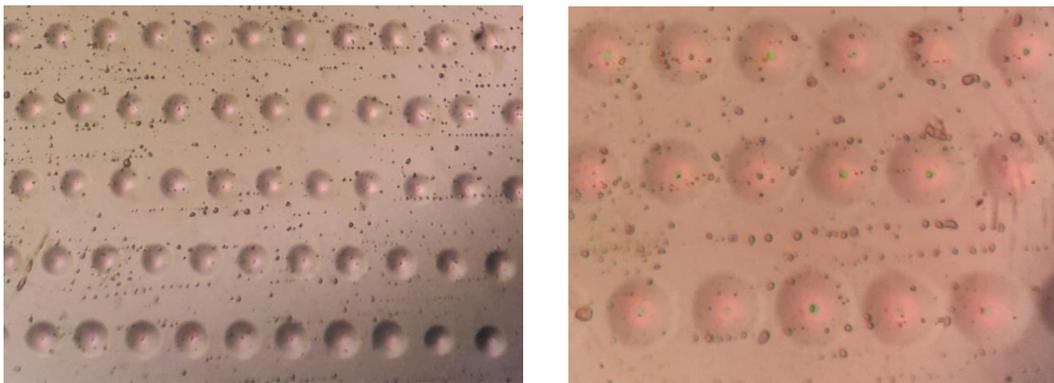


Рис.6. Фотография микроструктур, записанных сфокусированным лазерным излучением с $\lambda = 405$ нм на двухслойной структуре a-Si/Ag (увеличение $\times 200$ – слева, $\times 500$ – справа, с размером элементов 30 мкм)

Исследование рельефа микроструктур, образованных при прямой лазерной записи на двухслойной среде α -Si/Ag под воздействием сфокусированного излучения полупроводникового лазера на слой аморфного кремния со стороны стеклянной, также было проведено на электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 LMH. Образцы с записью лазерным излучением были исследованы на электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 LMH в Кыргызско – Российском Славянском университете.

Заключение

Предложен новый метод прямой лазерной рельефной записи на двухслойной структуре α -Si/Ag посредством ее деформирования за счет локального увеличения объема подслоя аморфного кремния при прямом лазерном воздействии со стороны подложки, и переходе среды от аморфного состояния к полукристаллическому. Данный метод позволит упростить технологию изготовления мастер матриц для производства радужных голограмм.

Список литературы

1. В.П. Макаров, С.С. Великасов, К.В. Макаров, А.Ж. Календеров, Сыдык уулу Н. «Магнетронная напылительная система для получения пленок α –Si» // Труды Международного семинара «Оптика и фотоника» Иссык-Куль Кыргызстан, сентябрь 2012 г. С. 126-128.
2. А.А. Кутанов, Н. Сыдык уулу, И.А. Снимщиков, С.С. Великасов, В.П. Макаров. «Спектральные интерференционные фильтры на пленках аморфного кремния и прямая лазерная запись на них» // Мир голографии-2016. Том 2, №1 С. 83-87.
3. А. А. Кутанов, Н. Сыдык уулу, И. А. Снимщиков, В. П. Макаров, С. С. Великасов. «Особенности технологии прямой лазерной записи дифракционных и голограммных структур на пленках α -Si и GeTe» // Мир Голографии-2017. Том 3, № 1. С. 50-52.
4. Кутанов А.А., Сыдык уулу Н., Казакбаева З.М. «Трехмерная лазерная запись изображений на пленках аморфного кремния» // Международной конференции. СибОптика-2018, 23-27 апреля 2018 г. С. 24-29. Новосибирск СО РАН

УДК 535.4; 681.787

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Т.Э. Кулиш

*Институт физики им. академика Ж.Ж. Жеенбаева НАН КР,
г.Бишкек, проспект Чуй 265-а
tkulich@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрены различные методы голографической интерферометрии, в целях выбора методов исследования объектов в зависимости от протекающих в них процессов.

Ключевые слова: Голограмма, интерферометрия, регистрирующая среда, фотопластина, лазер.

ANALYSIS OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY METHODS

T.E. Kulish

*Institute of Physics academician J.J. Zheenbaeva, NAS KR,
Bishkek, Chui Avenue 265-a*

Abstract. Various optical schemes that allow recording holographic interferograms in volumetric recording channels are considered, as well as their advantages and disadvantages are listed. A new method of obtaining holographic interferograms proposed, which allows to eliminate the previously noted shortcomings.

Keywords: Hologram, interferometry, high-resolution recording medium, photographic plate, laser.

Рост требований к надежности элементов конструкций при одновременном повышении уровней их рабочих параметров и снижении веса, а также появлением новых материалов, включая многослойные и композиционные, потребовал от исследователей создания новых более точных и усовершенствованных бесконтактных методов неразрушающего контроля. Появление мощных методов голографической и особенно спекл-интерферометрии открыли широкие возможности анализа работы натуральных конструкций и решения важных научно-практических задач диагностики прочности при конструировании механических конструкций, радиоэлектронных аппаратов, для изучения различных физических явлений, например, турбулентных быстропротекающих потоков жидкости, ударных волн в аэродинамических трубах и т.п. С помощью голографической интерферометрии можно также следить за ходом химических реакций и процессов диффузии.

Методы голографической и спекл-интерферометрии широко используются для регистрации и измерения параметров изменений объектов при различных воздействиях [1-10]. В основе разнообразных методов голографической интерферометрии лежит принцип сравнения двух волновых фронтов, причем один из них или оба записывают и восстанавливают голографическим методом. Рассмотрим имеющиеся варианты методов голографической интерферометрии: метод двух экспозиций, метод реального времени, метод усреднения во времени, стробо-голографический метод, метод спеклов.

Интерференция и дифракция составляют основу голографии. Рассматривается световая волна, которая сталкивается с препятствием. Это может быть непрозрачный экран с некоторыми прозрачными отверстиями, или наоборот, прозрачная среда с непрозрачными структурами. Из геометрической оптики известно, что тень становится видимой на экране за препятствием. При ближайшем рассмотрении можно обнаружить, что это нестрого правильно. Если размеры препятствия (например, диаметр отверстий в непрозрачном экране или размер непрозрачных частиц в прозрачном объеме) находятся в пределах длины волны распределения света, то формируются темные и светлые области. Это явление называется дифракцией. Дифракцию можно качественно объяснить принципом Гюйгенса: Каждая точка волнового фронта может рассматриваться как исходная точка для вторичной сферической волны. Волновой фронт в любом другом месте является когерентной суперпозицией этих вторичных волн.

В самой природе голографических методов заложена возможность, позволяющая определять смещения поверхности объектов, а через них - деформации, напряжения, дефекты структуры, измерять амплитуды вибраций, исследовать формы колебаний, измерять параметры рельефа сложных поверхностей и производить сравнение объектов с эталонными. Интерференционные методы позволили осуществить переход от измерения пространственно-распределенных величин в дискретных точках к получению измерительной информации сразу по всему полю исследуемого объекта бесконтактным способом, с высокими точностью и быстродействием.

В основе методов голографической интерферометрии лежит свойство голограмм точно воспроизводить записанные на них волновые поля. Преимущества методов голографической интерферометрии это экспериментальная простота, высокая точность и возможность бесконтактных наблюдений и измерений всей поверхности или всего объема испытуемого изделия.

Метод голографической интерферометрии был предложен практически одновременно несколькими авторами [4-11].

В работе [4], выполненной Р.Л. Пауэллом и К.А. Стетсоном, был описан анализ вибраций диффузно рассеивающих объектов методом голографической интерферометрии. М.Х. Хорман [5], поместив в рабочее плечо интерферометра Маха-Цендера вместо исследуемого объекта его голограмму, также соединил

голографию с интерферометрией. Дальнейшее развитие методов голографической интерферометрии было дано в работах Д.М. Берча [6], Р.Д. Кольера, Е.Т. Догерти и К.С. Пеннингтона [7], К.А. Стетсона и Р.Л. Пауэлла [8], К.А. Хейнеса и Б.П. Хилдебранда [9], в которых изучались деформации и смещения диффузно отражающих объектов. В работах [10-11] А.О. Хефлингер, Р.Ф. Буеркер и Р.Е. Бруке применили голографическую интерферометрию для измерений в области аэродинамики.

Г.В. Островская, Ю.И. Островский и др. в работе [12] провели исследования лазерной искры, в которых использовали тонкий стеклянный клин и в результате впервые получили голографические интерферограммы с полосами конечной ширины.

Метод голографической интерферометрии заключается в следующем. Если голограмму после химической обработки вернуть на то же самое место, где она экспонировалась, а предмет не убирать, то можно получить две волны: идущую непосредственно от объекта и восстановленную голограммой. Если теперь слегка изменить положение предмета или деформировать его, то это отразится на наблюдаемой картине - восстановленное изображение предмета окажется покрытым интерференционными полосами, характеризующими изменение состояния предмета.

Основу голографической интерферометрии составляют пять взаимосвязанных методов.

Метод реального масштаба времени. По этому методу сначала записывается голограмма неподвижного объекта. После проявления голограмма устанавливается строго в первоначальное положение, так что восстановленное изображение точно накладывается на объект. Затем исследуемый объект наблюдается сквозь голограмму. При этом любое смещение объекта приводит к возникновению интерференционных полос, наблюдаемых в реальном масштабе времени.

Метод двойной экспозиции. Данный метод основан на последовательной регистрации двух голограмм объекта на одной фотопластинке в двух его состояниях, например, до и после нагрузки.

Метод усреднения во времени. Метод основан на длительной экспозиции объекта, испытывающего циклическое вибрационное воздействие, во время которого происходит интерференция между совокупностью отдельных изображений, причем наиболее четко на интерферограмме проявляются полосы, записанные при скорости объекта, близкой к нулю, т.е. в крайних амплитудных положениях.

При использовании **стробо-голографического метода** исследования вибраций экспонирование голограммы производится лишь в крайних положениях объекта синхронно с его колебаниями. Стробо-голографический метод позволяет получать контрастные полосы при значительно больших амплитудах колебаний. Для этого получают голограмму неподвижного объекта и, проявив её "на месте", наблюдают через неё вибрирующий объект при

импульсном освещении в моменты времени, соответствующие одному из крайних положений.

Метод спеклов – это метод, схожий с цифровой интерферометрией, для расчета изменений оптического пути, вызванных деформацией непрозрачных тел или изменчивостью рефрактивного индекса прозрачных тел. В спекл-интерферометрии электронные устройства (ПЗС) используются для записи информации. Спекл-решетки, записанные системами спекл-интерферометрии могут считаться голограммами поверхности изображения. Голограммы поверхности изображения – это голограммы сфокусированных изображений. Используются они обычно в ТВ-голографии.

Цифровая голография – стала первым подходом к решению проблем визуализации, приближающих к реальности и полному доступу к объектной волне. Работу в области цифровой голографии начата в 1990 году. С помощью цифровой голографии интенсивность и фаза электромагнитной волны поля могут быть измерены, сохранены, переданы, применены для моделирования и манипулирования на компьютере.

Цель цифровой голографии в основном совершенствовать голографическую интерферометрию, метод, который с успехом используется для точного измерения деформации и формы непрозрачных тел или преломляющих поверхностей в прозрачной среде.

Каждый из указанных методов в конкретных условиях имеет определенные преимущества перед другими. Приведем математическое описание этих методов и проанализируем преимущества и недостатки каждого из них. Рассмотрим подробнее вышеперечисленные методы.

Метод реального масштаба времени

Метод основан на интерференции волны, восстановленной голограммой и волны отраженной от предмета во время наблюдения. Интерферометрическое исследование в реальном масштабе времени может быть осуществлено на обычной голографической установке с внеосевым опорным пучком, по схеме, которая изображена на рисунке 1.

Поскольку интерференционные полосы наблюдают в процессе деформации или перемещения, то этот метод называют методом голографической интерферометрии в реальном масштабе времени. Вид интерференционной картины определяется изменениями, которым подвергается объект, а также схемой голографической установки. Проведем количественный анализ распределения полос. Пусть голограмма записана предметной волной рассеянной объектом $\bar{U}_n(x, y) = U_1(x, y) \exp[i\varphi(x, y)]$ и плоской волной $\bar{U}_0(x, y) = \bar{U}_R$ Интенсивность регистрируемого поля в плоскости голограммы:

$$J(x, y) = (\bar{U}_n + \bar{U}_R)^2 = (\bar{U}_n + \bar{U}_R)(U_n^* + U_R^*) = U_n^2 + U_R^2 + \bar{U}_n \cdot \bar{U}_R^* + \bar{U}_n^* \cdot \bar{U}_R \quad (1)$$

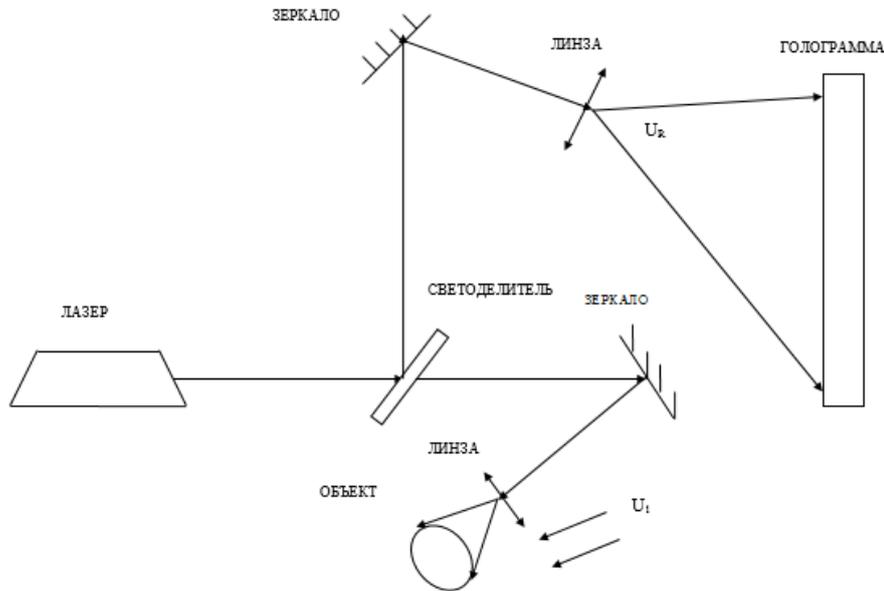


Рис.1. Внеосевая схема регистрации голографической интерферометрии. U_R - опорный пучок; U_1 - предметный пучок

Фотопластинка экспонируется распределением освещенности, соответствующим формуле (1), затем проявляется так, что ее амплитудное пропускание $T(x, y)$ пропорционально $J(x, y)$

$$T(x, y) = T_0 + \alpha(\bar{U}_n \cdot \bar{U}_R^* + \bar{U}_n^* \cdot \bar{U}_R), \quad (2)$$

где T_0 пропорционален первым двум слагаемым в (1); α - коэффициент пропорциональности, зависящий от применяемого фотографического процесса. Мы здесь ограничились чисто амплитудной записью этого распределения, когда фотослой реагирует на освещенность только своим пропусканием.

После проявления, как уже отмечалось, голограмма помещается на прежнее место и освещается волной, которая представляет собой сумму волн, рассеянных объектом и опорного пучка первоначальной формы. Если изменение, происшедшее с объектом, невелико, то амплитуда рассеянного им излучения остается практически той же, фаза же меняется. Поэтому новую объектную волну можно записать в виде $\bar{U}'_n = \bar{U}_1(x, y) \exp[i\theta(x, y)]$.

Результирующая волна $\psi(x, y)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \psi(x, y) = T(x, y)(\bar{U}'_n + \bar{U}_R) = T_0\bar{U}'_n + \alpha\bar{U}_n U'_n U_R^* + \\ + \alpha\bar{U}_n^* \bar{U}_R \bar{U}'_n + T_0 U'_n + \alpha\bar{U}_n U_R^2 + \alpha U_R^2 U_n^* \end{aligned} \quad (3)$$

Слагаемые в выражении (3) представляют собой волны, распространяющиеся в различных направлениях. Первое и пятое слагаемые соответствуют направлению распространения первоначальной волны. Собирая эти два члена выражения, получим:

$$\psi_0(x, y) = T_0 \bar{U}'_n + \alpha U_R^2 \bar{U}_n = T_0 U_1(x, y) \exp[i\theta(x, y)] + \alpha_0 U_R^2 U_1(x, y) \exp[i\varphi(x, y)] \quad (4)$$

Если за время между регистрацией голограммы и последующим наблюдением с объектом не произошло никаких изменений, то две интерферирующие волны будут отличаться одна от другой только постоянными множителями T_0 и $\alpha d/R^2$. При негативной записи голограмм ($\alpha < 0$) волны будут в противофазе ($-I = e^{i\pi}$), и будут везде ослаблять одна другую, а при равенстве их амплитуд - будут полностью гасить.

Если же с объектом произошли какие-либо изменения, то мы будем наблюдать интерференционную картину, структура которой определяется этими изменениями.

Контраст интерференционной картины будет определяться соотношением интенсивностей интерферирующих волн. Для того чтобы уравнивать эти интенсивности, на стадии наблюдения можно вводить в опорный или предметный пучок ослабляющие высококачественные фильтры, например, электрохимический фильтр [13].

Метод реального масштаба времени обладает тем существенным достоинством, что с помощью одной голограммы, полученной в исходном состоянии объекта, можно с интерферометрической точностью исследовать динамику происходящего с ним процесса, изучая последовательно множество его состояний. Если при восстановлении волнового фронта изменить наклон восстанавливающего пучка, то можно получить систему несущих полос конечной ширины, ориентация и частота которых по желанию наблюдателя будут задаваться направлением и величиной наклона пучка [14]. Эти полосы облегчают и уточняют расшифровку интерференционной картины и позволяют идентифицировать знак фазовых изменений, вносимых объектом.

Голографическая интерферометрия в реальном масштабе времени усложняется рядом факторов. Чтобы интерференционная картина наблюдалась в общем, и чтобы по ней можно было судить о смещении предмета, о положении предмета и о его освещении при наблюдении через обработанную голограмму, установленную в исходное положение, должны быть точно такими же, как при получении голограммы. Это означает, что предмет, оптические детали голографической установки либо должны оставаться в фиксированном положении в течении времени между экспонированием и наблюдением, либо могут быть возвращены в исходное положение с большой точностью. Совместить интерференционную структуру, образованную предметным и опорными пучками во время наблюдения со структурой, которая зарегистрирована на голограмме, необходимо с точностью до долей расстояния между полосами. Эта задача упрощается, когда угол между предметным и опорным пучками мал. Дополнительная трудность связана с усадкой эмульсии, сопровождающей мокрый процесс обработки фотографической пластины. Это вызывает неизбежные искажения восстановленных волновых фронтов и соответствующее искажение наблюдаемой интерференционной картины. Кроме

того, до тех пор, пока фотопластинка не высохнет полностью, усадка продолжается, что затрудняет усадку голограммы с помощью исходного опорного пучка.

Эти недостатки преодолеваются теми или иными способами. Например, в работе [15] использовано устройство, обеспечивающее поворот пластинки вокруг двух ортогональных осей так, чтобы тонкую настройку можно было бы осуществлять, поворачивая микрометрические винты, а два края пластинки располагаются против двух закругленных штифтов из нержавеющей стали и прижимаются к ним за счет силы тяжести, либо с помощью пружины. В работах [16, 17], во избежание трудностей установки голограммы на прежнее место, производили проявление, не вынимая фотопластинки из голографической установки. Для этого был использован простой держатель, в котором пластинка подвешивается вертикально так, чтобы сосуд с фотореактивами, в который погружается пластинка, можно было подводить под нее снизу.

Пути преодоления таких нежелательных эффектов, как однородные и неоднородные деформации фотопластинок, набухание и усадка, изложены в работах [18-22].

Несмотря на указанные трудности, экспериментаторы успешно применяют этот метод для решения прикладных задач, в частности, для исследования деталей и конструкций, подвергнутых деформации и смещению, например, для определения деформации сетки мишени суперорбитонов [9]. В работе [23] приведены результаты исследований деформации лопаток турбин. С целью изучения термической деформации интегральных микросхем, вызванной джоулевым тепловыделением, при протекании тока в р-п переходах был использован также метод реального масштаба времени [24]. Этот метод успешно используется для проведения вибрационных измерений при небольших амплитудах колебаний.

Метод двойной экспозиции

Метод двойной экспозиции наиболее распространен и заключается в следующем. В методе двойной экспозиции на фотопластинку записываются два последовательных состояния объекта. Сначала получают голограмму исследуемого предмета в первоначальном состоянии, т. е. не нагруженного, не нагретого и не деформированного. Затем предмет подвергают внешним воздействиям и на ту же фотопластинку записывают голограмму его измененного состояния. Так как запись вторично производится на ту же голограмму, необходимо обеспечить стабильность установки в промежутке между экспозициями. При восстановлении голограммы суперпозиция волновых фронтов этих состояний дает интерференционную картину, которая покрывает изображение объекта и позволяет определить величину его смещения.

При восстановлении изображения с двукратно экспонированной голограммы наблюдается результат интерференции полей, существующих в

разные моменты времени - во-первых, волнового поля, несущего информацию о первоначальном состоянии объекта, и, во-вторых, волнового поля, несущего информацию о его измененном состоянии. В результате на изображение объекта накладывается сеть интерференционных полос, по которым определяют изменения, происшедшие с объектом. Метод двух экспозиций применяют для изучения поверхностной деформации тел, контроля сварных швов, обнаружения трещин, пузырей, непроваров и так далее.

В методе с двойной экспозицией используется внеосевая схема, подобная той, которая изображена на рис. 1. Предположим, что в некоторый момент времени t_1 , во внеосевой голографической схеме регистрируется предметная волна $\bar{U}_1(x, y)$, рассеянная от объекта (рис.1).

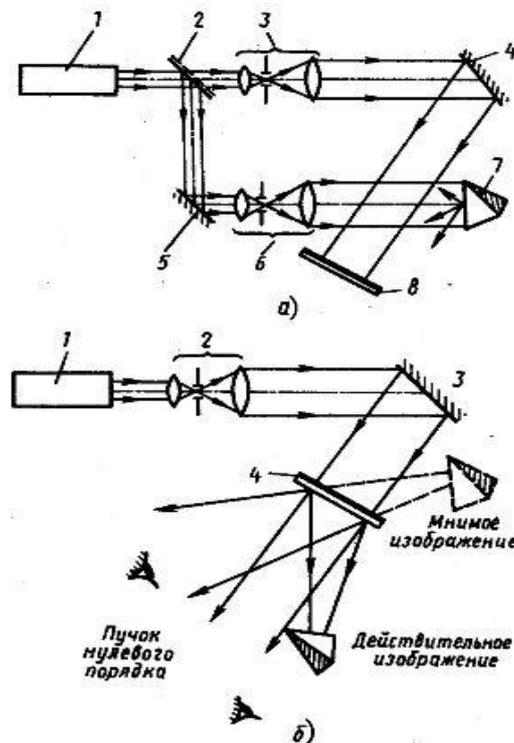


Рис.2. Метод двойной экспозиции

а - схема получения; 1 - лазер; 2 - расщепитель пучка; 3 и 6 - линзовые системы; 4 и 5 - зеркала; 7 - объект; 8 - фотопластинка. б - схема восстановления; 1 - лазер; 2 - линзовая система; 3 - зеркало; 4 - голограмма.

В методе двух экспозиций используется голографическая схема, подобная изображенной на рис. 2. Для примера предположим, что объектом в этой схеме служит турбинная лопатка и что определяется ее отклик на воздействие механической силы. На одну фотопластинку регистрируются две голограммы объекта, находящегося в двух разных состояниях: ненагруженном и нагруженном. При освещении проявленной фотопластинки восстанавливающей волной, идентичной опорной волне, использовавшейся на стадии регистрации, наблюдатель, смотрящий через голограмму, увидит трехмерное мнимое изображение турбинной лопатки с наложенной на него картиной

интерференционных полос (рис. 2). Наблюдатель заметит также, что полосы локализованы в пространстве, причем не обязательно на поверхности турбинной лопатки, и слегка смещаются и изменяют свою форму при изменении направления наблюдения. Анализ наблюдаемой интерференционной картины позволяет выявить созданные нагрузкой деформации и установить опасные места.

Через некоторый интервал времени t_2 на той же самой фотопластинке регистрируется волна $\bar{U}_2(x, y)$, рассеянная объектом в нагруженном состоянии. Обе волны экспонируются одновременно с опорной волной \bar{U}_R . После проявления такой фотопластинки получается дважды экспонированная голограмма. При освещении такой голограммы волной \bar{U}_R восстанавливается такая волна, комплексная амплитуда которой пропорциональна сумме $\bar{U}_1(x, y) + \bar{U}_2(x, y)$, а интенсивность определяется выражением:

$$J(x, y) = |\bar{U}_1(x, y) + \bar{U}_2(x, y)|^2 \quad (5)$$

В связи с тем, что деформация (перемещение), рассматриваемые голографической интерферометрией, обычно малы в сравнении с пространственной протяженностью объекта, предметные волны могут быть выражены следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{U}_1(x, y) &= \bar{U}_0(x, y) = a(x, y) \exp[-i\varphi(x)] \\ \bar{U}_2(x, y) &= \bar{U}'_0(x, y) = a(x, y) \exp\{-i[\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)]\} \end{aligned} \quad (6)$$

Следовательно, распределение интенсивности в восстановленном изображении можно записать:

$$\begin{aligned} J(x, y) &= |a(x, y) \exp[-i\varphi(x, y)] + a(x, y) \exp\{-i[\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)]\}|^2 = \\ &= 2a^2(x, y) \{1 + \cos[\Delta\varphi(x, y)]\} \end{aligned} \quad (7)$$

Распределение интенсивности восстановленного изображения является функцией интенсивности точки (a^2) объекта, промодулированной по закону косинуса, вследствие изменения фазы в результате смещения объекта. Темные полосы - это линии, вдоль которых значения фазы $\Delta\varphi$ являются нечетными, кратными числа π , светлые полосы - линии постоянных значений фазы $\Delta\varphi$, являющиеся четными кратными числа π . В различных случаях изменение фазы $\Delta\varphi$ может быть связано с различными физическими величинами, например смещением, вращением, деформацией, изгибающим моментом, колебаниями, температурой, давлением, концентрацией массы, электронной плотностью или напряжением.

При использовании метода двойной экспозиции отпадает необходимость точного возвращения химически обработанной фотопластинки в то положение, которое она занимала при экспозиции. Если экспонирование объекта в двух состояниях сделано излучением одной и той же продолжительностью и интенсивностью, то получаются высококонтрастные интерференционные картины. Однако это условие не выполняется для определенного класса

фотоматериалов, как например, фототермопластических носителей, из-за специфичности записи голографической информации на них.

Методики интерпретаций голографических интерферограмм одинаковы для обоих методов голографической интерферометрии.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что применение методов голографической интерферометрии как бесконтактных методов неразрушающего контроля открывает широкие возможности, так как они имеют следующие преимущества: экспериментальная простота, высокая точность, возможность бесконтактных наблюдений и измерений всей поверхности или всего объема испытываемого изделия.

Вышеописанные методы голографической интерферометрии позволят создавать усовершенствованные бесконтактные устройства неразрушающего контроля. Таким образом, исследование и модернизация методов голографической интерферометрии и особенно разработка методов цифровой спекл-интерферометрии оправдано, поэтому проведение научных исследований в данном направлении является перспективным.

Список литературы

1. Gabor D.A. New microscopic principle // Nature: 1948. - v.161. - P.777-778.
2. Денисюк Ю.Н. Об отражении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // ДАН СССР. - 1962. - Т.144. - С.1275-1278.
3. Leith E.N., Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory // J/ Opt. Soc. Am.-1962. - V.52. - P.1123-1130/
4. Powell R.L., Stetson K.A. Interferometry vibration analysis of three-dimensional objects by wavefronts reconstruction // Journ. Opt. Soc. Amer.-1965.-V.55. – P.1593 – 1598.
5. Horman M.H. An application of wavefront reconstruction // Appl. Opt.-1965.- V.4.-P.333-335.
6. Burch J.M. The application of lasers in production engineering // Prod. Eng.-1965.-V.44.-P.436-444.
7. Collier R.J., Doherty E.T., Penington K.S.Application of moire techniques to holography // Appl. Phys. Lett. - 1965.- V.7.-P.223-225.
8. Stetson K.A., Powell, R.L. Hologram in interferometry // Journ. Opt. Opt. Soc. Amer. – 1965.- V.55. – P.1570.
9. Haines K.A., Hildebrand B.P. Surface-deformation measurement using the wavefront reconstruction technique // Appl. Opt.-1966.- V.5.-P.595-602.
10. Brooks R.E., Heflinger L.O., Wuerher R.F. Interferometry with a holographically reconstructed comparison beam // Appl/ Phys. Let t.-1965.- V.18-P.116.
11. Heflinger L.O., Wuerther R.F., Brooks R.E. Holographic interferometry // Journ. Appl. Phys. – 1966. V.37. – P.642-649.
12. Какос А., Островская Г.В., Островский Ю.И., Зайдель А.Н. Interferometry holographic investigation of a laser-spark // Phys. Lett. - 1966. - V.23. - P.81-83.

УДК 535.4; 681.787

ЦИФРОВАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ГОЛОГРАММ

Т.Э. Кулиш, Д.А. Исмаилов

*Институт физики им. академика Ж.Ж. Жеенбаева НАН КР,
г.Бишкек, проспект Чуй 265-а
tkulich@mail.ru, ismailov_j@mail.ru*

Аннотация: В данной статье рассмотрена методика восстановления цифрового изображения объекта методом реконструкции Френеля. Данная методика широко используется в цифровой голографической интерферометрии, поскольку ее применение удобно для расшифровки голографических интерферограмм объектов.

Ключевые слова: Голограмма, цифровая голография, голография Фурье, голография Френеля, прибор с зарядовой связью.

DIGITAL RECONSTRUCTION OF HOLOGRAMS

T.E. Kulish, D.A. Ismailov

*Institute of Physics academician J.J. Zheenbaeva, NAS KR,
Bishkek, Chui Avenue 265-a
tkulich@mail.ru, ismailov_j@mail.ru*

Abstract: This article discusses a technique for restoring a digital image of an object using the Fresnel reconstruction method. This technique is widely used in digital holographic interferometry since its application is convenient for decoding holographic interferograms of objects.

Keywords: Hologram, digital holography, Fourier's holography, Fresnel holography charge coupled device.

1. Общие принципы

При записи цифровой голограммы плоская опорная волна и объектная волна пересекаются на поверхности Прибора с Зарядовой Связью (ПЗС). Получившаяся в результате этого голограмма записывается и сохраняется в электронном виде. Объектом зачастую является трехмерное тело с диффузно отражающей поверхностью, находящееся на расстоянии d от ПЗС.

В оптической реконструкции виртуальное изображение появляется на месте оригинального объекта, а настоящее изображение также формируется на расстоянии d , но в противоположном направлении от ПЗС, см. рисунок 1(б).

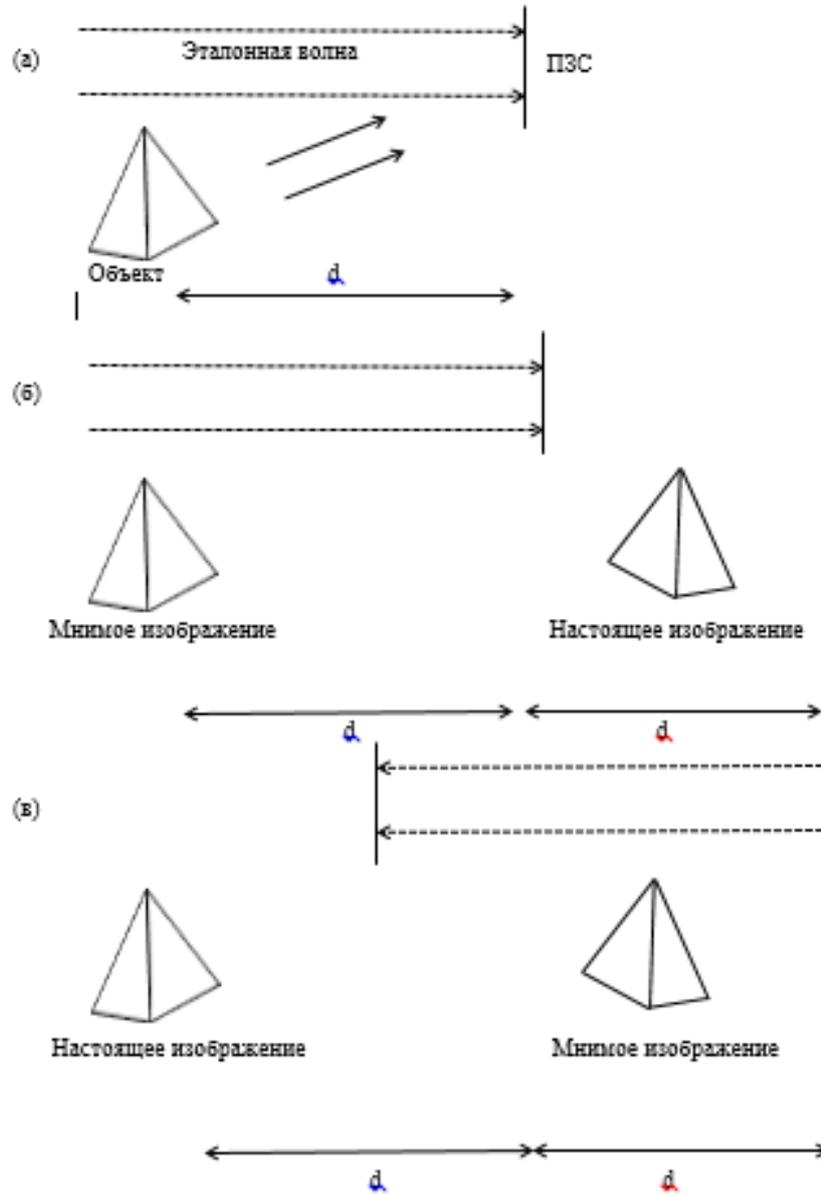


Рис. 1. Цифровая голография

- (a) Съемка
- (b) Реконструкция с объектной волной E_r
- (c) Реконструкция с сопряженной опорной волной E_r

Дифракция световой волны на щели (в этом случае голограмма), установленной перпендикулярно по отношению к входящему лучу, подробно объяснена интегралом Френеля-Кирхгофа:

$$\Gamma(\xi, h) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) \frac{\exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho')}{\rho'} dx dy \quad (1)$$

при

$$\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2} \quad (2)$$

где $h(x, y)$ – голографическая функция, ρ' – расстояние между точками на голографической и реконструированной плоскостях. Геометрические величины

объяснены на рисунке (1). Коэффициент наклона равен одному, потому что углы θ и θ' примерно равны нулю.

$E_R(x, y)$ для плоской опорной волны определяется реальной амплитудой:

$$E_R(x, y) = a_R + i0 = a_R \quad (3)$$

Дифракционная картина высчитывается на расстоянии d за плоскостью ПЗС, а значит, она воссоздаёт комплексную амплитуду на плоскости настоящего изображения.

Уравнение (1) является основой для числовой голографической реконструкции, потому что преобразованное волновое поле $\Gamma(\xi, \eta)$ есть сложная функция, чью интенсивность и фазу можно рассчитать, в то время как в оптической голографической реконструкции рассмотреть можно только интенсивность волны. Это интересное свойство цифровой голографии используется в цифровой голографической интерферометрии.

2. Реконструкция по теореме Френеля

Как для величин x и y , так и для величин ξ и η , являющихся довольно незначительными по отношению к расстоянию d между плоскостью реконструкции и ПЗС матрицей, выражение (2) может быть представлено разложением в ряд Тейлора:

$$\rho = d + \frac{(\xi-x)^2}{2d} + \frac{(\eta-x)^2}{2d} - \frac{1}{8} \frac{[(\xi-x)^2 + (\eta-x)^2]^2}{d^3} + \dots \quad (4)$$

Четвертый член последовательности можно не учитывать, если его значение мало по отношению к длине волны:

$$\rho = \frac{1}{8} \frac{[(\xi-x)^2 + (\eta-x)^2]^2}{d^3} \ll \lambda \quad (5)$$

или

$$d \gg \sqrt[3]{\rho} = \frac{1}{8} \frac{[(\xi-x)^2 + (\eta-x)^2]^2}{\lambda} \quad (6)$$

Тогда расстояние ρ состоит из линейных и квадратичных членов:

$$\rho = d + \frac{(\xi-x)^2}{d} + \frac{(\eta-x)^2}{d} \quad (7)$$

Примем дополнительное приближение в виде замены знаменателя в уравнении (1) на d , из-за которого последующее выражение вытечет (преобразуется) в реконструкцию реального изображения:

$$\Gamma(\xi, h) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho\right) \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_R^*(x, y) h(x, y) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} ((\xi-x)^2 + (\eta-x)^2)\right] dx dy \quad (8)$$

Если увеличение аргумента показательной функции под знаком интеграла можно расписать, получается следующая формула

$$\Gamma(\xi, h) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho\right) \exp\left[-\frac{i}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_R^*(x, y) h(x, y) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi + y\eta)\right] dx dy \quad (9)$$

Это уравнение названо приближением Френеля или трансформацией Френеля из-за его математической схожести с преобразованием Фурье [1]. Оно позволяет восстановить волновое поле на плоскости за голограммой, в данном случае на плоскости настоящего изображения.

Интенсивность рассчитывается возведением в квадрат:

$$I(\xi, \eta) = |\Gamma(\xi, \eta)|^2 \quad (10)$$

Фаза рассчитывается следующим уравнением:

$$\varphi(\xi, \eta) = \arctan \frac{\text{Im}|\Gamma(\xi, \eta)|}{\text{Re}|\Gamma(\xi, \eta)|} \quad (11)$$

Re обозначает реальную часть, а Im – мнимую.

Формула восстановления виртуального (мнимого) изображения в приближении Френеля:

$$\begin{aligned} \Gamma(\xi', \eta') &= \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho\right) \exp\left[-\frac{i}{\lambda d} (\xi'^2 + \eta'^2)\right] \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_R^*(x, y) L(x, y) h(x, y) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi' + y\eta')\right] dx dy = \\ &= \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho\right) \exp\left[+\frac{i}{\lambda d} (\xi'^2 + \eta'^2)\right] \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_R^*(x, y) h(x, y) \exp\left[+i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi' + y\eta')\right] dx dy \quad (12) \end{aligned}$$

Для оцифровки трансформации Френеля (уравнение 9) представлены следующие подстановки [2]:

$$v = \frac{\xi}{\lambda d} \quad ; \quad \mu = \frac{\eta}{\lambda d} \quad (13)$$

При этом уравнение (9) принимает данный вид:

$$\begin{aligned} \Gamma(v, \mu) &= \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i\pi\lambda d(v^2 + \mu^2)\right] \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_R^*(x, y) h(x, y) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[i2\pi(xv + y\mu)\right] dx dy \quad (14) \end{aligned}$$

Сравнение уравнения (9) с определением двумерной трансформации Фурье показывает, что приближение Френеля касемо коэффициента сферической фазы есть обратное преобразование трансформации Френеля для функции $E_R^*(x, y)h(x, y)\exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right]$:

$$\begin{aligned} \Gamma(v, \mu) &= \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i\pi\lambda d(v^2 + \mu^2)\right] \times \\ &\times \mathfrak{F}^{-1}\left\{E_R^*(x, y)h(x, y)\exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right]\right\} \quad (15) \end{aligned}$$

Функция Γ может быть оцифрована, если образец голографической функции $h(x, y)$ берется на прямоугольной растре величиной $N \times N$ точек с шагами Δx и Δy вдоль координат. Δx и Δy являются расстояниями между соседними пикселями в горизонтальном и вертикальном направлениях ПЗС

матрицы. С дискретными значениями интегралы уравнения (9) преобразуются в бесконечные суммы:

$$\Gamma(m, n) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i\pi\lambda d \left(m^2 \Delta v^2 + n^2 \Delta \mu^2\right)\right] \times \quad (16)$$

$$\times \mathfrak{F}^{-1}\left\{E_R^*(x, y)h(x, y)\exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right]\right\}$$

для $m=0, 1, \dots, N-1$; и $n=0, 1, \dots, N-1$.

Согласно теории трансформации Фурье, между Δx , Δy и Δv , $\Delta \mu$ существует следующее отношение, см. приложение А:

$$\Delta v = \frac{1}{N\Delta x} \quad ; \quad \Delta \mu = \frac{\eta}{N\Delta y} \quad (17)$$

После повторной замены:

$$\Delta \xi = \frac{\lambda d}{N\Delta x} \quad ; \quad \Delta \eta = \frac{\lambda d}{N\Delta y} \quad (18)$$

Используя данные уравнения, уравнение (16) превращается в

$$\Gamma(m, n) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i\pi\lambda d \left(\frac{m^2}{N^2\Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2\Delta y^2}\right)\right] \quad (19)$$

$$\times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} E_R^*(k, l)h(k, l)\exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)\right] \exp\left[i2\pi\left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)\right]$$

Это дискретное преобразование Френеля. Матрица Γ рассчитывается умножением $E_R^*(k, l)$ и $h(k, l)$ на \exp (экспоненту) применением к нему обратного дискретного преобразования Фурье. Вычисление проводится наиболее эффективно при использовании алгоритма быстрого преобразования Фурье. От коэффициента, стоящего перед суммой, зависит только общая фаза, так что его в расчёте можно опустить, если нас интересует только насыщенность в соответствии с уравнением (10). Это так же применимо, когда необходимо рассчитать разницу в фазах между голограммами, записанными на одной длине волны

$$(\Delta\varphi = \varphi_1 + \text{const.} - (\varphi_2 + \text{const.})) = \varphi_1 - \varphi_2).$$

Соответствующая дискретная формула для восстановления при помощи мнимой линзы с $f=d/2$ (12):

$$\Gamma(m, n) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[+i\pi\lambda d \left(\frac{m^2}{N^2\Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2\Delta y^2}\right)\right] \quad (20)$$

$$\times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} E_R^*(k, l)h(k, l)\exp\left[+i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)\right] \exp\left[i2\pi\left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)\right]$$

Типичная цифровая голограмма показана на рисунке 2. Она была записана, основываясь на геометрическом преобразовании фигуры 1. Объект размещен на расстоянии $d=1.054$ м от ПЗС-матрицы с разрешением 1024×1024 пикселей и расстоянием между пикселями, равным $\Delta x = \Delta y = 6.8$ мкм. Длина волны 632.8 нм. Цифровое преобразование, выполненное соответственно уравнению 9, которое в свою очередь тождественно уравнению 19, показано на рисунке 5. Можно заметить, что реальное изображение игральной кости

использовано в качестве объекта. Яркий квадрат в центре – это не преломлённая преобразованная волна. Из-за смещенной с оси структуры изображение пространственно отделено от периода нулевого порядка. Мнимое изображение – вне фокуса в этом преобразовании.

Одно интересное свойство голографии заключается в том, что каждая часть голограммы хранит в себе информацию о целом объекте. Это показано на голограммах рисунков 6 и 8, где черные маски закрывают почти половину площади всей голограммы. Тем не менее, весь куб видно на преобразованиях без помех, см. рисунки 3 и 8. Маски видны в качестве теней на периодах нулевого порядка. Уменьшение числа эффективных пикселей приводит к ухудшению разрешения на преобразованных изображениях. Это соответствует увеличению размера пятна, вызванному уменьшением апертуры в оптическом преобразовании голограммы.

Относительно уравнения (18), расстояния между пикселями $\Delta\xi$ и $\Delta\eta$ на преобразованном изображении зависят от расстояния d , выбранного для цифрового преобразования, потому что уравнение (18) соответствует ограниченному дифракционному разрешению оптических систем: голограмма – это апертура оптической системы с боковой длиной $N\Delta x$. Согласно теории дифракции, дифракционная решетка проявляется на расстоянии d за голограммой. Следовательно, $\Delta\xi = (\lambda d)/(N\Delta x)$ – это половина диаметра воздушного диска или диаметр пятна на плоскости преобразованного изображения, которое ограничивает разрешение. При установлении разрешения изображения, преобразованного дискретным преобразованием Френеля, на его физический предел, это можно рассматривать как алгоритм “естественного масштабирования”.



Рис.2. Цифровая голограмм

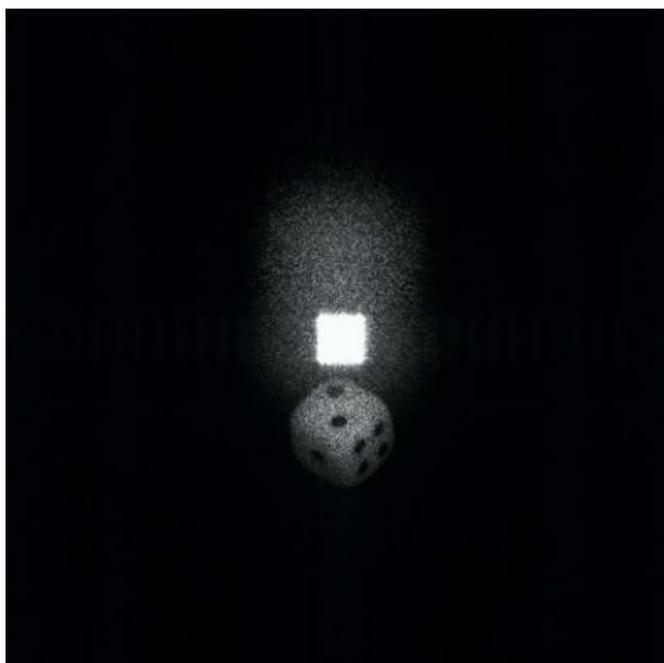


Рис.3. Цифровая реконструкция



Рис.4. Замаскированная цифровая голограмма

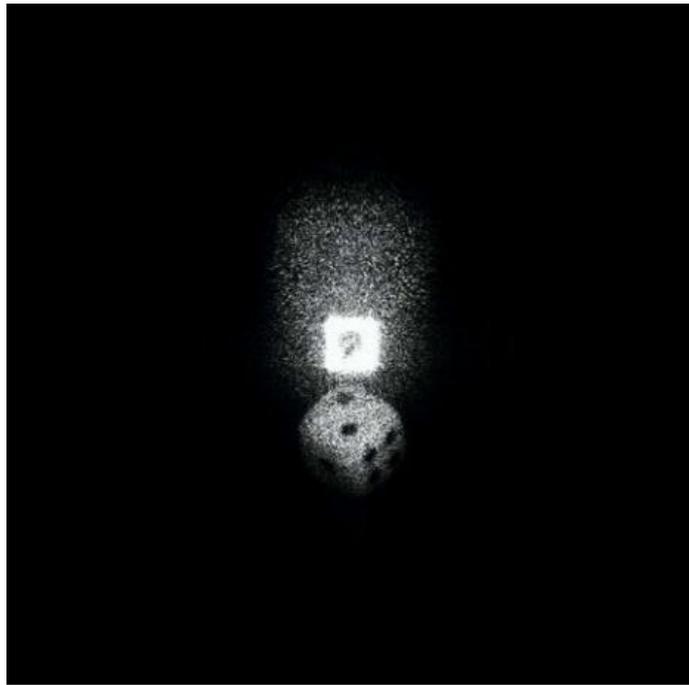


Рис.5. Преобразование

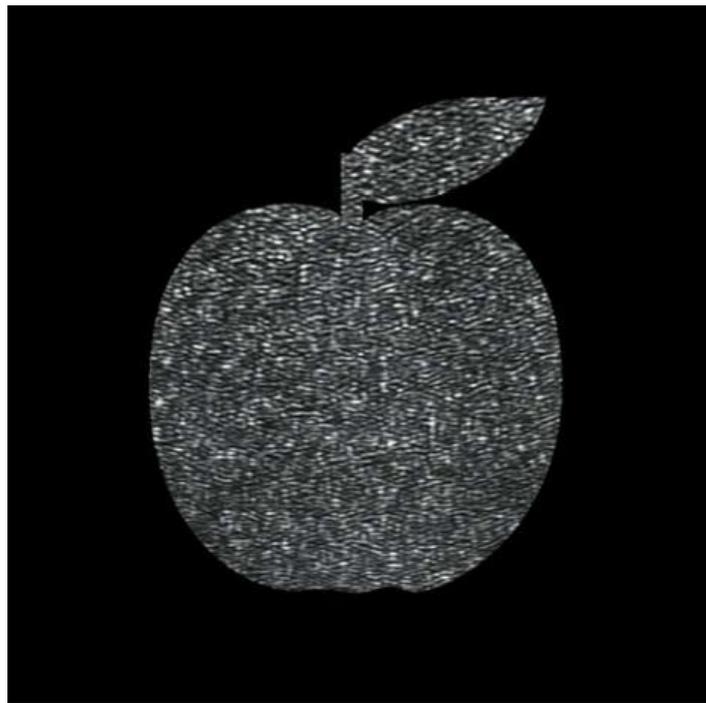


Рис.6. Замаскированная цифровая голограмма

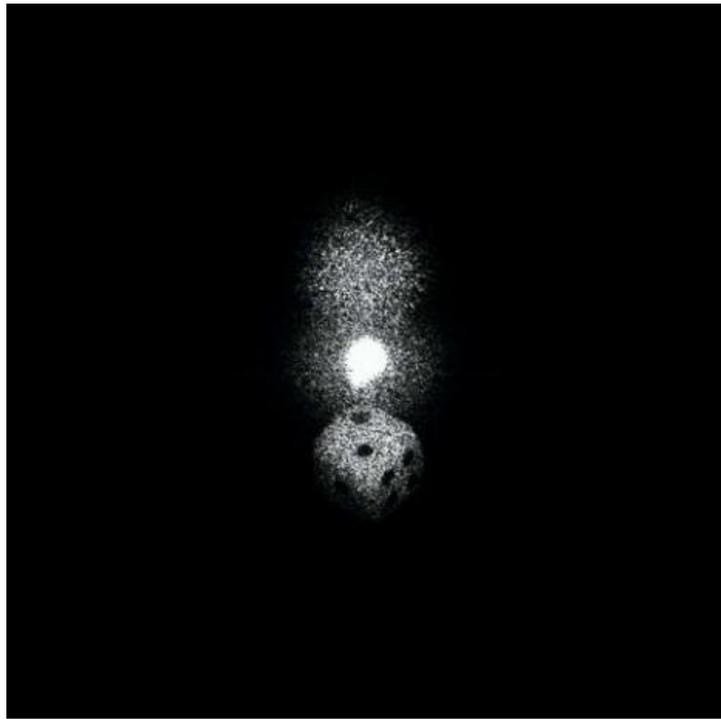


Рис.7. Преобразование

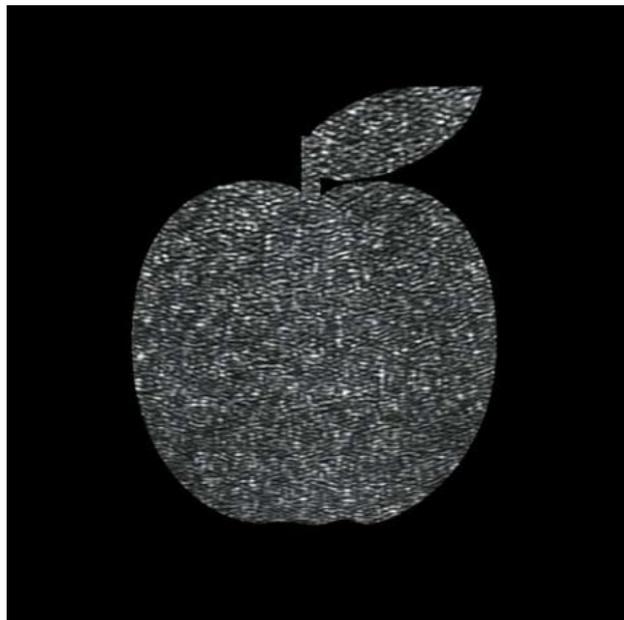


Рис.8. Замаскированная цифровая голограмма

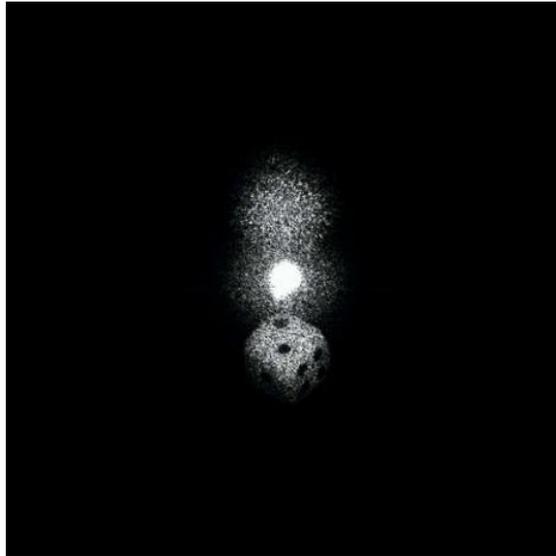


Рис.9. Преобразование

Заключение

Таким образом можно сделать вывод, что методы цифровой голографии позволяют эффективно исследовать различные объекты с разрешающей способностью, определяемой длиной волны оптического излучения, параметрами оптической системы и регистрирующей среды. Одно интересное свойство голографии заключается в том, что каждая часть голограммы хранит в себе информацию о целом объекте. При установлении разрешения изображения, преобразованного дискретным преобразованием Френеля, на его физический предел, это можно рассматривать как алгоритм “естественного масштабирования”.

За последнее время проведены активные исследования, направленные на совершенствование методов цифровой голографии. Перспективные исследования в области цифровой голографии направлены на повышение разрешающей способности и получение более достоверных результатов измерений исследуемых объектов.

Таким образом, исследование и модернизация методов цифровой голографической интерферометрии, методов цифровой спекл-интерферометрии оправдано, поэтому проведение научных исследований в данном направлении является перспективным.

Список литературы

1. Pedrini G, Zou YL, Tiziani H (1995) Digital double-pulsed holographic interferometry for vibration analysis. *J Mod Opt* 42(2):367-374.
2. Yaroslavskii LP, Merzlyakov NS (1980) *Methods of digital holography*. Consultants Bureau, New York.
3. Т.Э. Кулиш, Д.А. Исмаилов, К.М. Жумалиев Цифровая голография // Научный журнал ФИЗИКА, НАН КР, 2020, №1, стр. 57-62.

УДК 681.786

ПРИМЕНЕНИЕ ПВМС ДЛЯ ЗАПИСИ ФУРЬЕ – ГОЛОГРАММ

^{1,2}А.А.Жээнбеков, ¹М.Т.Мамырбеков

¹*Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева НАН КР,
г.Бишкек, пр.Чуй 265-а*

²*Кыргызско-Российский Славянский Университет*

Аннотация. Рассматривается способ применения специализированного программного обеспечения для пространственного модулятора света (ПМС), с использованием метода компьютерного синтеза голограмм для генерации вводимого изображения в голографическую интерференционную картину и вывода в голографическую проекционную систему, которая осуществляет перенос изображения в плоскость фоточувствительного носителя.

Ключевые слова: *пространственный модулятор света, компьютерно-синтезированная голограмма, фурье-голограмма, интерференционная картина, голографическая проекционная система.*

APPLICATION OF SPACE LIGHT MODULATORS FOR RECORDING FOURIER HOLOGRAM

^{1,2}A. Jeenbekov, ¹M. Mamyrbekov

¹*Institute of Physics named after academician Zh.Zheenbaev of the NAS KR
Bishkek, 265-a, Chui Av.*

²*Kyrgyz-Russian Slavic University*

Annotation. We consider a method of using software for a spatial light modulator (SLM), using the method of computer- synthesis of holograms to generate an input image into a holographic interference picture and output to a holographic projection system that transfers the image to the plane of a photosensitive medium.

Keywords: *spatial light modulator, computer-synthesized hologram, Fourier hologram, interference pattern, holographic projection system.*

Введение

Процесс формирования сигнала в оптическом диапазоне пригодны для изменения практически любого из физических параметров волны: амплитуды, частоты, фазы, направления волнового вектора и поляризации. Управление параметрами излучения и физические эффекты, пригодные для реализации различных типов оптических модуляторов, изучены задолго до появления лазеров. Но только после появления лазеров началось широкое применение приборов на основе выше указанных параметров.

Исследования и разработки методов и приборов для высокоэффективного и экономичного управления лазерным, да и вообще световым излучением, поиск и отработка технологии новых материалов для них, продолжаются.

При увеличении объема и плотности записи информации неизбежно возникает необходимость увеличения скорости поиска и выборки нужной части информации. Поиск новых возможностей увеличения информационной плотности записи и скорости выборки информации ведется по многим направлениям, в том числе в области голографии, которая, в силу своих специфических свойств, является перспективным направлением для создания высокоэффективных систем записи и хранения информации.

Голографический метод записи информации является одним из перспективных и эффективных путей решения проблемы надежного, долговременного хранения информации (полутонных, цифровых и др.), с высокой информационной плотностью носителей. С развитием технических средств в архитектуре голографического запоминающего устройства совершенствуется методы, процесс записи и считывания голографической информации в сочетании взаимозаменяемыми методами - традиционного двухлучевого метода записи голограмм и компьютерно-синтезированные голограммы [1], каждый из которых имеет специфические особенности и применения.

По типу используемых голограмм наибольшим преимуществом пользуются фурье-голограммы, регистрируемые в плоскости фурье-преобразования или вблизи ее, так как они могут быть записаны на малых площадях и инвариантны к поперечному сдвигу относительно опорного пучка. Инвариантность к сдвигу существенно упрощает требования к установке фотоприемника типа ССD камер, воспринимающего восстановленное изображение при считывании.

Для формирования матрицы сигналов, предназначенной для голографической записи по методу голографии Фурье, используют пространственные модуляторы света. Оптически управляемые жидкокристаллические пространственные модуляторы света (ЖК ПМС) бывают просветного и отражательного типов. Но место их использования зависит от задачи, в котором какие виды голографической памяти необходимо создать. В настоящее время такие модуляторы (обеих типов) построены на основе ЖК матриц либо системы микрзеркал. Разрешение таких модуляторов достигает 1280×1024 пикселей, что соответствует $\sim 1.3 \times 10^6$ бит информации. Частота смены изображения достигает 10^3 раз в секунду. Таким образом, при записи голографическим методом возможно уже в настоящее время достигнуть скорости записи порядка 1 Гбит/с, при условии наличия соответствующих регистрирующих материалов и лазеров с достаточной мощностью излучения.

В работе предлагается способ применения специализированной программы с помощью ПВМС ввести в проекционную оптическую систему плоскую компьютерно-синтезированную голограмму Фурье.

Результаты исследования

Как известно, пространственные световые модуляторы используются не только как элемент проекционного устройства, но выполняет значительные число функций связанные с преобразованием, хранением и обработки оптической информации.

Рассмотрим один способов применения специализированного программного обеспечения для отражательного жидкокристаллического пространственного модулятора света (ЖК ПМС-Thorlabs EXULUS), с использованием метода компьютерного синтеза голограмм для генерации вводимого изображения в голографическую интерференционную картину и вывода в голографическую проекционную систему, которая осуществляет перенос изображения в плоскость фоточувствительного носителя.

Таблица 1

Параметры ПМС Thorlabs EXULUS

Длина волны, λ	633 нм
Тип дисплея	ЖК, работающий на отражение
Размер пикселя, Δ	6,4x6,4 мкм ²
Частота обновления	60 Гц
Количество уровней квантования	8 бит (256)
Размер экрана (рабочей области)	12,5x7,1 мм
Разрешение	1920x1080 пикселей
Интерфейс цифрового входа сигнала	DVI-HDTV

Функциональная возможность модулятора позволяют одновременно выводить до 10 Мбит информации на один кадр и записать голограммы в реальном масштабе времени.

Плотность информации на ПМС составляет

$$940 \text{ Кбит}/88,75 \text{ мм}^2 = 10,59 \text{ Кбит}/\text{мм}^2$$

Максимальное уменьшение проекционной оптической системы определяется дифракционным пределом R [2]:

$$R = 1,22(\lambda F)/D$$

где D – апертура оптического прибора, F –фокусное расстояние оптического прибора.

Минимальный размер пикселя определяется длиной волны и относительным отверстием проекционной оптической системы. Длина волны определяется выбором фоточувствительного материала. В качестве фоточувствительного материала выбраны материалы компании «Славич»,

минимальная длина волны сенсбилизации составляет 633 нм для материала ПФГ-03М.

Разработан программный графический интерфейс, в котором отображается выбор режима частоты кадров (уровень серого в пределах от 0 до 255), фазы и настройку окна предварительного просмотра изображения. Режимы ввода и отображения изображения обеспечивает в формате (png, jpeg, bmp). При стандартном режиме работы частоты кадров глубина бита загруженного изображения автоматически преобразуется в 8-битную серую шкалу и обеспечивает полный ход фазы 2π ($\lambda=633$ нм). Также можно ввести значения фокусного расстояния и наклона ориентации генерируемого изображения в x и y осях. Значение длины волны, должно соответствовать длине волны источника света [3].

На рис.1. показана оптическая схема установки голографической проекционной системы с применением ПМС Thorlabs EXULUS для реализации 2D голографической проекции изображений. Коллимированный лазерный луч падает на экран ПМС, при этом наилучшие результаты для голографической проекции достигаются при размере диаметра луча чуть меньше $d=7$ мм. Падающий луч проходит через поляризатор и полуволновую пластину, так что он поляризован под углом 45° в направлении оптической оси панели. Исходное изображение сначала преобразуется в компьютерно-синтезированную голограмму (КСГ), которая рассчитывается прилагаемым программным продуктом. Изменение значение фокусного расстояния осуществляется автоматически, однако можно установить фиксированное значение. Известно, что КСГ использует дифракцию в различных зонах (ближних, средних и дальних). Для получения четкого голографического изображения на экране необходим набор линз (линза Френеля и т.д.) для формирования изображения. На рис.2 показано проецируемое голографическое изображение (картина оз. Иссык-Куль) и компьютерная синтезированная интерференционная картина, которая рассчитывается с использованием прилагаемого ПО, где фокусное расстояние для первой линзы, $f = 30$ мм, вторая линза, $f = 60$ мм, соответственно. Дифракционная картина содержит три параметра: длину волны, угол дифракции и угол поворота.

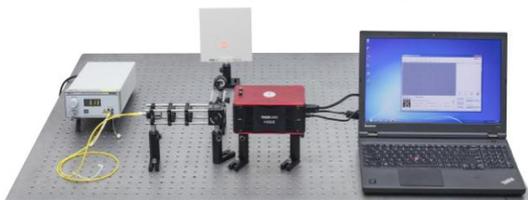
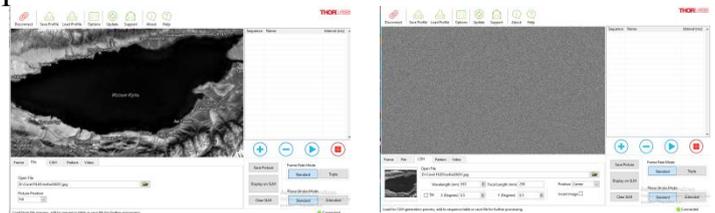


Рис.1 Оптическая установка, используемая для реализации КСГ



а

б

Рис.2. а. Исходное изображение в виде картины оз.Иссык-Куль, б/ компьютерно-синтезированная интерференционная картина

Синтезированная интерференционная картина исходного изображения выводится на экран ПМС, которое переносится голографической проекционной системой на оптической установке для регистрации на фотоносителе.

Заключение

В процессе исследований было показано, применения специализированного программного обеспечения для пространственного временного модулятора света (ПВМС), с целью эффективного использования динамического диапазона модулятора для вывода голографической структуры (в виде фурье голограмм) для генерации вводимого изображения в голографическую интерференционную картину.

Исследована система записи вводимой информации в виде полутонного изображения аэрокосмических снимков с использованием метода компьютерного синтеза 2D голограмм и вывода в голографическую проекционную систему, которая осуществляет перенос изображения в плоскость фоточувствительного носителя. Результаты исследований показали, возможности в будущем эффективного применения программного графического интерфейса с расширенными параметрами ПВМС для практического применения голографических запоминающих устройств с высокой плотности записи информации

Список литературы

1. Колфилд Г. Оптическая голография. (Пер. с англ.) - М.: Мир, 1982 - Т.1. - 380 с.; - Т.22.
2. Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем: учеб. пособие для вузов. СПб. : Лань, 2016. 446 с.
3. Жээнбеков А.А., Исмаилов Д.А., Жумалиев К.М. «Применение программного продукта ПМС для получения компьютерно-синтезированной голограммы», Сборник материалов международной научно-рецензируемой онлайн конференции “Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы”, Ташкент, РУз., Часть 2, стр. 69-72, 28 май 2020 г.

УДК 621.372:551.508.8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА

А.Т. Орозобаков, Б.Б. Саякбаева, Э.К. Токтосунов

*Институт физики им. академика Ж.Ж.Жеенбаева НАН КР, 720071,
Кыргызстан, Бишкек, пр.Чуй 265-а*

Аннотация. В статье представлены некоторые результаты экспериментальных исследований высотного распределения озона над оз. Иссык-Куль на миллиметровых волнах. Для анализа изменчивости содержания озона над регионом подобные микроволновые измерения проводятся регулярно, сезонно, в данной статье приводится типичный пример, подтверждающий спорадические возникновения струйной динамики распределения озона в стратосфере над наземными микроволновыми измерениями обсерватории.

Ключевые слова: озон, вариация, концентрация озона.

EXPERIMENTAL STUDIES AND ANALYSIS OF MECHANISMS OF OZONE CONTENT VARIABILITY

A.T. Orozobakov, B.B. Sayakbaeva, E.K. Toktosunov

*Institute of Physics academician J.J. Zheenbaeva, NAS KR,
Bishkek, Chui Avenue 265-a*

Annotation. The article presents some results of experimental studies of the altitude distribution of ozone over the lake. Issyk-Kul on millimeter waves. To analyze the variability of the ozone content over the region, such microwave measurements are carried out regularly, seasonally; this article provides a typical example confirming the sporadic occurrence of the jet dynamics of ozone distribution in the stratosphere above ground-based microwave measurements of the observatory.

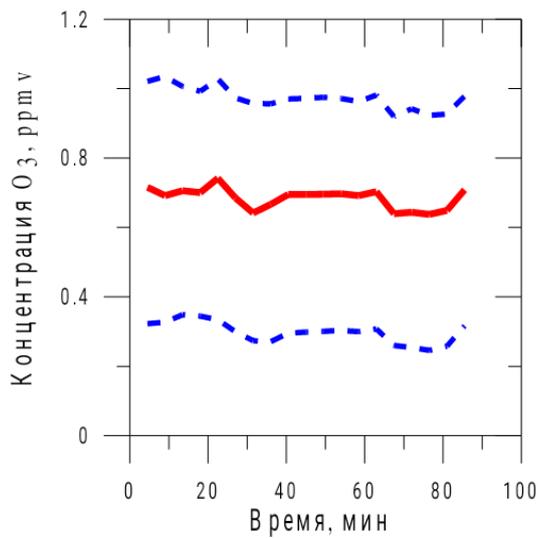
Keywords: ozon, variation, the ozone concentration.

В Иссык-Кульской обсерватории им. проф. Орозобакова Т. исследования содержания озона проводятся в основном в пределах высот 20-60 км. [1-3]. Изменчивость озона исследуется в верхней стратосфере – нижней мезосфере, так как именно на этих высотах озон является одной из важнейших фотохимических компонент и временная эволюция его концентрации в значительной степени определяется суточными вариациями освещенности. Данные вариации являются существенно не гармоническими, что усиливается сильной нелинейностью протекающих с участием озона фотохимических процессов. В результате «чистая» (без учета динамики мезосферы) фотохимическая эволюция озона на конкретной высоте является процессом с

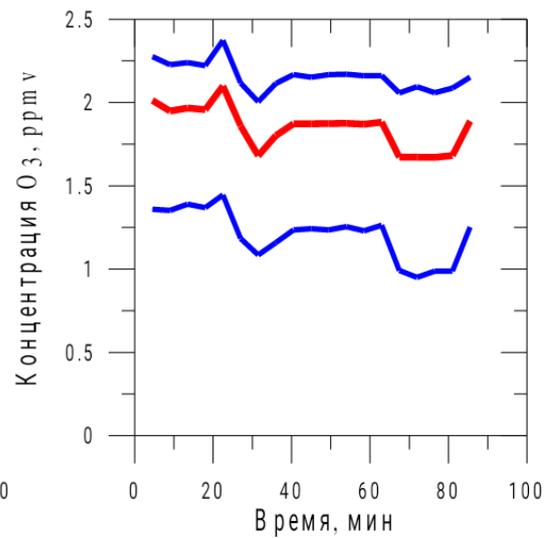
широким временным спектром. Поэтому при исследовании влияния волновых процессов на мезосферный озон (прежде всего, воздействия внутренних гравитационных волн) проводятся специальные обработки измеряемых временных рядов O_3 , которые будут для каждого значения высоты исключать из исходной экспериментальной информации суточные вариации этой компоненты, обусловленные фотохимией. Для расчета фотохимических вариаций концентрации озона, отвечающих конкретному месту и дате, используется базовая динамическая модель мезосферной фотохимической системы. На указанных временных масштабах (1 сутки) основным управляющим параметром данной модели является концентрация паров воды. Вертикальное распределение этой компоненты будет задаваться из подходящих (по времени и месту) данных спутникового зондирования средней атмосферы. В частности, на данный момент такие данные предоставляют инструменты SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) и MLS (Microwave Limb Sounder), размещенных на спутниках TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) и Aura соответственно [4]. Обработанные таким образом временные ряды концентрации озона для каждого значения высоты из рассматриваемого диапазона будут содержать вариации этой компоненты, обусловленные мезосферной динамикой.

В качестве первого шага в исследовании пространственно-временной динамики концентрации озона над Кыргызстаном проведено восстановление временной эволюции вертикального профиля концентрации озона по данным микроволновых наблюдений линии его собственного излучения с резонансной частотой 110.8 ГГц, выполненных в обсерватории вблизи села Караой (43°с.ш., 77°в.д.) спектрорадиометром РМС-001 с использованием абсолютной калибровки по “горячей” (черное тело при температуре окружающей среды) и “холодной” (кипящий жидкий азот) нагрузкам [3]. При восстановлении профиля концентрации озона использовался разработанный в рамках проекта МНТЦ метод, в основе которого лежит Бейесов подход к решению обратных задач, предполагающий построение вероятностного распределения искомым характеристик на основе представлений об измерительном шуме и имеющейся априорной информации о профиле [5]. При этом использовался новый способ регуляризации задачи, основанный на аппроксимации искомого профиля озона функцией в виде искусственной нейронной сети, представляющей собой нелинейную параметризацию в виде суперпозиции определенного числа функций (называемых нейронами), нелинейно зависящих от своих параметров. В процессе анализа непрерывных серий вертикальных профилей концентрации озона, извлеченных из данных измерений с малым временем накопления (4.5 мин.), были обнаружены «быстрые» (продолжительностью 10-20 мин.) вариации концентрации озона. Эти вариации затрагивают широкий диапазон высот, начиная с примерно 20 км, при этом относительное изменение озона в процессе развития процесса увеличиваются с ростом высоты, что дает

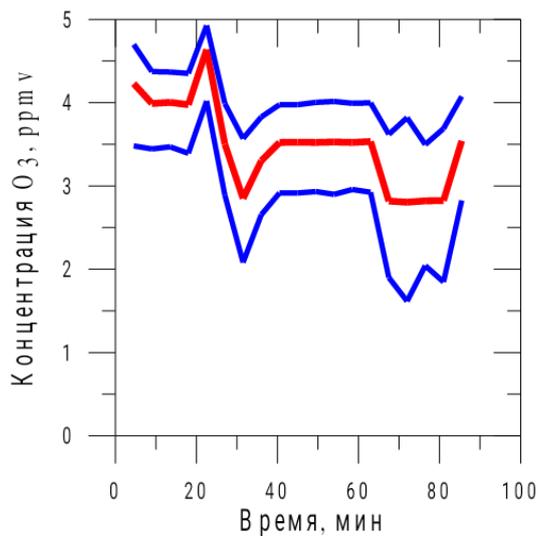
основание говорить о спорадическом возникновении струйной (направленной вверх) динамики в стратосфере над областью зондирования. Это, в частности, можно видеть из Рис. 1.а-1.д и 2.а-2.д, где приведены временные зависимости концентрации озона на высотах 15 (Рис.1.а и 2.а), 20 (Рис. 1.б и 2.б), 25 (Рис. 1.в и 2.в), 30 (Рис. 1.г и 2.г) и 35 км (Рис. 1.д и 2.д), восстановленные из непрерывных серий измерений с временем накопления 4.5 мин, проведенных в диапазонах локальных времен 10:50:56 - 12:17:02 и 15:19:18 - 16:48:19 соответственно. Средняя линия показывает временные зависимости, отвечающие максимуму вероятности, крайние линии - границы доверительных интервалов.



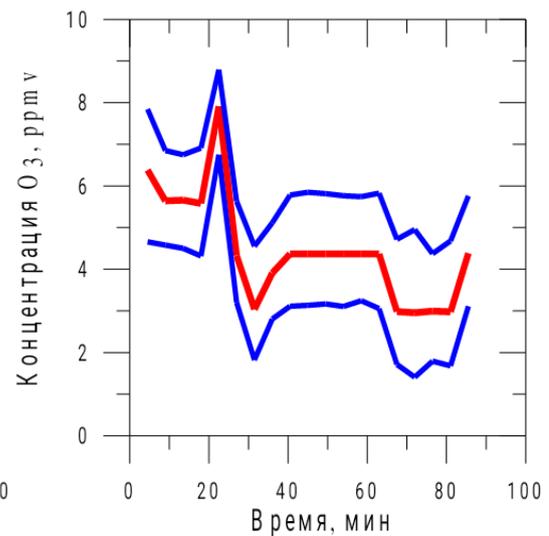
1а



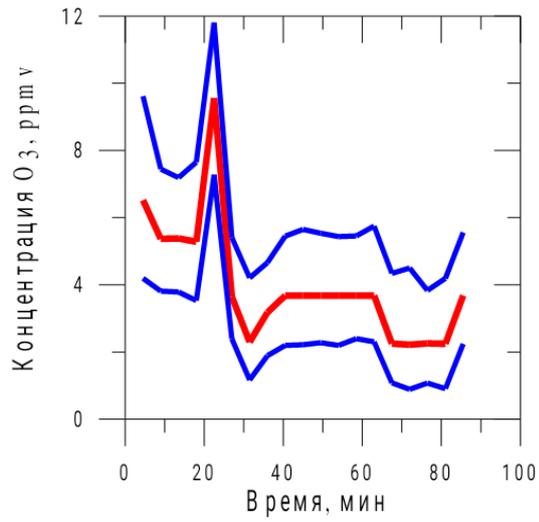
1б



1в

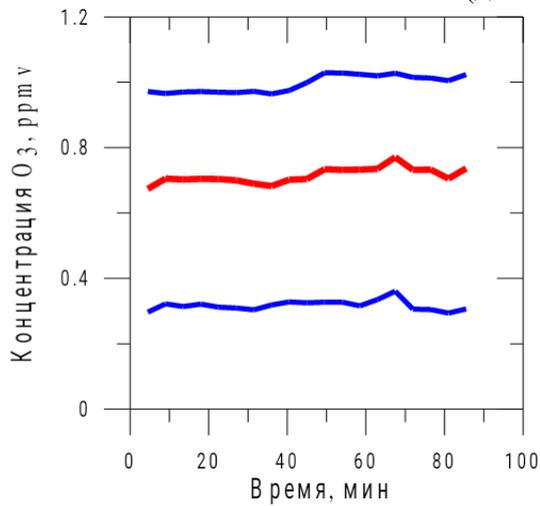


1г

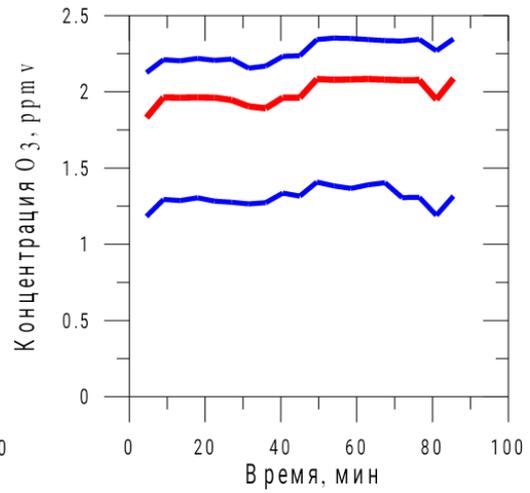


1д

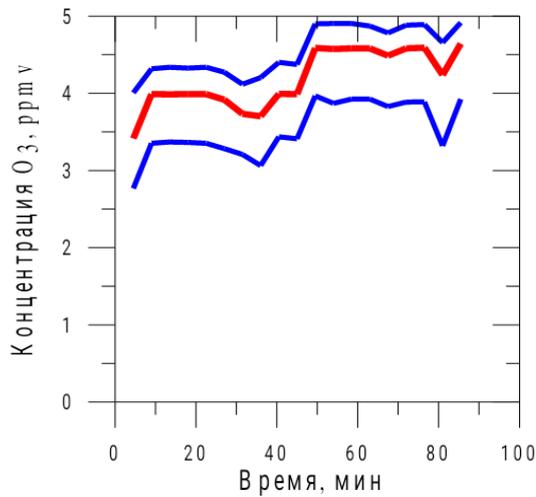
Рис. 1.а-д. Временные зависимости концентрации озона на различных высотах (до 12-ти)



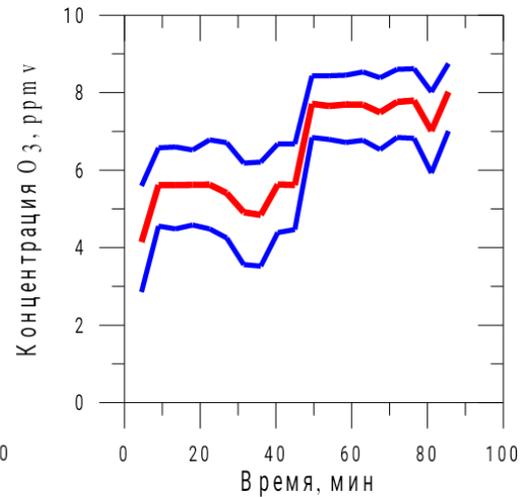
2а



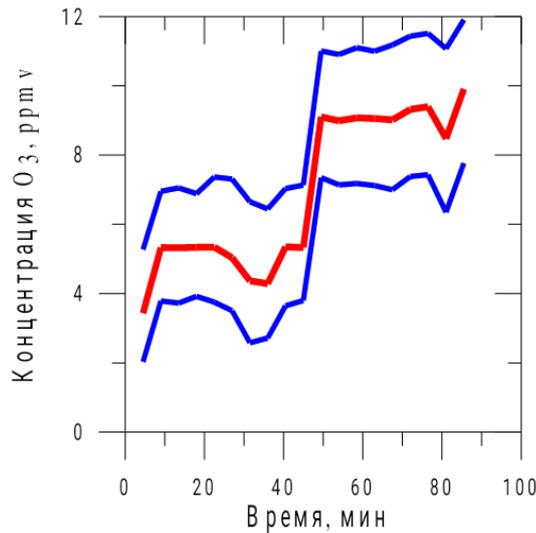
2б



2в



2г



2д

Рис.2. Временные зависимости концентрации озона на различных высотах (после 15-ти)

Более детальное исследование обнаруженного эффекта будет проводится постоянно по непрерывным измерениям в течение нескольких дней с использованием абсолютной калибровки по “горячей” и “холодной” нагрузкам.

Причиной наблюдаемой изменчивости озона на высотах 25-50 км считается быстрое фотохимическое время ее жизни порядка 10^2 - 10^3 секунд. Однако, O_3 входит в состав медленного семейства нечетного кислорода O_x ($O+O(^1D)+O_3$), поэтому временная эволюция концентрации озона определяется временем эволюции полной концентрации данного семейства и характерным временем атмосферного переноса. Фотохимическое время жизни O_x существенно зависит от высоты: на 40-50 км оно порядка 1-3 суток, но экспоненциально резко увеличивается ниже 40 км, так что на высотах 25-30 км оказывается уже порядка одного месяца и более, при этом характерное время переноса за счет атмосферной динамики в стратосфере составляет порядка 5-10 суток. На высотах выше 40 км O_x и O_3 оказываются фотохимически активными компонентами, на которые атмосферный перенос оказывает сравнительно слабое воздействие. Основной реакцией образования озона в атмосфере Земли является тройная реакция $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$, где M - молекула воздуха. Константа данной реакции существенно (по закону $T^{-2.4}$) зависит от температуры и чем выше температура, тем ниже скорость образования озона и наоборот. То есть 10% увеличение температуры должно приводить к уменьшению скорости образования озона на 24%. Отсюда можно заключить, что наблюдаемая изменчивость концентрации озона (и антикорреляция с температурой) на 40-50 км определяется и в значительной степени управляется локальной изменчивостью температуры посредством соответствующей модуляции фотохимической скорости образования озона.

В свою очередь, на высотах средней стратосферы (25-30 км) и ниже, где фотохимическое время жизни O_x около месяца и более, временная эволюция O_x и O_3 не имеет ярко выраженных фотохимических вариаций, однако подвержена сильному воздействию со стороны атмосферного переноса, так что эти компоненты становятся трассером атмосферной динамики. Это означает, что на данных высотах эволюция концентрации озона должна коррелировать с температурой воздуха, когда изменчивость обеих характеристик является следствием проявления одного и того же фактора – атмосферного переноса [6]. Таким образом, можно заключить, что наблюдаемая изменчивость концентрации озона на высотах средней стратосферы определяется и в значительной степени управляется атмосферным переносом в вертикальном и меридиональном направлениях.

Список литературы

1. Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б., Токтосунов Э.К. Наземные измерения высотного распределения озона на миллиметровых волнах в Иссык-Кульской обсерватории. //Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана, №4, 2020, С.3-9.
2. Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б., Орозобаков Э.У., Токтосунов Э.К. Общее содержание озона над Средней Азией по результатам обработок данных мировой сети. //Известия ВУЗов Кыргызстана, №8, 2019, С.3-11.
3. Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б., Орозобаков Э.У. Наземные радиофизические наблюдения высотного распределения озона над регионом Средней Азии. //Журнал радиоэлектроники, №12, 2018, С.1-13.
4. <https://disc.gsfc.nasa.gov>
5. Орозобаков Т.О., Орозобаков А.Т., Кисляков А.Г., Вдовин В.Ф., Зинченко И.И., Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Носов В.И., Носова Е.В., Рыскин В.Г., Шкелев Е.И., Орехов Ю.И., Хохрин Л.П. Обсерватория для мониторинга озонового слоя Земли в миллиметровом диапазоне длин волн в Среднеазиатском регионе. //Вестник ННГУ, Сер. Радиофизика, 2007, № 6, С.44 – 51.
6. Носов В.И., Шкелев Е.И. Оптимизированная система калибровки спектрорадиометра полной мощности для наблюдений линий озона. //19-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (Крым и Ко 2009), 14-18 сентября 2009, Севастополь, Крым, Украина, т.2, с 915-919.

УДК: 536.12.34

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Д.С. Джураев

Таджикский технический университет им. академика М.С. Осими, Худжанд, Таджикистан

Аннотация. В данной статье приведены способ получения, область применения и изменение свойств магнитных жидкостей при воздействии магнитного поля. Кроме того, приведены некоторые характеристики, зависимости диэлектрической проницаемости, электрофизические и электрические свойства магнитных жидкостей от концентрации ферромагнитных частиц и температуры.

Ключевые слова: магнитная жидкость, диэлектрическая проницаемость, электрофизические свойства, электрические свойства, магнитное поле, температура.

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF MAGNETIC LIQUIDS

D.S. Dzhuraev

Polytechnic Institute of Tajik Technical University. ac. M.S. Osimi, Khujand, Tajikistan, e-mail: juraev77@mail.ru

Annotation. This article describes the method of production, the scope, the change in the properties of magnetic fluids when exposed to a magnetic field. In addition, some characteristics, the dependence of the dielectric constant, electrophysical and electrical properties of magnetic fluids on the concentration of ferromagnetic particles and temperature are given.

Key words: magnetic fluid, dielectric constant, electrophysical properties, electrical properties, magnetic fields, temperature.

Methods for producing magnetic fluids are diverse. Some are based on the grinding of iron, nickel, cobalt to hundredths of a micron using mills, an arc or spark discharge, using sophisticated equipment and at the cost of high labor costs.

Magnetic liquids do not belong to materials of mass demand. As a rule, they are produced in small batches and used in high-tech devices and devices: in sealing systems for inputting rotating shafts, anti-friction units and dampers, in ultrasonic flaw detection and high-quality loudspeakers, rare-element magnetic separators, tilt sensors and high Sensitive accelerometers, micromanometers and actuators of robots.

The use of magnetic fluids in various fields of science and technology also predetermines the variety of requirements for their physicochemical and electrical characteristics, taking into account the specific conditions for their use. In most cases, a number of properties of magnetic fluids uniquely determine the effectiveness of its operation, regardless of the scope. Among them, saturation magnetization and

resistance to the action of gravitational forces and magnetic fields can be called - the higher they are, the higher output indicators of magneto-liquid devices are usually achieved. This cannot be said of other properties of magnetic fluids, since they are differentiated depending on the conditions of use. Such characteristics of magnetic fluids include viscosity, volatility, toxicity, heat resistance, and special requirements for chemical resistance to working fluids, which were described in sufficient detail in the literature [1–7]. For example, when used in high-speed seals and bearing assemblies, magnetic fluids must have low viscosity and volatility in combination with high heat resistance; when used as magnetic ink - on the contrary, high volatility. When using magnetic fluids in biology and medicine, it must be taken into account that they must be non-toxic and resistant to contact with living cells and body tissues [8–11].

The main means of controlling magnetic fluids is the magnetic field. For example, by applying an inhomogeneous magnetic field to them, it is possible to achieve bulk ponderomotive forces several orders of magnitude greater than gravity. These forces are used in magneto-liquid separators, acceleration sensors, etc. Due to the possibility of localizing magnetic fluids by a magnetic field, magneto-fluid seals, controlled lubricants, magnetically sensitive fluids for flaw detection, and others were developed. In practice, a wide variety of magnetic fluids are used, among which magnetic fluids based on mineral oils and organosilicon media should be distinguished. The viscosity of such magnetic fluids with a saturation magnetization of 20–40 kA / m can reach a value of the order of 10⁴; therefore, they are sometimes identified with magnetic pastes. For the needs of medicine, magnetic fluids based on edible vegetable oils are being developed.

The development of studies of structured magnetic fluids and the possibility of their practical use (in particular, magnetic fluids with a microdroplet structure) led to the idea of artificially creating multiphase magnetizable media - magnetic fluids with a non-magnetic filler. Such liquids can be widely used as a magnetically sensitive medium, which indicates the prospects of their application for solving some problems of chemical technology, instrument making, etc. In this regard, studies of the properties of magnetic fluids with non-magnetic filler, in particular, the formation of an anisotropic structure and the characteristics of the optical properties of such systems associated with these processes, are becoming relevant. Similar studies could be useful in the theoretical description of liquid multiphase magnetizable media.

With increasing temperature, the electrophysical parameters of magnetic fluids increase, such as electric capacity, permittivity, conductivity, and dielectric loss tangent [12]. Moreover, the nature of their dependences on the concentration of the solid phase does not change [13–16]. The electrical properties of magnetic fluids in with increasing concentration of ferromagnetic powders can change by more than an order of magnitude under the influence of a magnetic field. This fact is a significant result and can find practical application in the synthesis of new functional materials, as well as in the creation of controlled electrical modules.

Literature

1. Taketomi S., Tikazumi S. Magnetic fluids. Per. from English / Edited by V.E. Fertman. –M.: Mir, 1993. 69 - 94, 113 - 122, 125 - 137s.
2. Fertman V.E. Magnetic fluids. Minsk.: Higher. School, 1988. 9 - 44, 104 - 162s.
3. Morozova T. F. Formation of a structure in magnetic fluid under the influence of polarizing voltage. Abstract. Diss ... cand. physical mat. sciences. Stavropol, 2002. –24 p.
4. Bejanyan M. A. Effects of the interaction of magnetic fluid droplets with electric and magnetic fields. Abstract. Diss ... cand. physical mat. sciences. Stavropol, 2002. –18 p.
5. Larionov Yu. A. Kinetics of structuring magnetic colloid in the near-electrode layer. Abstract. Diss ... cand. physical mat. sciences. Stavropol. 2002, –24 p.
6. Malsugenov OV. Kaplestruyny movement of magnetic fluid in electric and magnetic fields. Abs. Diss ... cand. physical mat. sciences. Stavropol, 2004. -24 p.
7. Grabovsky Yu. P. Development of physicochemical principles for the synthesis of magnetic fluids with predetermined properties. Abstract. Diss. ... dr. tech. sciences. Stavropol, 1998. –44 p.
8. Levin B. E., Tretyakov Yu. D., Letyuk L. F. Physicochemical principles of production, properties and application of ferrites. M.: Metallurgy, 1979. –P.55 - 67, –P.88 - 110.
9. Tretyakov Yu. D., Oleinikov N. N., Mozhaev A. P. Fundamentals of cryochemical technology. M.: Higher school, 1987. –P.104 - 114.
10. Cherkasova OG Physical and chemical principles of the use of finely dispersed magnetic materials in pharmacy. Abstract. diss ... dr. farm. sciences. –Moscow, 1993. – 35 p.
11. Nesterenko V. M., Aprosin Yu. D., Shlimak V. M. // Thesis. Doc. III All-Union. Conf. on the use of magnetic fluids in biology and medicine. –Sukhumi, 1989. – P.158 - 159.
12. Nachaeva O.A. Structural organization of magnetic colloids in electric and magnetic fields. Diss ... cand. Ph. mat. Sciences:01.04.13.-Stavropol, 2003.-140p.
13. Kozhevnikov VM, Morozova TF, Shatalov AF, Malsugenov OV Electric properties of thin layers of magnetic fluid of various concentrations under the influence of temperature / Abstracts of the regional scientific and technical conference "University science - North- C. region." Stavropol, 1997. –S.80–83.
14. Kozhevnikov V.M., Larionov Yu.A., Morozova T.F. The influence of the structure of the surface layer of a magnetic fluid on conductivity / Materials of the regional scientific and technical conference STGTU. Stavropol, 1998. –P.69.
15. Morozova T.F. Electrical conductivity of a magnetic fluid in a constant electric field with a change in temperature / Materials of the regional scientific and technical conference STGTU. Stavropol, 1998. –P.82.
16. Kozhevnikov V.M., Morozova T.F., Shatalov A.F. Investigation of the dielectric loss tangent in thin layers of liquid dielectrics / Tez. doc. XXVII scientific and technical conference of StSTU. Stavropol, 1998 . p. 47.

УДК 621.762

МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ РЕАКЦИОННОГО СПЕКАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ В АТМОСФЕРЕ АЗОТА

¹Л.О. Сатаев, ²Н.К. Касмамытов, ³Н.Ж.Кайрыев

¹Таразский региональный университет им. М.Х.Дулати, Республика Казахстан, г.Тараз, e-mail: leke_1974@mail.ru

²Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева НАН КР, Кыргызстан, г.Бишкек, пр. Чуй 265-а, e-mail: nurkas@mail.ru

³Кыргызско-Российский Славянский Университет им. Б.Н.Ельцина, г.Бишкек, e-mail: n.kajryev@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию процесса реакционного азотирования пористого кремниевого изделия в виде цилиндра в атмосфере азота с превращением в нитрид кремния. Представлены результаты численных расчётов кинетики реакционного спекания кремния в атмосфере азота для цилиндрического пористого образца кремния заданных размеров. Рассчитаны концентрационные кривые зависимости кремния и азота от времени реакционного спекания при заданных температуре и давлении азота в камере электропечи, взятых из собственного эксперимента. Проведен анализ расчётных кривых азотирования нитрида кремния. Выявлено, что кристаллохимическая реакция в процессе азотирования происходит интенсивно сначала в приповерхностных областях цилиндра с последующим фронтальным переходом реакции во внутренние области в направлении к центру оси цилиндра.

Ключевые слова: кремний, азот, модельные расчеты; пористый сплошной цилиндр, температура, давление, кинетика азотирования; скорость реакционного синтеза, нитрид кремния, микроструктура.

MODEL CALCULATIONS OF REACTIONARY BAKING OF SILICON PRODUCTS IN THE ATMOSPHERE OF NITROGEN

¹L.O. Satayev, ²N.K. Kasmanyov, ³N.J.Kairyev

¹Taraz Regional University I.M.H. Dulati, Republic of Kazakhstan, Taraz, e-mail: leke_1974@mail.ru

²Institute of Physics by Academician J. Jeenbayev of the National Academy of State, Kyrgyzstan, Bishkek, Chui 265-a, e-mail: nurkas@mail.ru

³Kyrgyz-Russian Slavic University by B.N. Yeltsin, Bishkek, e-mail: n.kajryev@mail.ru

Annotation. The article is devoted to the study of the process of reactionary nitrogenization of a porous silicon product in the form of a cylinder in the atmosphere of nitrogen with the transformation into silicon nitrid. The results of numerical calculations of the kinetics of the reactionary caking of silicon in the nitrogen atmosphere for the cylindrical porous sample of silicon of specified sizes are presented. The concentration curves of silicon and nitrogen dependence on the time of reactionary caking at the specified temperature and nitrogen pressure in the electro oven chamber, taken from their own experiment, are calculated. The analysis of the calculated curves of

the nitrogen nitride of silicon has been carried out. It was revealed that the crystalline reaction in the process of nitrogenation occurs intensively first in the pre-internal areas of the cylinder, followed by the frontal transition of the reaction to the internal areas in the direction to the center of the cylinder axis.

Keywords: *silicon, nitrogen, model calculations; porous solid cylinder, temperature, pressure, kinetics of nitrogenation; reactionary fusion rate, silicon nitride, microstructure.*

Введение

Ранее в работах [1-4] были опубликованы наши экспериментальные результаты по особенностям реакционного спекания шликерных изделий кремния в атмосфере чистого азота. Для определения оптимальных технологических режимов реакционного спекания кремниевых изделий в атмосфере чистого азота требуется экспериментальным путем детально изучить закономерности реакционного спекания. Процесс реакционного синтеза нитрида кремния зависит от многих параметров (размеров изделий, размера дисперсности частиц порошинок, пористости изделий и многих других характеристик – подачи давления азота в камеру, кинетики нагрева, температуры спекания, временной выдержки, диффузионных процессов массопереноса азота в кристаллический кремний и многие др.). Многофакторность процессов, протекающих при реакционном спекании нитрида кремния приводит к тому, что для определения оптимальной температуры реакционного спекания для конкретного изделия, требуется предварительно провести множество дорогостоящих экспериментов, связанных с затратами на электроэнергию, материалы и трудового времени. Для сокращения дорогостоящего эксперимента параллельно были начаты работы по разработке модельных исследований кремниевых изделий в атмосфере азота с целью сокращения дорогостоящего эксперимента, экономии сырья и энергозатрат.

В работах [5-8] подробно описаны, последовательно разработанные нами несколько физико-математических моделей. Эти модели рассматриваются с учетом их развития и усовершенствования.

Целью настоящей работы явилась компьютерная реализация двухмерной нестационарной модели реакционного спекания пористого кремниевого изделия цилиндрической формы в среде азота в цилиндрической системе координат с помощью известной программы COMSOLmultiphysics -5.3. Этот программный пакет позволяет решить систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов [10].

Опыты показывают [1-3,9], что при реакционном спекании отформованных порошков кремния в атмосфере азота при определенных температурах синтезируются нитридокремниевые изделия с заданной микроструктурой, причем с рядом уникальных свойств [2,9]. Однако, для выявления оптимальных режимов реакционного синтеза нитрида кремния требуется провести множество дорогостоящих экспериментов по выявлению оптимальных параметров (по температуре, скорости нагрева, времени

выдержки, величине давления газа, конфигурации и толщины изделия и других) реакционного спекания. Анализ численных расчётов по реакционному спеканию кремния в среде азота существенно позволил сократить экспериментальную часть работы по выявлению оптимальных режимов спекания для заданных конфигураций (форм и размеров) нитридо-кремниевых изделий, применяемых в производстве, а также существенно уменьшить энерго- и ресурсозатраты (воду, пластификаторы, и др.).

Представляло интерес провести численный расчет в цилиндрической системе координат процесса реакционного спекания опытного образца, имеющая цилиндрическую форму с радиусом $R=2,15$ см и высотой $h=4,5$ см находящегося в электропечи с атмосферой азота.

Результаты и обсуждение численных расчетов.

В процессе реакционного синтеза нитрида кремния температура- T и давление азота- P в камере электропечи рассматриваются как внешние управляющие параметры. Для численных расчётов временной закон изменения температуры реакционного спекания и задаваемое давление азота в камере печи, были взяты из собственных экспериментов [4]. Экспериментальные режимы реакционного спекания нитрида кремния изображены в виде графиков зависимостей на рис. 1а,б.

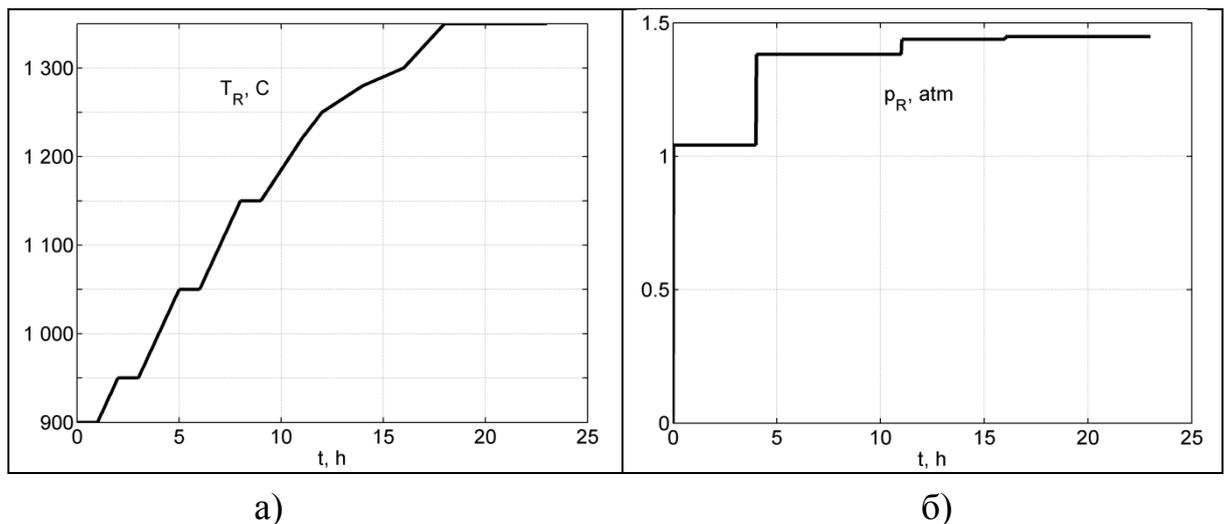


Рис. 1а,б. Зависимость температуры (а) и давления азота (б) в электропечи в условиях реакционного спекания кремниевых изделий в атмосфере азота, проведенные в лаборатории порошковых материалов Института Физики им. академика Ж.Жеенбаева НАН КР [1,4].

Видно, что в начальный момент времени выдержки при рабочей температуре реакционного спекания $T=1350^{\circ}\text{C}$ в камеру вакуумной электропечи напускается азот и давление поддерживается постоянным $P=1,5$ атм в процессе реакционного спекания.

Известно, что в процессе азотирования кремниевого изделия протекают процессы диффузии атомов азота в кристаллический кремний, приводящие к снижению давления азота в камере, но в эксперименте не допускается

понижения давления в камере ниже значения $P=1,25$ атм. В этот момент напускается азот в камеру и давление доводится до первоначального значения $P= 1,5$ атм.

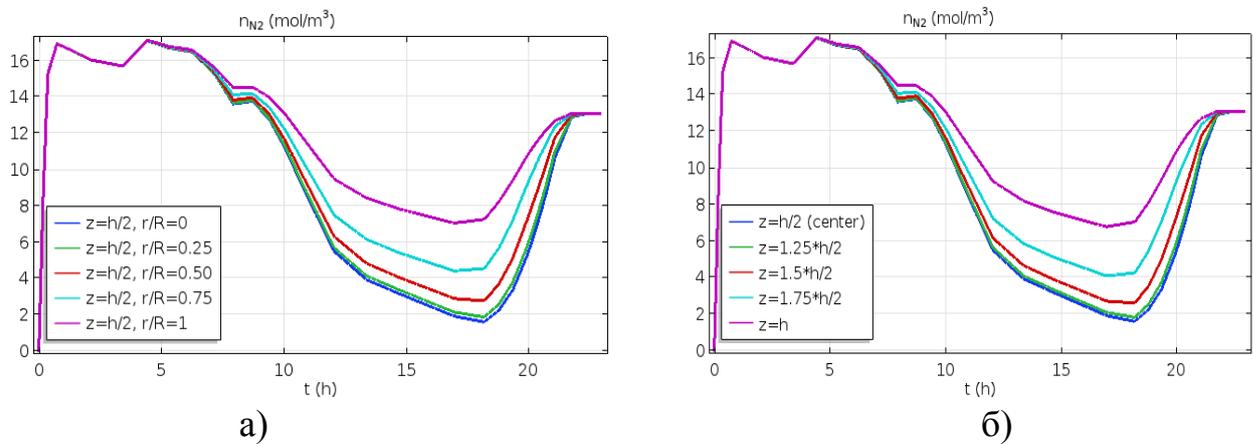


Рис.2а,б. Эволюция молярной концентрации молекул азота в цилиндре ($R=0,215$ см, $h=4,5$ см) в разных точках радиальной(а) и аксиальной осей(а).

В результате протекания диффузии атомов азота в кристаллический кремний (в течение 4 часовой выдержки при постоянной температуре спекания 1350°C) однозначно можно заметить, что в кремниевом образце возрастает концентрация молекул азота (см. рис.2 а,б), причем по всему объему кремниевого изделия. Из расчетных кинетических кривых азотирования (рис.2а,б) видно, что в интервале выдержек от 7 до 24 часов при рабочей температуре реакционного спекания 1350°C в направлении от боковой поверхности цилиндра к её главной оси наблюдается «расхождение» в азотировании. Это объясняется тем, что у поверхности образца азотирование начинается раньше и протекает чуть быстрее, чем в центральных областях у оси цилиндра. И только после выдержки 24 часов, процесс азотирования заканчивается по всему объему цилиндрического образца, а концентрация азота выравнивается, т.е. величина молярной концентрации между осевым центром и поверхностью цилиндрического образца становится одинаковой.

На рис.3 а,б показаны кинетические кривые численных расчетов изменения молярной концентрации атомов азота в радиальной плоскости, находящаяся в центре кремниевого цилиндрического образца, причем в заданных точках от боковой поверхности цилиндра к центру оси образца. Численные расчеты показывают, что (по мере увеличения нагрева образцов в электропечи согласно режиму, показанному на рис.1а.), при температуре $\sim 1100^{\circ}\text{C}$ и при более высоких температурах начинается интенсивный процесс диффузионного проникновения азота в кристаллическую решётку кремния, причем такое диффузионное азотирование преимущественно начинается в поверхностных областях цилиндра с последующим переходом вглубь объема изделия.

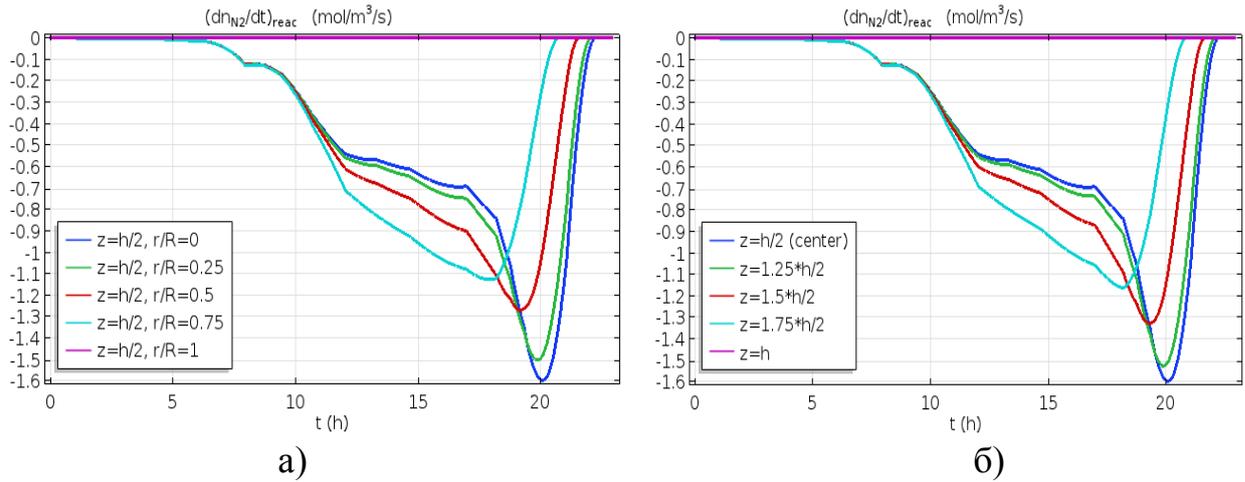


Рис.3. Эволюция скорости реакции азотирования в цилиндрическом образце ($R=0,215$ см, $h=4,5$ см) в разных точках радиальной (а) и аксиальной осей (б).

На рис. 4. показана монотонная кинетическая кривая относительного уменьшения процентного содержания исходного количества кремния в цилиндре по отношению к атомам кремния вступивших в реакционный синтез. Видно, что при выдержке 24 часа кремний в полном объеме вступает в кристалло-химическую реакцию с азотом, образуя нитрид кремния.

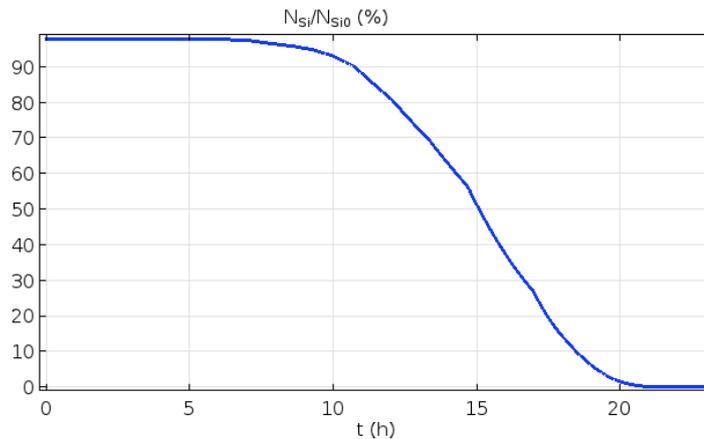


Рис.4. Относительное изменение общего количества атомов кремния в процентах, непрореагировавших с азотом в кремниевом образце

Таким образом, процесс реакционного азотирования (когда кремний вступает в реакцию с азотом, образуя нитрид кремния - Si_3N_4) сопровождается уменьшением концентрации молекул азота по всему объему изделия. Из анализа кривых численных расчетов можно однозначно утверждать, что молекулы атомов азота начинают диффундировать первоначально у поверхностей кремниевого изделия с постепенной их транспортировкой по кристаллической решетке во внутренние области к центру оси цилиндрического изделия.

Результаты модельных расчетов показывают, что фронт интенсивного азотирования передвигается с приповерхностных слоев изделия во внутренние области изделия, причем с монотонным уменьшением концентрации непрореагировавших атомов кремния. Фронтальная область интенсивного азотирования монотонно смещается во внутренние области изделия. Наглядно процесс синтеза в цветном изображении просматривается в объемном разрезе цилиндра на рис.5а,б, где представлены пространственные перераспределения молярной концентрации атомов азота и кремния в цилиндрическом образце в процессе реакционного спекания при температуре $T=1350^{\circ}\text{C}$ в момент выдержки $t=18,3$ часа. Отметим, что в момент времени $t=18,3$ часа в центре цилиндра синтез нитрида кремния еще окончательно не завершен. Для полного завершения синтеза нитрида кремния по всему объему цилиндрического изделия требуется продолжать реакционное спекания в течение 7 часов при температуре спекания 1350°C с постоянным давлением азота 1,5 атм.

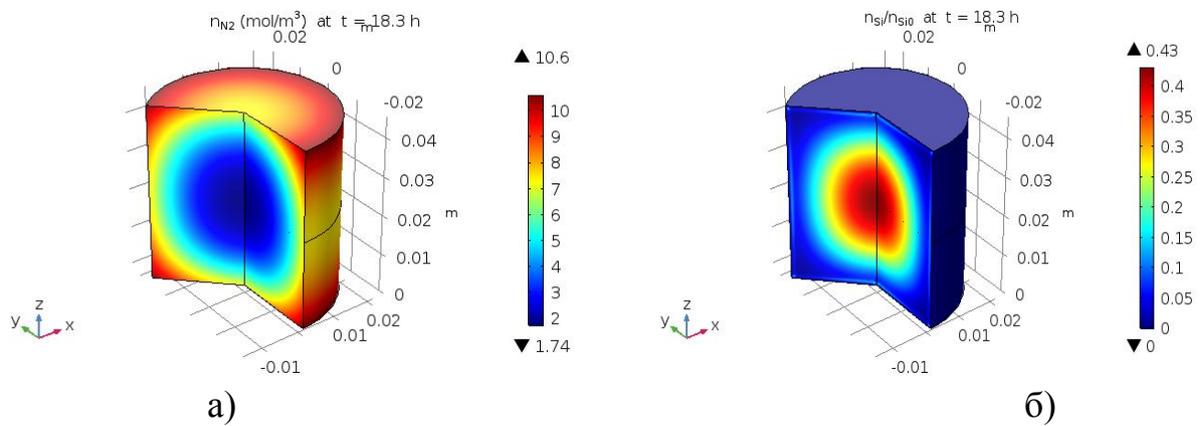


Рис.5а,б. Пространственное перераспределение молярной концентрации атомов азота(а) и кремния (б) в момент времени 18,3 ч после начала реакционного спекания, показанный в виде разреза до оси цилиндра: а- концентрационное перераспределение атомов азота в объеме изделия от поверхности до центра цилиндра; б- концентрационное перераспределение атомов кремния

Из рис.6. видно, как изменяется температура реакционного синтеза по всему объему кремниевого образца от поверхности до центра цилиндра. Разница в температуре между поверхностью и центральной частью для данных размеров цилиндрического образца в процессе реакционного азотирования составляет порядка ~ 9 градусов (см. рис.6 и 7).

Скорость реакционного азотирования (см. рис.3 и 8а) увеличивается и достигает наибольших значений во внутренних областях изделия это обусловлено тем, что реакция экзотермическая, т.е. процесс реакционно-кристаллического превращения кремния в нитрид кремния сопровождается выделением дополнительного тепла внутри изделия. В связи с этим температура во внутренних, центральных частях цилиндра по отношению к поверхности поднимается выше (см. рис. 3 и 8а) приблизительно на $\sim 9\div 10^{\circ}\text{C}$,

чем в приповерхностных областях. Отметим, что концентрация азота в любой заданной точке внутри кремниевого изделия определяется двумя процессами, а именно процессом реакционного азотирования и диффузионным переносом атомов азота в кристаллический кремний с поверхностных областей во внутренние области цилиндрического изделия. В момент равенства скоростей этих двух процессов концентрация азота достигает своего минимального значения (рис.2). В промежутках времени, где температура азота в печи поддерживается постоянной (на рис.1, выдержки в интервалах времени $t=[2\div 3]$ ч, $[5\div 6]$ ч, $[8\div 9]$ ч.), скорость реакционного азотирования очень низкая, практически нулевая. Это связывается с недостаточным диффузионным насыщением атомами азота кристаллической решетки кремния, обусловленное циклическим понижением давления азота до 1,25 атм в камере печи, которая через промежуток времени опять доводится до давления 1,5 атм.

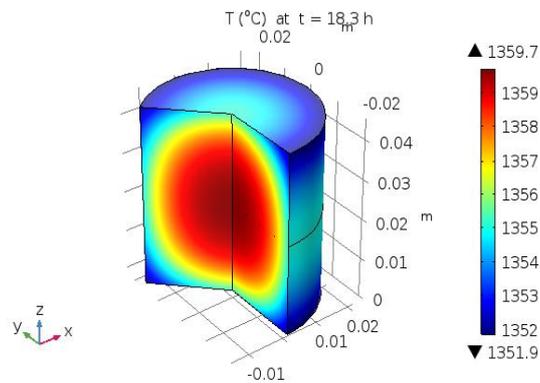


Рис.6. Пространственное распределение температуры в изделии в момент времени $t = 18,3$ ч., после начала спекания

Несмотря на это, концентрация азота монотонно увеличивается по всему сечению изделия из-за преобладания процесса диффузионного массопереноса азота в кристаллический кремний над реакционным азотированием (см.рис.2). Концентрация кремния по всему сечению цилиндрического изделия убывает монотонно (рис.4). Из-за высокой теплопроводности нитрида кремния распределение температуры по всему сечению образца является практически однородным (рис.6,7) и процесс реакционного азотирования ограничивается только диффузионным перемещением атомов азота в кристаллический кремний.

Если удлинить исходный размер цилиндрического изделия приблизительно в 4,44 раза, т.е. высоту цилиндра до $h=20$ см при том же значении радиуса $R=2,15$ см, то его удельная поверхность уменьшится на 25 %. Это будет означать, что в соответствующей пропорции уменьшится и интенсивность потока диффундирующих атомов азота в кремний при тех же значениях давления азота в камере электропечи.

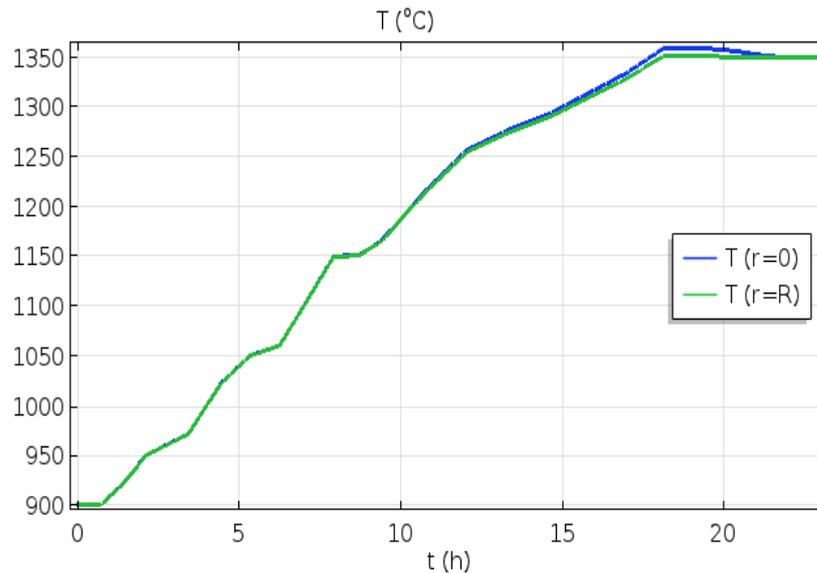


Рис.7. Эволюция температуры на поверхности (зеленная кривая) и на оси (синяя кривая) цилиндрического изделия: максимальный перепад температуры ($\sim 9^{\circ}\text{C}$) наблюдается в момент времени $t = 18,3$ ч.

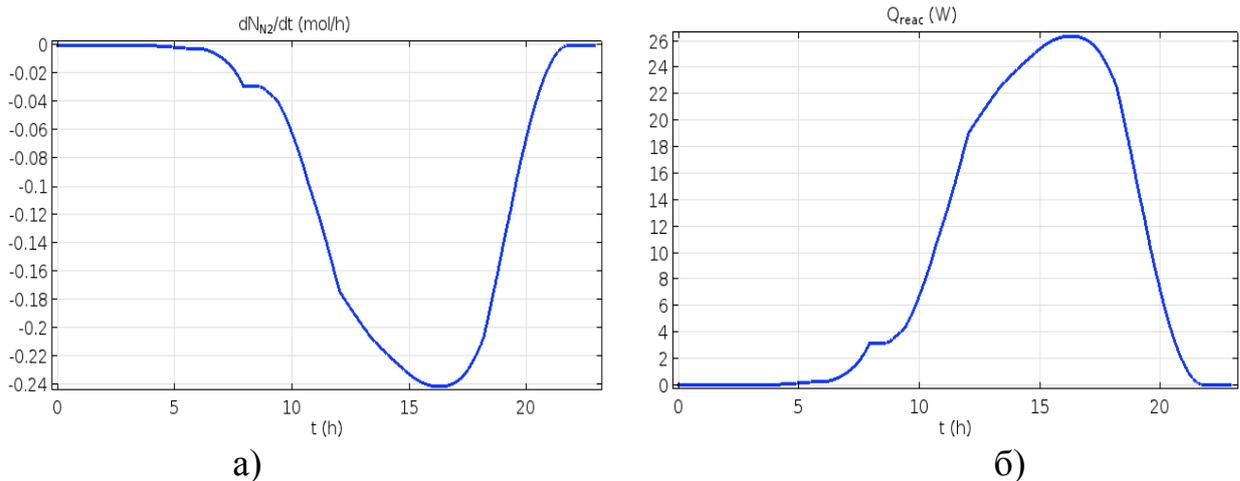


Рис.8а,б. Временные зависимости скорости реакции азотирования кремния (а) и мощности тепловыделения(б) при реакционном спекании

В результате таких изменений диффузионный процесс азотирования у поверхности и соответственно проникновение атомов азота в глубь изделия приводит к увеличению времени азотирования на 2 часа по сравнению с исходными размерами цилиндра $h=4,5\text{см}$. При этом максимальный перепад температуры в изделии, возникающий за счет выделения тепла (рис.8б.) в процессе экзотермической реакции нитрида кремния составляет $\sim 9^{\circ}\text{C}$ (рис.6, 7).

Из рис. 9а,б. наглядно видно, как уменьшается относительное содержание не прореагировавших атомов кремния с азотом в цилиндрическом образце по радиальному(а) и аксиальному (б) направлениям в заданных точках цилиндра.

На рис.10а-в приведены микрофотографии структуры нитрида кремния, формирующиеся в процессе реакционного синтеза кристаллов кремния в атмосфере азота при температуре спекания 1350°С.

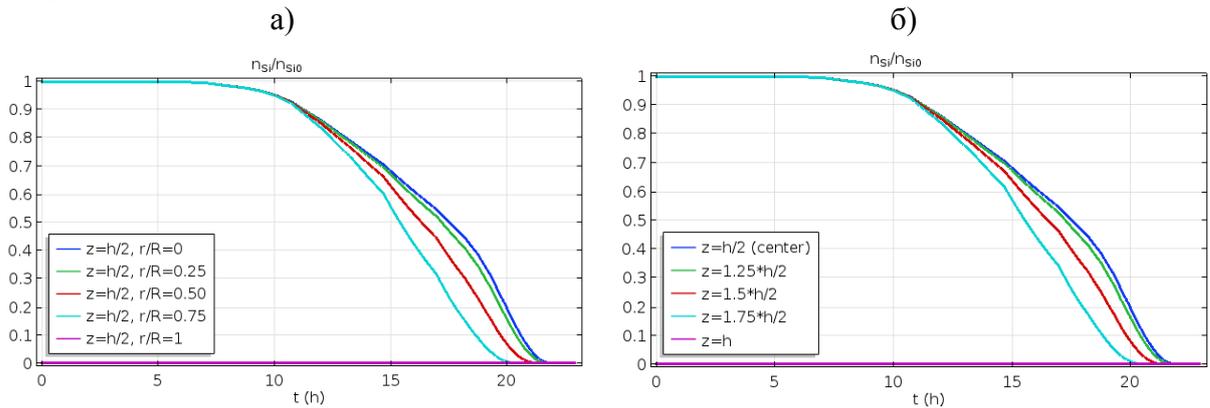


Рис.9а,б. Эволюция относительной концентрации атомов кремния в цилиндре ($R=0,215$ см, $h=4,5$ см) в разных точках радиальной (а) и аксиальной осей (б).

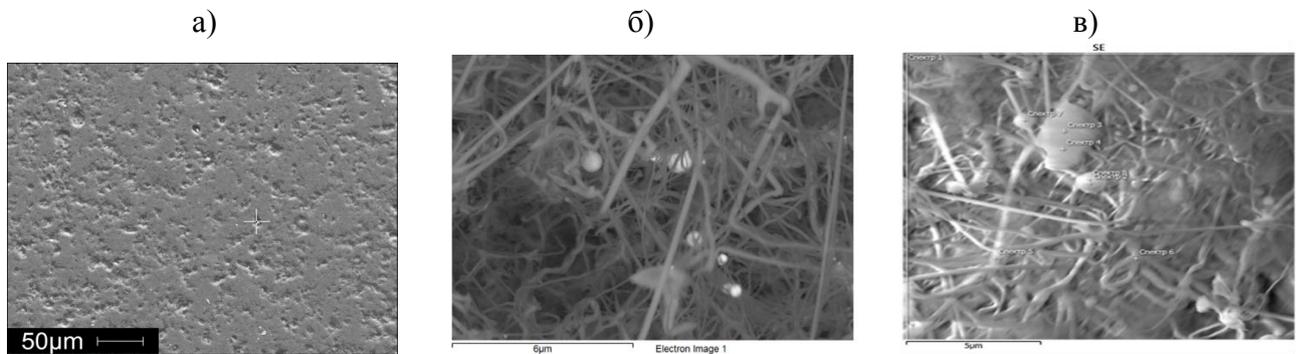


Рис.10а-в. Микроструктура реакционно-спекенного нитрида кремния при $T=1320^{\circ}\text{C}-24\text{ч}$: а) поверхность образца, округлые точки темного контраста – микропоры; б) излом, изображение в области поверхности пор образца; в) излом, в области плотного тела зерна нитрида кремния.

Видно, что в результате реакционного синтеза формируются ультрадисперсные нитевидные кристаллы нитрида кремния. Таким образом, в результате реакционного спекания при температуре 1350°С-24ч. формируется нитрид кремния в виде нано- и ультрадисперсных нитевидных кристаллов. Следует отметить, что в микроструктуре (см. рис. 10 б,в) имеются также включения в виде оксидных примесей - светлые сферические частицы-оксидные легкоплавкие включения.

В заключении статьи хочу выразить искреннюю признательность своему научному руководителю Нурбеку Кыдырмышевичу Касмамытову – д.ф.-м.н., профессору, заведующему лаборатории «Порошковых материалов» Института физики им. академика Ж.Жеенбаева Национальной академии наук Кыргызской Республики. Я, очень благодарен Вам за оказанную помощь и ценные советы в обсуждении модели и расчетных результатов. Также хочу поблагодарить Нурлана Жутановича Кайрыева – к.ф.-м.н., доцента кафедры

«Физики и микроэлектроники» Естественно-технического факультета Кыргызско-Российского Славянского Университета за оказанную помощь при разработке физико-математической модели реакционного азотирования кремния в среде азота и обсуждении результатов. Огромное Вам спасибо!

Выводы

1. Проведен численный анализ процесса реакционного спекания кремния в атмосфере азота для цилиндрического образца с помощью двухмерной нестационарной физико-математической модели в цилиндрических координатах, которая позволила охватить процесс синтеза во всем объеме изделия.
2. Установлено, что численные расчеты синтеза нитрида кремния при температуре $T=1350^{\circ}\text{C}$ -24ч. и давлении азота $P=1,5\text{атм}$ хорошо согласуются с результатами собственных экспериментов по реакционному спеканию спрессованных пористых изделий кремния в среде азота. Расчеты показывают, что данный температурный режим реакционного спекания является оптимальным, при котором осуществляется полное кристалло-химическое реагирование кремния с азотом по всему объему изделия.
3. Выявлено, что кристаллохимическая реакция в процессе азотирования происходит интенсивно сначала в приповерхностных областях изделия с последующим фронтальным переходом реакции во внутренние области изделия, обусловленная затрудненным диффузионным переносом атомов азота в частицы кремния через микропоры.
4. Исследования показывают, что интенсивное (массовое) реакционное азотирование пористого кремниевого изделия уже начинается при температурах $1230\text{-}1250^{\circ}\text{C}$ и протекают с высокой скоростью. При температуре 1230°C реакционный синтез нитрида кремния протекает лавинообразно, что объясняется дополнительным выделением тепла в объеме изделия, благодаря процессу экзотермической реакции азотирования кремния. Максимальный перепад температуры в объеме кремниевого образца между центром и поверхностью изделия не превышает $\sim 9^{\circ}\text{C}$.

Список литературы

1. Касмамытов Н.К. Особенности технологии получения нано- и ультраструктурированных керамокомпозиционных материалов на основе шламовых отходов кремния// Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. -2009 . - №1. – С. 57-68
2. Касмамытов Н.К. Реакционное спекание и свойства нано- и ультраструктурированных керамокомпозиционных материалов. //М.: Перспективные материалы. - 2011. - № 12. -С. 208-212.

3. Касмамытов Н.К. Особенности структурообразования нано- и ультрадисперсных керамокомпозиционных материалов на основе шламовых отходов кремниевого производства//М.: Перспективные материалы .- 2011. - № 12. -С. 201-207.
4. Касмамытов Н.К. Микрорентгеноспектральные исследования керамокомпозиционных материалов.// Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. -2010. - Т.10. - №5. – С.115-122.
5. Сатаев Л.О., Касмамытов Н.К, Кайрыев Н.Ж./ Одномерная физико-математическая модель реакционного спекания отформованных ультрадисперсных порошков кремния в атмосфере азота.// Современные тенденции развития науки и технологии. 2016. -№4-1. – С.46-53.
6. Касмамытов Н.К, Сатаев Л.О., Кайрыев Н.Ж/ Двумерная нестационарная модель реакционного спекания кремния в атмосфере азота// в сборнике: II-Международные научные чтения (Памяти С.Ф.Ковалевской), сб. статей Международной научно-практической конференции. -2016. –С.5-8.
7. Касмамытов Н.К, Сатаев Л.О., Кайрыев Н.Ж./ Модельные исследования кинетики реакционного спекания полнотелых сферических частиц кремния в азоте.// Вестник науки и образования Северо-Запада России. -2018. –Т.4. - №3. –С.139-147.
8. Касмамытов Н.К, Сатаев Л.О., Кайрыев Н.Ж., Жеенбаев Н.Ж./Особенности физико-математической модели реакционного спекания пористого порошкового кремниевого тела в среде азота.//Вестник науки и образования Северо-Запада России. -2019. –Т.5. - №1. –С.60-72.
9. Касмамытов Н.К. Утилизация отходов кремниевого производства: технология, керамика, структура, свойства и применения. // Бишкек. –Белек-принт. –2010. – 236 с.
10. Link to the site: <https://www.pdfdrive.com/comsol-multiphysics-version-53-e42893806.html> COMSOL Multiphysics version 5.3 // 2017. -142 p.

УДК 621.762

МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ РЕАКЦИОННОГО СИНТЕЗА НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Л.О. Сатаев

*Таразский региональный университет им. М.Х.Дулати, Республика Казахстан,
г.Тараз, e-mail: leke_1974@mail.ru*

Аннотация. В статье представлены результаты численных расчётов реакционного спекания кремниевых изделий различной формы и размеров в атмосфере азота с образованием нитрида кремния. В работе приведены расчеты для тонкостенных изделий: трубки - чехлов для термопар, стакана в форме усеченного конуса – для плавки драгметаллов и аффинажа золота, тигля - предназначенного для выращивания монокристаллов кремния. Численные расчеты позволили выявить особенности перераспределения температуры и относительного изменения концентрации атомов кремния и азота в изделии в процессе реакционного синтеза.

Ключевые слова: кремний, азот, спекание, реакция, нитрид кремния, модельные расчеты, изделия: диск, трубка, стакан, тигель.

MODEL CALCULATIONS OF REACTIONARY BAKING OF SILICON NITRIDE

L.O. Satayev

*Taraz Regional University, M.H. Dolati, Kazakhstan, Taraz
e-mail: leke_1974@mail.ru*

Annotation. The article presents the results of numerical calculations of reactionary sintering of silicon products of different shapes and sizes in the atmosphere of nitrogen with the formation of silicon nitride. The work provides calculations for thin-walled products: tubes - cases for thermopars, a glass in the form of a truncated cone - for melting precious metals and affinity of gold, crucible intended for the cultivation of silicon monocrystals. Numerical calculations revealed the specifics of temperature redistribution and relative change in the concentration of silicon and nitrogen atoms in the product during reactionary synthesis.

Keywords: silicon, nitrogen, caking, reaction, silicon nitrid, model calculations, products: disk, tube, glass, crucible.

Введение

В работах [1-4] детально изучены особенности эволюционного формирования микроструктуры нитрида кремния на различных стадиях реакционного спекания для отформованных порошков кремния в виде различных форм изделий. Было установлено, что микроструктура реакционно спечённого нитрида кремния формируется в несколько стадий. На первой стадии, ионы атомов азота под действием движущих сил диффузии проникают

в кристаллическую решетку кремния, образуя насыщенные твёрдые растворы Si-N. На основе экспериментов и микроструктурных исследований [1,2,4] были сделаны следующие предположения. Во-первых, первоначально твердые растворы Si-N образуются на поверхности кремниевой частицы с постепенным диффузионным переходом вглубь к центру частицы. С помощью локального микрорентгеноспектрального анализа было показано, что микроструктура у сформировавшихся частиц нитрида кремния на различных этапах (момента времени) процесса реакционного синтеза, как правило, в ядре крупных частиц остается не прореагировавший с азотом кремний. Во-вторых, если в поверхностных областях кремниевого образца, где относительная концентрация атомов кремния по отношению к атомам азота достигало соответственно, как 3:4, то считалось, реакция с образованием нитрида кремния полностью завершилось. Реакционное спекание кристаллического кремния в атмосфере чистого азота в наиболее общем случае можно представить в виде гетерогенного процесса, протекающего в системе реагентов «твёрдое вещество (Si) – газ (N₂)», а в продукте кристаллохимической реакции образуется новое твёрдое кристаллическое вещество (соединение Si₃N₄):



где Q – выделенная теплота в результате протекания реакции. Согласно формулы (1), реакционный синтез нитрида кремния относится к экзотермическим реакциям. Следует отметить, что процесс реакционного спекания кремния с азотом сопровождается без усадки исходного спрессованного брикета [1,2,4].

Ранее в наших работах [6-10] подробно были описаны ряд моделей реакционного синтеза нитрида кремния, причем модели разрабатывались в последовательном развитии: вначале одномерная, потом двухмерная нестационарные модели реакционного спекания кремния в атмосфере азота. В настоящей работе численные расчеты проведены с помощью двухмерной модели в цилиндрической системе координат, подробно о этой модели смотрите в работе [8-10]. Фактически данную модель можно рассматривать как трехмерную модель, описывающая процесс синтеза нитрида кремния в объеме.

С учетом вышеотмеченного, настоящая работа была посвящена компьютерной реализации двухмерной физико-математической модели с помощью известной программы Comsol multiphysics 5.3. Этот программный пакет [11] численного моделирования позволяет решать системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов. Таким образом, целью исследования являлось проведение численных расчетов реакционного синтеза нитридо-кремниевых изделий различной формы, применяемые в промышленном производстве.

Теоретические расчёты процесса реакционного превращения кремния в нитрид кремния в атмосфере азота с использованием методов компьютерного

моделирования является очень целесообразной для разработки оптимальной технологии по получению качественных реакционно-спечённых керамических изделий на основе нитрида кремния. Численные расчеты позволяют существенно сократить число дорогостоящих экспериментов по выявлению оптимальных режимов реакционного спекания нитрида кремния для заданной формы изделия и толщины их стенок.

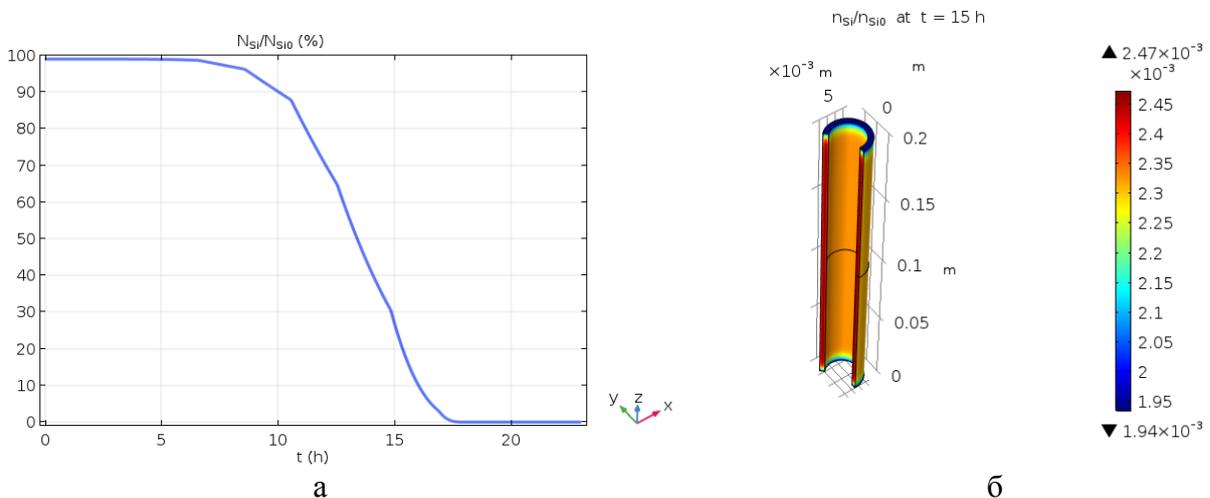
Результаты численных расчетов синтеза нитрида кремния

На рис.1а-г приведены результаты расчета реакционного спекания для тонкостенной цилиндрической трубки толщиной 3 мм, которая используется в качестве чехлов термопар. Численный анализ показал, что в момент времени реакционного спекания $t=15,4$ часа количество непрореагировавшего кремния с азотом составляет около 28% по объему кремниевого изделия.

Из рис.1в видно, что в результате кристаллохимической реакции кремния с азотом выделяется дополнительное количество теплоты Q , а в момент времени $t=15,4$ часа наблюдается максимальное выделение тепла благодаря экзотермической реакции синтеза нитрида кремния. Несмотря на лавинообразное выделение скрытой теплоты реакции (на кривой рис.1в имеется максимум выделенной теплоты $Q = 4,4112 \times 10^5$ Дж в момент времени 14,7 ч.) расчеты все же показывают, что температура в процессе синтеза по всему объему тонкостенной цилиндрической трубки распределена практически равномерно, за исключением торцевых частей поверхности трубки, где на $\sim 1^\circ\text{C}$ температура выше, чем внутри объема изделия.

Очевидно, это следует связывать с двумя факторами, во-первых очень высокой теплоотдачей нитрида кремния и во-вторых, выделенная теплота одновременно во фронте реакции идет и на диффузионные процессы проникновения азота в кристаллический кремний с последующим образованием новых кристаллов нитрида кремния на новых участках, где еще не прореагировал кремний с азотом.

С другой стороны, из рис.1а четко прослеживается, что при рабочей температуре спекания 1280°C , начиная с выдержки 5 часов и до 17,5 часов, количество непрореагировавшего кремния лавинообразно уменьшается.



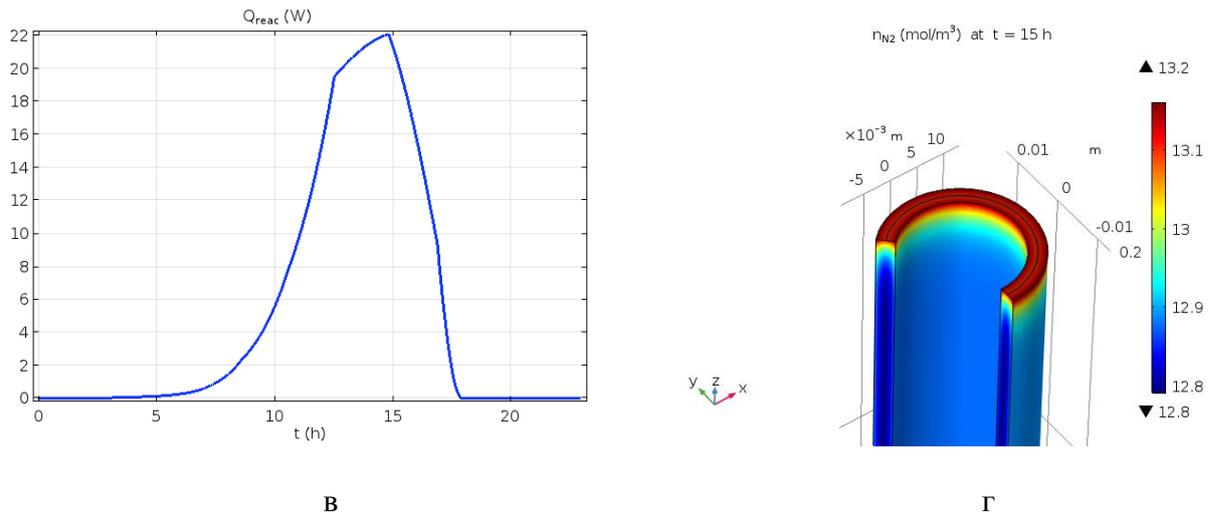


Рис.1а-г. Кинетика образования нитрида кремния в цилиндрической тонкостенной трубке с размерами $R_1=1$ см, $R_2=1,3$ см, $h=20$ см при температуре реакционного спекания 1280°C в момент времени 15,4 часа выдержки: а – общее количество непрореагировавших атомов кремния с атомами азота в данный момент выдержки; б–пространственное перераспределение температуры по объему трубки и относительная концентрация непрореагировавших атомов кремния; в – количество выделившегося тепла $Q = 4,4112 \times 10^5$ Дж в процессе реакционного синтеза нитрида кремния; г–пространственное распределение температуры и относительная концентрация атомов азота в объеме трубки.

Безусловно следует отметить, что в рассматриваемом диапазоне временной выдержки при данной температуре спекания 1280°C расчетные кривые зависимости очень хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученные в работах [3,12], а при выдержках свыше (т.е. в интервале времени 17,5÷24 часа) кремний постепенно вступает в реакцию с азотом и к концу температурной выдержки кремний взаимодействуя с азотом практически полностью превращается нитрид кремния по всему объему трубки.

На рис.2а–г представлены результаты реакционного синтеза нитрида кремния для изделия, представляющий собой конусовидный усеченный стакан, который применяется в металлургии при плавке драгметаллов, а также для аффинажа золота. Толщина и высота стенок конусовидного стакана соответственно составляет $\Delta R_{1,2}=0,35$ см, $h=22$ см. Несмотря на то, что толщина стенок усеченного конусовидного стакана чуть больше, чем у цилиндрической трубки результаты пространственного распределения температуры по всему объему конусовидного стакана имеет практически аналогичное перераспределение температуры, как и у цилиндрической трубки.

Например, температура у верхней поверхности стакана приблизительно выше на один градус по сравнению с областями внутри стенок изделия. А температура между отдельными частями стакана отличается менее чем на пол градуса. Если сравнить области, между верхней поверхностью дна стакана и

боковой поверхностью стакана, то температура отличается менее чем на 0,2 градуса.

На рис.3. приведены результаты численных расчетов для массивного тонкостенного тигля, который используется для выращивания монокристаллов кремния цилиндрической конфигурации по известному методу Чохральского, который имеется в производстве на КХМЗ «Астра» Кыргызской Республики. Видно, что для массивного тигля общая картина распределения температуры в объеме тела тигля аналогична конусовидному стакану, которая описана выше. Азотирование кремниевого тигля протекает равномерно по всему телу тигля с незначительной разницей концентрационного содержания атомов азота у верхней кромки тигля по отношению к боковым стенкам и дна тигля, причем это отличие небольшое и составляет $n(N) = 1,4 \text{ мол/м}^3$. При температуре 1280°C азотирование кремниевого тигля в момент времени $t=14$ ч достигает чуть более 50% по объему, это означает что половина кремния, преимущественно находящиеся в центральных внутренних частях стенок тигля, еще не вступила в реакцию с азотом и окончательно не сформировались кристаллы нитрида кремния.

Для осуществления полного реакционного азотирования по всему телу массивного тигля очевидно необходимо незначительно поднять температуру спекания до требуемых величин и увеличить время выдержки.

Заметим, что в процессе азотирования кремния выделяется дополнительная теплота из-за экзотермической реакции. Максимальное значение выделенной скрытой теплоты для тигля составляет $Q = 1.4267 \cdot 10^7$ Дж при экзотермической реакции нитрида кремния, причем приходится на момент времени $t=13,6$ ч.

Расчеты показывают, что выделение скрытой теплоты в результате экзотермической реакции нитрида кремния, температура во всех частях тигля заметно не изменяется, кроме дна и верхней кромки тигля. Очевидно, это следует связывать с тем, что определенная часть выделенной теплоты расходуется на образование новых кристаллов нитрида кремния в области фронта реакции с продвижением реакции с поверхности в глубь тигля, а оставшаяся часть тепла уходит в рабочее пространство электропечи из-за высокой теплопроводности нитрида кремния.

Таким образом, численный метод расчета синтеза нитрида кремния путем диффузионного азотирования для различных тонкостенных изделий толщиной от 0,3 до 0,6 см или $d=0,5 \pm 0,2$ см показывают в первом приближении схожесть результатов с небольшим отличием в величине относительного содержания остаточного кремния не вступивших в реакцию с азотом с течением выдержки. С увеличением массы и объема изделий кинетика реакционного образования нитрида кремния при одинаковых начальных условиях температурного режима реакционного спекания и давления газа приводит к увеличению времени выдержки реакционного спекания до окончательного формирования нитрида кремния.

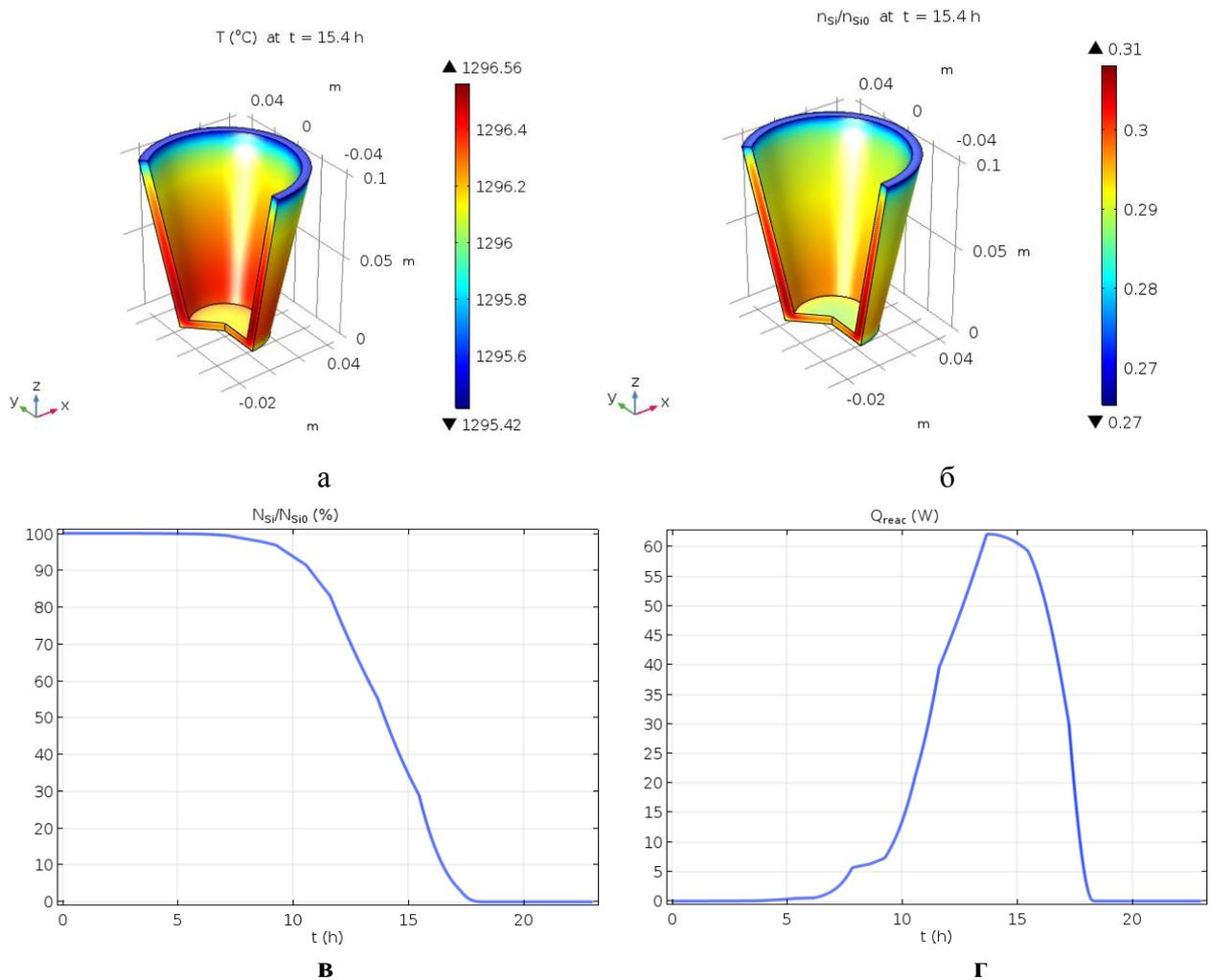


Рис.2а–г. Численные расчеты реакционного образования нитрида кремния в тигле конусной усеченной формы с размерами $\Delta R_{1,2}=0,35$ см, $h=22$ см при температуре реакционного спекания 1290°C в момент времени 15,4 часа выдержки: а – пространственное распределение температуры в изделии; б – относительная концентрация непрореагировавших атомов кремния в момент времени 15,4 часа после начала спекания; в – временная зависимость общего количества не прореагировавших атомов кремния; г – количество выделившегося тепла $Q = 1.3352 \cdot 10^6$ Дж при реакционном синтезе нитрида кремния.

В дальнейшем следует провести по этой же модели численные расчеты реакционного спекания кремния в атмосфере азота для больших сплошных, габаритных и толстостенных изделий для выявления особенностей синтеза нитрида кремния и сравнения их с тонкостенными изделиями, рассмотренные выше. Пользуясь случаем, хочу выразить моему научному руководителю доктору физико-математических наук, профессору Нурбеку Кыдырмышевичу Касмамытову большую благодарность и искреннюю признательность за

постановку задачи исследования, обсуждение результатов расчета, а также за ценные советы по написанию настоящей статьи.

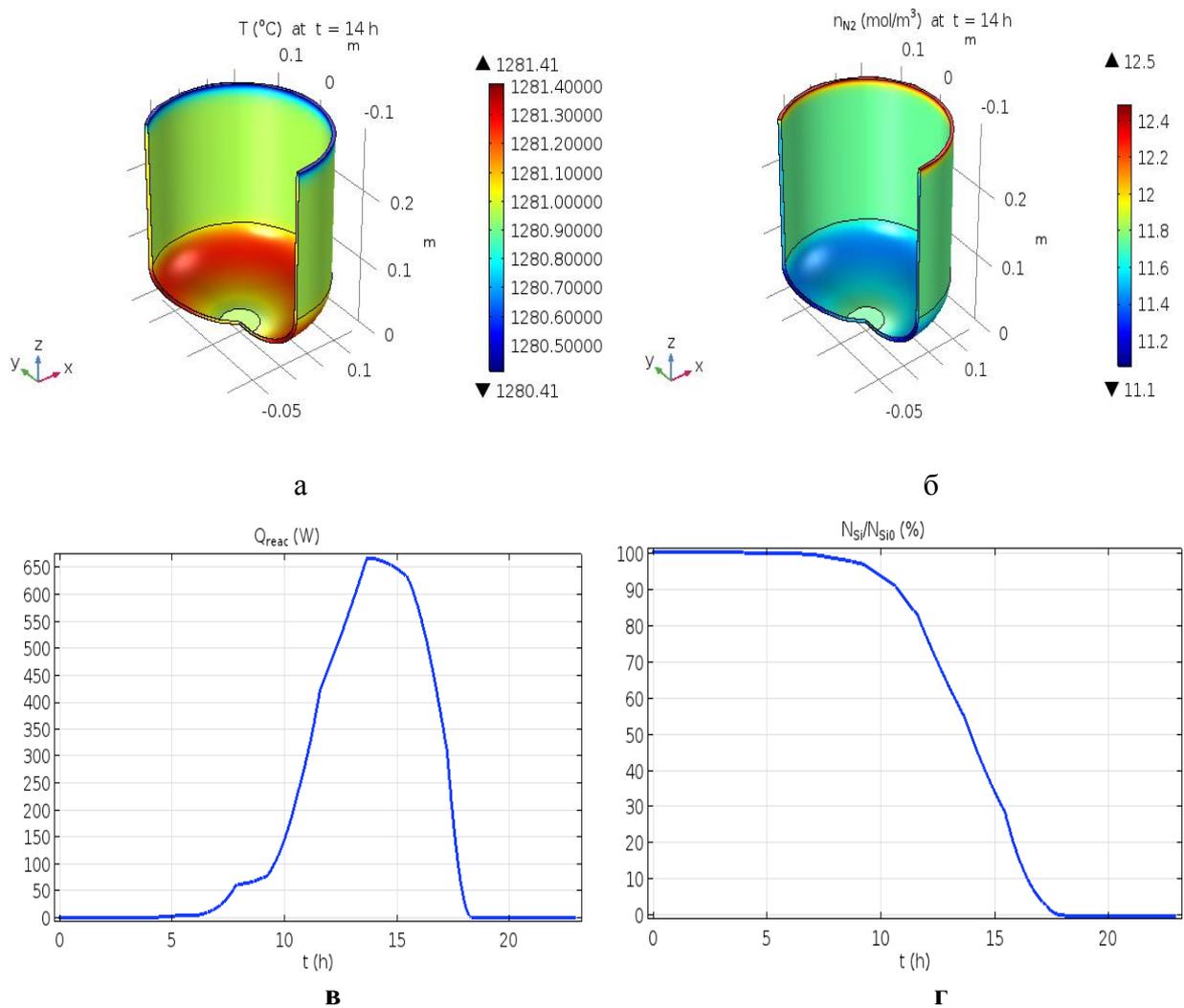


Рис.3а-г. Кинетика образования нитрида кремния в массивном тигле в процессе реакционного спекания кремния в среде азота при температуре 1280⁰С в момент выдержки 14 ч., внешний диаметр тигля 27,2 см, толщина стенок 0,65 см, высота тигля 42 см: а - перераспределение температуры в объеме и поверхности тигля; б - относительное содержание концентрации азота в объеме тигля; в - количество тепла $Q = 1.4267 \cdot 10^7$ Дж, выделившегося в процессе реакционного синтеза нитрида кремния; г- временные зависимости общего количества непрореагировавших атомов кремния.

Также выражаю благодарность за оказание помощи, на начальной стадии работы, связанная с разработкой двумерной физико-математической модели старшему научному сотруднику лаборатории порошковых материалов Института физики им. академика Ж.Жеенбаева НАН Кыргызской Республики Нурлану Жутановичу Кайрыеву.

Выводы

1. Установлена кинетическая закономерность образования нитрида кремния в процессе реакционного синтеза для кремниевых, пористых, тонкостенных изделий различных конфигурационных форм в атмосфере чистого азота. Для заданных температурных моментов и времен выдержек в процессе реакционного синтеза нитрида кремния определены максимальные значения выделившегося экзотермического тепла: для тонкостенной цилиндрической трубки выделенное тепло составило: $Q = 4,4112 \cdot 10^5$ Дж в момент времени выдержки $t = 14,8$ часа, для конусовидного стакана $Q = 1,3352 \cdot 10^6$ при $t = 13,6$ часа, для массивного тигля $Q = 1,4267 \cdot 10^7$ Дж при $t = 13,4$ часа.
2. Показано, что для трех разновидностей тонкостенных изделий различной конфигурации характер кривых реакционного азотирования кремния в атмосфере азота имеет схожесть в эволюции относительного концентрационного содержания непрореагировавшего кремния при одинаковых начальных внешних условиях (давления азота, скорости нагрева), имеющих толщину стенок равной $d = 0,5 \pm 0,2$ см, но отличаются друг от друга только крутизной наклона кривой реакционного азотирования, которая обусловлена массивностью (габаритами образца). Сравнительный анализ показал, что расчётные данные, полученные по двумерной модели, хорошо согласуются с экспериментальными данными.
3. Численные расчеты позволяют существенно сократить число дорогостоящих экспериментов по выработке оптимальных технологических режимов реакционного спекания для обеспечения наилучшего синтеза и эксплуатационных свойств в производстве промышленных нитридо-кремниевых изделий.

Список литературы

1. Касмамытов Н.К. Структурообразование керамокомпозиционного материала на основе нитрида кремния // Бишкек: Изд-во КРСУ, 2011. - 90 с.
2. Касмамытов Н.К., Макаров В.П. Кыргызская керамика на основе местного сырья // Бишкек, изд-во: КРСУ, 2014. – 122 с.
3. Касмамытов Н.К. / Реакционное спекание и свойства нано- и ультраструктурированных керамокомпозиционных материалов // Российский научный журнал «Перспективные материалы». – 2011. - №3. – С.208-213.

4. Касмамытов Н.К. Особенности структурообразования нано- и ультрадисперсных керамокомпозиционных материалов на основе шламовых отходов кремниевого производства// Перспективные материалы. - 2011. -№ 12. -С. 201-207.
5. Касмамытов Н.К. Микрорентгеноспектральные исследования керамокомпозиционных материалов. // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. -2010. - Т.10. - №5. – С.115-122.
6. Valipour M.S., Saboohi Y. Modeling of multiple noncatalytic gas–solid reactions in a moving bed of porous pellets based on finite volume method// Heat Mass Transfer, vol.43(9), pp.881–894, 2007.
7. Сатаев Л.О., Касмамытов Н.К, Кайрыев Н.Ж./ Одномерная физико-математическая модель реакционного спекания отформованных ультрадисперсных порошков кремния в атмосфере азота. // Современные тенденции развития науки и технологии. 2016. -№4-1. – С.46-53.
8. Касмамытов Н.К, Сатаев Л.О., Кайрыев Н.Ж./ Двумерная нестационарная модель реакционного спекания кремния в атмосфере азота// в сборнике: II-Международные научные чтения (Памяти С.Ф.Ковалевской), сб. статей Международной научно-практической конференции. -2016. –С.5-8.
9. Сатаев Л.О., Касмамытов Н.К, Кайрыев Н.Ж./ Модельные исследования кинетики реакционного спекания полнотелых сферических частиц кремния в азоте. // Вестник науки и образования Северо-Запада России. - 2018. –Т.4. - №3. –С.139-147.
10. Сатаев Л.О., Касмамытов Н.К, Кайрыев Н.Ж., Жеенбаев Н.Ж./Особенности физико-математической модели реакционного спекания пористого порошкового кремниевого тела в среде азота. //Вестник науки и образования Северо-Запада России. -2019. –Т.5. - №1. –С.60-72.
11. Link to the site: <https://www.pdfdrive.com/comsol-multiphysics-version-53-e42893806.html> COMSOL Multiphysics version 5.3 // 2017. -142 p.
12. Касмамытов Н.К. Утилизация отходов кремниевого производства: технология, керамика, структура, свойства и применение. // Бишкек: изд-во «Белек». – 2010.- 236 с.

УДК 535.34, 548.0, 75, (575.2)(04)

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ KCl, АКТИВИРОВАННЫХ ЕВРОПИЕМ

¹А.А.Эгамбердиева, ²М.М. Кидибаев, ²Г.С. Денисов, ¹К.У.Утемисов

¹Кыргызский национальный университет им. Ж.Баласагына, Кыргызстан, г. Бишкек, ул. Абдымомунова 238.

²Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева НАН КР, Кыргызстан, г. Бишкек, пр. Чуй 265-а, kidibaev@mail.ru, dengs@list.ru.

Аннотация. В работе исследованы кристаллы KCl, активированные европием. Было показано, что при длительном отжиге на воздухе структура легированного центра изменилась. В среде европия катионная вакансия замещается кислородом. Определено, что время затухания линии 420 нм уменьшается с увеличением концентрации кислорода. При термодиффузионном процессе происходит преобразование центров, содержащих европий. Его валентность может быть +3.

Ключевые слова: кристаллы хлористого калия; соактиваторы; примесно-вакансионного диполя; термолюминесценция; дозиметрия; ионизирующее излучение; люминесценция; вакансии.

STUDY OF KCl CRYSTALS, ACTIVATED BY EUROPIUM

¹A.A.Egamberdieva, ²M.M.Kidibaev, ²G.S.Denisov, ¹K.U.Utemisov

¹Kyrgyz National University. J. Balasagyn, Kyrgyzstan, Bishkek, st. Abdymomunova 238.

²Institute of Physics by Academician J. Jeenbayev of the National Academy of State, Kyrgyzstan, Bishkek, Chui 265-a, e-mail: kidibaev@mail.ru, dengs@list.ru.

Annotation. The KCl crystals activated by europium have been studied in the work. There have been shown, that at long annealing on air the structure of the doped centre changed. In the environment of europium the cation vacancy is replaced by oxygen. It is determined that the 420 nm line at a low-level decreases with the increase in oxygen concentration. In the thermodiffusion process, the centers containing Europaia are transformed. His valence can be +3.

Keywords: crystals of potassium chloride; co-activators; impurity-vacancy dipole; thermoluminescence; dosimetry; ionizing radiation; luminescence; vacancies.

Кристаллы, активированные редкоземельными элементами, давно привлекают внимание как перспективные сцинтилляционные материалы, пригодные для регистрации ионизирующего излучения, для создания лазеров и т.д. Свойства европия, который является типичным лантаноидом с внутренней оболочкой $4f^7$, изучались в различных работах. Однако, влияние кислорода на центры, содержащие европий в хлоридах, ранее не рассматривалось.

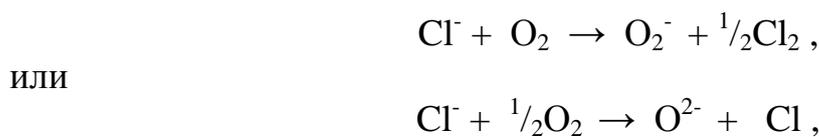
Кристаллы хлористого калия чистые и легированные были выращены методом Стокбаргера в вакууме усовершенствованным методом Киропулоса в

платиновой чашке на воздухе из реактива особой чистоты. Примесь вводили в шихту перед выращиванием кристалла в виде треххлористого европия. Спектральный анализ образцов показал, что в легированных кристаллах содержится 0.1 масс % европия и небольшое количество других примесей. Спектры поглощения кристаллов измеряли в видимой и ультрафиолетовой области на двухлучевом спектрофотометре SP8-100 (PYE UNICAM).

В спектрах поглощения кристаллов KCl-Eu, выращенных в вакууме наблюдаются две основные полосы (рис. 1), обусловленными переходами с нижнего $4f^6 5d$ – уровня, расщепленного на два подуровня, на верхний $4f^7$. При низких температурах эти полосы обнаруживают электронно-колебательную структуру, которую связывают с расщеплением $4f^7$ – уровня в результате взаимодействия электрона, принадлежащего европию, с колебаниями решетки [1, 2]. Было сделано предположение, европий входит в решетку в основном в двухвалентном состоянии.

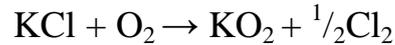
При вхождении иновалентной примеси всегда возникает вопрос о компенсации заряда, т.е. о строении примесного центра. В случае с европием компенсация может осуществляться катионной вакансией или ионом кислорода. В нескольких исследованиях показано, что в кристаллах образуется одна или две катионные вакансии, причем расположенные в плоскости (110). Так, в работе [3] предложены две модели кластерного центра для трёхвалентных лантаноидов в бромистом натрии. В ней избыточный заряд Dy^{3+} , Ho^{3+} и другие компенсируется за счёт двух вакансий ионов натрия. В кристалле KCl заряды других двухвалентных примесей, в частности свинца, компенсируются катионной вакансией. Так, в работе [4] был сделан вывод о сильном влиянии катионной вакансии на оптические характеристики Pb^{2+} -центров. Это влияние обусловлено, во-первых, способностью v_c^- локально компенсировать избыточный объем и заряд иона Pb^{2+} , приводя к уменьшению его взаимодействия с полносимметричными колебаниями окружения; во-вторых, способностью v_c^- (и ассоциированного с ней междуузельного атома хлора) нарушать эквивалентность минимумов адиабатического потенциала триплетного возбужденного состояния разной ориентации.

Возможно также, что около европия располагается ион кислорода. Если кислород двухвалентен, то в этом случае естественным образом решается проблема зарядовой компенсации. Однако, вопрос о вхождении в кристаллическую решетку кислорода до сих пор остаётся открытым. В [5] показано, что кислород входит в кристалл во время роста, замещая ионы хлора:



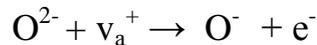
где Cl^- и Cl – ион и атом хлора соответственно. Если это происходит в окрестности европия, то возможно создание устойчивого центра $O^{2-} - Eu^{2+}$.

В другой работе [6] найдено, что добавка KO_2 образует в кристаллической решетке O^- -центры, которые замещают ионы Cl . KO_2 в малых концентрациях появляется благодаря реакции расплава KCl с кислородом:



Поэтому кристаллы с малым содержанием KO_2 можно просто получить в атмосфере кислорода. Количество образовавшегося KO_2 зависит от положения равновесия реакции.

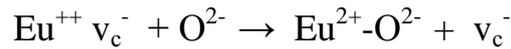
Кислород, обладающий избыточным отрицательным зарядом, по сравнению с ионами хлора, требует компенсации этого заряда, которая осуществляется за счет иновалентного металла или анионной вакансии. Где бы ни была расположена вакансия - в непосредственной близости от примесного иона кислорода, т.е. в виде примесно-вакансионного диполя, или в отдалении от O^{2-} - в любом случае концентрация анионных вакансий в кристалле с кислородной примесью больше, чем в кристалле, не содержащем кислорода. Если вакансии находятся далеко от примесных ионов O^{2-} , образование центров окраски на начальной стадии облучения ускоряется за счет более высокой концентрации вакансий. В кристаллах, выращенных на воздухе, всегда присутствуют ионы или молекулы кислорода. Они сильно влияют на оптические свойства примесных центров. Если в кристалле существуют примесно-вакансионные диполи, то под действием облучения происходит их распад и ионизация ионов O^{2-} с образованием свободных электронов в соответствии с реакцией [6].



Ион O^- , оставаясь в узле кристаллической решетки, не требует компенсации заряда, а электрон локализуется на освободившейся из диполя анионной вакансии и образует F- центр.

Для выяснения влияния кислорода на строение примесных центров были исследованы кристаллы как содержащие кислород, так и бескислородные. Спектр поглощения кристаллов, выращенных в вакууме (рис.1, кр.1). Местоположение полос почти совпадает с известными из литературы [2]. Эти кристаллы выдерживали на воздухе при температуре 700°C . В процессе длительного отжига в спектре поглощения происходят изменения (кр.2-4). Со временем, полосы поглощения, обусловленные вакансионными диполями, уменьшаются и через 40 часов практически исчезают. В кристалле, выращенном на воздухе, эти пики поглощения тоже очень маленькие, но имеется ещё один при 272 нм (кр.5). Это можно объяснить введением каких-либо ионов кислорода в решетку KCl в термодиффузионном процессе. Выше было отмечено, что за полосы 241 и 333 нм ответственны переходы на уровень $4f^7$. Поскольку эти переходы ослабевают, значит, количество центров $\text{Eu}^{++} v_c^-$ уменьшается.

Видимо, в кристаллах KCl-Eu центры вида $\text{Eu}^{++} v_c^-$ преобразуются в центры $\text{Eu}^{2+} - \text{O}^{2-}$ по схеме:



В этом случае должна увеличиваться проводимость кристаллов.

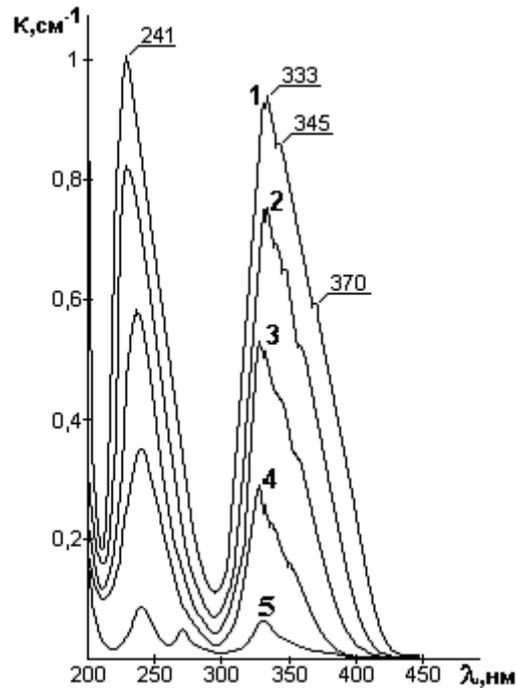


Рис.1. Поглощение кристаллов KCl-1%Eu , выращенных в вакууме:
 1-неотожженный; 2, 3, 4 -отожженные 5ч, 12ч, 26ч
 соответственно; 5-выращенных на воздухе

Были проведены эксперименты по установлению времени затухания импульсной катодолуминесценции бескислородных кристаллов и кристаллов, содержащих кислород (авторы выражают благодарность Олешко В.И. из ТПУ за предоставленную возможность провести эксперименты на импульсном ускорителе электронов и за помощь в эксперименте). Люминесценция кристаллов возбуждалась воздействием импульса сильнофокусированного электронного пучка плотностью 0.2 Дж/см^2 . Было определено, что время затухания линии 420 нм уменьшается с увеличением концентрации кислорода. Кривые описываются экспоненциальными функциями:

$$I_1(\tau) = 51.12 \cdot e^{-0.010 \tau}$$

$$I_2(\tau) = 42.58 \cdot e^{-0.012 \tau}$$

После перестройки в полулогарифмических координатах (рис.2), было определено, что в кристаллах, не содержащих кислород, время затухания составляет 1000 нс, а в кислородосодержащих - 850 нс. Это свидетельствует о том, что окружение примесного центра меняется.

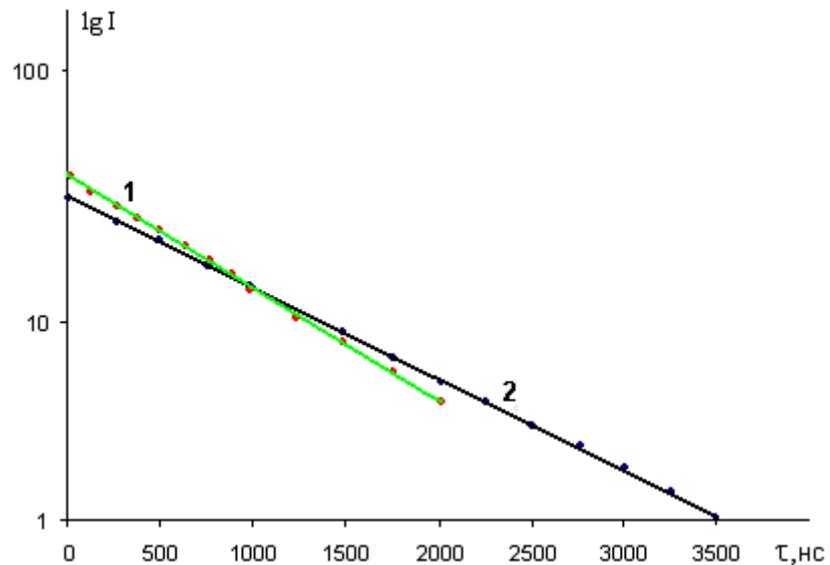


Рис.2. Затухание люминесценции кристалла KCl-Eu, выращенных на воздухе (1) и в вакууме (2)

Таким образом, при термодиффузионном процессе происходит преобразование центров, содержащих европий и другие редкоземельные элементы.

Список литературы

1. Walter E.Bb, Wagner M. Vibrational Coupling of Nearly Degenerate Electronic States, - Phys. Rev., v.145. - №2.- p.689-698. - 1966
2. Шуралёва Е.И., Парфианович И.А., Ивахненко П.С. Люминесценция и энергетическая структура центров свечения фосфоров, активированных двухвалентным европием. // Спектроскопия кристаллов под ред. Каминский А.А., Наука, 1975, с. 320-325
3. Писаренко В.Ф. Люминесценция и электрические свойства ионных кристаллов, активированных ионами редкоземельных элементов: Диссерт. на соиск... док. физ.-мат. наук, Краснодарский Гос. Ун-т. – 1976
4. Нагирный В.П. Поляризованная люминесценция Pb^{2+} -центров разной структуры в KCl- $PbCl_2$ Труды Института физики АН Эстонской ССР, т. 55, 198-216, 1984.
5. Andersen T. and Baptista J.L. New Oxygen Centres in KCl Single Crystals. - Phys. stat. sol. (b). - № 44. – p.29-38.-1971
6. Ficher F., Grundig H., Hilsch R. Definiertes Einbau und Optisches Absorption Von O_2^- - und O^- - Centren in KCl. - Z.Physik.-Bd.189, №1.-P.79-96.-1966.

УДК:543:423(575.2)(04)

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАНДАРТОВ В АТОМНО-ЭМИССИОННОМ СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ

Г.Ж.Доржуева, Т.Т.Султангазиева, Рыскул кызы Гулзат,
А.Татыбеков, Н.Ж.Жеенбаев.

*Институт физики им.академика Ж.Жеенбаева
НАН КР, 720071, г. Бишкек, Кыргызстан, пр.Чуй 265^а*

Аннотация. Рассмотрены особенности использования стандартов при измерении концентраций тяжелых металлов в почвенном покрове методом атомно-эмиссионного спектрального анализа. Представлены результаты количественного атомно-эмиссионного спектрального анализа по определению содержания макро и микроэлементов в почвах г. Бишкек.

Ключевые слова: атомно-эмиссионный спектральный анализ, плазма, двухструйный плазматрон, спектр, почва, концентрация тяжелых металлов, микроэлементы.

SPECIFICS OF USING STANDARTS IN THE ATOMIC EMISSION SPECTRAL ANALYSIS

G.J.Dorjueva, T.T. Sultangazieva, Ruskul kyzy Gulzat,
A.Tatybekov, N.J.Jeenbaev

*Academician J.Jeenbaev Institute of Physics of the National Academy of Sciences
of the Kyrgyz Republic, 720071, Kyrgyz Republic, Bishkek, Chui prospect 265^a*

Annotation. Specifics of using standarts while measuring concentrations of heavy metals in the soil's cover by atomic emission spectral analysis are considered. The results of determination of the microelements in the soil on the territory of Bishkek city using quantitative atomic emission spectral analysis method are presented.

Key words: atomic emission spectral analysis, plasma, two-jets plasmatron, spectrum, soil, heavy metals concentration, microelements.

В настоящее время для Кыргызской Республики важным является решение проблемы техногенного загрязнения окружающей среды, причем наиболее остро вопрос обеспечения экологической безопасности стоит для территорий городов Бишкек и Ош. Среди неблагоприятных факторов, прежде всего, следует отметить загрязнение воздуха, воды, почвы и продуктов питания отходами промышленного и иного производства, в особенности, токсичными тяжелыми металлами. Кроме того, не менее важно уделять внимание обеспечению экологической чистоты пригородам столиц, принимая во внимание преобладание сельскохозяйственных угодий, предназначенных для обеспечения продовольственного обеспечения городов.

Для решения экологических задач, связанных с проведением мониторинга загрязненности окружающей среды, экспрессным, экономичным и эффективным методом исследования является высокочувствительный атомно-эмиссионный спектральный анализ (АЭСА). В качестве высокочувствительной технологии, использующей дуговые генераторы плазмы, АЭСА может эффективно использоваться для определения элементного состава почвенного покрова для решения экологических, геологических, промышленных и иных задач. Важно отметить, что при применении атомно-эмиссионного спектрального анализа для решения экологических задач, немаловажную роль в обеспечении точности измерений играет подбор головных стандартов.

Как показывает обобщение литературных данных, корректная подготовка и использование головных стандартов позволяют значительно уменьшить погрешность количественного спектрального анализа почвы, обусловленного ее сложным и неоднородным микросоставом вследствие наличия различных органических веществ и многообразия составляющих элементов. Причем, концентрации таких веществ могут изменяться в интервале до 3-4 порядков величины [1]. В целом же, погрешности, обусловленные влиянием на результаты спектрального неконтролируемых вариаций валового и минералогического состава проб, являются основными и наиболее нежелательными [2]. Также для получения достоверных результатов немаловажен отбор образца и правильная его подготовка в спектральных аналитических задачах, поскольку анализу подвергается лишь небольшая поверхность образца, которая вступает во взаимодействие с источником возбуждения. Для получения корректного результата анализа можно отметить следующие основные требования: образец должен быть однородным (гомогенным) по структуре и составу, форма образца должна иметь достаточную поверхность для контакта с источником возбуждения.

Таким образом, во многом эффективному определению элементного состава эмиссионным спектральным методом содействует предварительное знание состава почвы исследуемой территории и, соответственно, корректная подготовка стандартов и проб для анализа. В частности, при проведении исследований почвенного покрова можно воспользоваться усредненным составом почв, который может быть представлен в виде основных компонентов градуировочного образца (соответственно, градуировочного графика) смесью следующих веществ в мас. %: SiO_2 – 70, Al_2O_3 – 13, Fe_2O_3 – 5.0, CaO – 2.5, MgO – 1.5, K_2PO_4 – 1.5, Na_2CO_3 – 5.12, K_2CO_3 – 2.5, TiO_2 – 0.8, MnO_2 – 0.08 [3]. Однако и в этом случае, при проведении анализа почвенного покрова, следует иметь в виду, что почвы, равно как и ряд грунтов, выбранной для анализа территории, являются сложными композициями составляющих веществ (песок, глина, гумус, вода и др.) и даже для конкретного типа почвы или грунта процентный состав может варьироваться в широких пределах.

Основным зональным типом почв для территории Бишкека являются серозёмы северные обыкновенные (малокарбонатные). Они занимают южную

часть города, в северной – нижней части – получили распространение лугово-серозёмные, серозёмно-луговые, луговые и лугово-болотные почвы. С учетом всех этих факторов, в том числе и естественной вариабельности содержания элементов, можно отобрать представительный образец с достаточной и контролируемой достоверностью. Экологические исследования, как правило, требует выполнения массовых анализов на токсичные тяжелые металлы почв, подземных и поверхностных вод и других объектов окружающей среды. При этом применяемые методы должны обеспечить низкие пределы обнаружения токсичных элементов, которые должны быть ниже предельно допустимых концентраций (ПДК) для определяемых токсичных ингредиентов.

Для решения задачи определения содержания тяжелых металлов в почве методом атомно-эмиссионного спектрального анализа, в исследованиях в качестве источника возбуждения спектров широко используется двухструйный плазматрон ДПП-50, который при прямом введении анализируемой пробы между струями плазмы позволяет осуществить экспресс анализ с низкими пределами обнаружения и высокими метрологическими характеристиками определения. Высокая температура и протяженность двухструйного плазматрона ДПП-50 обеспечивает полноту испарения вводимых веществ, что является определяющим фактором понижения предела обнаружения в атомно-эмиссионном спектральном анализе, а высокая стабильность струи плазмы является гарантом хорошей воспроизводимости точности анализа. В настоящей работе использовалась экспериментальная установка, предложенная в [4].

Экспериментальная часть

Для проведения атомно-эмиссионного спектрального анализа почв на территории г.Бишкек были определены следующие точки отбора проб:

1. м-н «Восток-5»;
2. ТЭЦ-2 (северная часть, прилегающая к ТЭЦ);
3. ТЭЦ-3 (восточная часть, ул. Чолпон-Атинская);
- 4 ТЭЦ-2 (южная часть, прилегающая к ТЭЦ);
5. ул. М.Горького / ул. 7 апреля;
6. проспект Чуй / проспект Манаса;
7. проспект Чуй / ул. Т.Уметалиева;
8. м-н «Ак-Орго» (район школы).

Следует отметить, что количественный эмиссионный спектральный анализ является относительным методом, так как содержание элементов примеси в анализируемой пробе определяется сравнением с содержанием в пробах с известными концентрациями, называемых эталонами. Содержание элементов в эталонах должно быть точно установлено химическими анализами или расчетом при изготовлении искусственных образцов. Первый эталон готовится обычно с концентрацией порядка 3% или 1%. Эталоны готовят для элементов, которые предполагается определять в анализируемых пробах. В качестве эталонов для металлометрических проб могут быть использованы пробы пород

исследуемого района, содержание которых обеспечивается точным химическим анализом. В свою очередь, расчет ведется, как правило, на атомный вес элемента, иногда молекулярного соединения данного элемента.

Подготовка стандартного образца проводилась следующим образом. В качестве стандартного образца сравнения использовался особо чистый графитовый порошок с введенными примесями определяемых элементов, количество которых должно быть не менее 7-8. На аналитических весах брались навески оксидов определяемых элементов (см. Таблицу 1). Соли и окиси определяемых элементов в определенных количествах тщательно истирались до получения однородного состава и мелкой дисперсности в течение 15-20 мин в агатовой или яшмовой ступке. Затем постепенно к полученному составу перемешивали малыми дозами графитовый порошок требуемого количества и истирали, получая смесь головного образца сравнения. Последовательным трехкратным разбавлением головного образца сравнения с графитовым порошком получали всю шкалу образцов сравнения.

Таблица 1.
Содержание определяемых элементов и их оксидов в стандартах

№	Элемент	Наличие элемента в оксиде/соли	Содержание элемента в процентах (%)	Содержание в головном эталоне (%)
1	P	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	26,93	3
2	As	Na_3AsO_4	36	3
3	Zn	ZnO	80,33	3
4	Be	BeO	36	1
5	Cd	CdO	87,5	3
6	Co	CO_2O_3	71	1
7	Sb	Sb_2O_3	83,54	3
8	Cu	CuO	80	1
9	Ni	Ni_2O_3	70,97	1
10	Pb	PbO_2	86,62	1
11	Mo	MoO_2	75	1
12	Nb	Nb_2O_5	69,9	1

Метод определения тяжелых металлов заключается в испарении анализируемой пробы в смеси с угольным порошком в плазме дуги двухструйного плазматрона ДГП-50М и в измерении интенсивности излучения спектральных линий фотографическим способом. Использование

двухструйного плазматрона, позволяет более полно испарять труднолетучие, трудновозбуждаемые элементы из частичек анализируемой пробы. Это существенно уменьшает влияние состава пробы на результаты анализа. Анализируемую смесь вводят в плазменную струю плазматрона вдуванием. Определение тяжелых металлов ведут по методу трех эталонов. Элементом сравнения служит фон рядом с аналитической линией. Проведенные исследования по определению количественного состава в пробах, отобранных на территории г.Бишкек в летний период прошедшего года, позволили определить содержание 8 элементов, представленных в Таблице 2 ниже.

Таблица 2.
Количественный спектральный анализ почвы г.Бишкек (мг/кг)

№	Район отбора пробы	Sb	Pb	Cr	Mo	Mn	V	Zn	Cu
1	М-н «Восток-5»	1.026	0.05	0.074	0.022	0.05	0.012	0.019	0.1
2	ТЭЦ (север)	0.24	0.02	0.03	0.019	0.022	0.011	0.28	0.03
3	ТЭЦ (восток)	0.19	0.02	0.06	0.034	0.062	0.038	0.34	0.02
4	ТЭЦ (юг)	0.646	0.019	0.024	0.022	0.024	0.015	0.15	0.05
5	ул. Горького – ул. 7 апреля	0.53	0.019	0.028	0.026	0.047	0.019	0.22	0.028
6	пр. Чуй – пр. Манас	0.81	0.053	0.036	0.058	0.32	0.019	0.36	0.02
7	пр. Чуй – ул. Уметалиева	0.64	0.02	0.019	0.1	0.57	0.82	0.24	0.07
8	М-н «Ак-Орго»	0.74	0.049	0.87	0.028	0.047	0.047	0.26	0.47
9	ПДК	4,5	32	6,0	-	700	150	23	3,0

Заключение

Применение метода атомно-эмиссионного спектрального анализа позволило определить количественный состав элементов в почвенном покрове г.Бишкек. Показана необходимость корректного подбора и подготовки головных стандартов для повышения точности измерений методом эмиссионного спектрального анализа. Проведенные измерения показывают возможность надежного и экспрессного определения тяжелых металлов в почве при использовании двухструйного плазматрона ДГП-50М в качестве источника возбуждения спектров. Обобщенный анализ полученных данных показывает, что, в целом, содержание тяжелых металлов в почве не превышают ПДК. Наибольшее содержание Sb, Pb наблюдается в микрорайоне «Восток-5» и пересечения проспект Чуй / проспект Манаса. В восточной части ТЭЦ (район

ул.Чолпон-Атинская) наблюдается наибольшее содержание Mn, V, Zn. В районе школы микрорайона «Ак-Орго» наблюдается наибольшее содержание Cr, Cu, здесь же заметны содержания Sb, Pb. Полагаем, что различие содержания элементов в различных районах города связано с разными источниками, среди которых ТЭЦ, автомобильный транспорт и частный сектор. Полученные результаты требуют дальнейшего анализа для определения источников загрязнения в различных районах г.Бишкек.

Список литературы

1. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение. // Н.: Наука. 1989, 150 с.
2. Русанов А.К., Ботова Л.И. О влиянии состава порошков на результаты спектрального анализа методом вдувания. // М.: 1990
3. Марукович Е.И., А.Г.Непокойчицкий. Эмиссионный спектральный анализ // - Минск: Беларус.навука, 2013. – 307 с.
4. Жеенбаев Ж.Ж, Энгельшт В.С., Урманбетов К., Таштанов Р.А., Доржуева Г.Ж. Влияние макрокомпонентов природных вод на интенсивности линий определяемых микроэлементов // Известия НАН КР. -2003. -№2-3. –С. 73-79.

УДК:543:423:575.2(04)

СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕ НА ТЕРРИТОРИИ г.БИШКЕК

А. Чылымов, А.М. Нурсеитова, Р.А. Таштанов,
Г.Ж. Доржуева, Н.Ж. Жеенбаев.

*Институт физики им.академика Ж.Жеенбаева
НАН КР,720071, г. Бишкек, Кыргызстан, пр.Чуй 265^а*

Аннотация: Представлены результаты определения качественного состава микроэлементов в почвах на территории г.Бишкек методом атомно-эмиссионного спектрального анализа. Показана возможность экспрессного определения 18 элементов в пробах при использовании двухструйного плазматрона в качестве источника возбуждения спектров.

Ключевые слова: атомно-эмиссионный спектральный анализ, плазма, двухструйный плазматрон, спектр, почва, концентрация тяжелых металлов, микроэлементы.

CONCENTRATIONS OF HEAVY METALS IN THE SOIL OF THE BISHKEK CITY AREA

A. Chylymov, A.M. Nurseitova, R.A. Tashtanov,
G.J. Dorjueva, N.J. Jeenbaev

*Academician J.Jeenbaev Institute of Physics of the National Academy of Sciences
of the Kyrgyz Republic, 720071, Kyrgyz Republic, Bishkek, Chui prospect 265^a*

Annotation: The results of the determination of the microelements qualitative composition in the soil on the territory of Bishkek city by atomic emission spectral analysis method are presented. The possibility of express determination of 18 elements in samples by using two-jets plasmatron as a source of spectra excitation is shown.

Key words: *atomic emission spectral analysis, plasma, two-jets plasmatron, spectrum, soil, heavy metals concentration, microelements.*

Введение

В настоящее время исследовательские работы по выявлению техногенного загрязнения в окружающей среде являются одними из важнейших научных направлений деятельности, связанными с обеспечением экологической безопасности. При этом следует выделить проблему определения степени загрязненности почвенного покрова в крупных городах и мегаполисах, в особенности, исследования направленные на измерения достоверного содержания в почве микроэлементов, и прежде всего, тяжелых металлов. Известно, что превышение содержания тяжелых металлов может привести к многочисленным физическим, химическим и биологическим изменениям в окружающей среде, а характер и степень изменений зависят от содержания и форм нахождения тяжелых металлов в природных объектах [1].

Изучение состава почвенных образований, сложившихся в результате загрязнения окружающей среды специфической миграцией тяжелых металлов, попавших техногенным путем в различные участки биосферы важно и с точки зрения понимания процессов загрязнения, происходящих в атмосферном слое. Ряд металлов, поступая с промышленным и автомобильным дымом и другими путями в атмосферу, быстро переходят в почву, растения и другие природные объекты, что позволяет, пусть и косвенно, оценить элементный состав микроэлементов в воздушной среде до их осаждения. Изменения в окружающей среде, связанные с понижением или повышением уровней загрязнения, исчезновением его источников или появлением новых экологических факторов могут проходить достаточно быстро, особенно в городах, где сосредоточены предприятия различных отраслей промышленности и окружающая среда загрязнена значительным количеством химических

веществ [2,3]. Поэтому необходим регулярный мониторинг экологической чистоты, обеспечивающий получение достоверных данных о загрязненности покрова почвы тяжелыми металлами.

Решение проблемы контроля загрязненности окружающей среды, и в частности, почвенного покрова, требует использования экспрессных методов определения элементного состава, среди которых наиболее универсальным, экспрессным, имеющим низкие пределы обнаружения, является атомно-эмиссионный спектральный анализ (АЭСА) [4].

Экспериментальная часть

Подготовка почвенных образцов к анализу проводилась следующим образом. Навеску образца почвы, помещали в фарфоровых тиглях в муфельную печь. Постепенно увеличивая температуру в печи, образцы прокаливали при температуре 500°C в течение 6 часов, что обеспечивает полное разрушение органических веществ. Полученную пробу массой 5 г истирали на вибромельнице «Пульверизетте-5-1» фирмы «Фрич» в течение одного часа. При этом полученные порошковые образцы имели крупность менее 10 мкм. После этого образцы смешивали буфером в соотношении 1:19 и насыпали в готовые стаканчики, используемые для анализа. Проба анализируется путем введения между струями плазмы в виде тонкой аэрозвеси. Подготовка стандартных образцов: головной синтетический образец для токсичных тяжелых металлов вводится в основы окислов и солей марки ХЧ соответствующих элементов. Рабочие стандартные образцы имели концентрации: 0.03; 0.01; 0.003; 0.001; 0.0003; 0.0001%.

Исследование качественного состава проб, для определения содержания тяжелых металлов, проводились методом АЭСА при силе тока $I=60\text{A}$ и расходе плазмообразующего газа $G_{a/k} - 2.5\text{л/мин}$. Несущий и транспортирующий газ – аргон. Расход транспортирующего газа $G_{tr}-0.2\text{ л/мин}$. Угол наклона катодного и анодного головок двухструйного плазматрона ДПП-50М варьировался в диапазоне $60-65^{\circ}$. Время экспозиции $t-20\text{сек}$. Излучение от приосевых участков разряда через однолинзовую систему освещения фокусировалось на всю высоту щели ($H=15\text{ мм}$) спектрографа шириной 12 мкм. Общая схема измерений представлена на рис.1.

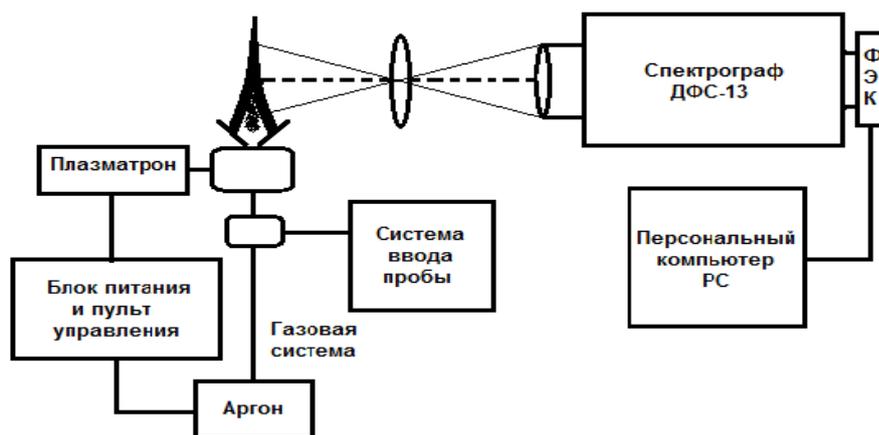


Рис. 1. Общая схема измерений концентрации микроэлементов.

Предложенная конструкция в полной мере отвечает требованиям полного испарения анализируемой пробы и надежного измерения интенсивности излучения спектральных линий, необходимых для успешного проведения спектральных исследований классическими методами атомно-эмиссионной спектроскопии.

Согласно Концепции экологической безопасности Кыргызской Республики [5] основными источниками загрязнения атмосферного воздуха в Кыргызстане являются предприятия энергетики, выпуска стройматериалов, коммунального хозяйства, горнодобывающей и перерабатывающей отраслей, частные домовладения, а также автотранспорт. Однако в настоящее время, наряду с другими, особую актуальность на территории г.Бишкек вызывают такие источники загрязнения, как вредные выбросы ТЭЦ, автотранспорта, частного (жилого) сектора, влияющие на образование в атмосфере вредного смога. В этой связи при проведении анализа почвы, используемого для получения информации о загрязнении воздушной среды, актуальным является проведение районирования территории при отборе проб, позволяющих локализовать, в определенной степени, выбросы ТЭЦ, частных домовладений, автотранспорта.

Принимая во внимание вышеизложенное, для проведения анализа почв на территории г.Бишкек предварительно были определены следующие 7 точек отбора проб:

1. М-н Восток-5;
2. ТЭЦ-1 (северная часть, прилегающая к ТЭЦ);
3. ТЭЦ-2 (южная часть, прилегающая к ТЭЦ);
4. ул. Чолпон-Атинская;
5. м-н «Ак-Орго» (район школы);
6. проспект Чуй / ул. Т.Уметалиева;
7. ул. М.Горького / ул. 7 апреля

Пробу отбирали по общему требованию к отбору проб по ГОСТ 17.4.01-83 и ГОСТ 17.4.4.02-84 Кыргызской Республики. Для контроля санитарного

состояния почв, отбор проводили на глубине 0–10 см. С каждой площадки, размером 5x5 м, отбирали одну объединенную пробу, составленную из пяти точек. Каждый образец почвы отмечен пунктом отбора пробы, номером, глубиной отбора от поверхности земли и другими данными. Для обеспечения воспроизводимости и правильности аналитических результатов особое внимание уделялось уменьшению загрязнения проб микроэлементами от внешних источников, а также исключению потерь определяемых элементов на всех этапах работы с образцами. Пробы отбирались как во дворах домов, вдали от проезжей части дороги, так и рядом с дорожным полотном, чтобы провести оценку влияния микроэлементов, образованных в результате движения автотранспортных средств и осаждения твердых частиц ТЭЦ.

Проведенные исследования по определению качественного состава в пробах, отобранных на территории г.Бишкек, позволили определить наличие 18 элементов, представленных в таблице 1 ниже.

Таблица 1.

Результаты качественного спектрального анализа почвенного покрова на территории г.Бишкек.

№№	Элементы, мг/кг		№№	Элементы, мг/кг	
1	Сурьма	Sb	10	Мышьяк	As
2	Железо	Fe	11	Кобальт	Co
3	Медь	Cu	12	Олово	Sn
4	Свинец	Pb	13	Кадмий	Cd
5	Хром	Cr	14	Цинк	Zn
6	Марганец	Mn	15	Стронций	Sr
7	Ванадий	V	16	Бериллий	Be
8	Никель	Ni	17	Алюминий	Al
9	Молибден	Mo	18	Кремний	Si

Заключение

Применение метода атомно-эмиссионного спектрального анализа позволило определить качественный состав почвенного покрова в пробах, отобранных в различных местах на территории г.Бишкек. Проведенные измерения показывают возможность надежного и экспрессного определения тяжелых металлов в почве при использовании двухструйного плазматрона

ДГП-50М в качестве источника возбуждения спектров. Достигнуто устойчивое появление спектральных линий 18 элементов, позволяющих проводить как качественный, так и последующий количественный анализ содержания тяжелых металлов в почве. Обобщенный анализ полученных спектров показывает, что наибольшей интенсивностью обладают спектральные линии кремния, алюминия, железа. Данный результат позволяет сделать вывод о преобладающем наличии данных элементов в почве на территории г.Бишкек, что, в целом, согласуется с результатами других работ [6] для аналогичных видов почв.

Список литературы

1. Заксас Н.П. Возможности двухструйного дугового плазматрона для атомно-эмиссионного спектрального анализа высокочистых веществ и биологических проб. / Заксас Н.П. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. т.78. № 1. ч.II. С. 34-38.
2. Заксас Н.П. Возможности двухструйного дугового плазматрона для атомно-эмиссионного спектрального анализа высокочистых веществ и биологических проб. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. т.78. № 1. ч.II. С. 34-38.
3. Делигодина Ю.Н., Захарова О.Л., Савельева И.Н., Шанина Е.В. Особенности депонирования тяжелых металлов в почвенном покрове территорий воздействия предприятий теплоэнергетики // Успехи современного естествознания. 2017. № 7. С. 71-75.
4. Шабанова Е.В., Бусько А.Е., Васильева И.Е. Дуговой сцинтилляционный атомно-эмиссионный анализ порошковых проб при использовании МАЭС с высоким временным разрешением. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т.78. № 1-II. С. 24-33.
5. Концепция экологической безопасности Кыргызской Республики. Указ Президента Кыргызской Республики от 23 ноября 2007 года № 506.
6. Урманбетов К., Жеенбаев Ж.Ж., Таштанов Р.А. Прямое количественное определение некоторых тяжелых токсичных металлов из почвы с использованием установки «НУР». // Известия Национальной Академии Наук Кыргызской Республики. 1991. №1. С. 11-13.

ОГЛАВЛЕНИЕ

А.А. Кутанов, Н. Сыдык уулу, И.А. Снимщиков	Прямая лазерная запись сформированием рельефа на двухслойной структуре a-Si/Ag..	3
Т.Э. Кулиш	Анализ методов голографической интерферометрии.....	9
Т.Э. Кулиш, Д.А. Исмаилов	Цифровая реконструкция голограмм.....	19
А.А. Жээнбеков, М.Т. Мамырбеков	Применение пвмс для записи фурье – голограмм.....	29
А.Т. Орозобаков, Б.Б. Саякбаева, Э.К. Токтосунов	Экспериментальные исследования и анализ механизмов изменчивости содержания озона.....	34
Д.С. Джураев	Электрофизические свойства магнитных жидкостей	40
Л.О. Сатаев, Н.К. Касмамытов, Н.Ж. Кайрыев	Модельные расчеты реакционного спекания кремниевых изделий в атмосфере азота.....	43
Л.О. Сатаев	Модельные расчеты реакционного синтеза нитрида кремния для тонкостенных изделий.....	54
А.А. Эгамбердиева, М.М. Кидибаев, Г.С. Денисов, К.У. Утемисов	Исследование кристаллов KCl, активированных европием	63
Г.Ж. Доржуева, Т.Т. Султангазиева, Рыскул кызы Гулзат, А. Татыбеков, Н.Ж. Жеенбаев.	Особенности использования стандартов в атомно-эмиссионном спектральном анализе.	68
А. Чылымов, А.М. Нурсеитова, Р.А. Таштанов, Г.Ж. Доржуева, Н.Ж. Жеенбаев.	Содержание тяжелых металлов в почве на территории г.Бишкек.....	73

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ**Документы**

- Сопроводительное письмо на имя главного редактора журнала печатается на бланке учреждения, представляющего статью.
- Рецензия.

Составные части статьи и порядок их следования

1. Объем материала от 4 до 10 страниц набранного текста оформленного в текстовом редакторе Microsoft Word, файл в формате .doc или .docx (шрифт 14, Times New Roman, интервал 1). Поля: верхнее, нижнее-20мм, левое-2,5мм, правое-15мм. Графический материал должен быть четким, разрешение не менее 300 пикселей

2. В верхнем левом углу указывается универсальная десятичная классификация (УДК)

3. Следующий абзац – название статьи указывается по центру (шрифт 14 полужирный ЗАГЛАВНЫМИ БУКВАМИ);

4. Во втором ряду фамилия имя отчество автора(ов);

5. В третьем ряду указывается полное название учебного заведения (место работы или учебы), город и страна.

6. Дальше через строку - аннотация не менее 50 слов на языке статьи (на русском и английском языках); *ключевые слова от 3 до 5 слов и словосочетаний* (на русском и английском языках)

7. Дальше через строку идет изложение материала (шрифт 14);

- **Введение** (состояние проблемы, задачи исследования);

- **Основная часть** – название в текст не вносится. Основную часть рекомендуется разбивать на разделы с названиями, отражающими их содержание: постановка задачи, методы исследования, математическая модель, обсуждение результатов и т.д.

- **Заключение** (выводы).

8. После основного текста указывается список литературы (Список использованной литературы). Список литературы оформляется не по алфавиту, а по мере того, как она встречается в тексте статьи. Схема списка литературы:

Авторы (обычный шрифт) → **название статьи** (обычный шрифт) → **выходные данные** (город, издательство) → **цифровые данные** (год, страницы). (Острейковский В.А., Карманов Ф.И. Статистические методы обработки экспериментальных данных с использованием пакета MathCAD. М.: ИНФРА-М, 2015. 207 с.).

9. Рисунки и таблицы набираются шрифтом Times New Roman 12 с одинарным междустрочным интервалом. Рисунки, диаграммы и таблицы создаются с использованием черно-белой гаммы. Использование цвета и заливок не допускается! Все рисунки и таблицы должны иметь название.

10. Формулы следует набирать с помощью редактора формул Microsoft Equation и нумеровать в круглых скобках (2).

Отдельным файлом подаются сведения об авторе

контактный телефон: (Viber, WhatsApp, Telegram, Mail.Ru Агент)

e-mail: _____

11. Авторы и рецензенты несут полную ответственность за содержание, стиль и качество оформление статьи.

Басууга 22.04.2021-ж. кол коюлду.
№30 офсет кагазы.
Форматы 84х60 1/16
Көлөмү 7,5 б.т.
Нускасы 50. Заказ 2021.

«Avrasya Press» басмаканасы
Бишкек ш., 7-апрель көч. №1а. Тел: 0(312)299 300
E-mail: avrasyapress2003@mail.ru
www.avrasyapress.com