

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук Павельева Владимира Сергеевича

на диссертацию **НАЗЬМОВА Владимира Петровича**

«Литографическая широкоапертурная рефракционная рентгеновская оптика»,

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по

специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики

в диссертационный совет Д 003.016.03 на базе

ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Диссертационная работа В.П. Назьмова посвящена разработке методов создания и исследованию элементов широкоапертурной рефракционной оптики рентгеновского диапазона. В последнее время большое развитие получили методы исследования структуры вещества с использованием жесткого рентгеновского излучения. Такие методы активно применяются в решении задач медицинской диагностики, геологии, биологии, материаловедения. Для решения этих задач важно иметь возможность получать высокую концентрацию рентгеновского излучения в пятно субмикронных размеров. В то же время в большом количестве экспериментов в качестве источников когерентного рентгеновского излучения используются лазеры на свободных электронах или каналы вывода синхротронного излучения с размером поперечной когерентности, измеряемой единицами сантиметров. Такой луч с помощью рефракционной широкоапертурной оптики может быть трансформирован в луч с поперечным размером в несколько нанометров, но значительно более интенсивный. Таким образом, работа В.П. Назьмова безусловно является **актуальной**.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые модифицирован метод глубокой рентгенолитографии и выработаны условия, при которых впервые получены микроструктуры высотой 7 мм и более, достигнуто аспектное отношение 500 и более.
2. Впервые предложен метод и выработаны условия формирования поддерживающего слоя, консолидированного в одной полимерной 3D-сети с функциональными микроструктурами. Впервые продемонстрировано формирование многоуровневой системы с несколькими поддерживающими слоями.
3. Выработаны технические и технологические условия формирования преломляющих рентгеновских LIG-линз. Впервые продемонстрирована 2D-фокусировка рентгеновского

излучения линзой, состоящей из двух линз с линейным фокусом и ориентированных под 90 градусов одна относительно другой на одной подложке.

4. Впервые предложены математические модели, описывающие адиабатические, мозаичные и адиабатические мозаичные планарные линзы.
5. На базе предложенной математической модели рассчитаны оптические свойства линейной мозаичной адиабатической линзы, размер фокуса которой лишь в несколько раз превышает длину волны используемого рентгеновского излучения, а выигрыш в интенсивности в фокусе (без учёта рассеяния излучения в линзе) - до 10^7 .
6. Впервые проанализированы оптические условия построения и реализован на базе элементов LIG-оптики многопольный рентгеновский микроскоп, пространственное разрешение которого в двух разных полях зрения составило ок.190 нм.
7. Впервые разработана и сформирована преломляющая широкоапертурная линза, позволившая фокусировать кванты с энергией более 200 кэВ в фокус с размером около 5 мкм.
8. Впервые разработана и сформирована преломляющая линза, позволившая однозначно продемонстрировать превышение числовой апертурой линзы величины угла полного внутреннего отражения для материала линзы.
9. Впервые с помощью мозаичной линзы экспериментально подтверждена теоретически предсказанная возможность монохроматизации рентгеновского излучения.
10. Впервые с целью увеличения апертуры преломляющей линзы при высоких энергиях квантов предложены мозаичные линзы, преломляющие элементы которых в зависимости от места расположения в линзе изготавливаются из различных материалов.
11. Впервые на базе двух преломляющих 2D-линз построен оптический телескоп, обеспечивающий коллимацию потока рентгеновского излучения с углом расходности до 0,5 мкрад и выигрышем в интенсивности в выходном пучке около 10.

В качестве **теоретической и практической значимости** работы можно отметить то, что разработанные методы создания рефракционной и широкоапертурной оптики рентгеновского диапазона позволяют создавать элементную базу для управления излучением лазеров на свободных электронах и синхротронного излучения рентгеновского диапазона, а также для создания компактных приборов для решения задач геологии, археологии и космических исследований. Результаты экспериментов, полученных с помощью созданных элементов рентгеновского диапазона, имеют национальное и мировое значение для науки и культуры.

Обоснованность полученных результатов и достоверность диссертационной работы подтверждена использованием адекватных методов исследования и согласованностью полученных результатов с известными экспериментальными результатами, полученными с помощью апробированных методик, а также с другими теоретическими моделями. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается также использованием современных средств измерений и стандартных методик проведения исследований, а также методов статистической обработки данных и экспериментальными результатами, достигнутыми пользователями при эксплуатации разработанных рентгенооптических систем.

Необходимо отметить, что **личный вклад** В.П. Назьмова в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим.

Диссертация В.П. Назьмова состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Материал работы изложен на 245 страницах, включает 136 рисунков, 6 таблиц и список цитируемой литературы из 160 наименований.

Общая характеристика и содержание работы:

Во **введении** В.П. Назьмов обосновывает актуальность темы диссертации, определяет цель, формулирует задачи, отмечает научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, формулирует положения, выносимые на защиту.

В **первой** главе на основании проведённых автором математического моделирования распределения дозы поглощённого излучения в толстом слое полимерного рентгенорезиста, а также экспериментального изучения метода рентгенолитографического структурирования установлено, что в условиях глубокой рентгенолитографии на синхротронном излучении вторичные эффекты, такие как рассеяние излучения в слое резиста и вторичные фотоэлектроны с одной стороны, а также большой перепад дозы по толщине слоя рентгенорезиста с другой стороны оказывают определяющее влияние на воспроизведение и качество микроструктур с ультравысоким аспектным отношением. Причём это влияние тем сильнее, чем больше поперечные размеры структур. Также показано, что на величину искажения при переносе размеров структур в толстый полимерный резистивный слой влияет радиационно-индукционная температура маски и самого слоя. С целью минимизации тепловых искажений проанализированы методы, стимулирующие снижение радиационно-индукционной температуры, такие как увеличение давления охлаждающего газа в камере облучения (гелий), увеличение скорости сканирования и длительности ожидания в поворотных точках скана, увеличение частоты модуляции и укорочение длительности строба падающего рентгеновского излучения, вариация толщины и материала фильтров, поглощающих излучение,

изменение угла наклона зеркала скользящего падения, оптимизация толщины центрального бимстопа. Для минимизации влияния вышеперечисленных факторов на качество воспроизведение структур В.П. Назьмовым предложено выделять из широкого спектра синхротронного излучения (СИ) узкий диапазон, содержащий кванты с актуальной для заданной толщины слоя рентгенорезиста энергией, подавляя относительно мягкую компоненту спектра с помощью фильтров, а относительно жёсткую компоненту - посредством центрального бимстопа. Благодаря подавлению жёсткой компоненты спектра, вносящей наибольший вклад в рассеянное излучение, удалось минимизировать толщину нерастворимого ореола вокруг структур. На основе анализа диффузационной модели растворителя автором предложен и успешно реализован оригинальный метод формирования слоёв негативного рентгенорезиста, обеспечивающий требуемую однородность распределения концентрации остаточного разбавителя и практически неограниченно большую толщину слоя. Для механической стабилизации формируемых микроструктур предложен и успешно опробован литографический метод формирования поддерживающих субслоёв. В результате двух последовательных облучений с поочерёдной сменой спектра и, соответственно, дозы, можно сформировать сложную самоподдерживающую трёхмерную структуру (без связующих слоёв), которая устойчива к механическому воздействию (уже на стадии жидкостного проявления и ополаскивания).

Во второй главе В.П. Назьмов описывает подходы к созданию преломляющей линзы, как системы микроструктур, где акцептанс линзы наиболее полно характеризует её эффективность.

Показано, что величина выигрыша в интенсивности в фокусе параболической преломляющей рентгеновской линзы определяется главным образом материалом линзы, а поскольку каждому материалу отвечает определённая технология обработки – то и технологией. В главе выработаны основные критерии дизайна параболических преломляющих линз, формируемых методом рентгенолитографии, и ограничения, накладываемые на: количество фокусирующих элементов в линзе, радиус кривизны преломляющей поверхности, взаимную точность позиционирования преломляющих микроструктур, геометрическую апертуру линзы.

На базе принципа переноса изображения в глубокой рентгенолитографии В.П. Назьмовым выработаны технологические условия формирования системы планарных полимерных микроструктур с преломляющим профилем, задаваемым различными функциями, апертурой до 1,5 мм и линейной формой фокуса длиной до 2,1 мм. В.П. Назьмовым разработан метод измерения размера фокуса на базе предложенной системы наноструктур, составляющих флуоресцентный тест-объект и организованных по принципу шкалу нониуса. Достигнутая на разработанных линзах и измеренная с помощью тест-объекта ширина линейного фокуса составила 100 нм. В качестве приложения линз с линейным фокусом предложен эксперимент

по характеризации методом стоячих волн многослойной системы, состоящей из различных материалов с толщиной слоёв до нескольких нанометров.

В третьей главе В.П. Назьмовым предложен и детально разработан принцип формирования фокуса в форме точки с помощью скрещенных планарных преломляющих рентгеновских линз, формируемых на одной подложке, а также разработаны технологические условия формирования таких линз с геометрической апертурой до 0,8 мм. Также выработаны критерии, накладываемые на дизайн при формировании отдельных элементов, такие как минимальное количество фокусирующих элементов и точность выполнения угла наклона одной линейной линзы относительно другой. Размер фокуса разработанных и сформированных с помощью оптимизированного метода глубокой рентгенолитографии преломляющих скрещенных рентгеновских полимерных линз, измеренный с помощью тест-объекта, описанного в главе 2, при энергии возбуждения 28 кэВ составил ок. 300 нм по вертикали, включая дифракционный предел около 60 нм и проекцию источника ок. 180 нм. Исследована длинная линза, характеризующаяся большим, чем у тонкой линзы, акцептантом вследствие более короткого фокусного расстояния, благодаря чему возможен меньший размер фокуса. Апертура преломляющих рентгеновских линз с непрерывным параболическим профилем мала вследствие поглощения в материале и ограничивает размер поля зрения. В.П. Назьмовым предложен путь решения данной проблемы посредством создания рентгеновской многопольной планарной преломляющей линзы (как массива сублинз, интегрированных в одну) и разработки технологии её формирования на базе метода сверхглубокой рентгенолитографии. На базе вышеуказанных двухмерных массивов микроструктур, выступающих в роли мультиконденсорной и мультиобъектной полимерных преломляющих линз, В.П. Назьмовым впервые собран и испытан многопольный рентгеновский микроскоп с разрешением ок 190 нм. Посредством рентгеновского телескопа, собранного на базе двух систем фокусирующих микроструктур (рентгеновских объектива и окуляра) В.П. Назьмову удалось уменьшить расходимость луча синхротронного излучения до величины менее 0,5 мкрад, увеличив при этом освещённость объекта в 10 раз. Посредством адаптации геометрических размеров преломляющих элементов к функции пропагатора электромагнитной волны в линзе разработана адиабатическая линза, которая характеризуется ещё более коротким фокусным расстоянием, чем длинная линза, и ещё большей величиной акцептанса.

В четвёртой главе В.П. Назьмовым изучено увеличение акцептанса преломляющей линзы, формируемой путём удаления пассивного материала и объединения зон с преломляющим профилем в непрерывный т.н. киноформный профиль, за счёт чего

геометрическая апертура может быть увеличена благодаря добавлению всё более узких периферийных зон, проблема формирования которых сдерживает применение такого типа линз: изгиб и слипание концов сегментов наблюдается при изготовлении линз из позитивного резиста ПММА, а волнистость концов – для линз, изготовленных из негативного фоторезиста SU-8. В изготовленных линзах с геометрической апертурой 2000 мкм ширина последнего сегмента достигает 2 мкм при аспектном отношении более четырёхсот. Проанализировано влияние точности изготовления элементов киноформного профиля на величину эффективной апертуры. В частности, ожидается сужение активной апертуры в четыре раза при возрастании ошибки передачи размеров с 1 мкм до 5 мкм. Такие ошибки наблюдаются для структур высотой 100 мкм и 1000 мкм, соответственно. Вследствие искажения тонких сегментов преломляющего профиля измеренный размер фокуса изготовленных рентгеновских полимерных преломляющих линз ограничивается величиной 2-3 мкм. Для установления причин отклонения оптических свойств от ожидаемых апертура линзы была исследована в радиографической моде с помощью узкого рентгеновского луча, при этом регистрация интенсивности излучения в фокусе позволила выявить вклад каждого участка апертуры. Установлено, что в линзе происходит перераспределение энергии в соседние зоны со всё более возрастающей эффективностью по мере уменьшения ширины зоны вследствие рассеяния излучения сегментами на углы большие, чем ожидаемые в идеальном случае. В результате, эффективно используется лишь до 400 мкм апертуры, а искажение фронта волны и рассеянный фон ограничивают размер фокуса. Особенно важна разработка линз с большой апертурой для экспериментов с использованием квантов высоких энергий, где трудно обеспечить большую апертуру других типов оптики. Поэтому исследовались линзы с киноформным дизайном, выполненные из никеля, декремент показателя преломления которого в ~7 раз выше, чем у полимеров. С помощью никелевой планарной преломляющей киноформной линзы был впервые в мире сконцентрирован луч с энергией более 200 кэВ в фокус размером около 5 мкм.

В пятой главе В.П. Назымовым изучено увеличение акцептанса преломляющей линзы путём удаления пассивного материала и перегруппировки преломляющих элементов. На основании нового принципа группировки предложена *мозаичная линза*. По сравнению с принципом упорядочения, отвечающим условию распространению излучения в тонкой линзе, в данной модели призмоидные преломляющие элементы упорядочены в рядах квазиравномерно отстоящими друг от друга, а относительное положение рядов адаптировано к свойствам пропагатора для длинной (толстой) линзы. Большое количество призмоидных преломляющих элементов, выстроенных в ряд, осуществляет транспорт рентгеновского луча в фокус. Чтобы

компенсировать набег фазы в каждом ряду, возникающий после удаления пассивного материала, в каждый ряд линзы введены компенсирующие элементы, но их толщина намного меньше, чем суммарная длина удалённого пассивного материала. Таким образом, результирующий фазовый декремент соответствует таковому, обеспечиваемому непрерывным параболическим профилем, а специфическое квазирегулярное расположение микропризм напоминает орнамент мозаики. С помощью предложенной В.П. Назьмовым математической модели *тонкой мозаичной линзы* (полуадиабатическое приближение) получено аналитически, что размер фокуса такой линзы описывается суммой двух компонент: одна из них – это результат интерференции когерентного излучения при нулевом поглощении линзой, вторая – учитывает сокращение поперечного размера преломляющих элементов вдоль оптической оси и рассеяние излучения на их шероховатой преломляющей боковой поверхности. В.П. Назьмовым экспериментально продемонстрировано, что вся апертура линзы шириной 6 мм активна. Поглощение материала не играет такой важной роли при увеличении размера апертуры, как это имеет место для линз с непрерывным параболическим профилем, что позволяет превысить величину дифракционного предела последних. В эксперименте продемонстрирован высокий потенциал мозаичной компоновки, который может быть использован для создания фокусирующих линз с размером фокуса менее микрометра. Характерно, что угловой акцептанс такой линзы может в несколько раз превышать угол полного внутреннего отражения материала линзы. Особенно заметно преимущество мозаичных линз перед линзами с непрерывным параболическим профилем в 2-Д геометрии. Расчёты показывают, что акцептанс полимерных 2-Д линз может в тысячи раз превышать акцептанс линз с непрерывным параболическим профилем. Экспериментальное исследование таких линз позволило определить величину достигнутой в данной разработке эффективной апертуры - около 600×600 мкм при выигрыше в фокусе 176 и размере фокуса 46×46 мкм для энергии квантов 12 кэВ. Для мозаичной линзы влияние поглощения материала линзы не столь критично как для линз с непрерывным параболическим профилем, и эффективная апертура ограничивается уже величиной декремента коэффициента преломления с ростом энергии квантов. Поэтому в целях увеличения акцептанса линзы с мозаичной компоновкой для высоких энергий В.П. Назьмовым предложена комбинированная линза, состоящая из преломляющих элементов, выполненных из *различных материалов*. А именно, вблизи оптической оси располагаются преломляющие элементы, выполненных из лёгких материалов с относительно малым декрементом показателя преломления, а на периферии – из тяжёлых материалов с большим значением последнего. Например, для условий фокусировки на станции элементного анализа, установленной на 8-м канале источника СИ ВЭПП-4, эффективная апертура линзы, сформированной на базе только никелевых элементов, не превышает 400 мкм, а после замены преломляющих элементов в 22-х рядах в средней части

линзы на полимерные - до 750 мкм. При осуществлении двумерной фокусировки с помощью таких линз выигрыш в интенсивности в фокусе почти утверждается. Линзы с преломляющими элементами, выполненными из различных материалов, могут представлять интерес для исследований, проводимых при энергиях квантов более 50 кэВ.

Дальнейший прогресс по пути увеличения акцептанса преломляющих линз предложено осуществить посредством увеличения числовой апертуры мозаичной линзы путём *адиабатического сжатия* пропагатора рентгеновской волны за счёт искривлённой по закону первого и второго порядков преломляющей поверхности боковых стенок призмоидных микроструктур мозаичной адиабатической линзы. При этом положение микроструктур и размер их треугольного сечения меняются в соответствии с величиной пропагатора в каждом сечении рентгеновской линзе. В.П. Назымовым предложена математическая модель такой линзы в геометрическом приближении. Модель позволяет рассчитать начальную геометрическую, числовую и эффективную апертуру и геометрические параметры преломляющих элементов, а также ожидаемый размер фокуса. Расчётный размер фокуса такой линзы может достигать нескольких ангстрем, а выигрыш интенсивности в фокусе - 10^7 . Благодаря большей величине акцептанса мозаичные линзы могут более эффективно выполнять другие функции в сравнении с линзами с параболическим профилем, а именно монохроматизацию излучения.

Этот подход был использован для разработки компактного монохроматора рентгеновского излучения, состоящего из входных щелей, планарной преломляющей линзы с мозаичным расположением элементов, центрального бимстопа и апертурной диафрагмы, причём весь монохроматор с успехом может уместиться на площадке диаметром 40 мм и быть выполнен методом глубокой рентгенолитографии.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. Показано, что потенциальный – позволяющий дальнейшее развитие - метод глубокой рентгенолитографии может быть использован для формирования высококачественных элементов и систем преломляющей рентгеновской оптики.
2. Доказано, что легко структурируемый полимерный материал на базе фоторезиста SU-8 и его аналог резист mrx могут быть предложены не только для отработки формирования модельных элементов рентгеновской оптики, но для формирования последних с целью их многократного использования.
3. На базе планарных полимерных и металлических преломляющих микроструктур разработаны элементы и системы рентгеновской оптики, которые можно объединить по принципу изготовления в один подкласс – «LIG– оптики». К вышеуказанному подклассу можно отнести преломляющие и фазосдвигающие элементы, телескопы, монохроматоры,

а также интерферометры, амплитудные и фазовые диафрагмы, также предложенные и исследованные (за рамками настоящей работы).

4. Проведено теоретическое моделирование рентгенооптических свойств преломляющих элементов и систем планарной рентгеновской LIG-оптики с учётом особенностей их изготовления.

5. Экспериментально проверено, что планарные линзы и системы линз могут применяться для 1D - и 2D-нанофокусировки рентгеновского излучения, передачи рентгеновских изображений, а также в качестве конденсоров рентгеновского излучения.

6. Установлено, что в области энергий квантов более 100 кэВ преломляющие линзы LIG-оптики имеют значительные перспективы по сравнению с другими видами рентгеновской оптики.

7. Продемонстрирована передача изображения многопольным рентгеновским микроскопом в нескольких полях зрения одновременно с пространственным разрешением в нанометровом диапазоне.

8. Предложено характеризовать оптические свойства рентгеновских линз посредством их акцептанса, который является функцией числовой апертуры и эффективной апертуры. Наибольший акцептанс среди рассмотренных систем ожидается для линз с адиабатическим сужением и мозаичной расстановкой призмоидных преломляющих элементов. В результате, выигрыш в интенсивности в фокусе может достигать величины 10^7 , а размер фокуса до 10 Å (в рамках геометрической оптики).

9. Показано, что фокусирующие планарные преломляющие мозаичные линзы на базе призмоидных микроструктур могут быть использованы для монохроматизации рентгеновского излучения широкого спектра. Для энергии фотонов 16 кэВ достигнуто энергетическое разрешение $1,8 \times 10^{-2}$. Возможные приложения монохроматора на базе рентгеновской линзы перекрывают интересы от флуоресцентного анализа микрообъектов до микроскопии в жёстких рентгеновских лучах.

10. Показано, что широкий диапазон вариации конструктивных параметров планарных преломляющих рентгеновских линз обеспечивает возможность их применения на различных источниках рентгеновского излучения с учётом технических параметров последних.

11. В экспериментах по материаловедению с помощью изготовленных элементов LIG-оптики изучены важные свойства физических объектов, а также достигнуты рекордные значения обнаружительной способности - менее 10 аг.

12. Посредством телескопической системы, созданной на базе полимерных преломляющих рентгеновских линз, достигнута расходимость выходного пучка излучения менее 0,5 мкрад и выигрыш в интенсивности около 10.

Текст автореферата не лишен стилистических ошибок:

1. На стр.16 в подписи к рисунку 4 неточно приведено сокращенное название туннельной микроскопии – “AFM” вместо “STM” (AFM – общепринятое сокращенное название атомно-силовой микроскопии).

2. На стр. 5б цифры на рисунке плохо различимы из-за слишком малого размера.

В качестве замечаний к диссертационной работе можно отметить следующее:

1. При приведении результатов исследований созданных линз не приведены оценки их энергетической эффективности. В то же время энергетическая эффективность является общепринятым критерием работы фокусирующих оптических элементов.
2. В третьей главе автором приведены результаты исследования формирования фокуса в форме точки с помощью скрещенных планарных преломляющих параболических линз. Однако принципиальная возможность создания скрещенных элементов открывает гораздо более широкие возможности управления пучком – в частности, известно решение задачи фокусировки гауссова пучка в квадратную фокальную область с равномерным распределением интенсивности с помощью скрещенного элемента. Результаты исследования элементов, изготовленных с помощью разработанных технологий, с более широким функционалом (фокусировка в заданные области, формирование пучков с замечательными свойствами) отсутствуют в работе, хотя их наличие, безусловно, могло бы продемонстрировать огромный потенциал разработанных технологий для создания различных оптических систем рентгеновского диапазона.
3. Не приведены количественные оценки отклонения измеренных распределений интенсивности, сформированных созданными элементами, от расчетных (в частности, в главе 5).
4. В тексте диссертации не выделены ссылки на работы автора, что приводит к необходимости приложения дополнительных усилий для оценки авторского вклада при чтении текста.
5. В тексте диссертации имеется небольшое количество опечаток.

Сделанные в отзыве замечания не вносят принципиальных изменений в Положения и Выводы, выносимые автором на защиту.

Представляемая работа прошла серьезную апробацию, ее основные результаты неоднократно докладывались на российских и международных конференциях. По теме

диссертационной работы опубликовано 67 научных работ (из них 52 — статьи в международных и российских журналах, входящих в список ВАК по направлению “Физика”, 4 — в трудах российских и международных научных и научно-технических совещаний и конференций, 5 — российских и зарубежных патентов).

Автореферат диссертации В.П. Назьмова оформлен в соответствии с требованиями ВАК, написан четким и понятным языком. Он дает достаточно полное представление о содержании диссертации, содержит необходимые формулировки цели и задач исследований, выносимых на защиту положений, научной новизны и практической значимости.

В целом диссертация В.П. Назьмова представляет собой ясную и хорошо оформленную работу. Текст диссертации содержит необходимые иллюстрации и написан ясным и профессиональным языком.

Все это позволяет утверждать, что представленная диссертационная работа В.П. Назьмова является законченным научным исследованием и полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям по специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики и критериям, установленным в п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней». Автор диссертации, Назьмов Владимир Петрович, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.

Доктор физ.-мат. наук



Б.С. Павельев

Заведующий кафедрой наноинженерии
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева»
(Самарский университет) 443086, г. Самара,
Московское шоссе, д. 34
8 927 601 7634, pavelyev10@mail.ru

Подпись В.С. Павельева заверяю

Учёный секретарь Самарского университета

д.т.н.

kuzm@ssau.ru

Дата:



В.С. Кузьмичев

28 августа 2018 г.

Соучредитель оплаченной брошюры