

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук Асадчикова Виктора Евгеньевича

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

Актуальность

Диссертационная работа В.П. Назьмова посвящена разработке рентгеновской оптики с увеличенной апертурой и коротким фокусным расстоянием, что обеспечивает увеличение плотности потока фотонов при одновременном достижении пространственного разрешения в субмикронном и даже нанометровом диапазоне размеров. Развитие методов диагностики внутренней структуры объектов с названным разрешением обусловлено не только наблюдаемым успехами в электронной технике, но прогрессом в создании новых, часто не кристаллических, функциональных материалов для различных применений. До последнего времени разрешение такого уровня было доступно лишь в электронной и атомно-силовой микроскопии. Однако электронный зонд может создавать искажения структуры изучаемого объекта. Кроме того, методом электронной микроскопии с высоким разрешением можно исследовать лишь небольшие объекты (с характерными размерами порядка единиц микрон), причём в условиях высокого или среднего вакуума. Атомно-силовой микроскоп принципиально допускает исследования только структуры поверхности вещества. В отличие от названных методов рентгеновское излучение (в зависимости от длины волны) обладает значительной проникающей способностью. Поэтому, сфокусированный в субмикронный объём рентгеновский луч становится уникальным средством для визуализации структуры объектов наnanoуровне, что становится возможным, например, при сканировании объекта. Все выше сказанное определяет безусловную актуальность рассматриваемой работы.

Новизна результатов, обоснованность и достоверность результатов.

Теоретическая и практическая значимость

Новизна результатов обусловлена оригинальной постановкой задачи. Автором теоретически обоснован, экспериментально проверен и практически реализован метод

получения высоко аспектных рентгенооптических элементов и структур на базе различных полимеров для фокусировки рентгеновского излучения. Парадоксальность подхода состоит в том, что для этого использован метод глубокой рентгеновской литографии. Т.е. под действием рентгеновского излучения (и последующего травления) полимеру сначала придается нужная форма, а затем полученное изделие используется для управления характеристиками рентгеновского же пучка. Таким образом создается новой новый вид компактной рентгеновской оптики на одной подложке, которую автор именует как LIG-оптику. Свойства создаваемых элементов подробно обсуждаются автором путем проведения теоретических расчетов, которые хорошо согласуются с результатами им же проведенных экспериментов. Анализ диссертационной работы показывает, что вклад автора в ее выполнение безусловно был решающим, а результаты ее выполнения уже находят практическое применение, в том числе, в ИЯФ СО РАН.

Автор показал замечательное владение методикой проведения физических экспериментов. Результаты расчётов методологически верифицированы использованием различных аналитических оценок и программ численного счёта, а методики исследования материалов многократно испытаны на различных полимерах. Полученные аналитически результаты представлены в диссертации наглядно, и что особенно важно, приведены в сравнении.

В работе продемонстрированы пути нахождения простых решений для проблем, возникающих при структурировании, например, не всегда требуется реализовывать всю цепочку, обусловленную аббревиатурой LIGA, а достаточно высокие результаты достигаются уже на этапе реализации процессов LIG.

Общая характеристика работы

Во введении обоснована актуальность темы, указана научная новизна и практическая значимость разработки элементов рентгеновской оптики и полученных результатов. Отмечено, что поставленная и обоснованная здесь же цель работы достигается через решение изложенных в разделе задач.

Первая глава имеет фундаментальное и решающее значение не только для выполнения всей диссертационной работы, но и для проведения новых исследований с применением разработанного автором подхода. В ней изложены основы формирования микроструктур в сверхтолстых (более 1 мм) слоях полимера с использованием рентгеновского синхротронного излучения как средства переноса размеров. Благодаря высокой коллимации пучка синхротронного излучения в работе получено и демонстрируется воспроизведение микроструктур с характерным размером в микронной области, и что

особенно важно, аспектным отношением более 100. В настоящее время такие результаты не могут быть достигнуты с применением иных известных на сегодняшний день технологий. Автором выработаны основные принципы проекционного переноса изображения в рентгеновских лучах синхротрона на базе модификации спектра первичного излучения и оптимизации внешних условий облучения. При этом достигнутый наклон боковых стенок микроструктур менее 1 миллирадиана, а достижимая предложенным методом высота микроструктур оценивается величиной до 24 мм. Это наглядно демонстрирует потенциал примененного в работе рентгенолитографического метода. После проведения анализа причин изгиба и слипания получаемых высоко аспектных микроструктур автор находит универсальное решение этой проблемы, состоящее в формировании поддерживающего субслоя. Им определены свойства субслоя и условия его формирования. Полнота исследований материала по структурированию применяемого полимера дополняется исследованиями его стойкости к воздействию радиации в условиях, близких к условиям воздействия на преломляющие линзы в пучках мощного рентгеновского излучения. На основе математического моделирования определены условия формирования многоуровневой структуры, создание которой демонстрирует филигранную технику физического эксперимента, которой владеет автор. Достигнутые результаты сопровождаются иллюстративным материалом.

Вторая глава посвящена анализу рефракционной линзы как системы преломляющих микроструктур. На примере созданной одномерно фокусирующей линзы, определены технологические ограничения на формирование линз на одной подложке в рабочем поле, заданном размерами области сканирования при глубокой рентгенолитографии. С помощью данной линзы удалось сфокусировать синхротронный пучок с энергией 15,85 кэВ в пятно с характерным размером 105 нм при расчетном значении 93 нм (в одном направлении). При этом выигрыш в интенсивности в фокусном пятне увеличивается более, чем в 400 раз. Следует отметить, что измерение интенсивности рентгеновского излучения с субмикронной точностью является непростой задачей. В данном случае она решалась с применением специального калиброванного тест-объекта, который был разработан автором и изготовлен под его контролем.

В третьей главе описана оригинальная авторская идея создания рефракционных линз с точечным фокусом на одной подложке. Методом глубокой рентгенолитографии В.П.Назымову удается сформировать систему наклонных под заданным углом

микроструктур высотой до 500 мкм. Причём, область перекрещивания структур обладает свойствами фокусировки излучения в двух плоскостях. Автором установлены конструктивные особенности данного решения. Исследованы технологические условия формирования и проведена их оптимизация.

Приведённые результаты экспериментов убедительно доказывают правильность выбранного решения, причём aberrации линзы не замечены в пределах точности измерений. На базе введённого понятия акцептанса автором классифицированы, рассчитаны, сформированы на одной подложке и исследованы следующие типы рефракционных линз: короткая линза, длинная линза, адиабатическая линза. Показано, что адиабатическая линза обладает наименьшей величиной фокусного пятна.

Также автором изучены условия получения изображений посредством скрещенных линз: показано, что

- как и в оптике видимого света, необходимо помещать объект в передний фокус объективной линзы, совпадающий с задним фокусом конденсорной линзы;
- для получения изображений объектов с низким контрастом, к которым относятся практически все микрообъекты размером менее 1 мкм, необходимо обеспечить условия частичной когерентности фронта волны облучения объекта.

Опираясь на опыт формирования структур в толстых слоях резиста и опыт получения изображений в одном поле зрения, автор впервые продемонстрировал возможность получения изображений параллельно в нескольких полях зрения на экране одного детектора, проанализировав условия построения и создав т.н. многопольный рентгеновский микроскоп с пространственным разрешением в нанометровом диапазоне размеров.

Четвёртая глава посвящена особенностям формирования линз с киноформным профилем и исследованию их рентгенооптических свойств. На базе осуществлённых расчётов и проведённых экспериментов автором делается вывод, что вследствие градиента дозы рентгеновского излучения по двум координатам в теле преломляющих микроструктур, проекционное воспроизведение такого типа линз удовлетворительного качества возможно только в слоях полимера ограниченной толщины, порядка 100 мкм.

В **пятой главе** изучается найденное автором решение по увеличению эффективной апертуры линзы путём удаления пассивного материала и иной нежели киноформная перегруппировка преломляющих элементов. Необходимый набег фазы в пределах апертуры линзы обеспечивается вариацией толщины корректирующих элементов. Вследствие уменьшения толщины пассивного материала относительно линзы

с параболическим профилем, величина эффективной апертуры становится зависимой в большей степени от величины декремента показателя преломления и в меньшей степени от сечения поглощения, что позволяет существенно увеличить апертуру.

Автор логически подытоживает исследование в области широкоапертурной преломляющей оптики исследованием линзы с мозаичной компоновкой и адиабатическим сужением апертуры. Автор, моделируя распространение плоского фронта сквозь неё определил, что благодаря большой входной апертуре и сокращённой длине такая линза может обеспечить размер фокуса порядка 1 нм в диапазоне энергий квантов 5-30 кэВ.

Особенно важным кажется вывод о возможности фокусировки рентгеновского излучения с энергией квантов более 100 кэВ линзами с мозаичной компоновкой, поскольку другие принципы фокусировки малоэффективны в этом диапазоне.

Замечания и недостатки

В диссертационной работе преломляющие линзы классифицируются по величине акцептанса, однако количественные данные акцептанса разных типов линз приведены разрозненно и не ясно, насколько существенна разница между тем или иным типом линз. С другой стороны, автор не упоминает и не использует при анализе созданных им линз принятый подход, связанный с анализом их эффективности. Это было бы полезно для сравнения оптических свойств разработанных им линз с другими рентгенооптическими элементами, использующимися в настоящее время.

На стр. 32 автор указывает, что он пользовался моделью [67], улучшив ее применительно к своим экспериментам. Однако окончательное математическое выражение в тексте не представлено, а стр. 34 этой же моделью названы результаты соответствующих ей расчетов.

На стр. 59 автор не определяет термин “*Z*” в формуле 2.5. Из дальнейшего текста, видимо, следует, что *Z(X)* – функция, описывающая профиль создаваемой поверхности.

На стр. 62 следует читать не «*кристалличность бериллия*», а «*мозаичность поликристаллического бериллия*».

Во введении диссертации содержится достаточно полный литературный обзор по рассматриваемой в работе научной проблеме. Этот же материал практически полностью представлен и автореферате диссертации. Однако там не приведены ссылки на цитируемую литературу, что затрудняет анализ материала.

В то же время автор страдает излишней скромностью. В тексте диссертации он ссылается на ряд работ [102, 103, 106, 116, 125, !28, 134 и др.], автором которых он

является. При этом его участие в данных работах может быть установлено только с учетом списка цитируемой литературы.

В тексте диссертации имеется ряд опечаток (стр.15, 26, 30, 32, 36, 39, 42, 56, 67, 87, 89, 93, 117, 121, 142, !52, 166, 169, 215, 216 и стр.17 автореферата).

Выводы и заключение

Тема диссертации возникла на базе исследования возможности формирования рентгеновской оптики с помощью глубокой рентгенолитографии, побуждённая эффектными результатами, представленными в кандидатской диссертации автора «Исследование воздействия синхротронного излучения на толстые слои полимерных материалов в процессах формирования микроструктур с высоким аспектным отношением». Поэтому настоящая работа является логическим продолжением исследования метода глубокой рентгеновской литографии, начатого автором более 30 лет назад на пучках синхротронного излучения накопителя ВЭПП-3 (Новосибирск), однако не заимствует результатов из кандидатской диссертации в силу специфики свойств используемых полимеров. Однако, диссертант подошёл к этой работе с приобретённым ранее багажом знаний методов анализа материалов. Все полученные в данной работе результаты являются новыми и оригинальными

Личный вклад В.П.Назьмова в разработку и исследование рефракционной литографической оптики неоспорим. Им лично были предложены и реализованы все ключевые решения по формированию широкоапертурной оптики, с его участием проведены исследования радиационной стойкости использованных при формировании оптических элементов рентгеновских резистов, а также исследования оптических свойств разработанной и изготовленной рефракционной оптики в пучках рентгеновского излучения, получения рентгеновских изображений микро- и нанообъектов. Вызывает уважение проявленное автором не только глубокое знание радиационной физико-химии полимеров, но и его понимание теории и эксперимента в области рентгеновской оптики.

Сделанные в отзыве замечания не вносят принципиальных изменений в Положения, выносимые автором на защиту и выводы к диссертационной работе.

Представляемая работа прошла серьезную апробацию, ее основные результаты многократно представлялись на российских и международных конференциях. По теме диссертационной работы опубликовано 62 научных работы (из них 52 — статьи в рекомендованных ВАК журналах и 4 — труды российских и международных конференций).

Автореферат диссертационной работы В.П. Назьмова оформлен в соответствии с требованиями ВАК, текст изложен технически грамотно и понятно. Текст автореферата отвечает содержанию диссертационной работы, включает в себя формулировки цели и задач исследований, выносимых на защиту положений, научной новизны и практической ценности.

В целом диссертация В.П. Назьмова представляет собой внутренне логически стройную и достаточно хорошо оформленную работу. Текст диссертации обильно иллюстрирован и изложен ясным и профессиональным языком.

Все это позволяет заключить, 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
(01.04.18 кристаллография и физика кристаллов),
профессор, заведующий лабораторией
рефлектометрии и малоуглового рассеяния.

ФГУ Федеральный научно-исследовательский центр

«Кристаллография и фотоника»

Российской академии наук

119333 г. Москва,

Ленинский просп., д. 59

8 (499) 135 22 00

asad@crys.ras.ru

Подпись В.Е. Асадчикова заверяю

Учёный секретарь ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

К.Ф.-м.н.

Электронный адрес: cp-secr@crys.ras.ru

Дата:

В.Е. Асадчиков



П.А. Просеков

27 августа 2018 г.