

ОТЗЫВ НА АВТОРЕФЕРАТ

диссертации Смертина Руслана Маратовича

“Многослойные зеркала для безмасочной и проекционной рентгеновской литографии”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертационная работа Смертина Руслана Маратовича связана с разработкой методов изготовления и характеристики многослойных зеркал для проекционной рентгенолитографии на длинах волн 13,5 нм и 11,4 нм, а также с вопросами придания микрозеркалам МЭМС отражательных свойств на длине волны 13,5 нм в рамках концепции безмасочной проекционной рентгенолитографии. Это важные и очень востребованные направления экспериментальной деятельности. Актуальность темы диссертации Р.М. Смертина не вызывает сомнения. Автор работы выполнил впечатляющий объем трудоемких исследований, среди которых синтез и изучение физических и отражательных характеристик многослойных зеркал (МЗ) Mo/Be (пик отражения на 11,4 нм), Ru/Be и Ru/Be с барьерными слоями Mo ($\lambda = 11,4$ нм), а также поиск и изготовление электрически непроводящих бесстрессовых отражающих покрытий (13,5 нм) для безмасочной проекционной литографии.

Перечислим самые яркие, на наш взгляд, достижения. Благодаря внесению барьерных слоев Mo в МЗ Ru/Be на оба интерфейса удалось получить рекордный коэффициент отражения (72.2 %) на длине волны 11.4 нм (зеркала Mo/Ru/Mo/Be). При этом увеличивается также и интегральный коэффициент отражения за счет одновременного увеличения как высоты, так и ширины пика отражения, причем при сохранении долговременной стабильности.

В результате вакуумного отжига удалось увеличить пиковый коэффициент отражения МЗ Mo/Be на ~ 6 % (в относительном выражении) по сравнению с неотожженным образцом.

Найдено электрически непроводящее бесстрессовое отражающее покрытие для нанесения на зеркальца МЭМС. Речь идет о МЗ Si/C с долей слоя углерода в периоде 0.64, с $R \approx 11$ % на $\lambda = 13.5$ нм; отработана технология его синтеза в атмосфере Ar и H₂. На примере коммерчески доступной МЭМС продемонстрирована долговременная стабильность и радиационная стойкость МЗ Si/C, нанесённых на зеркальца МЭМС, к излучению с длиной волны ~ 13.5 нм. При этом пиковый коэффициент отражения на длине волны 13.5 нм составил 2.8% при угле скольжения 67° (рис. 4), а интегральный 7.1 %

Обширный список авторских публикаций (19) указывает на практическую востребованность физических и технологических результатов, полученных при непосредственном участии автора диссертации и его соавторов. Диссертация Р.М. Смертина есть законченное исследование, и эта работа, без сомнения, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

В тексте есть небольшое число досадных опечаток. Так, на стр. 2 следует писать “заведующий отделом” Есть также вопросы и замечания по существу.

Название диссертации словно говорит, что безмасочная литографии не является проекционной. Было бы точнее: “Многослойные зеркала для проекционной и безмасочной проекционной рентгеновской литографии.”

Следовало бы пояснить, что понимается под “пиковым” и “интегральным” коэффициентами отражения МЭМС.

Вызывает вопрос и требует пояснения утверждение “Т.к. для безмасочной литографии производительность не является настолько острой проблемой, как для масочной, то уменьшение коэффициента отражения даже в десятки раз, относительно других оптических элементов, не будет критической проблемой.”

Отмеченные недостатки не умаляют заслуги автора диссертации. Это замечательная экспериментальная работа, в полной мере удовлетворяющая требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Р.М. Смертин заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Дата 11__ сентября 2025 г.

Г.н.с. Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

д.ф.-м.н. _



Е.Н. Рагозин

Подпись д.ф.-м.н. Рагозина Е.Н. заверяю.

(Ф.И.О. автора отзыва)

Помощник директора

(должность заверяющего лица)

Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Физический институт
им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,

(наименование организации)

доктор физ.-мат. наук

(учёная степень)



/Савинов Сергей Юрьевич/