

Рефлектометрия в мягком рентгеновском диапазоне с лазерно-плазменным источником излучения

Е.Н.Рагозин

Обсуждаются устройство и применение рефлектометров с дифракционной решеткой скользящего падения на область длин волн короче 300 Å. Основное внимание уделено рефлектометрам с лазерно-плазменным источником излучения, возбуждаемым импульсно-периодическим лазером с «умеренными» выходными параметрами (энергия в импульсе 0.1–1 Дж, длительность импульса 10 нс и менее). Приведенные сведения могут быть полезны при создании метрологических установок в мягком рентгеновском диапазоне спектра, как лабораторных, так и включенных в серийное производство интегральных микросхем методом проекционной рентгенолитографии.

Ключевые слова: проекционная рентгенолитография, рефлектометр, лазерная плазма, решетка Роуланда, VLS-решетка, схема Хеттрика–Андервуда, разрешающая способность, делитель пучка, многослойное зеркало.

Содержание

1. Введение	537
2. Первые рефлектометры с лазерно-плазменным источником излучения	538
2.1. Рефлектометр Центра рентгеновской оптики	538
2.2. Рефлектометр AT&T Bell Laboratories	540
3. Рефлектометры, ориентированные на инспекцию оптики для производства микросхем	541
4. Полихроматический рефлектометр	543
5. Некоторые аспекты метрологии элементов оптики для крупносерийного производства микросхем	543
6. Рефлектометр Института физики микроструктур РАН	544
7. Заключение	544

1. Введение

Ренессанс рентгеновской оптики [1], состоявшийся в последней четверти прошлого столетия, характеризовался созданием новых рентгенооптических элементов, таких как многослойные зеркала, многослойные поляризаторы и делители пучка, многослойные дифракционные решетки, решетки с шагом, изменяющимся на поверхности по заданному закону (так называемые VLS-решетки), и др. Новые оптические элементы мягкого рентгеновского (МР) диапазона нашли применение в лабораторных исследованиях и измерениях, выполняемых на борту космических аппаратов (см., напр., [2–6]). Новый мощный импульс развитию рентгеновской оптики был дан разработками в области проекционной рентгенолитографии с использованием многослойных зеркал, предложенной в ФИАНе еще в 1980-х гг. [7]. Вскоре работы были продолжены совместно с НИИ молекулярной электроники (Зеленоград) и Харьковским политехническим институтом [8]. Параллельно в течение трех десятилетий аналогичные исследования проводились за рубежом, и к середине 2010-х гг. они привели к промышленному производству микросхем с минимальным разрешением в несколько

нанометров (см. обзор И.А.Артюкова [9]). Расширяющееся применение рентгеновской оптики, в свою очередь, потребовало создания и совершенствования средств метрологии/рефлектометрии для измерения спектральных коэффициентов отражения и пропускания рентгенооптических элементов (многослойных зеркал, дифракционных решеток, абсорбционных фильтров, делителей пучка, фотошаблонов, пелликлов* и др.), а также абсолютных измерений чувствительности детекторов излучения. Признанным авторитетом в этой области служит Национальный метрологический институт ФРГ (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB), где этим целям служат два канала синхротронного излучения (0.65 – 30 нм и 5 – 50 нм) [10]. Вместе с тем потребовалось улучшить доступность измерительной аппаратуры и приблизить ее к местам изготовления и применения рентгеновской оптики. Полноценным решением стало использование лазерной плазмы как источника МР-излучения при создании автономных (лабораторных) рефлектометров.

Лазерная плазма как источник МР-излучения, возбуждаемая лазерными импульсами «умеренной» мощности (энергия в импульсе 0.1–1 Дж, длительность 1–10 нс, частота 1–10 Гц), с длиной волны 1.06/0.53 мкм и расходом, близкой к дифракционной, обладает рядом достоинств. Во-первых, это возможность варьировать характер спектра от линейчатого до (квази)непрерывного путем выбора лазерной мишени: материал мишени с не-

А.Е.Н.Рагозин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: enragozin@gmail.com, ragozinen@lebedev.ru

Поступила в редакцию 29 августа 2024 г., после доработки – 27 сентября 2024 г.

* Пленка, служащая для защиты топологического рисунка фотошаблона (маски) от возможных дефектов (загрязнений в виде частиц).

высоким атомным номером дает преимущественно линейчатый спектр (это удобно для калибровки прибора по длине волны), который постепенно переходит в непрерывный с ростом атомного номера материала мишени. Во-вторых, это высокая спектральная яркость: по данным работы [11] при энергии в импульсе всего 0.25 Дж, длине волны 0.53 мкм и частоте следования импульсов 10 Гц спектральный поток составляет более 2×10^{13} фотон./с·ср·0.1 нм во всем диапазоне 10–16 нм. Наконец, это безупречная воспроизводимость положения в пространстве при условии точности механического перемещения лазерной мишени. Сочетание этих обстоятельств сделало лазерную плазму самым удобным и перспективным источником мягкого рентгеновского излучения для компактных лабораторных рефлектометров.

Ниже даны примеры рефлектометров с лазерно-плазменным источником (ЛПИ) излучения, созданных в разное время за рубежом и в России.

2. Первые рефлектометры с лазерно-плазменным источником излучения

Структурно рефлектометр с ЛПИ состоит из трех основных блоков: вакуумной камеры с лазерной мишенью и расположенным снаружи импульсно-периодическим лазером, камеры монохроматора и измерительной камеры, включающей в себя гониометр с достаточным числом степеней свободы, на котором закрепляется измеряемый оптический элемент, и детекторы излучения. Кроме того, в установке могут использоваться абсорбционные фильтры для подавления высших порядков дифракции на решетке, вспомогательные зеркала для увеличения пропускной способности (throughput) и регулируемые диафрагмы, определяющие размер пучка МР-излучения.

Первые сообщения о создании автономных рефлектометров относятся, по-видимому, к началу 90-х гг. [12, 13]. Широкую известность получила работа [12], выполненная в Центре рентгеновской оптики (CXRO, Лаборатория им. Лоуренса в Беркли), где был реализован ряд базовых решений; с него мы и начнем краткий обзор рефлектометров с ЛПИ.

2.1. Рефлектометр Центра рентгеновской оптики (1992 г.)

На рис.1 представлена схема рефлектометра [12]. Для возбуждения плазмы использовались импульсы второй

гармоники Nd:YAG-лазера (0.532 мкм) с энергией 0.33 Дж, длительностью 8 нс и максимальной частотой следования 10 Гц. Лазерный пучок расширился до 25 мм и фокусировался на мишень плосковыпуклой линзой с фокусным расстоянием 254 мм; при этом сферическая aberrация и дифракционный размер фокального пятна приблизительно равны (20 мкм). Ось лазерного пучка составляла 68° с нормалью к цилиндрической мишени, а в монохроматор направлялось излучение под углом 45° по другую сторону от нормали. При этом реальный размер пятна на мишени составлял 20×55 мкм, а интенсивность – около 2×10^{12} Вт/см². Мишенью служил полированный металлический цилиндр диаметром 32 мм и длиной 305 мм. После каждой лазерной вспышки мишень проворачивалась шаговым моторчиком, активируемым сигналом от лазерной вспышки. Размеры кратера составляли примерно 0.5×0.2 мм, поэтому между вспышками мишень смещалась на 0.5 мм, так что на одном витке спирали умещалось 200 кратеров. Одновременно с поворотом цилиндр смещался на 25 мкм вдоль оси при помощи прецизионного столика-транслятора. Общий ресурс мишени составлял 96000 лазерных вспышек. Фокусировка оптимизировалась при регистрации выхода рентгеновского излучения с помощью фотодиода в камере ЛПИ, на который было нанесено Al-покрытие толщиной 2000 Å.

Монохроматор со сферической решеткой, работающей с постоянным углом отклонения 164° во внешнем порядке дифракции, рассчитан на работу в диапазоне 30–300 эВ (400–40 Å). Используются две сменные позолоченные гравированные решетки с радиусом 3 м (800 и 2400 штрих./мм) с углом блеска 2.5° . Цилиндрическое предзеркало, скрещенное по отношению к решетке, служит для увеличения входного телесного угла и уменьшения вертикального размера пучка на образце (до 0.3 мм). Предзеркало, покрытое отражающим слоем родия или никеля, установлено под скользящим углом 6° . В монохроматоре не используется входная щель; ширина выходной щели регулируется. Разрешающая способность $\lambda/\delta\lambda \approx 100–500$ в зависимости от ширины щели и раскрытия решетки. Последнее регулируется диафрагмой, ширина которой изменяется от 6 мм до нуля. При этом горизонтальный размер пучка на образце варьируется от 30 мм до менее чем 1 мм. Максимальная пропускная способность монохроматора, определяемая как максимальный телесный угол сбора излучения, умноженный на эффективность оптики, составляет 2×10^{-4} ср. Оценивая схему монохроматора, можно заключить, что акцент был

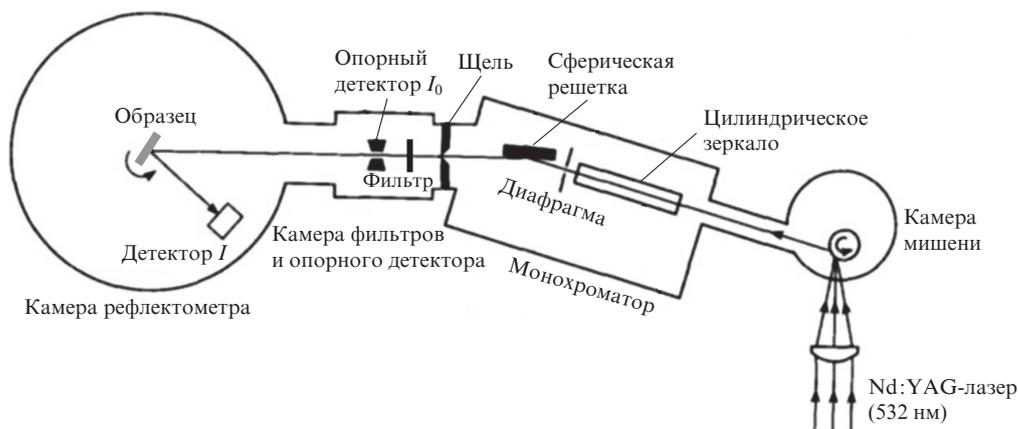


Рис.1. Схема рефлектометра, приведенная в работе [12].

сделан на максимизации пропускной способности при поддержании умеренной спектральной разрешающей способности.

Был измерен абсолютный выход излучения из монохроматора. Так, при использовании мишени из золота он составил на длине волны 124 \AA (100 эВ) около $2 \times 10^4 \text{ МэВ}$, или около 2×10^8 фотонов за вспышку. Это значение получено при ширине выходной щели 100 мкм , что в данном случае соответствует полосе около 1 эВ ($\lambda/\delta\lambda \approx 100$).

На пути к образцу вышедший из монохроматора пучок проходит через барабан с фильтрами (до 10 фильтров), служащими для подавления высших порядков дифракции, и затем через контрольный детектор I_0 , который перехватывает примерно половину пучка и является импульсным монитором амплитуды рентгеновского импульса после монохроматора. В измерительной камере диаметром 65 см находятся образец и конечный детектор I , перемещаемые двумя гониометрами с минимальным размером шага 0.005° . Ось гониометра расположена на расстоянии 77 см от выходной щели монохроматора, а детектор – примерно в 25 см от оси вращения. Минимальный угол между входящим и отраженным лучами составляет 5° . Образец может перемещаться под вакуумом в трех ортогональных направлениях с общим перемещением 50 мм вдоль каждого направления. Столики-трансляторы обеспечивают возможность измерения однородности образцов, а также позволяют перемещать образец в луч и из него, чтобы можно было измерить как падающий, так и отраженный луч. Образцы можно измерять в проходящем и отражающем свете, от скользящего падения до угла в пределах 5° от нормали.

Известно, что рефлектометры на основе синхротронного источника излучения благодаря его стабильности позволяют достичь точности абсолютных измерений коэффициентов отражения и пропускания на уровне 0.1% . При абсолютных измерениях с ЛПИ сказывается повторяемость источника от выстрела к выстрелу. На рис.2 показан типичный измеренный выходной сигнал монохроматора, иллюстрирующий повторяемость от выстрела к выстрелу для золотой мишени с монохроматором, установленным на 120 \AA , при 4×10^5 фотонов на импульс в каждом из двух Au/Si-детекторов I и I_0 . Сигнал в каждом из детекторов демонстрирует среднеквадратичные флук-

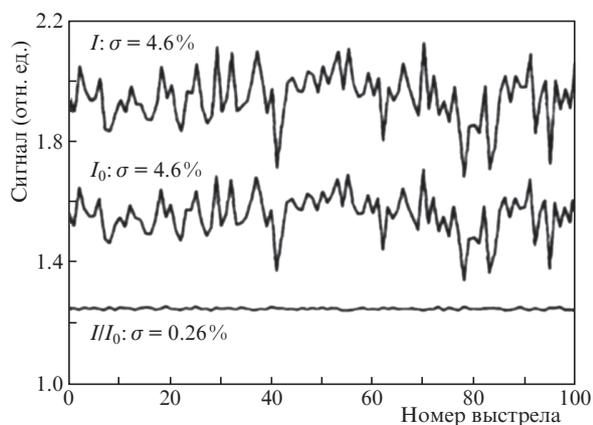


Рис.2. Сигналы, измеренные конечным детектором I и контрольным детектором I_0 , в зависимости от номера выстрела лазера. Флуктуации σ от выстрела к выстрелу в 4.6% (RMS) компенсируются в отношении двух детекторов. Оставшиеся (0.26%) флуктуации в отношении I/I_0 согласуются с ожидаемыми изменениями $N^{1/2}$ числа фотонов на импульс.

туации (RMS) около 5% , которые сильно коррелируют для обоих детекторов. Затем вариация источника от выстрела к выстрелу «выпадает» из отношения сигналов с двух детекторов, и точность измерения увеличивается примерно до 0.25% . Остаточные флуктуации в отношении I/I_0 ($\sim 0.25\%$) согласуются с ожидаемым статистическим изменением Пуассона $(2/N)^{1/2} = 0.22\%$. Отмечено, что вариация от выстрела к выстрелу очень сильно зависит от степени обработки поверхности стержня мишени, поэтому для измерений необходимо использовать полированную мишень.

На данном рефлектометре, в частности, был измерен абсолютный спектральный коэффициент отражения многослойного зеркала Mo/Si, который сравнивался с измеренным на рефлектометре на синхротроне BESSY в РТВ. Продемонстрировано довольно хорошее согласие результатов измерений на рефлектометре с ЛПИ и на синхротроне BESSY. Таким образом, показано, что рефлектометр с ЛПИ обеспечивает непрерывно перестраиваемое МР-излучение и является удобной альтернативой синхротронному излучению для измерений, не требующих интенсивности или яркости синхротрона.

Позднее, в 2000 г., сотрудники Центра рентгеновской оптики опубликовали работу, в которой подводился промежуточный итог почти десятилетней эксплуатации рефлектометра [14]. После усовершенствования рефлектометра появилась возможность измерять отражение масок (шаблонов) для проекционной рентгенолитографии размером 200 мм в любой точке поверхности. К моменту публикации [14] было промерено около 400 масок с многослойным покрытием для программы рентгенолитографии.

Были проведены сравнительные измерения с помощью рефлектометра на синхротроне Advanced Light Source (ALS) Центра рентгеновской оптики [15]. Этот прибор способен обеспечивать очень высокую точность (см. табл.1) благодаря высокому потоку, стабильности механической конструкции, высокому качеству оптической конструкции и компонентов, а также высокой спектральной чистоте, достигаемой в монохроматизированном пучке. На рис.3 показан результат измерений, выполненных на плоском многослойном зеркале Mo/Si. Данные

Табл.1. Сравнение рабочих параметров рефлектометра на основе синхротронного пучка ALS/CXRO и рефлектометра на основе лазерной плазмы.

Рабочие параметры	Рефлектометр на синхротроне ALS	Рефлектометр с ЛПИ
Поток на длине волны 134 \AA (фотон./с)	10^{11}	4×10^5 (при частоте 1 имп./с)
Размер пятна на образце (мкм)	50×300	500×300
Разрешающая способность на длине волны 134 \AA	1500 (со щелью 50 мкм) Предел: 5000 с решеткой 200 штрих./мм	300 (со щелью 100 мкм) Предел: 500 со щелью 25 мкм и решеткой 800 штрих./мм
Точность длины волны	10^{-4}	10^{-3}
Точность измерения коэффициента отражения	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.7\%$

Примечание. Авторы [14] не указывают ширину спектральной полосы для сравниваемых потоков фотонов в секунду.

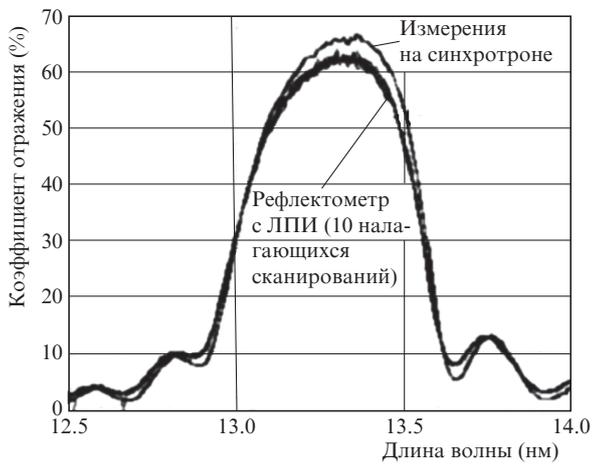


Рис.3. Сравнение результатов измерений отражательной способности, выполненных с использованием синхротронного пучка Центра рентгеновской оптики и рефлектометра на основе лазерной плазмы (полное сравнение результатов приведено в табл.1).

с синхротронного пучка являются результатом одиночного сканирования, данные из лазерно-плазменной системы – результат 10 перекрывающихся сканирований.

Видно, что соответствие длин волн очень хорошее, разница между двумя измерениями составляет менее 0.01 нм. Однако разница в отражательной способности существеннее: значение, полученное с использованием лазерно-плазменного рефлектометра, систематически примерно на 3.5% ниже. Оба эти различия можно отнести к систематическим эффектам, которые в принципе могут быть исправлены. Разница в отражательной способности, по мнению авторов, объясняется более низкой спектральной чистотой монохроматора системы на основе лазерной плазмы. Небольшое расхождение в длине волны может быть отнесено к более низкой механической точности сканирующего механизма по сравнению с синхротронной системой.

Светосильный рефлектометр с умеренной разрешающей способностью на основе ЛПИ, разработанный и созданный в СХРО, продемонстрировал достаточно вы-

сокую точность при выполнении абсолютных измерений в МР-диапазоне длин волн. Он прост в использовании, позволяет исследовать образец за короткое время и относительно компактен.

2.2. Рефлектометр AT&T Bell Laboratories

В 1991 г. была опубликована работа [13] с описанием рефлектометра высокого разрешения, нацеленная на рефлектометрию многослойной оптики в интересах проекционной рентгенолитографии. Акцент при этом делался на измерение отражения широкоапертурной фигурной оптики и, в частности, в области длин волн короче L-края кремния (125 Å), где, по мнению авторов, резко возрастает чувствительность фоторезистов.

Параметры ЛПИ аналогичны тем, что использованы в работе [12], однако дальнейшая оптическая схема существенно сложнее (рис.4). Использовался VLS-монохроматор по схеме Хеттрика–Андервуда с входной щелью (модель HIREFS-175-M-UHV фирмы Hettrick Scientific); плоскость дисперсии горизонтальная. Посередине (~35 см) между мишенью и вертикальной входной щелью установлено позолоченное сферическое (радиус кривизны 10 м, диаметр 50 мм) зеркало под скользящим углом 2°, создававшее на щели астигматическое изображение источника. Зеркало служит для увеличения сбора излучения в горизонтальном направлении, а также препятствует прохождению «осколков» мишени в монохроматор и загрязнению решетки. Посередине (~87 см) между входной и выходной щелью установлено сферическое зеркало скользящего падения, образующее совместно с VLS-решеткой схему Хеттрика–Андервуда. После зеркала следует зеркало на основе изогнутой стеклянной пластины, скрещенное по отношению к решетке, которое фокусирует излучение в вертикальном направлении. В вертикальном направлении приемный угол прибора равен 4.4 мрад, в горизонтальном направлении он зависит от длины волны и не превышает 2.8 мрад. Предусмотрены четыре сменные VLS-решетки с центральной частотой от 65 до 1440 штрих./мм на область длин волн примерно от 350 до 7 Å. Спектральная разрешающая способность зависит от

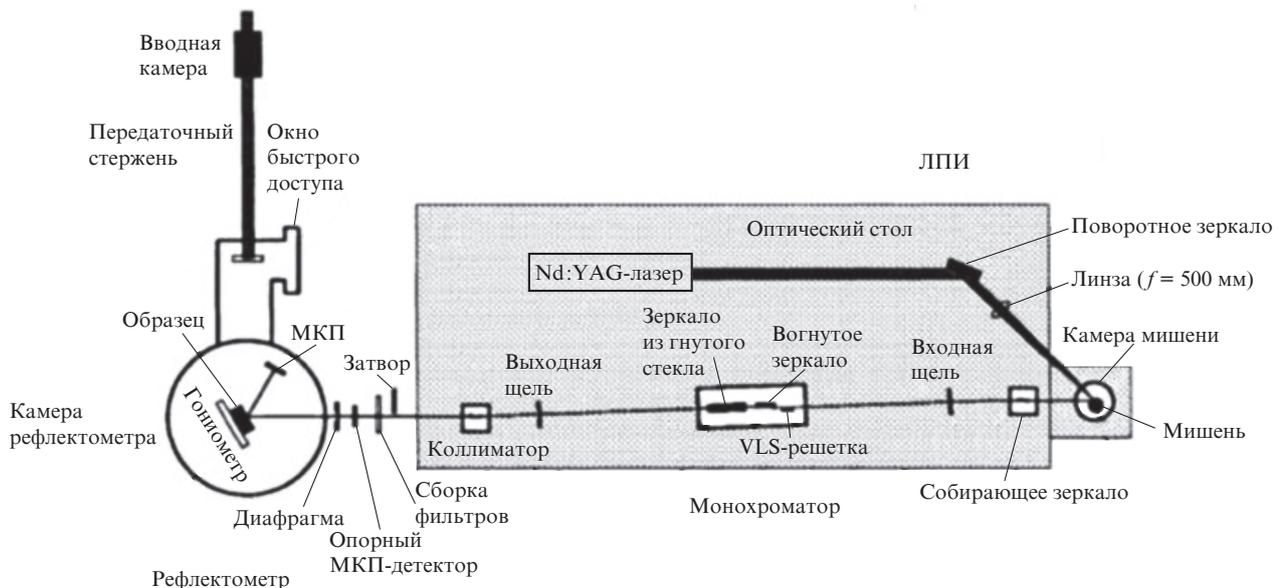


Рис.4. Принципиальная схема рефлектометра для МР-излучения [13].

ширины щели и типа решетки, может превышать 500–1000 везде, кроме коротковолнового края рабочего диапазона. Последняя оптическая поверхность в системе представляет собой позолоченное сферическое зеркало (радиус кривизны 20 м, диаметр 50 мм), расположенное на расстоянии 35 см от выходной щели монохроматора, которое используется для коллимации пучка в горизонтальном (дисперсионном) направлении. За этим зеркалом следуют пневматический механизм затвора для блокировки луча и узел фильтра с шаговым двигателем, который может вместить семь тонкопленочных пропускающих фильтров. Наконец, вертикальные и горизонтальные апертуры размером от 0.5 мм до 16 мм и от 50 мкм до 1.6 мм соответственно используются для задания размера пучка, падающего на рефлектометр.

Рефлектометр рассчитан на измерение образцов до 75 мм в диаметре. Подобно работе [12], используются два МКП-детектора диаметром 25 мм: контрольный и измерительный. Контрольный МКП-детектор имеет отверстие 6 мм в центре и служит, как и в [12], для учета флуктуаций рентгеновского сигнала ЛПИ при прецизионных измерениях и нормировки сигнала измерительного детектора. Авторы отмечают, что одним из недостатков созданной системы является то, что, поскольку МР-излучение поступает в виде 10-наносекундных импульсов, источник должен работать в режиме низкого потока, чтобы МКП-детекторы работали в линейном режиме. (К сожалению, потока недостаточно для использования детектора с более широким динамическим диапазоном, такого как фотодиод.) Низкий поток подразумевает невысокое отношение сигнал/шум; типичная неопределенность в абсолютном отражении составляет ~5% после усреднения 30 лазерных выстрелов на одну точку данных.

Таким образом, в [13] разработан новый лазерно-плазменный МР-рефлектометр для характеристики многослойных покрытий для проекционной рентгенолитографии. Система способна измерять отражательную спо-

собность в зависимости от длины волны и угла падения в области МР-излучения. Рефлектометрия использовалась для исследования оптических характеристик различных многослойных покрытий, для измерения однородности многослойного покрытия на фигурной оптике, а также для измерения коэффициента контрастности потенциальных методов обработки отражательных масок (фотошаблонов).

Желание расширить рабочий спектральный диапазон в коротковолновую область до 7 \AA привело к использованию малых скользящих углов падения, $\sim 2^\circ$, на всех зеркалах, что обусловило малые приемные углы, низкую пропускную способность и, в конечном итоге, относительно низкий световой поток на образце, а также худшее, по сравнению с [12], отношение сигнал/шум.

3. Рефлектометры, ориентированные на инспекцию оптики для производства микросхем

Десятилетие спустя стало ясно, что в Европе будет разворачиваться крупносерийное производство (HVP) микросхем методом проекционной рентгенолитографии. Однако при производстве МР-оптики необходим непосредственный доступ к лабораторным метрологическим инструментам. В 2003 г. группа немецких компаний и университетов сообщила о разработке лабораторного рефлектометра с ЛПИ, предназначенного для производственного контроля оптических компонентов на заводе Carl Zeiss SMT. Рефлектометр рассчитан на характеристику МР-оптики в диапазоне 10 – 16 нм, в том числе крупногабаритной многослойной оптики [11].

На рис.5 показана схема такого рефлектометра в двух проекциях – вид сбоку и вид сверху. Как и рефлектометры, описанные выше, прибор состоит из трех основных модулей: ЛПИ, монохроматора и измерительной каме-

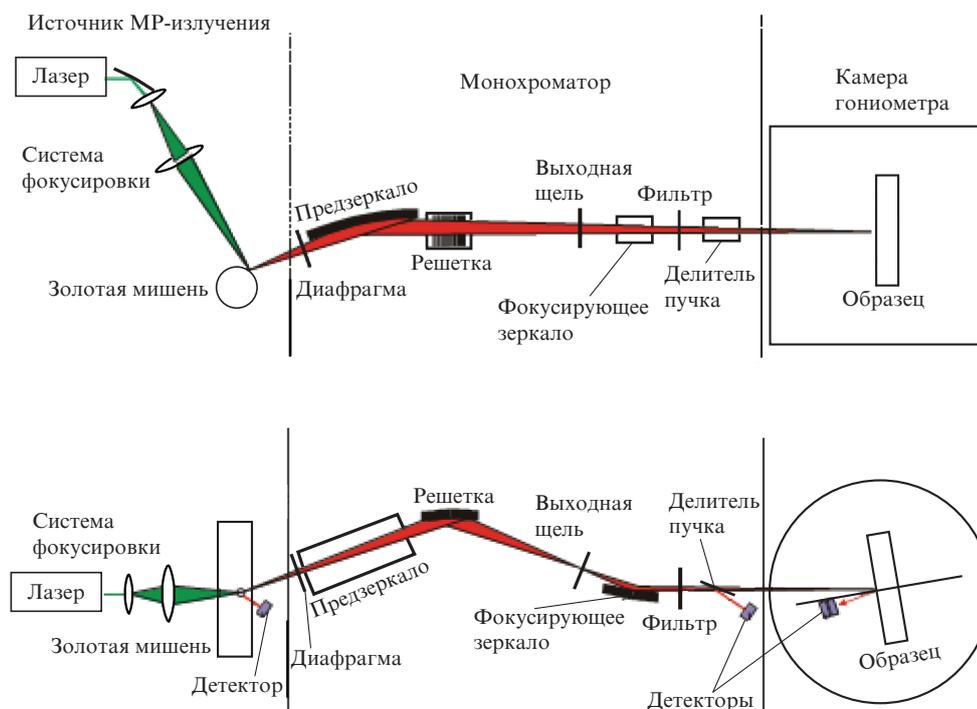


Рис.5. Оптическая схема лабораторного рефлектометра с ЛПИ [11] (вверху – вид сбоку, внизу – вид сверху).

ры, включающей в себя гониометр и детектор. Входной щели нет, есть делитель пучка, направляющий долю МР-излучения на контрольный детектор.

ЛПИ возбуждается импульсами на длине волны 532 нм с энергией до 0.7 Дж длительностью 10 нс, следующими с частотой 10 Гц. Лазерный пучок фокусируется в пятно диаметром 10 мкм, давая источник МР-излучения размером 30×50 мкм. Расстояние между соседними кратерами на поверхности мишени составляет 100 мкм. Ресурс мишени (вращающийся цилиндр диаметром 50 мм и длиной 200 мм) составляет три миллиона выстрелов. При энергии лазерного импульса всего 250 мДж достигается поток фотонов 2×10^{13} фотон./с·ср·0.1 нм во всем диапазоне длин волн (от 10 до 16 нм) (рис.6). Подробная характеристика источника представлена в работе [16]. В качестве материала мишени выбрано золото, дающее практически ровный квазиконтинуум.

Монохроматор обеспечивает перестройку выходного пучка в диапазоне 10–16 нм. В вертикальном направлении позолюченное предзеркало (эллиптический цилиндр) отображает источник на поверхность образца в камере гониометра. Используется сферическая решетка с частотой 1200 штрих./мм с золотым покрытием. В горизонтальном направлении решетка фокусирует источник на выходную щель. После выходной щели стоит зеркало, фокусирующее выходную щель на образец с четырехкратным увеличением. При ширине выходной щели 250 мкм размер МР-пятна на образце ~ 2 мм. Делитель пучка отбирает определенную часть пучка и направляет ее на опорный детектор для контроля энергии пучка, падающего на образец. При ширине выходной щели 50 мкм разрешающая способность $\lambda/\delta\lambda = 180$ (L-край Si) и 320 (K-край Ве). При энергии лазерного импульса 0.25 Дж на выходе монохроматора регистрировалось 3×10^6 фотон./имп., что дает пропускную способность монохроматора 3.3%.

Измерения отражения проводятся в гониометрической камере. Гониометр рассчитан на образцы диаметром до 500 мм, толщиной до 200 мм и массой до 30 кг. Угол падения может изменяться от 3° до 60° относительно нормали. Угол перемещения детектора варьируется от 0 до 180° . При 180° можно измерить энергию падающего МР-пучка. Отраженный пучок измеряется на расстоянии 150 мм от точки измерения.

Энергия МР-импульса на выходе монохроматора измеряется с помощью кремниевых фотодиодов AXUV-100

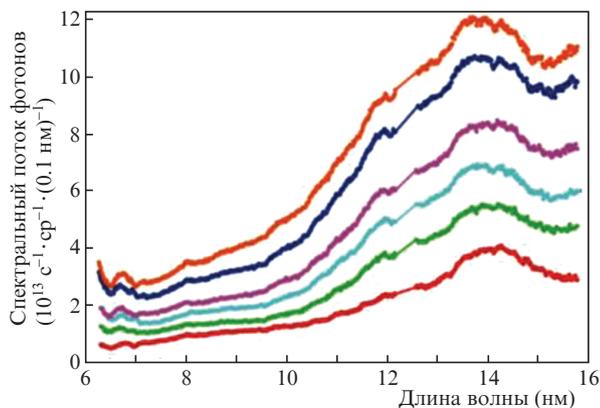


Рис.6. Спектральное распределение МР-излучения при энергии лазерного импульса от ~ 200 мДж до 630 мДж с шагом около 80 мДж (снизу вверх) [11].

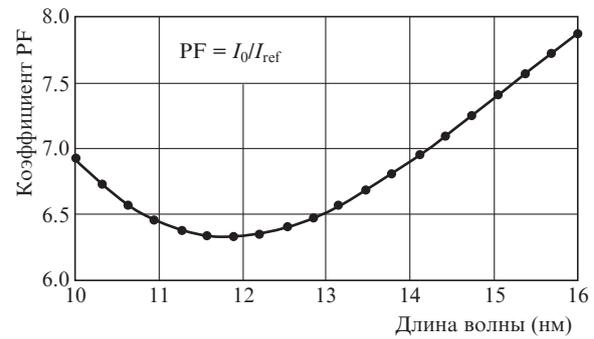


Рис.7. Коэффициент распределения интенсивностей падающего МР-пучка между измерительным детектором (I_0) и опорным детектором (I_{ref}).

с непосредственно нанесенным фильтром Ti/Zr/C (IRD, Inc). Для измерения отражательной способности используются два детектора: измерительный детектор (D_{meas}) для определения энергии падающего или отраженного МР-пучка (I_0 и I соответственно) в гониометрической камере и опорный детектор (D_{ref}) для определения опорного значения входящей МР-энергии (I_{ref}) за светоделителем. Положение детекторов указано на рис.5. По соотношению $I_0 = PF \times I_{ref}$, где PF – коэффициент разделения, энергия падающего МР-пучка задается опорным детектором. Таким образом, отражательная способность рассчитывается по формуле $R = I/(I_{ref} \times PF)$.

Вариация сигналов измерительного и опорного детекторов от выстрела к выстрелу составляет 3.6% (RMS). Стандартное отклонение σ нормализованного отношения интенсивностей I/I_{ref} на один порядок величины меньше, чем σ сигналов одиночного детектора, что соответствует результатам, полученным ранее [12]. Чтобы рассчитать отражательную способность зеркала, необходимо знание коэффициента разделения PF. На рис.7 показан измеренный коэффициент разделения, который оказался функцией длины волны.

Были выполнены измерения спектрального коэффициента отражения 60-периодной многослойной структуры Mo/Si при угле падения 5° при использовании десяти лазерных вспышек на каждую «точку» длины волны (рис.8). Нанесены результаты семи перекрывающихся сканирований, а также, для сравнения, показана отража-

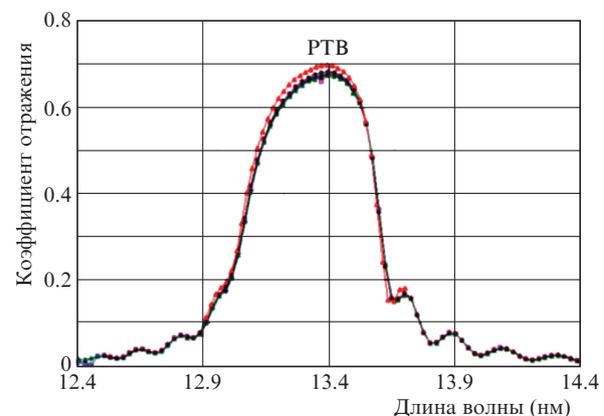


Рис.8. Отражательная способность 60-периодного многослойного зеркала Mo/Si, измеренная при использовании 10 лазерных вспышек на точку длины волны [11]. Показаны семь перекрывающихся сканов в сравнении с контрольной отражательной способностью, измеренной в ПТВ.

тельная способность, измеренная в РТВ. Отражательная способность с использованием 10 кадров на точку воспроизводится в пределах 0.5% (RMS). По сравнению с измеренной в РТВ, отражательная способность в максимуме примерно на 3% ниже. Это соответствует результатам, полученным ранее в [12] при использовании лабораторного рефлектометра с ЛПИ, и объясняется, возможно, влиянием более высокого спектрального загрязнения излучения из-за компактной конструкции монохроматора по сравнению с монохроматорами в накопительных кольцах. Другая возможная причина, обоснованная в [17], состоит в несколько меньшей отражательной способности р-компоненты при измерениях с неполяризованным излучением, в отличие от измерений с использованием линейно s-поляризованного синхротронного излучения в РТВ. Еще одной причиной, по нашему мнению, может быть недостаточно высокое спектральное разрешение.

Воспроизводимость измеренной центральной длины волны составляет 0.01% RMS. Различия в длине волны по сравнению с измерениями в РТВ составляют менее 0.01 нм.

4. Полихроматический рефлектометр

Нельзя не упомянуть и об относительно простом полихроматическом приборе, в котором широкополосное излучение взаимодействует с образцом перед анализом спектрального состава, в отличие от описанных выше установок с монохроматором (рис.9) [18]. В полихроматической компоновке МР-излучение источника фокусируется на поверхности образца, в данном случае с помощью схемы Киркпатрика – Баеза (рис.10). В режиме измерения отражающей способности отраженный луч распространяется в направлении VLS-решетки с плоским полем. Дифрагированный луч отображается на ПЗС-камере, формируя полный спектр на ПЗС-детекторе и позволяя получать полный спектр в течение одного цикла считывания. Решетка и ПЗС-детектор установлены на оптической скамье и могут перемещаться как блок VLS-спектрометра по полукруглой направляющей. Удаляя образец с пути луча и перемещая блок спектрометра за образцом, можно записать опорный спектр. Помещая образец на пути луча, можно проводить измерения пропускания (фильтра и т. д.). Кроме того, за счет вращения образца и блока спектрометра можно проводить измерения при различных углах падения излучения в режиме $\theta - 2\theta$, в диапазоне углов падения приблизительно от 5° до 88° .

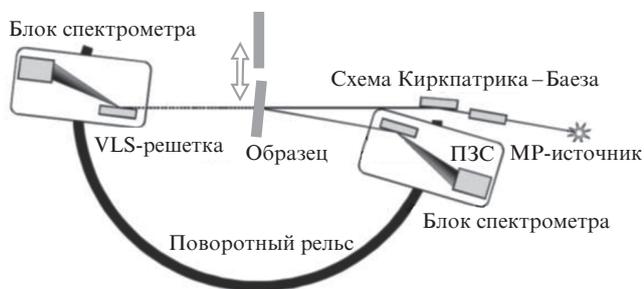


Рис.9. Схема полихроматического МР-спектрофотометра (блок спектрометра содержит дифракционную VLS-решетку и ПЗС-камеру) [18]. Показано расположение элементов в режиме отражения или в режиме сравнения/пропускания.

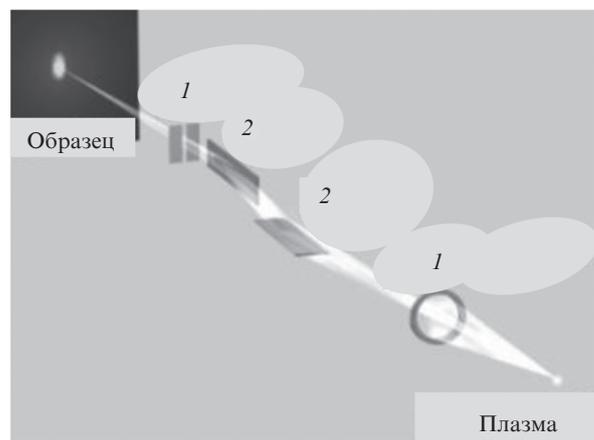


Рис.10. Построение широкополосного МР-изображения плазмы на образце на основе схемы Киркпатрика – Баеза: 1 – диафрагмы; 2 – скрещенные цилиндрические зеркала [18].

Несмотря на то что работа данной установки была продемонстрирована с адаптированной микрофокусной рентгеновской трубкой [19, 20], она с очевидностью сможет работать и с ЛПИ при условии подавления высших порядков дифракции.

5. Некоторые аспекты метрологии элементов МР-оптики для крупносерийного производства микросхем

Наряду с лабораторными рефлектометрами были разработаны и стали коммерчески доступны промышленные рефлектометры, непосредственно встроенные в крупносерийное производство чипов методом проекционной рентгенолитографии. Помимо требований к спектральному разрешению и точности абсолютных измерений, которым удовлетворяют лабораторные инструменты, к ним предъявляется ряд специфических требований, вытекающих из особенностей высокотехнологичного крупносерийного производства. Это высокая производительность измерений, постоянно растущие требования к локальности измерений (вплоть до 0.01 мм^2), возможность измерений масок (фотошаблонов) с контролируемым позиционированием, защитных пленок (так называемых пелликлов (pellicles)) и крупногабаритных (до 500 мм) многослойных зеркал, автоматизированная загрузка/выгрузка образцов, высокая чистота и высоковакуумное исполнение. Эти вопросы лежат за пределами темы настоящего обзора, и мы ограничимся лишь несколькими ссылками на работы, дающие представление о возможностях техники.

Так, требования к рефлектометрии масок и демонстрация работы рефлектометра приведены, например, в [21], где используется газоразрядный источник излучения. Вместе с тем компания Euvtech (США) использует для этой цели ЛПИ с ленточной лазерной мишенью [22]. Отметим также, что РТВ, идя навстречу потребностям промышленности, установил новый МР-рефлектометр на электронном накопителе BESSY II. Такой рефлектометр предназначен для метрологии на длине волны полноразмерной оптики для проекционной рентгенолитографии и позволяет исследовать образцы с максимальной массой 50 кг и диаметром до 550 мм по всей поверхности [23]. Эскиз блока крепления образца в рефлектометре (рис.11) показывает все степени свободы столика с образцом.

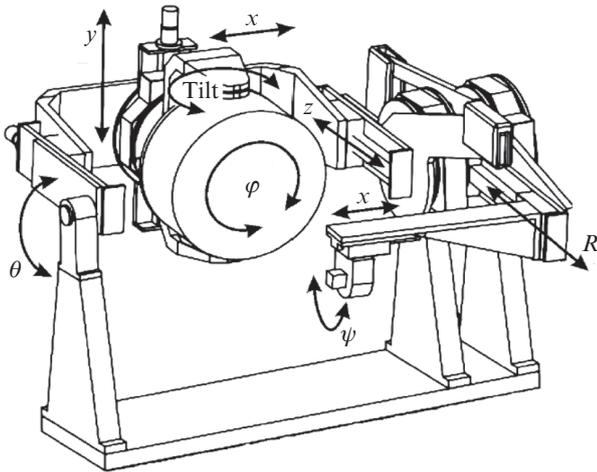


Рис.11. Эскиз системы рефлектометра с указанием всех степеней свободы [23]. Столик с образцом помещается внутрь вакуумной камеры и управляется двигателем в вакууме. Образец может перемещаться в направлениях x , y и z , вращаться по углу φ и наклоняться по θ и ψ .

6. Рефлектометр Института физики микроструктур РАН

В Отделе многослойной рентгеновской оптики Института физики микроструктур РАН разработан рефлектометр на основе монохроматора с плоской решеткой с эквидистантными штрихами по схеме Черни–Тёрнера с ЛПИ [24], который успешно используется для характеристики многослойных рентгеновских зеркал, измерения спектрального пропускания абсорбционных фильтров и, в частности, эффективности дифракционных решеток [25]. Точность абсолютных измерений составляет приблизительно 1%.

7. Заключение

Разработаны и успешно используются как лабораторные, так и промышленные рефлектометры в МР-диапазоне спектра на основе импульсно-периодического ЛПИ. Точность и воспроизводимость измерения абсолютных коэффициентов отражения/пропускания рентгенооптических элементов (многослойной оптики, зеркал скользящего падения, фильтров, пелликов/мембран) приближаются к стандартам, задаваемым рефлектометрами с синхротронными источниками (такими, как РТВ). Для достижения высокой точности абсолютных измерений решающее значение имеет количество фотонов на образце в достаточно узком спектральном интервале за лазерный импульс [фотон/(имп. · Å)], определяемое спектральной яркостью ЛПИ и пропусканием оптической схемы. Для достижения локальности измерений этот пучок фотонов должен к тому же фокусироваться на малую площадку образца. При этом используются как монохроматоры с классической решеткой Роуланда, так и с плоской VLS-решеткой в схеме Хеттрика – Андервуда и с плоской решеткой с эквидистантными штрихами в схеме Черни – Тёрнера. Различные схемы монохроматоров с точки зрения разрешающей способности, ширины спектрального рабочего диапазона и пропускной способности сопоставлены в работе [26].

Автор обзора видит необходимость развития отечественной метрологии (рефлектометрии) МР-диапазона.

Стоит задача прецизионного измерения параметров обычных и многослойных зеркал, спектральной эффективности дифракционных решеток, в том числе пропускающих, многослойных и VLS-решеток [5], отражательных зонных пластин, абсорбционных фильтров, делителей пучка, элементов поляризационной оптики и других рентгенооптических элементов, а также спектральной чувствительности детекторов излучения. При создании рентгенооптических элементов используется целый ряд современных технологий. Дифракционные решетки, в частности, могут изготавливаться на гравировальных станках, методами интерференционной, электроннолучевой и лазерной литографии. Расширение инструментария и повышение точности рефлектометрии МР диапазона даст дополнительный импульс развитию производственных технологий, и, разумеется, прецизионная рефлектометрия является одной из необходимых предпосылок развития промышленной рентгенолитографии [27].

Автор признателен И.А.Артюкову за полезные обсуждения вопросов, относящихся к теме рентгенолитографии, и предоставление ряда материалов.

- Underwod J.H., Attwood D.T. *Phys. Today*, **37** (40), 44 (1984); Андервуд Дж.Х., Атвуд Д.Т. *УФН*, **151**, 105 (1987).
- Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *УФН*, **185** (11), 1203 (2015). DOI: 10.3367/UFNr.0185.201511d.1203.
- Kando M., Pirozhkov A.S., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **103** (23), 235003 (2009).
- Вишняков Е.А., Медников, К.Н. Перцов А.А. и др. *Квантовая электроника*, **39** (5), 474 (2009) [*Quantum Electron.*, **39** (5), 474 (2009)].
- Рагозин Е.Н., Вишняков Е.А., Колесников А.О. и др. *УФН*, **191** (5), 522 (2021). DOI: 10.3367/UFNr.2020.06.038799.
- Shestov S., Reva A., Kuzin S. *Astrophys. J.*, **780** (1), 15 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/780/1/15.
- Виноградов А.В., Зорев Н.Н. *ДАН*, **302** (1), 82 (1988).
- Артюков И.А., Балакирева Л.Л., Бийкерк Ф., Виноградов А.В., Зорев Н.Н., Кожевников И.В., Кондратенко В.В. и др. *Квантовая электроника*, **19**, 114 (1992) [*Quantum Electron.*, **22**, 99 (1992)]; <https://doi.org/10.1070/QE1992v022n02ABEH0003351>.
- Артюков И.А. *Квантовая электроника*, **52** (12), 1094 (2022) [*Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **50**, Suppl. 4, S42 – S434 (2023)]; <https://doi.org/10.3103/S1068335623160029>.
- Laubis C., Barboutis A., Biel M., et al. *Proc. SPIE*, **8679**, 867921 (2013). DOI: 10.1117/12.2011529.
- Van Luyen L., Böttger T., Brauna S., et al. *Proc. SPIE*, **5038**, 12 (2003).
- Gullikson E.M., Underwood J.H., Batson P.C., Nikitin V. *Sci. Technol.*, **3**, 283 (1992).
- Windt D.L., Waskiewicz W.K. *Proc. SPIE*, **1547**, 144 (1991).
- Mrowka S., Underwood J.H., et al. *Proc. SPIE*, **3997**, 819 (2000).
- Underwood J.H., Gullikson E.M., Koike M., Batson P.J., Denham P.E., Franck K.D., et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **9**, 67 (1996).
- Scholz F., Scholz F., Tümmler J., Ulm G., Legall H., Nickles P.V., Sandner W., Stiel H., van Luyen L. *Proc. SPIE*, **5037**, 670 (2003).
- Van Luyen L., Böttger T., Schädlich S., Braun S., Foltyn T., Leson A., Scholz F., Müllender S. *Appl. Surf. Sci.*, **252**, 57 (2005).
- Starke K., Blaschke H., Jensen L., Nevas S., Ristau D., Lebert R., Wies C., Bayer A., et al. *Proc. SPIE*, **6317**, 631701 (2006).
- Egbert A., Mader B., Tkachenko B., Ostendorf A., Fallnich C., Chichkov B.N., et al. *J. Microlith. Microfab. Microsyst.*, **2**, 136 (2003).
- Egbert A., Tkachenko B., Becker S., Chichkov B.N. *Proc. SPIE*, **5448**, 693 (2004); <https://doi.org/10.1117/12.547029>.
- Farahzadi A., Wies C., Lebert R. *Proc. SPIE*, **7470**, 74700E (2009).
- <https://www.euvtech.com/hvm-reflectometer>.
- Tümmler J., Blume H., Brandt G., Eden J., Meyer B., Scherr H., Scholz F., Scholz F., Ulm G. *Proc. SPIE*, **5037**, 265 (2003).
- Garakhin S.A., Chkhalo N.I., Kas'kov I.A., et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **91** (6), 063103 (2020); <https://doi.org/10.1063/1.5144489>.
- Зорина М.В., Гарахин С.А., Колесников А.О., Рагозин Е.Н. и др. *Квантовая электроника*, **54** (1), 58 (2024).
- Колесников А.О., Рагозин Е.Н., Шатохин А.Н. *Квантовая электроника*, **53** (8), 672 (2024).
- <https://nauka.tass.ru/nauka/18223611>.