

Свободностоящие пленочные структуры для лазерно-плазменных экспериментов

Е.Б.Клюенков, А.Я.Лопатин, В.И.Лучин, Н.Н.Салащенко, Н.Н.Цыбин

Развита методика изготовления свободностоящих пленок толщиной 5–500 нм из различных материалов и многослойных композиций. Кроме их традиционного использования для спектральной фильтрации мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового излучения, рассматривается возможность применения ультратонких пленок, изготовленных по данной методике, в качестве мишеней для экспериментов по лазерному ускорению ионов. Изготовлен демонстрационный образец мишени в виде углеродной пленки толщиной 5 нм на поддерживающей сетке.

Ключевые слова: свободностоящая многослойная структура, тонкопленочная лазерная мишень, ЭУФ фильтр.

1. Введение

Тонкие металлические пленки широко применяются в качестве работающих на пропускание оптических элементов в приборах и схемах экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) и мягкого рентгеновского диапазонов длин волн. Выбор толщины и состава тонкопленочных элементов определяется спецификой конкретного приложения. Так, в задачах поляриметрии синхротронного излучения многослойная тонкая пленка может быть эффективным фазовращателем на просвет в классической схеме эллипсометра [1, 2]. Основным параметром здесь является вносимый пленкой фазовый сдвиг между s- и p-поляризованными компонентами излучения, который должен обеспечить достоверное определение поляризационных характеристик, и оптимальным оказывается использование многослойных пленок субмикронных толщин, состоящих из чередующихся в строгой периодичности слоев двух материалов (до нескольких сотен периодов). Состав и толщина пленочных фильтров, используемых в орбитальной аппаратуре для изучения Солнца в ЭУФ диапазоне, выбираются исходя из требований блокирования видимого излучения на 10–12 порядков [3]. Необходимое подавление фоновой засветки достигается использованием пары фильтров, последовательно установленных на входе прибора и перед детектором излучения. При спектральных исследованиях лабораторных источников столь высоких требований к блокирующим свойствам фильтра обычно не предъявляется, и применяются пленочные структуры меньшей общей толщины (50–200 нм), обеспечивающие малое поглощение в ЭУФ области спектра. Активно обсуждаются перспективы использования свободностоящих тонкопленочных элементов в установках проекционной нанолитографии с рабочей длиной волны 13 нм [4]. Для промышленных систем

нанолитографии разрабатываются импульсные лазерно-плазменные источники ЭУФ излучения большой средней мощности [5], что накладывает дополнительные требования на размер и термическую стойкость пленочных фильтров, подавляющих мощное фоновое излучение источника. Помимо спектральной селекции излучения, фильтр в схеме ЭУФ литографии может выполнять функции защиты оптических элементов от загрязнений продуктами эрозии мишени. Рассматривается возможность индивидуальной защиты от загрязнений маски (фотошаблона) с помощью близкорасположенной ультратонкой пленки с коэффициентом пропускания $T = 85\%–90\%$ при $\lambda = 13$ нм [6, 7]. Отдельно следует упомянуть применение тонких пленочных структур в качестве мишеней в экспериментах по лазерному ускорению ионов (см. обзорные работы [8, 9]). Толщина пленочной мишени является одним из параметров, определяющих эффективность ускорения ионов. В зависимости от режима облучения (интенсивности и длины волны фемтосекундного лазерного импульса) оптимальная толщина мишени находится в интервале 5–200 нм [9, 10].

В ИФМ РАН накоплен значительный опыт в области изготовления и аттестации свободностоящих тонкопленочных элементов для перечисленных приложений. Изготовлены фазовращатели на просвет на основе многослойных структур Cr/C, Cr/Sc, W/B₄C, эффективно работающие на различных участках спектрального диапазона 1.5–4.5 нм. В частности было продемонстрировано, что структура Cr/Sc обеспечивает на длине волны 3.1 нм фазовый сдвиг 90° при коэффициенте пропускания каждой поляризационной компоненты 0.4%, т.е. является аналогом четвертьволновой пластинки [11]. Разработаны ЭУФ фильтры на основе структур Zr/Si и Al/Si толщиной соответственно 200 и 300 нм на опорных сетках, установленные в каналах на $\lambda = 13.2, 17.1$ и 30.4 нм солнечных телескопов (проект ТЕСИС) [12]. Выполнен ряд работ по изготовлению и изучению свойств многослойных пленочных фильтров для проекционной ЭУФ литографии и диагностики лабораторной плазмы. Апробируются возможности изготовления по используемым методикам тонкопленочных мишеней для экспериментов по лазерному ускорению ионов.

Е.Б.Клюенков, А.Я.Лопатин, В.И.Лучин, Н.Н.Салащенко, Н.Н.Цыбин. Институт физики микроструктур РАН, Россия, Нижегородская обл., Кстовский р-н, 607680 д. Афонино, ул. Академическая, 7; e-mail: luchin@ipm.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 24 декабря 2012 г.

2. Методика изготовления свободностоящих пленочных структур

Для формирования структуры тонкой пленки применяется метод магнетронного напыления. На полированную кремниевую подложку предварительно наносится тонкий металлический подслой, а затем (послойно) материалы самой структуры. Наличие установок с четырьмя или шестью магнетронами позволяет напылять в одном технологическом цикле и подслои, и многослойную структуру, которая при необходимости может состоять из нескольких различных материалов. Конструкция магнетронных установок дает возможность получать однородные по толщине слои с точностью до 1% структуры на подложках диаметром до 200 мм. Для получения свободностоящей пленки подложка с напыленной структурой помещается на поверхность селективного растворителя. После растворения подслоя и заполнения водой емкости, в которой происходило травление, плавающая на поверхности воды пленка вылавливается на рамку с отверстием нужного размера. Рамка при этом ориентируется вертикально, что способствует оптимальному с точки зрения конечного результата распределению сил, действующих на пленку со стороны жидкости. Избежать разрушения тонких пленок на этапе травления и вылавливания позволяет более высокая механическая прочность многослойных структур по сравнению с однородными пленками той же толщины.

3. Свободностоящие абсорбционные фильтры для лазерно-плазменных источников ЭУФ излучения

В лазерно-плазменных экспериментах тонкопленочные элементы выступают чаще всего в качестве абсорбционных фильтров, работающих в паре с многослойными интерференционными зеркалами в светосильных спектральных приборах и каналах регистрации ЭУФ излучения. Необходимость использования фильтров связана с двумя основными моментами: во-первых, плазма интенсивно излучает вне ЭУФ диапазона и, кроме того, является источником рассеянного лазерного света; во-вторых, многослойные зеркала обычно представляют собой металлические покрытия с высокими коэффициентами отражения не только в узком интерференционном максимуме, но и в широкой области спектра, перекрывающей УФ, видимый и ИК диапазоны. Толщину фильтров, предназначенных для ЭУФ диагностики плазмы, в каждом конкретном случае стараются выбирать с некоторым запасом, исходя из априорных соображений о виде спектра. На практике толщина может считаться достаточной, если сигнал с приемника излучения при установке в схему дополнительного фильтра уменьшается пропорционально коэффициенту пропускания последнего на регистрируемой длине волны. Выбор материалов определяется требуемой полосой прозрачности. В спектральной области вблизи $\lambda = 13$ нм прозрачен Si и металлы ряда Y, Zr, Nb, Mo. Нами были изготовлены тонкопленочные фильтры на основе многослойных структур Zr/Si, Nb/Si и Mo/Si с коэффициентами пропускания $T = 40\% - 50\%$ на длине волны 13 нм и $T = 10^{-5} - 10^{-6}$ на длине волны 633 нм. Они применялись, например, в обзорном ЭУФ спектрометре лабораторного лазерно-плазменного источника и в схеме тестирования фоторезистов [13], а так-

же в каналах ЭУФ диагностики плазмы в эксперименте по лазерному ускорению протонов [14].

Для оснащения светосильного спектрометра Гамоша, регистрирующего излучение лазерной плазмы в диапазоне 3–4 нм, изготавливался многослойный Cr/Sc-фильтр [15], подавляющий излучение видимого диапазона не менее чем на шесть порядков. Приемы методики получения свободностоящих пленок были применены также при создании фокусирующего зеркального дисперсионного элемента спектрометра. Цилиндрическое зеркало выполнено в виде многослойной структуры, перенесенной на плоскую поверхность тонкой пластинки слюды с последующим ее изгибом (радиус изгиба 20 мм) [16, 17].

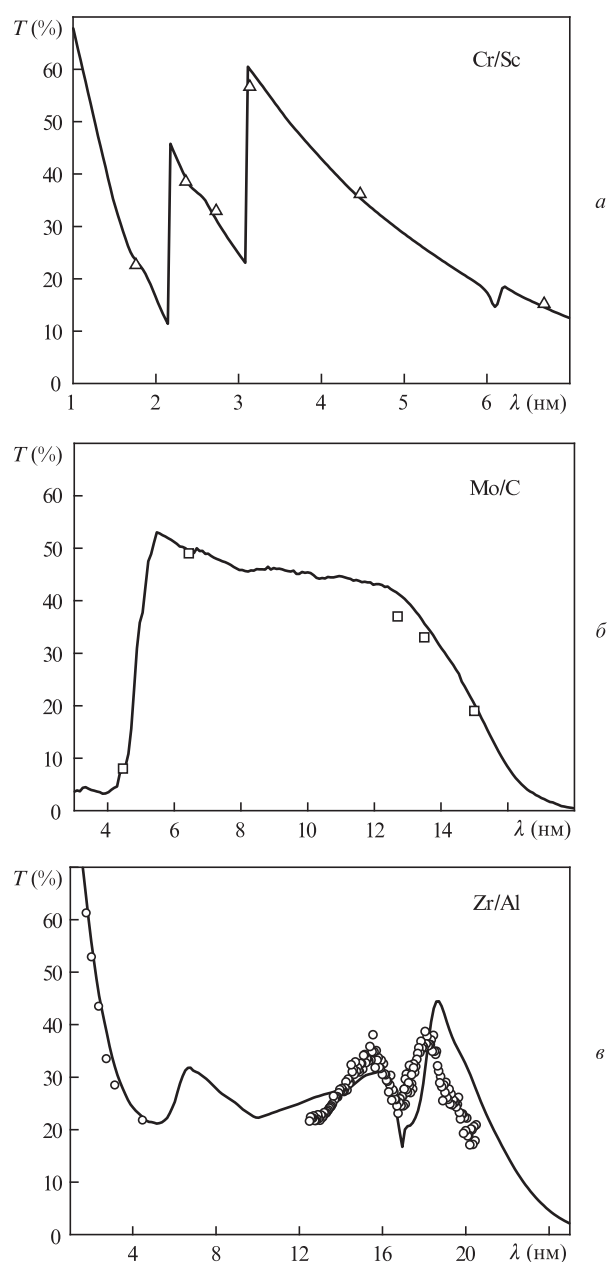


Рис.1. Коэффициенты пропускания некоторых тонкопленочных фильтров в ЭУФ области (сплошная кривая – результаты расчета с использованием оптических констант, доступных по адресу http://henke.lbl.gov/optical_constants, точки – результаты измерений): а – структура Cr/Sc ($N = 63$ – число периодов в многослойной структуре, $d_{Cr} = 1.5$ нм, $d_{Sc} = 1.6$ нм – толщины слоев соответствующих материалов в периоде); б – структура Mo/C ($N = 60$, $d_{Mo} = 2.1$ нм, $d_C = 0.6$ нм); в – структура Zr/Al ($N = 11$, $d_{Zr} = 5.1$ нм, $d_{Al} = 3.6$ нм).

Свободновисящие многослойные фильтры Mo/C и Zr/Al были разработаны и изготовлены для экспериментов по регистрации ЭУФ излучения, генерируемого при отражении лазерного импульса от релятивистского плазменного зеркала [18]. Mo/C-структуры характеризуются достаточно высокими (40%–50%) коэффициентами пропускания в полосе 6–13 нм и эффективным подавлением внеполосного излучения ($T = 5 \times 10^{-6}$ при $\lambda = 633$ нм). При разработке Zr/Al-фильтров основное внимание уделялось обеспечению максимально широкой полосы пропускания. Эти фильтры могут использоваться на любом участке спектра при $\lambda < 22$ нм, но имеют меньшие коэффициенты пропускания в ЭУФ диапазоне и менее эффективно ослабляют фоновое излучение: при $\lambda = 633$ нм $T \approx 10^{-4}$. Спектральные характеристики в ЭУФ области для некоторых многослойных пленок представлены на рис. 1.

Для задач проекционной нанолитографии на длине волны 13 нм были разработаны и изготовлены большеапертурные Mo/ZrSi₂-фильтры повышенной термической стойкости с $T > 70\%$ [4]. Толщина многослойных пленок составляла 54 нм, их коэффициент пропускания в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах не превышал 2%. Поскольку Mo/ZrSi₂-фильтры предполагается устанавливать в литографическую схему с лазерно-плазменным ЭУФ источником на основе CO₂-лазера, то важны также оптические характеристики фильтра на длине волны 10.6 мкм. Коэффициент пропускания измеренных образцов на этой длине волны составил 0.85%, отражения – около 85%. Состав фильтров был выбран по результатам сравнительных испытаний ряда пленочных структур из материалов с малым поглощением в условиях длительного вакуумного нагрева [19]. Показано, что выбранная структура способна выдерживать без существенного снижения прозрачности многочасовой нагрев до температур 900–950 °С, соответствующих выделяемой на единицу площади пленки мощности до 5 Вт/см². Продemonстрирована возможность изготовления свободновисящего Mo/ZrSi₂-фильтра с апертурой 160 мм.

4. Перспективы применения ультратонких пленочных структур

В большинстве экспериментов с лазерно-плазменными источниками толщина используемых для фильтрации ЭУФ излучения пленок составляет 100–200 нм. Развитая методика позволяет получать ультратонкие, достаточно прочные пленки толщиной в десятки нанометров. Мы рассчитываем на их возможное применение как элементов проекционной схемы ЭУФ нанолитографа (спектрального фильтра и защитной пленки, предохраняющей маску от загрязнений), а также в качестве мишеней в экспериментах по лазерному ускорению ионов.

Приемлемым для применения элемента на пролет в промышленном нанолитографе считается $T = 70\%$ – 80% . Для защитной пленки, расположенной перед отражающей маской, ввиду двойного прохода излучения (падающего и отраженного от маски) требования к прозрачности более жесткие: $T = 85\%$ – 90% . В ЭУФ диапазоне такие значения достижимы при толщине пленки 20–30 нм. Диаметр защитной пленки должен быть примерно 170 мм. Как и спектральный фильтр, защитная пленка должна длительно работать в нанолитографе при высокой температуре в жестких условиях разреженной газовой среды, содержащей водород, остаточные кислород, пары воды, радикалы и различные при-

меси. Первые результаты, полученные с помощью развитой методики, таковы: изготовлены образцы ультратонких свободновисящих кремниевых и многослойных защитных пленок толщиной 20–25 нм на основе структур Mo/ZrSi₂ и Mo/NbSi₂ с $T = 84\%$ – 90% на 13.5 нм [7]. В состав пленочных структур входит покрытие из силицида молибдена, замедляющее процесс окисления в условиях больших тепловых нагрузок. Максимальная апертура изготовленных образцов – 80 мм (рис. 2). Несмотря на малую толщину защитной пленки, в значительной степени сохраняется ее спектральная селективность. Излучение на длине волны 10.6 мкм поддается, по данным измерений, в 10 раз (на одном проходе), ЭУФ излучение блокируется еще более эффективно.

Рассмотренная методика получения ультратонких пленок может оказаться полезной при поиске оптимальных мишеней для различных режимов лазерного ускорения ионов. Необходимость оптимизации толщины мишени продемонстрирована, например, авторами работы [10], в которой наблюдалось формирование моноэнергетического пучка ионов углерода C⁶⁺ с энергией 30 МэВ при взаимодействии лазерного импульса (длительность 45 фс, интенсивность 5×10^{19} Вт/см²) с ультратонкими алмазоподобными пленками толщиной $d = 2.9$ – 40 нм. Максимальная энергия ионов достигалась при $d = 5.3$ нм.

Для демонстрации возможностей развитой методики мы изготовили образец углеродной мишени, выполненный в виде пленки толщиной 5 нм на металлической сетке размером 33×38 мм с квадратной ячейкой со стороной 1.7 мм (рис. 3). Полученная с использованием магнетронного напыления углеродная пленка, по-видимому, уступа-

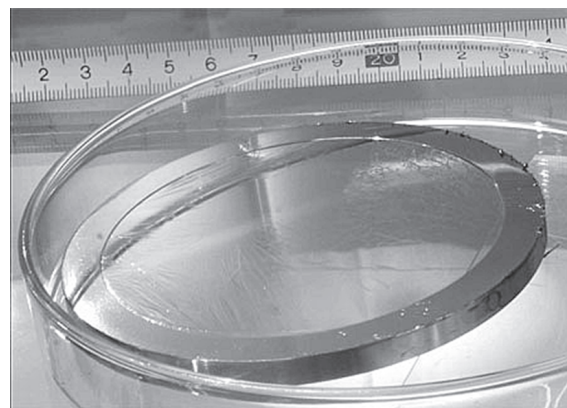


Рис. 2. Свободновисящая тонкая Mo/NbSi₂-пленка диаметром 80 мм – прототип защитного экрана для маски в схеме проекционной ЭУФ литографии; $T = 84\%$ при $\lambda = 13$ нм.

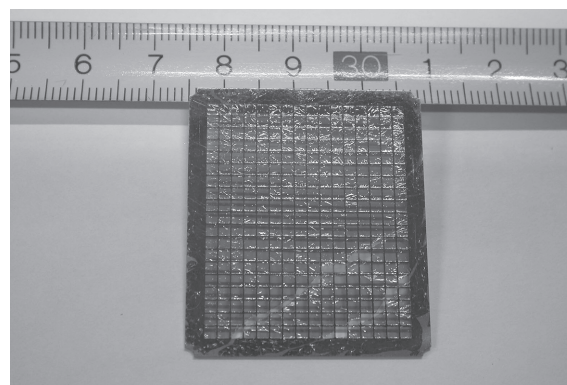


Рис. 3. Демонстрационный образец мишени для экспериментов по лазерному ускорению ионов. Толщина пленки углерода 5 нм.

ет по механической прочности алмазоподобной фольге, но предлагаемая конструкция мишени имеет то преимущество, что область разрушения пленки под действием лазерного импульса может быть ограничена пределами одной ячейки сетки. Также для изготовления мишеней мы можем воспользоваться различными материалами и многослойными композициями. В частности легко реализовать двухслойную мишень, которая состоит из очень тонкого слоя легких и более толстого слоя тяжелых атомов. Оптимальная для эффективного ускорения ионов толщина слоя тяжелых атомов зависит от интенсивности и длины волны излучения. Слой легких атомов должен быть много тоньше, чтобы ионный пучок был моноэнергетическим [9]. Примером, демонстрирующим возможность формирования двухслойной мишени из легких и тяжелых атомов, может служить изготовленная нами свободновисящая пленочная структура, состоящая из Mo/Si-основы толщиной 42 нм и слоя кремния толщиной 20 нм. Многослойность структуры обеспечивает необходимую для выполнения технологических операций и последующей эксплуатации мишени прочность свободновисящей пленки. Не представляет труда сформировать структуру с очень тонким слоем кремния или элемента с меньшей атомной массой.

5. Заключение

Работы по созданию источников и оборудования для высокопроизводительных установок проекционной ЭУФ литографии способствовали развитию методик изготовления свободновисящих тонких пленок с труднодостижимыми в недавнем прошлом характеристиками. Это не только расширяет возможности традиционного применения тонкопленочных элементов в качестве абсорбционных фильтров ЭУФ диапазона, но и закладывает основу для новых вариантов использования. Ультратонкие пленки толщиной 20–25 нм с апертурой более 100 нм будут тестироваться как защитные экраны для масок в проекционных литографических установках. Изготовленные по разработанной методике свободновисящие пленки еще меньшей толщины, однородные или состоящие из нескольких слоев, рассматриваются нами в качестве перспективных мишеней для лазерно-плазменных экспериментов по генерации высокоэнергетичных монохроматических пучков ионов. Продемонстрирован образец монослойной тонкопленочной мишени в виде углеродной пленки толщиной 5 нм на поддерживающей сетке.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 10-02-01073-а и программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения».

1. Kortright J.B., Underwood J.H. *Nucl. Instr. Meth. A*, **291**, 272 (1990).
2. Kortright J.B., Kimura H., Nikitin V., Yamamoto M., Yanagihara M. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 2963 (1992).
3. Mitrofanov A.V., Tokarchuk D.N. *Nucl. Instr. Meth. A*, **282**, 546 (1989).
4. Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Kluev E.B., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Salashchenko N.N., Tsybin N.N., Sjmaenok L.A., Banine V.E., Yakunin A.M. *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, **11**, 021115 (2012).
5. Banine V.Y., Koshelev K.N., Swinkels G. *J. Phys. D—Appl. Phys.*, **44**, 18 (2011).
6. Shroff Y.A., Leeson M., Yan P.Y., Gullikson E., Salmassi F. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **28**, C6E36 (2010).
7. Salashchenko N., Luchin V., Lopatin A., Tsybin., Chkhalo N., Kluev E., Drozdov M., Sjmaenok L., Belik V., Banine V., Yakunin A., Scaccabarozzi L., Diago P.R., Nikipelov A. <https://www.semtech.org/10258/poster/P-OP-12.pdf>.
8. Коржиманов А.В., Гоносков А.А., Хазанов Е.А., Сергеев А.М. *УФН*, **181**, 19 (2011).
9. Daido H., Nishiuchi M., Pirozhkov A.S. *Rep. Prog. Phys.*, **75**, 056401 (2012).
10. Henig A., Steinke S., Schnürer M., Sokollik T., Hörlein R., Kiefer D., Jung D., Schreiber J., Hegelich B.M., Yan X.Q., Meyer-ter-Vehn J., Tajima T., Nickles P.V., Sandner W., Habs D. *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 245003 (2009).
11. Андреев С.С., Бибишкин М.С., Kimura H., Клюев Е.Б., Лопатин А.Я., Лучин В.И., Прохоров К.А., Салашченко Н.Н., Hirono T., Цыбин Н.Н., Чхало Н.И. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **69**, 207 (2005).
12. Кузин С.В., Шестов С.В., Перцов А.А., Рева А.А., Зуев С.Ю., Лопатин А.Я., Лучин В.И., Жоу Х., Хуо Т. *Поверхность*, №7, 19 (2008).
13. Bulgakova S.A., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Mazanova L.M., Molodnyakov A.S., Salashchenko N.N. *Nucl. Instr. Meth. A*, **448**, 487 (2000).
14. Ragozin E.N., Pirozhkov A.S., Yogo A., Ma J., Ogura K., Orimo S., Sagisaka A., Mori M., Li Zh., Nishiuchi M., Daido H. *Rev. Sci. Instrum.*, **77**, 123302 (2006).
15. Бороздин Ю.Э., Казаков Е.Д., Лучин В.И., Салашченко Н.Н., Толстихина И.Ю., Чернов В.В., Чхало Н.И., Шевелько А.П., Якушев О.Ф. *Письма в ЖЭТФ*, **87**, 33 (2008).
16. Бибишкин М.С., Казаков Е.Д., Лучин В.И., Салашченко Н.Н., Чернов В.В., Чхало Н.И., Шевелько А.П. *Квантовая электроника*, **38**, 169 (2008).
17. Лопатин А.Я., Лучин В.И., Салашченко Н.Н., Чхало Н.И., Шевелько А.П., Якушев О.Ф. *ЖТФ*, **80**, 105 (2010).
18. Pirozhkov A.S., Esirkepov T.Zh., Kando M., Fukuda Y., Ma J., Chen L.-M., Daito I., Ogura K., Homma T., Hayashi Y., Kotaki H., Sagisaka A., Mori M., Koga J.K., Kawachi T., Daido H., Bulanov S.V., Kimura T., Kato Y., Tajima T. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **112**, 042050 (2008).
19. Chkhalo N.I., Gusev S.A., Drozdov M.N., Kluev E.B., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Pestov A.E., Salashchenko N.N., Shmaenok L.A., Tsybin N.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7521**, 752105, (2010).