

Влияние шероховатостей, детерминированных и случайных ошибок в толщинах пленок на отражательные характеристики аperiodических зеркал для ЭУФ диапазона

П.К.Гайкович, В.Н.Полковников, Н.Н.Салащенко, Н.И.Чхало, Ф.Шеферс, А.Соколов

На примере трех аperiodических многослойных Mo/Si-зеркал (АМЗ) для диапазонов длин волн 17–21 нм, 24–29 нм и 28406–33 нм численно изучено влияние детерминированных по линейному закону и случайных флуктуаций толщин пленок и межслойных шероховатостей на спектральные зависимости коэффициентов отражения. Результаты моделирования используются для решения обратной задачи по восстановлению межслойной шероховатости и индивидуальных толщин пленок по измеренным зависимостям коэффициентов отражения экстремального УФ излучения. Показано, что «асимметрия» границ влияет на величину и наклон плато коэффициента отражения. Случайные флуктуации толщин пленок с дисперсией 1%–2% слабо влияют на отражательные характеристики АМЗ и позволяют надежно восстановить индивидуальные толщины пленок. Флуктуации с дисперсией 8%–10% дают возможность оценить индивидуальные толщины, однако кривая отражения при этом существенно отличается от желаемой. Большие флуктуации не позволяют восстановить структуру АМЗ. Сформулированы основные критерии, которые должны быть выполнены при синтезе высококачественных АМЗ.

Ключевые слова: аperiodические многослойные зеркала, экстремальное ультрафиолетовое излучение, тонкие пленки.

1. Введение

Аperiodические многослойные зеркала (АМЗ) с уширенной, по сравнению с традиционными периодическими структурами, спектральной (угловой, при фиксированной длине волны) полосой отражения широко используются в научных исследованиях. Они применяются в астрономии для увеличения интегрального коэффициента отражения телескопов скользящего падения, работающих в жестком рентгеновском диапазоне [1], и в экстремальном УФ (ЭУФ) диапазоне в составе «стигматических» спектрометров с дифракционными решетками для исследований Солнца [2]. Применение АМЗ в рентгеновской микроскопии в окне прозрачности воды (длины волн 2.3–4 нм) увеличивает регистрируемый сигнал в два-три раза [3], что является особо важным при работе с лабораторными источниками излучения. Прибор состоит, как минимум, из двух многослойных зеркал для проекционного объектива и зеркала-коллектора, с помощью которого освещается исследуемый образец и в качестве которого, с точки зрения величины сигнала, также предпочтительнее использовать многослойное зеркало [4]. В случае периодических многослойных зеркал, спектральная полоса отражения которых в этом диапазоне $\Delta\lambda/\lambda$ составляет 1/200–1/300, для эффективной работы схемы необходимо, чтобы распределение периодов по поверхности каждого зеркала было выполнено с лучшей точностью ($\sim 0.1\%$) и для каж-

дого луча, прошедшего через систему зеркал, выполнялось условие Брэгга. В этом смысле зеркала должны быть «тождественны» с точностью около 0.1%. На практике это трудно реализуемо. Применение АМЗ существенно снижает требования к точности изготовления пленок, что делает реальным развитие высокоразрешающей и эффективной микроскопии на основе многослойных зеркал нормального падения.

Среди различных применений АМЗ следует также отметить их применение для одно- и двумерной фокусировки жесткого рентгеновского излучения в системе Киркпатрика–Баеза [5] и для управления пространственными, временными и спектральными характеристиками фемто- и субфемтосекундных импульсов электромагнитного излучения в ЭУФ области [6]. В последнее время в связи с работами по исследованию экстремального состояния вещества интерес представляют уже атто- и субаттосекундные импульсы, спектр которых лежит в рентгеновском или ЭУФ диапазоне [7].

На практике для успешного решения конкретной проблемы изготовления оптимального АМЗ нужно решить три основные задачи. Первая – с использованием целевой функции спектральной (угловой) зависимости коэффициента отражения рассчитать оптимальную структуру (толщины слоев) АМЗ (прямая задача). Вторая – для коррекции технологического процесса восстановить «истинные» толщины слоев синтезированных АМЗ по данным рентгеновской рефлектометрии (обратная задача). И третья задача – охарактеризовать изготовленное зеркало.

К настоящему времени для решения прямой задачи существуют различные алгоритмы расчета: от вероятностных методов Монте-Карло до решения задачи глобальной минимизации, подтвердившие свою работоспособность, в том числе и экспериментально [8–11]. Тем не менее и по этой проблеме остается ряд неизученных вопросов. Во-первых, наличие дефектов пленок (отличие

П.К.Гайкович, В.Н.Полковников, Н.Н.Салащенко, Н.И.Чхало. Институт физики микроструктур РАН, Россия, 603958 Н.Новгород, Академическая ул., 7; e-mail: chkhalo@ipmras.ru
F.Schäfers, A.Sokolov. Helmholtz-Zentrum Berlin, Institute for Nanometer Optics and Technology, Albert-Einstein-Strasse 15, D-12489 Berlin, Germany

плотностей материалов от их значений для массивных материалов, шероховатости или переходные границы раздела слоев, связанные с диффузионным и химическим взаимодействием материалов) вызывает не только уменьшение реальных коэффициентов отражения, но и существенное изменение формы спектральной кривой отражения. Более того, учет этих факторов в самом начале оптимизации зеркала может приводить к совершенно другим толщинам слоев в АМЗ и к улучшению характеристик реальных АМЗ по сравнению со случаем, когда оптимизация толщин проводилась для «идеального» АМЗ. Этот эффект, в частности, наблюдался в области энергий фотонов 10 кэВ [12]. В ЭУФ диапазоне из-за сильного поглощения можно ожидать еще большего влияния дефектов пленок на оптимизацию толщин пленок в АМЗ.

Примеров решения обратной задачи определения реальных толщин пленок в АМЗ по данным отражения в рентгеновском диапазоне в литературе мы не обнаружили. Можно лишь отметить, что по сравнению с обратной задачей для периодических зеркал, где параметрами выступают плотности материалов пленок, толщины пленок в периоде и вид функций переходных слоев (фактически вид функции диэлектрической проницаемости в пределах одного периода многослойного зеркала) [13, 14], в АМЗ число определяемых параметров увеличивается с ростом числа слоев в многослойной структуре.

Для поиска подходов и выяснения проблем решения обратной задачи для АМЗ в настоящей работе численно изучается влияние детерминированных по линейному закону и случайных флуктуаций толщин пленок и межслойных шероховатостей на спектральные зависимости коэффициентов отражения Mo/Si-АМЗ, предназначенных для спектрогелиографа «Кортес» [15]. По результатам исследований делаются выводы о влиянии шероховатости на коэффициенты отражения и необходимости ее учета при расчете оптимальных толщин пленок АМЗ, а также о возможности разделения влияния случайных и детерминированных изменений толщин пленок на коэффициенты отражения АМЗ по характеру их влияния на форму и смещение по спектру кривой отражения. Результаты численного моделирования прямой задачи использовались при восстановлении реальных параметров АМЗ по данным рентгеновского отражения. Показано, что такой подход позволяет оптимизировать конкретные толщины слоев АМЗ и затем восстанавливать толщины пленок в реальных АМЗ при малых (максимальное отклонение от номинального значения не более 10%) флуктуациях толщин. При больших флуктуациях задача не имеет удовлетворительного решения. Результаты этого исследования будут учтены при синтезе АМЗ для практических применений.

2. Прямая задача. Метод расчета

В работе численно исследовались три Mo/Si-АМЗ с равномерными по спектру и максимально возможными по величине коэффициентами отражения в диапазонах длин волн 17–21 нм, 24–29 нм и 28–33 нм. Экспериментально изучались две первые структуры. Расчет толщин слоев проводился для идеальных структур (плотности материалов пленок табличные, межслойная шероховатость нулевая). Минимальная толщина слоя была выбрана равной 2 нм, число слоев не превышало 40. Допустимые ва-

риации коэффициентов отражения в пределах плато на спектральной зависимости коэффициента отражения составляли 2% для диапазона 17–21 нм, 0.5% для диапазона 24–29 нм и 0.5% для диапазона 28–33 нм.

Задача определения толщин слоев АМЗ состоит в минимизации целевой функции, которая в нашем случае имела вид

$$F(\{d\}, \theta_0) = \int \{-w_1 R_i(d, \lambda) + [w_2 (R_0 - R_i(d, \lambda))]^2\} d\lambda,$$

где $\{d\} = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ – толщины слоев; N – число слоев; θ_0 – угол скольжения рентгеновского излучения; $R_0(\lambda)$ – желаемый профиль коэффициента отражения; $R_i(\lambda)$ – текущий расчетный профиль коэффициента отражения, меняющийся в ходе решения; $w_{1,2}$ определяют веса интегрального отражения и квадратичного отклонения реального коэффициента отражения от желаемого соответственно. Первое слагаемое обеспечивает максимальное интегральное отражение, второе – минимальное отклонение от заданного профиля. В случае прямой задачи профиль R_0 представлял собой плато с наперед заданным постоянным значением в определенном промежутке длин волн, в случае обратной задачи – отражательный профиль по данным измерений реальных образцов.

Расчет коэффициента отражения многослойных зеркал проводился по классическим итерационным формулам Парратта [16]. Межслойные шероховатости учитывались путем умножения соответствующих комплексных френелевских коэффициентов отражения на факторы Дебая–Валлера на каждой межслойной границе (такая операция справедлива в случае коррелированных шероховатостей [17]). Под межслойной шероховатостью в данном случае подразумевается совокупность как, собственно, геометрических шероховатостей, так и ширин переходных областей на границах раздела, связанных с диффузионным и химическим взаимодействием материалов слоев.

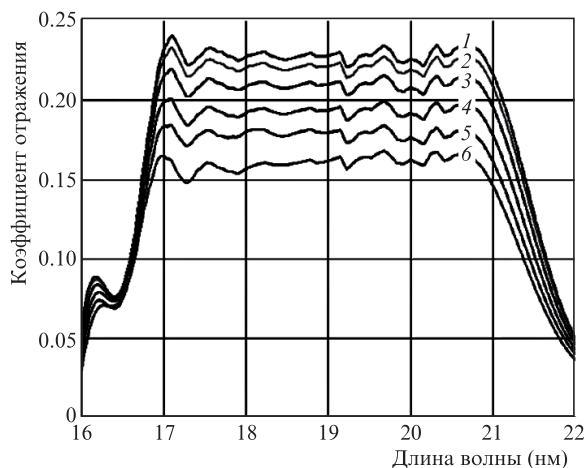
Нахождение экстремума целевой функции проводилось методом покоординатного спуска, в ходе которого целевая функция минимизировалась последовательно для каждого слоя, при этом использовалась формула для зависимости коэффициента отражения R_i от толщины любого слоя, записанная в явном виде [3], что позволило при однократном использовании алгоритма пересчитывать рекуррентные соотношения лишь один раз, уменьшая тем самым время вычислений.

Выполнено численное моделирование влияния как случайных ошибок в толщинах слоев структур, так и детерминированного их отклонения. Случайные ошибки формировались генератором случайных чисел с нормальным распределением, нулевым средним значением и единичной дисперсией [18]. Влияние детерминированного изменения толщин слоев исследовалось для значений отклонения Δd в пределах ± 0.15 нм.

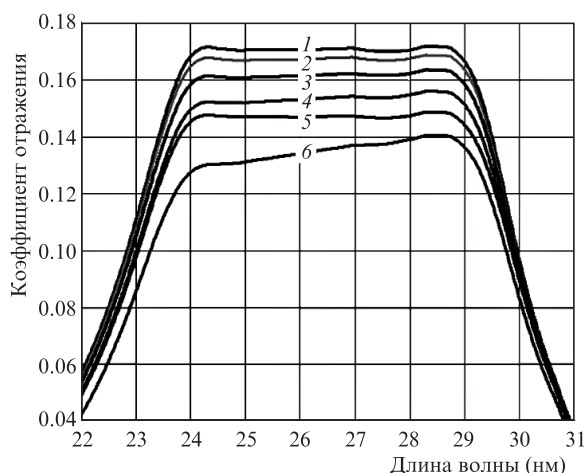
Программа оптимизации АМЗ, решающая задачу получения максимального равномерного интегрального коэффициента отражения в заданной полосе длин волн, была реализована на языке Fortran. Создан графический интерфейс АМуLet (aperiodic multilayer engineering tools), значительно облегчающий работу с программным кодом. В алгоритм программы АМуLet заложена возможность решения обратной задачи при наличии межслойных шероховатостей с самого старта итерационного процесса.

2.1. Влияние межслойных шероховатостей на коэффициенты отражения

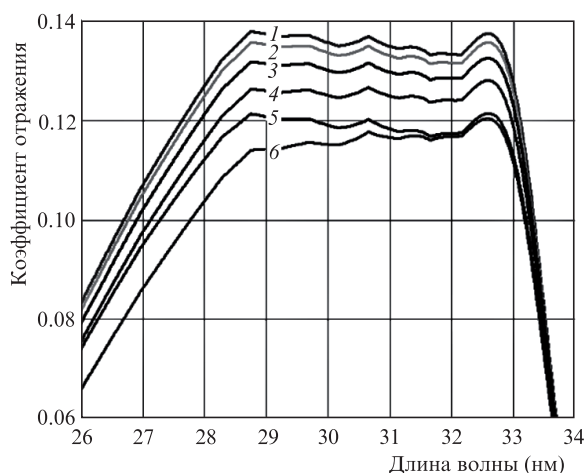
На рис.1 приведены расчетные спектральные зависимости коэффициентов отражения для трех АМЗ, оптимизированных для различных спектральных участков и для нескольких значений среднеквадратичной шероховатости межслойных границ. Видно, что с ростом шероховатостей коэффициент отражения зеркал предсказуемо уменьшается, причем исходная степень равномерности в



а



б



в

Рис.1. Расчетные спектральные зависимости коэффициентов отражения Mo/Si-AMЗ в диапазонах 17–21 нм (а), 24–29 нм (б) и 28–33 нм (в) для различных значений шероховатости на границах Mo на Si и Si на Mo: 0 и 0 (1), 0,3 нм и 0,3 нм (2), 0,5 нм и 0,5 нм (3), 0,7 нм и 0,7 нм (4), 1,2 нм и 0,6 нм (5), 0,6 нм и 1,2 нм (6).

области плато в целом сохраняется. Однако для дальнейшей диагностики АМЗ представляет интерес тот факт, что в случае разных величин шероховатостей или переходных границ между слоями (многослойная структура с «несимметричными» шероховатостями) спектральная зависимость плато имеет наклон, направление которого зависит от того, на какой именно границе шероховатость больше. Это хорошо заметно в случае явного превышения шероховатостью на границе слоя Mo на слое Si (Mo на Si) шероховатости на границе слоя Si на слое Mo (Si на Mo), что наблюдается в экспериментах. Наклон плато увеличивается при переходе в более длинноволновый диапазон. Таким образом, меньший по сравнению с рассчитанным теоретически коэффициент отражения при наличии явного наклона плато на спектральной зависимости косвенно указывает на асимметрию межслойных границ и может быть использован для оптимизации алгоритма решения обратной задачи.

Ранее в [12] на примере АМЗ с коэффициентом отражения на длине волны 0,154 нм было показано, что при учете межслойных шероховатостей с самого старта работы алгоритма оптимизации можно добиться значительного улучшения отражательных характеристик по сравнению с АМЗ, межслойные границы которых изначально считались идеальными, а шероховатость учитывалась уже после проведенного расчета. Для изучения этого эффекта в ЭУФ диапазоне были оптимизированы Mo/Si-AMЗ для следующих значений шероховатости: 1,2 нм для границы Mo на Si и 0,6 нм для границы Si на Mo. Выбранные параметры шероховатости определены по результатам исследования периодических многослойных Mo/Si-структур с периодами около 7 нм. Данные значения шероховатостей закладывались в начальное приближение при решении задачи оптимизации параметров зеркал. Величины плотностей тонких пленок также определялись экспериментально по данным исследования соответствующих периодических структур. В расчетах использовалась плотность молибдена, равная 0,95 от табличного значения. Плотность слоев кремния принималась табличной.

Нужно отметить, что априорный учет наличия межслойных шероховатостей не привел к большому увеличению отражательной способности зеркала, что можно, например, увидеть на рис.2,а и в. Единственный положительный эффект, полученный при априорном учете асимметрии шероховатостей, связан с устранением наклона плато. На рис.2,б приведен пример такого улучшения.

Таким образом, проведенное численное исследование позволяет сделать ряд выводов, важных как для оптимизации составов пленок АМЗ, так и для восстановления параметров слоев по данным рефлектометрических измерений. Во-первых, в наибольшей степени шероховатость влияет на величину коэффициента отражения на плато. При этом важным является учет возможной «асимметрии» межслойных границ. Во-вторых, шероховатость не приводит к дополнительным осцилляциям коэффициента отражения на плато, однако может повлиять, особенно в длинноволновой области, на его наклон. В-третьих, при проектировании АМЗ для конкретных приложений в ЭУФ диапазоне необходимо (или крайне желательно) знать величины межслойных шероховатостей и, в принципе, реальные плотности материалов слоев, которые и сами в общем случае зависят от толщин слоев. Эти величины можно получить в результате исследования соответствующих периодических многослойных зеркал с близки-

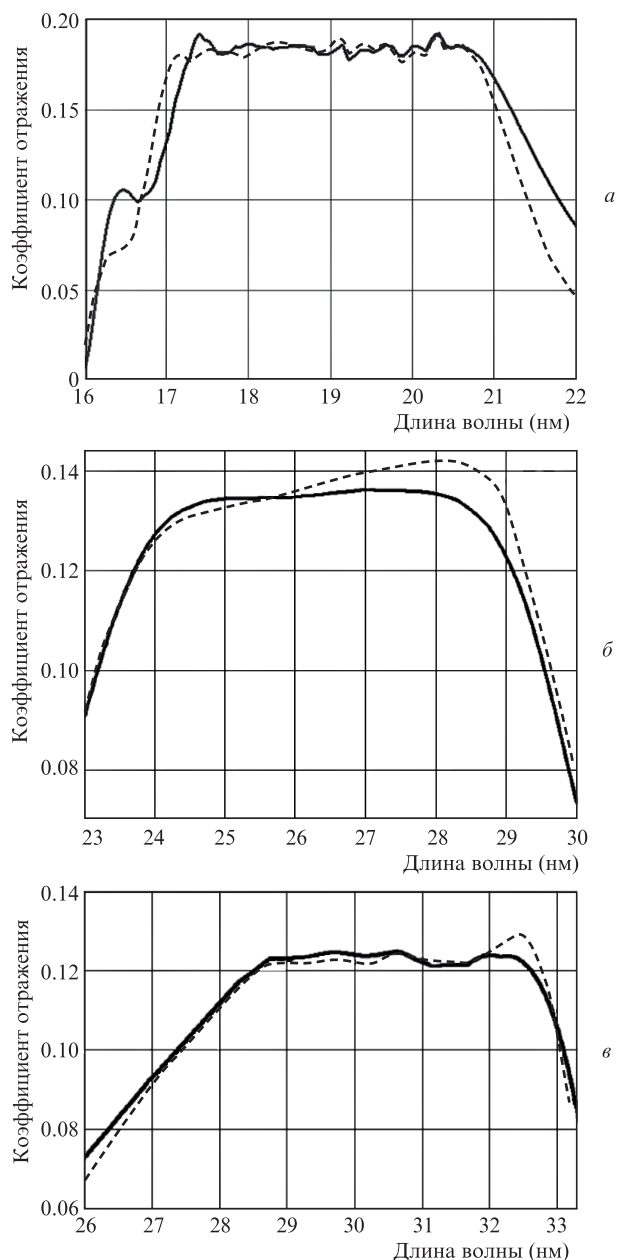


Рис.2. Расчетные спектральные зависимости коэффициентов отражения Mo/Si-AMЗ с шероховатостями 1.2 нм для Mo на Si и 0.6 нм для Si на Mo в диапазонах 17–21 нм (а), 24–29 нм (б) и 28–33 нм (в). Штриховые кривые соответствуют оптимизации толщин пленок АМЗ с последующим учетом шероховатостей на границах, а сплошные кривые – оптимизации с учетом шероховатостей в начале расчета.

ми толщинами слоев. Все эти данные необходимо учитывать либо с самого старта работы алгоритма оптимизации, либо при повторном решении задачи оптимизации. Такой подход дает возможность без потерь интегрального отражения сохранить равномерность коэффициента отражения в желаемом диапазоне.

2.2. Влияние детерминированных и случайных изменений толщин пленок на коэффициент отражения АМЗ

Другими факторами, влияющими на форму спектральной зависимости коэффициента отражения и его величину, являются ошибки в толщинах пленок в АМЗ. Ошибки могут быть обусловлены как случайными, так и

систематическими процессами. Например, в случае магнетронного распыления к случайным ошибкам приводят флуктуации напряжения на магнетронах и давления рабочего газа, а также микропробой. Систематические ошибки связаны с постоянной выработкой зоны эрозии мишени в процессе синтеза и с неточно определенным соответствием между скоростью прохода образца над мишенью и скоростью напыления пленок. Эта проблема особенно остро стоит при синтезе АМЗ, т. к. в отличие от случая периодических зеркал скорость прохода изменяется в широких пределах в зависимости от толщины слоев. Анализ влияния детерминированных и случайных изменений толщин пленок в АМЗ на коэффициенты отражения является крайне актуальным по двум причинам. Во-первых, он позволяет оценить их влияние на спектральные кривые отражения и тем самым выработать критерии допустимых ошибок, которые, конечно же, зависят от каждой конкретной задачи. Во-вторых, этот анализ помогает решать обратную задачу по восстановлению реальных параметров АМЗ по измеренным коэффициентам отражения.

На рис.3 приведены спектральные зависимости коэффициентов отражения для трех АМЗ с расчетными толщинами пленок и детерминированными изменениями толщин в каждом периоде на одну и ту же величину в пределах ± 0.15 нм, что соответствует изменению периода примерно на 1%. Видно, что в наибольшей степени такие изменения влияют на положение плато коэффициента отражения, сдвигая его в длинноволновую или коротковолновую область (в зависимости от знака Δd). Высота и спектральная ширина плато коэффициента отражения, а также его осцилляции изменяются незначительно. При этом для третьего АМЗ наблюдается большее уменьшение коэффициента отражения. Видно также, что чем больше изменение периода, тем больше будет сдвигаться и искажаться исходный профиль.

Влияние случайных флуктуаций толщин пленок с различными дисперсиями (0.3%, 0.5%, 1%, 2% и 5%) на коэффициент отражения в середине каждого спектрального диапазона для трех АМЗ иллюстрирует рис.4, на котором приведены огибающие гистограмм распределения коэффициентов отражения в середине каждого спектрального диапазона для 3000 реализаций. Анализ приведенных кривых, а также тысяч случайных реализаций показывает, что эти ошибки слабо влияют на ширину и положение плато коэффициента отражения, только незначительно изменяя его форму. Наиболее сильное влияние флуктуации оказывают на осцилляции и абсолютное значение коэффициента отражения. В частности, при флуктуациях толщин слоев с дисперсией 1% полуширина распределения коэффициента отражения для первого АМЗ составляет 0.71%, для второго – 0.32% и для третьего – 0.66%. При флуктуациях с дисперсией 5% полуширина распределения коэффициента отражения превышает 25% от номинального значения, и практически отсутствует надежда получить желаемый равномерный коэффициент отражения. Эффект возрастает при смещении в длинноволновую область. Из приведенных данных можно сделать вывод, что, несмотря на широкую полосу отражения АМЗ (в данном случае $\Delta\lambda/\lambda \approx 25\%$), дисперсии допустимых флуктуаций толщин лежат в диапазоне 1%–2%. Это условие существенно жестче, чем в случае периодических многослойных зеркал, где допустимые флуктуации могут быть сравнимы с относительной полосой пропускания зеркал.

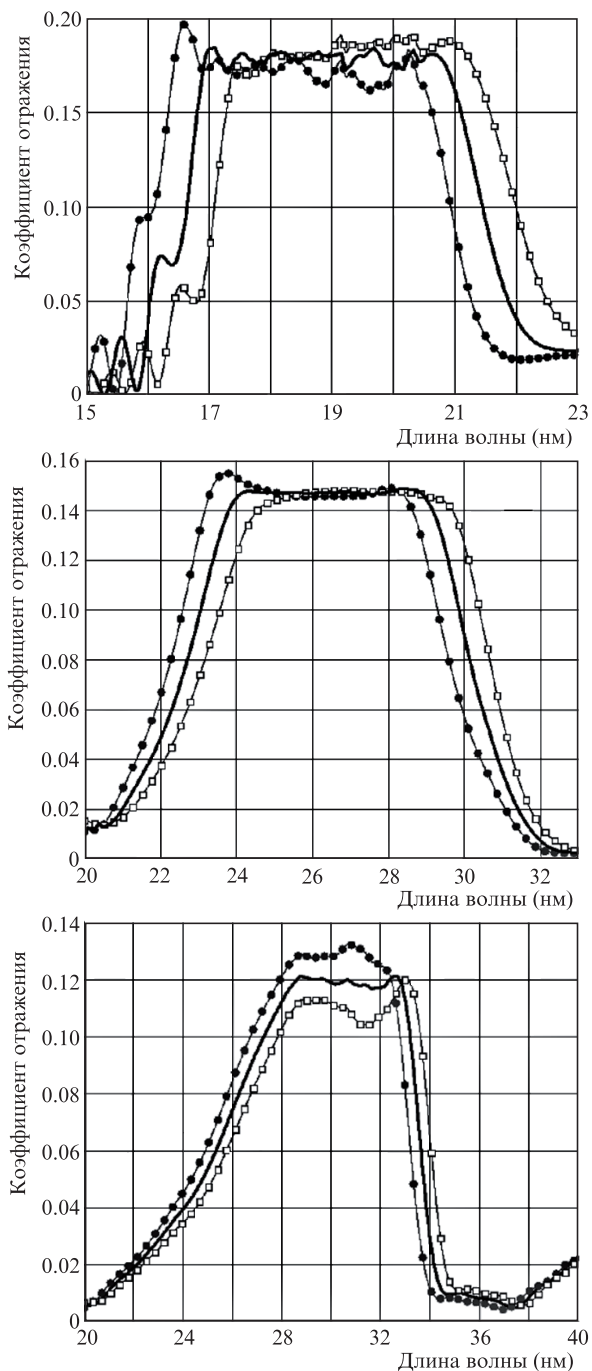


Рис.3. Спектральные зависимости коэффициентов отражения для трех АМЗ с расчетными (сплошные кривые) и детерминированными изменениями толщин в каждом периоде $\Delta d = -0.15$ (●) и 0.15 нм (□).

3. Эксперимент. Обратная задача

Образцы были синтезированы в ИФМ РАН методом магнетронного распыления в среде аргона при давлении 8×10^{-4} Тор. Напыление осуществлялось на кремниевые подложки со среднеквадратичной шероховатостью поверхности $0.2-0.3$ нм. Поскольку реальные шероховатости в многослойной структуре составляют $0.6-1.2$ нм, эта величина не окажет влияния на коэффициент отражения многослойного зеркала. Предварительные измерения отражательных характеристик выполнялись на лабораторном рефлектометре [19] в ИФМ, затем подробно изучались на синхротроне BESSY-2 [20–23]. На рис.5,а приведены спектральные зависимости коэффициента отраже-

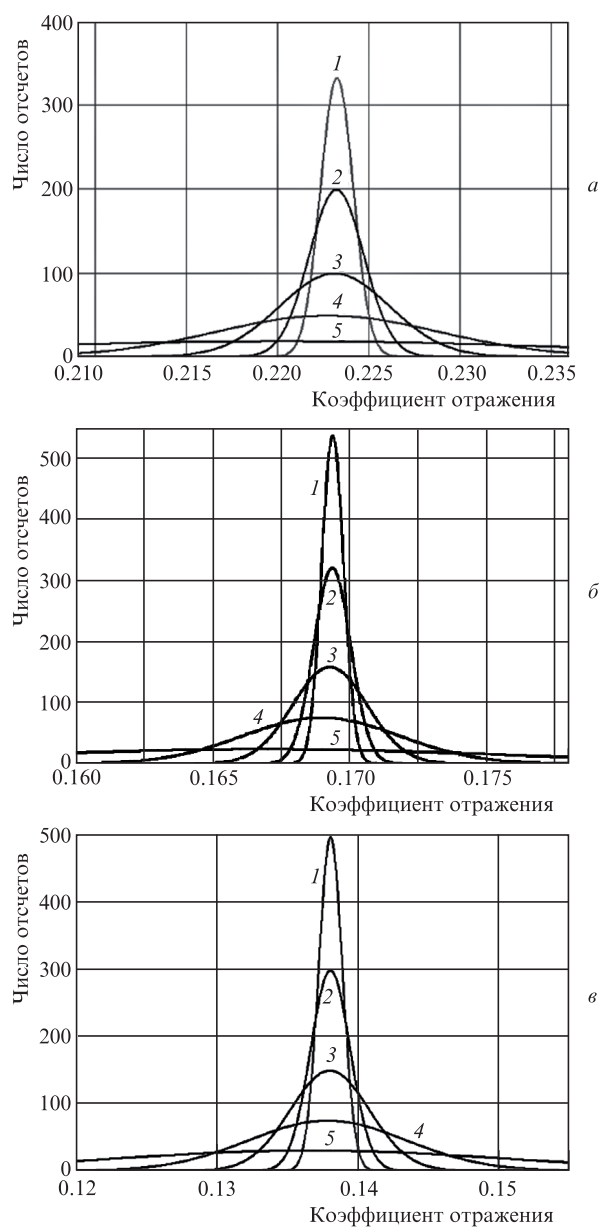


Рис.4. Огибающие гистограмм распределений коэффициентов отражения АМЗ, рассчитанные для дисперсий флуктуаций толщин пленок 0.3% (1), 0.5% (2), 1% (3), 2% (4) и 5% (5), в диапазонах 17–21 нм (а), 24–29 нм (б) и 28–33 нм (в).

ния для первого АМЗ. Для упрощения исследования не учитывалось детерминированное изменение толщин слоев, и аппроксимация проводилась только по двум значениям шероховатости (для границ Мо на Si и Si на Мо) и по случайным отклонениям толщин пленок от номинальных значений. Для ускорения процедуры поиска наилучшей реализации максимальное отклонение толщин пленок от номинальных было принято равным $\pm 10\%$ (среднеквадратичное отклонение составляет $2\%-3\%$, что вполне достаточно для практических применений). Сплошная кривая на рис.5,а, наилучшим образом совпадающая с результатами эксперимента, была получена при значениях шероховатости 1.15 нм на границе Мо на Si и 0.55 нм – на границе Si на Мо. Эти значения хорошо совпадают с данными для периодических многослойных зеркал.

На рис.5,б и в приведены расчетные и восстановленные по кривой отражения толщины пленок в АМЗ, а так-

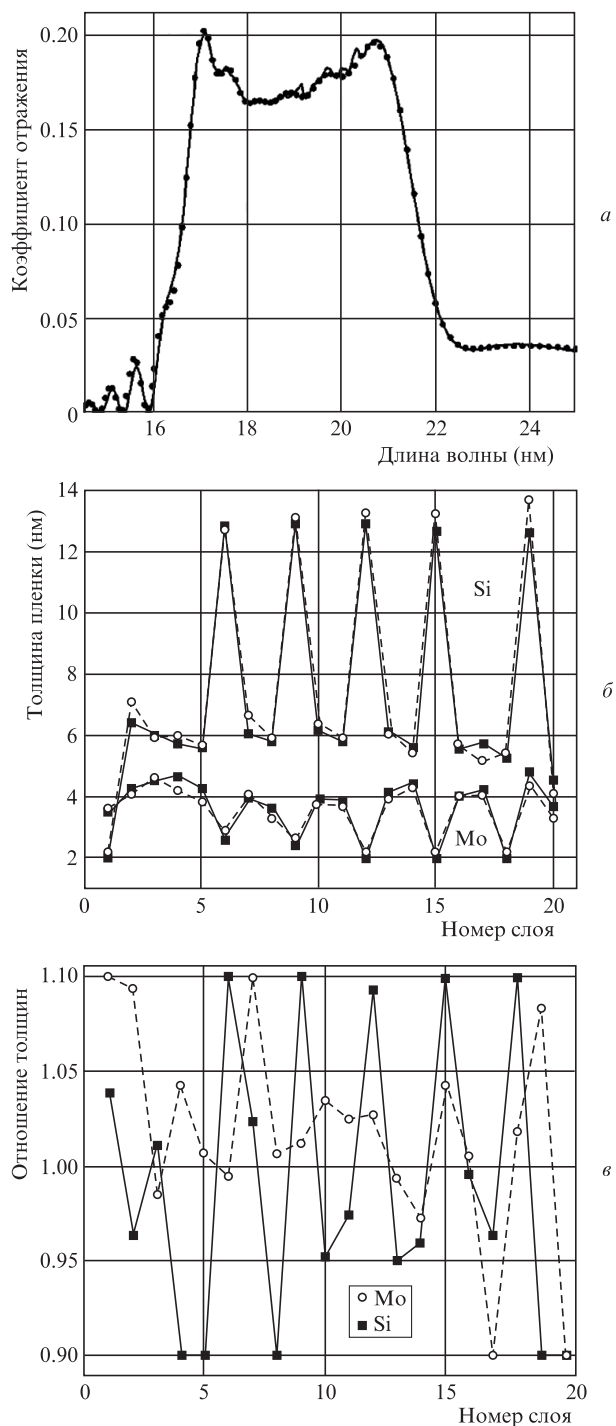


Рис.5. Измеренная (точки) спектральная зависимость коэффициента отражения для первого АМЗ и ее наилучшая аппроксимация (сплошная кривая) (а), а также расчетные (■) и восстановленные по кривой отражения (○) толщины пленок в АМЗ (б) и отношения восстановленных толщин к расчетным (в) в зависимости от номера слоя.

же отношения восстановленных толщин пленок к номинальным значениям соответственно. Из анализа рис.5 видно, что восстановленные параметры АМЗ выглядят физически состоятельными, а кривая отражения хорошо описывает данные эксперимента.

Результаты аналогичного исследования для второго и третьего АМЗ представлены на рис.6 и 7. Для второго АМЗ, оптимизированного для диапазона 24–29 нм, результаты измерений и аппроксимации удалось сблизить при значениях шероховатостей 1.15 нм на границе Мо на

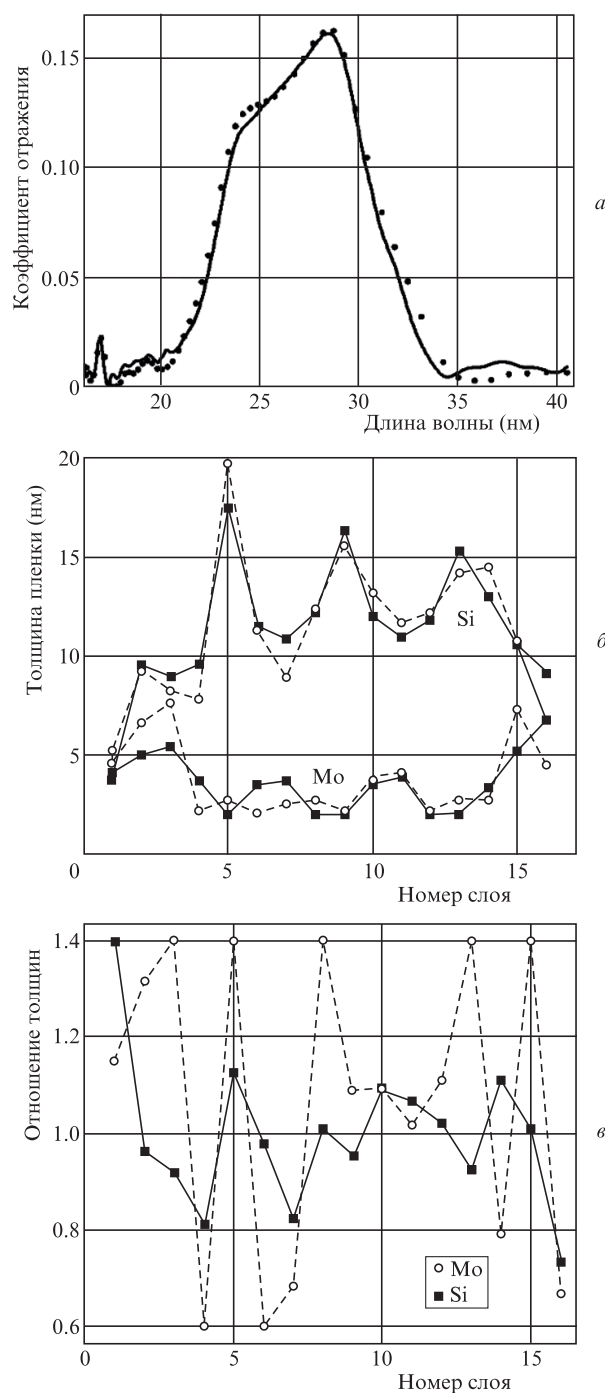


Рис.6. Измеренная (точки) спектральная зависимость коэффициента отражения для второго АМЗ и ее наилучшая аппроксимация (сплошная кривая) (а), а также расчетные (■) и восстановленные по кривой отражения (○) толщины пленок в АМЗ (б) и отношения восстановленных толщин к расчетным (в) в зависимости от номера слоя.

Si и 0.55 нм – на границе Si на Мо. Однако рассчитанные флуктуации толщин для второго АМЗ оказались существенно больше и для некоторых слоев достигали $\pm 40\%$. По-видимому, такие большие флуктуации повлияли и на точность определения шероховатостей границ слоев.

Для АМЗ, оптимизированного для диапазона 28–33 нм, наилучшее совпадение результатов расчетов и эксперимента наблюдается при нулевой межслойной шероховатости, что является физически несостоятельным результатом. Из рис.7,б видно, что структура АМЗ имеет более

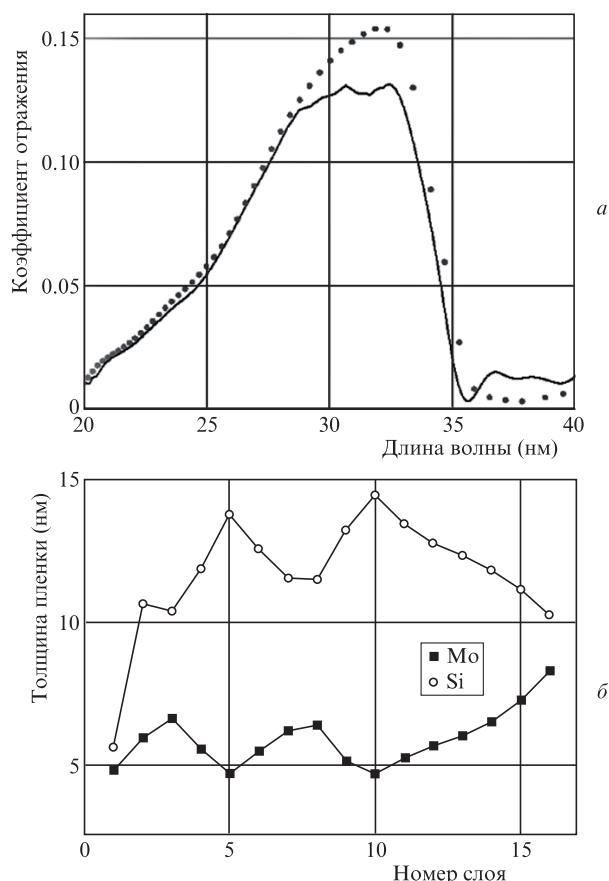


Рис.7. Измеренная (точки) спектральная зависимость коэффициента отражения для третьего АМЗ и ее наилучшая аппроксимация (сплошная кривая) (а) и расчетные толщины пленок в АМЗ в зависимости от номера слоя (б).

толстые пленки и большой разброс номинальных толщин, и, по-видимому, из-за большого разброса реальных толщин пленок требуется анализ гораздо большего числа реализаций, чтобы найти подходящую.

4. Обсуждение результатов и основные выводы

Проведенные в работе на примере трех Mo/Si-АМЗ численное моделирование и экспериментальное исследование в ЭУФ диапазоне позволяют сделать ряд выводов, важных как для оптимизации состава АМЗ, так и для восстановления параметров слоев по данным рефлектометрических измерений. Показано, что шероховатости межслойных границ, а также случайные и детерминированные изменения толщин пленок в значительной степени влияют на форму спектральной зависимости коэффициента отражения и на его величину. Продемонстрирована возможность восстановления состава АМЗ и межслойных шероховатостей по данным рефлектометрических измерений в ЭУФ диапазоне.

Установлено, что наличие межслойных шероховатостей не приводит к дополнительным осцилляциям спектральной зависимости коэффициента отражения на плато, а только понижает его, однако может повлиять, особенно в длинноволновой области, на наклон плато. При этом кривая отражения чувствительна к асимметрии границ, и изменение коэффициента отражения может достигать 5%–7% (см. рис.1). Учет шероховатостей с самого

старта работы алгоритма оптимизации либо повторный расчет с выбором в качестве начального приближения решения, полученного для идеальной структуры, позволяет, как минимум, сохранить равномерность коэффициента отражения, не потеряв в интегральном и пиковом отражении АМЗ.

Случайные флуктуации толщин слоев влияют на осцилляции коэффициента отражения на плато и на его абсолютное значение. В частности, при флуктуациях с дисперсией 5% полуширина распределения коэффициента отражения превышает 25% от номинального значения, и надежда получить желаемый равномерный коэффициент отражения практически отсутствует. Эффект возрастает при смещении в длинноволновую область. Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что, несмотря на широкую полосу отражения АМЗ (в рассматриваемом нами случае $\Delta\lambda/\lambda \approx 25\%$), допустимы флуктуации толщин с дисперсией не более 1%–3%. Это условие существенно жестче, чем в случае периодических многослойных зеркал.

Систематические ошибки в толщине слоев в процессе роста АМЗ вызывают смещение положения плато коэффициента отражения в длинноволновую или коротковолновую область в зависимости от знака Δd . Осцилляции на плато спектральной зависимости коэффициента отражения изменяются при этом незначительно. Спектральная ширина полосы отражения практически не меняется при малых систематических изменениях толщин (дисперсия $\sim 1\%$).

Сопоставление экспериментальных данных и результатов проведенного численного моделирования показало, что при наличии случайных флуктуаций толщин пленок с дисперсией 1%–2% можно получить АМЗ с отражательными характеристиками, близкими к ожидаемым, а индивидуальные толщины можно восстановить по данным измерений в ЭУФ диапазоне. Флуктуации с дисперсией 7%–10% позволяют оценить индивидуальные толщины, однако кривая отражения будет существенно отличаться от желаемой. Большие флуктуации не позволяют даже восстановить структуру АМЗ.

Можно отметить, что лучшие результаты были получены для АМЗ, оптимизированного для диапазона длин волн 17–21 нм. Это зеркало состоит из слоев наименьшей толщины, а индивидуальные толщины слоев группируются вокруг значений 2, 4, 6 и 13 нм. На начальном этапе изготовления данного АМЗ была проведена тщательная калибровка скорости роста пленок (тока магнетронных распылителей и скорости прохода подложки над магнетронами) в указанных диапазонах толщин. У двух других АМЗ и толщины слоев были больше, и их значения распределялись практически по всему диапазону толщин, от минимальных (2 нм) до 17 нм. При их синтезе использовались скорости роста, полученные из аппроксимации экспериментальных данных для первого АМЗ. Из результатов измерений видно, что такой подход не обеспечивает требуемых точностей изготовления слоев.

В заключение можно сформулировать основные критерии, которые должны быть выполнены при синтезе высококачественных АМЗ. Во-первых, при дизайне структуры АМЗ желательно выбирать реализации с минимальным числом толщин слоев. Если этого не удастся сделать, то, используя в качестве тестовых периодические зеркала, нужно провести калибровку параметров роста для максимального числа толщин пленок, в идеале – для каждой толщины. Во-вторых, необходимо поддерживать ста-

бильность технологического процесса так, чтобы дисперсия флуктуаций и детерминированное изменение толщин пленок не превышали 1%–2%. В-третьих, при расчете толщин пленок АМЗ надо либо учитывать шероховатости с самого старта работы алгоритма оптимизации, либо проводить повторный расчет с выбором в качестве начального приближения решения, полученного для идеальной структуры. При этом необходимо знать величины шероховатостей как на одной, так и на другой границе, а также учитывать, что они могут изменяться в зависимости от толщины слоя. На практике эти данные можно получить в ходе анализа отражательных характеристик периодических зеркал.

Работа поддержана грантами РФФИ № 13-02-00377, 14-02-00549 и 15-42-02139. При проведении исследований использовалось оборудование Центра коллективного пользования ИФМ РАН.

- Okajima T. et al. *Appl. Opt.*, **41** (25), 5417 (2002).
- Shestov S.V., Ulyanov A.S., Vishnyakov E.A., Pertsov A.A., Kuzin S.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9144**, 91443G (2014).
- Буренков Д.С., Успенский Ю.А., Артюков И.А., Виноградов А.В. *Квантовая электроника*, **35** (2), 195 (2005).
- Барышева М.М., Пестов А.Е., Салашченко Н.Н., Торопов М.Н., Чхало Н.И. *УФН*, **182**, 727 (2012).
- Akhsakhalyan A.A., Akhsakhalyan A.D., Kharitonov A.I., Kluev E.V., Murav'ev V.A., Salashchenko N.N. *Cent. Eur. J. Phys.*, **3** (2), 163 (2005).
- Бейгман И.Л., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **74** (3), 167 (2001).
- Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *УФН*, **185**, 1203 (2015).
- Meekins J.F., Cruddace R.G., Gursky H. *Appl. Opt.*, **26** (6), 990 (1987).
- Van Loevezijn P., Schlatmann R., Verhoeven J., van Tiggelen B.A., Gullikson E.M. *Appl. Opt.*, **35** (19), 3614 (1996).
- Karsten D.J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3113**, 500 (1997).
- Uspenskii Yu.A., Burenkov D.S., Hatano T., Yamamoto M. *Opt. Rev.*, **14** (1), 64 (2007).
- Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., Sharapova S., Wang Z., in *Optical Interference Coatings* (Whistler, Canada, 2013, p. TB.6).
- Андреев С.С., Барышева М.М., Чхало Н.И., Гусев С.А., Пестов А.Е., Полковников В.Н., Рогачев Д.Н., Салашченко Н.Н., Вайнер Ю.А., Зуев С.Ю. *ЖТФ*, **80** (8), 93 (2010).
- Kozhevnikov I.V., Peverini L., Ziegler E. *Phys. Rev. B*, **85**, 125439 (2012).
- Шестов С.В., Кузин С.В., Перцов А.А., Либерзон Д.Г., Климов А.А., Тихонравов А.В., Трубецков М.К., Шарапова С.А. *Труды XVII Междунар. симп. «Нанопластика и электроника»* (Н.Новгород, 2013, т. 1, с. 340, 341).
- Parratt L.G. *Phys. Rev.*, **95**, 359 (1954).
- Croce P., Nevot L. *Revue Phys. Appl.*, **11**, 113 (1976).
- http://num-anal.src.msui.edu/lib_na/cat/g/gsn1r.htm.
- Andreev S.S., Akhsakhalyan A.D., Bibishkin M.A., Chkhalo N.I., Gaponov S.V., Gusev S.A., Kluev E.V., Prokhorov K.A., Salashchenko N.N., Schäfers F., Zuev S.Yu. *Cent. Eur. J. Phys.*, **1** (1), 191 (2003).
- Jark W., Stöhr J. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **266**, 654 (1988).
- Schäfers F., Mertins H.-Ch., Gaupp A., Gudat W., Mertin M., Packe I., Schmolla F., DiFonzo S., Soullie G., Jark W., Walker R.P., Le Cann X., Nyholm R., Eriksson M. *Appl. Opt.*, **38**, 4074 (1999).
- BESSY-II reflectometer: http://www.helmholtz-berlin.de/pubbin/igama_output?modus=datei&did=292.
- Вайнер Ю.А., Зуев С.Ю., Кузин С.В., Полковников В.Н., Салашченко Н.Н., Стариков С.Д. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **78** (1), 98 (2014).