

ПРИГЛАШЕННАЯ СТАТЬЯ

Тонкопленочные рентгеновские фильтры на основе микроструктурированных подложек и их теплофизические свойства

А.В.Митрофанов

Показано, что на основе структурированных подложек со сквозными отверстиями микронных или субмикронных размеров, покрытых сверхтонкой органической пленкой, можно изготавливать тонкопленочные рентгеновские фильтры прямым напылением функциональных слоев фильтра без сложных дополнительных технологических операций на подложке. Рассмотрена оптимизированная методика изготовления рентгеновских фильтров на опорных структурах из гальванических никелевых сеток с мелким шагом и на полимерных трековых мембранах со сквозными порами с микронными и субмикронными диаметрами. Под термином «оптимизация» в данном случае имеется в виду согласование свойств подложки и режима напыления, при котором образец не перегревается. Изготовленные фильтры предназначены как для изображающих, так и для одноканальных детекторов излучения, работающих в мягком рентгеновском и жестком УФ диапазонах спектра с длинами волн 10–60 нм. Приведены тепловые расчеты нагрева сверхтонких слоев органической пленки и тонкопленочных опорных подложек при напылении на них алюминия или других функциональных материалов. Обсуждаются способы охлаждения тонкослойных композитов в процессе напыления и эксплуатации готовых фильтров в экспериментах. Дан краткий обзор работ, в которых применялись фильтры, изготовленные по этой методике на микроструктурированных подложках, включая орбитальные исследования рентгеновского излучения Солнца по программе КОРОНАС, а также лабораторные эксперименты с лазерной плазмой.

Ключевые слова: тонкопленочные рентгеновские фильтры, микроструктурированная подложка, теплофизические свойства.

1. Введение

Более четверти века назад в ФИАНе были начаты работы по созданию нового в то время класса рентгеновских телескопов и спектральных коронографов для исследований короны Солнца в мягкой рентгеновской и жесткой ультрафиолетовой областях спектра [1]. Новация заключалась в том, что впервые ключевым оптическим элементом для приборов служили фокусирующие многослойные рентгеновские зеркала нормального падения, разработанные и созданные в Институте физики микроструктур РАН совместно с сотрудниками ФИАНа. В результате этих работ были изготовлены, протестированы и позднее запущены на околоземную орбиту телескопы нового поколения: телескоп ТЕРЕК с каналами регистрации на 17.5 и 30.4 нм, проект «Фобос-1» (1988 г.) [2], телескоп ТЕРЕК-К для спутника КОРОНАС-И (1994 г.) с каналами на 13.2, 17.5 и 30.4 нм и, наконец, блок СРТ-К комплекса аппаратуры СПИРИТ для спутника КОРОНАС-Ф (2001–2005 гг.) с двумя многоканальными телескопами с полосами пропускания на длинах волн 17.1, 19.2, 28.4 и 30.4 нм (телескоп Т1) и 17.5 и 30.4 нм (телескоп Т2) [3, 4]. Заметим, что с 1988 по 2009 г. было запущено на земную орбиту 10 космических аппаратов с телескопами и спектрометрами для исследований Солнца в мягкой рентгеновской области спектра, в том числе четыре многока-

нальных комплекса приборов с шестью рентгеновскими телескопами, сделанными в ФИАНе. В качестве детектирующих устройств в этих приборах использовались разные типы безоконных координатно-чувствительных детекторов на основе микроканальных пластин (МКП), люминесцентных преобразователей (конвертеров) рентгеновского излучения, нанесенных на волоконно-оптические цилиндрические и конусные шайбы-световоды (фоконы), и ПЗС-приемников. Для защиты детектирующих устройств от нежелательного фонового излучения Солнца в длинноволновой части спектра совместно с сотрудниками Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (Дубна) в ФИАНе были разработаны и изготовлены универсальные (для всех типов используемых тогда детекторов) взаимозаменяемые сменные тонкопленочные рентгеновские фильтры на микроструктурированных подложках, рассчитанные на применение в мягкой рентгеновской и жесткой УФ областях спектра при работе с изображающей оптикой. Настоящая работа посвящена, в основном, описанию теплофизических (тепловых) свойств фильтров на мелкоструктурированных подложках.

2. Фильтры в рентгеновской астрономии Солнца

Практически все типы детекторов ультрамягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения, которые используются в приборах рентгеновской астрономии и в диагностике лабораторной плазмы, в том числе и так называемые солнечно-слепые фотоприемники, в той или иной степени чувствительны к фоновому излучению в широком (от УФ до ближней ИК области спектра) диапазоне длин волн (с границей около 1.1 мкм

А.В.Митрофанов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: mitrofa@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 18 октября 2017 г., после доработки – 27 ноября 2017 г.

для кремниевой ПЗС-матрицы или одноканального кремниевоего фотодиода без защитного фильтра). Солнце и многие лабораторные плазменные объекты излучают в рабочей области спектра значительно слабее по сравнению с длинноволновым фоном (различие по потоку энергии составляет несколько порядков). В связи с этим в солнечной рентгеновской астрономии и в «земных» экспериментах применяются защитные фильтры, блокирующие фоновое излучение и имеющие полосу пропускания в мягкой рентгеновской или в жесткой УФ области спектра.

В солнечных телескопах и радиометрах, рассчитанных на применение в этих спектральных областях, используются, как правило, системы из двух-трех отдельных тонкопленочных фильтров, согласованных по спектру пропускания с характеристиками детектора и оптических элементов прибора (отражающих зеркал, решеток на отражение или пропускание). К фильтрам предъявляются высокие требования по целому ряду параметров. Это должны быть прочные долгоживущие конструкции, прозрачные в рабочей области спектра, эффективно блокирующие фоновое излучение (часто на уровне свыше семи порядков) и не имеющие проколов и других скрытых или сквозных дефектов (pinholes) [5–8], способные выдерживать большие механические, акустические и термические нагрузки, удовлетворять климатическим требованиям, предъявляемым при испытаниях и хранении фильтров, иметь приемлемую радиационную стойкость и способность выдерживать перепады давления воздуха, возникающие в приборе в момент вывода телескопа на земную орбиту. Это относится прежде всего к фронтальным фильтрам с большой апертурой, которые устанавливаются на опорных структурах перед зеркальным объективом рентгеновских телескопов. Фильтр, который монтируется перед детектором или напыляется непосредственно на его входную поверхность (например, на чувствительную поверхность ПЗС-матрицы), называется фильтром детектора [5, 6]. Его размеры намного меньше, чем у крупногабаритных фронтальных фильтров, но к нему также предъявляются высокие требования по предельным механическим нагрузкам, стабильности характеристик (долговечности), однородности, отсутствию сквозных проколов и способности выдерживать термомеханические напряжения, возникающие в процессе изготовления и при проведении экспериментов. Именно о таких фильтрах пойдет речь в настоящей статье. Обзоры работ других авторов на эту тему, в которых рассматриваются вопросы изготовления и эксплуатации тонкопленочных фильтров в космической рентгеновской оптике, можно найти в [5–15].

Следует отметить, что в рассматриваемой спектральной области (мягкий рентгеновский и жесткий УФ диапазоны спектра с длинами волн 10–60 нм) основной механизм поглощения излучения – это фотоэффект, причем именно в этой области достигаются предельно высокие (10^{-5} – 10^{-6} см⁻¹) коэффициенты поглощения для однородных пленок из любых материалов. Поэтому, в отличие от классической (жесткой) рентгеновской области (для длин волн ~0.1 нм), где в качестве фильтров и окон приборов используют массивные пленки, толстые окна и фольги, здесь применяются предельно тонкие образцы в виде одиночных слоев или многослойников. При прохождении излучения через эти системы и оптические элементы на их основе они изменяют спектральный состав пучка, но

основная задача фильтров в рентгеновской астрономии – это блокировка потоков излучения вне рабочего диапазона прибора. В настоящей работе речь идет главным образом о поглощающих фильтрах, хотя ее результаты могут быть применимы к дифракционным рентгеновским фильтрам, а также к фильтрам на отражение. Механизм подавления длинноволнового фонового излучения с помощью тонкопленочных фильтров определяется совместным вкладом эффектов поглощения, отражения от поверхности и, в ряде случаев, рассеяния.

3. Устройство фильтров детектора

Фильтр детектора может быть сменным (заменяемым) или же представлять собой единую конструкцию с детектором излучения [5, 6]. Выбор типа фильтра определяется условиями эксперимента, конструкцией детектора, свойствами излучающего объекта, среды, в которой проводят измерения, и т.д. Для кремниевых детекторов изображения и фотодиодов в качестве интегрированного с фотоприемником защитного фильтра применяют спектрально-селективные однослойные или чаще многослойные субмикронные пленки, которые наносятся на чувствительную поверхность детектора [5, 6]. Использование многослойной структуры необходимо для выбора заданной (рабочей) полосы пропускания фильтра, улучшения эксплуатационных характеристик фильтра благодаря компенсации механических напряжений в слоях и отсутствию порога кристаллизации аморфных тонкопленочных слоев, а также для защиты внутренних элементов фильтра сверхтонкой барьерной пленкой.

Несмотря на очевидные достоинства единого функционального элемента фильтр – фотоприемник, во многих случаях удобнее использовать перед детектором сменный защитный фильтр, который может быть установлен или заменен по целому ряду причин. Конструкция узла детектора со сменным фильтром позволяет заменять фильтр на новый перед запуском телескопа на орбиту, переходить на другой спектральный интервал измерений и удобна для наземных предполетных калибровок аппаратуры. Кроме того, если детектором прибора служит коммерческий безоконный микроканальный умножитель с открытыми каналами, создание интегрированного с ним фильтра на входной поверхности МКП проблематично. Рентгеновские детекторы изображения, в том числе усилители яркости на основе безоконной МКП, – дорогостоящие и delicate приборы. Поэтому дополнительные технологические операции на чувствительной поверхности фотоприемника могут повлиять на его характеристики при изготовлении защитного фильтра, интегрированного с детектором [16]. При использовании в приборе сменного защитного фильтра детектора эта проблема не возникает.

Рассмотрим особенности конструирования и изготовления сменного фильтра детектора ультрамягкого рентгеновского и ЭУФ излучения, будь то приемник изображения или одноканальный фотодиод. Этот фильтр должен состоять из металлического слоя, например алюминия толщиной 0.1–0.2 мкм, или из многослойной тонкопленочной структуры, прозрачной для рабочего излучения и способной блокировать на уровне нескольких порядков по потоку энергии прохождение фонового излучения в длинноволновой области спектра, начиная с $\lambda \geq 0.1$ мкм. Поскольку суммарная толщина тонкопленочной конструкции не превышает нескольких десятых микрона,

то на площади окна детектора в пределах $1-10\text{ см}^2$ свободная (свободно висящая) пленка фильтра должна быть усилена какой-либо достаточно жесткой опорной структурой, например сеткой с высокой прозрачностью и с оптимальным периодом структуры, который выбирается из условий эксперимента и геометрии чувствительных ячеек детектора. Заметим, что в лабораторных условиях и в экспериментальных схемах рентгеновской литографии в некоторых случаях можно обходиться тонкопленочными конструкциями без жестких опорных структур.

Стандартная технология изготовления сменного тонкопленочного фильтра включает в себя напыление структуры фильтра на плоскую гладкую подложку (как правило, с использованием технологического «жертвенного» слоя), отделение фильтра от подложки и закрепление его на пропускающей опорной структуре с последующим удалением жертвенного покрытия. По сути это разновидность метода реплик, а сам рентгеновский фильтр представляет собой однородную тонкопленочную бездефектную реплику большой площади, снятую с гладкой поверхности подложки-теплоотвода и выполняющую роль рентгеновского окна детектора. Процедура изготовления фильтра детектора существенно упростится, если исключить сложный этап репликации напыленной структуры фильтра. Однако прямое напыление слоев фильтра на свободно висящую тонкую пленку или на полимерный жертвенный слой без эффективного отвода тепла приводит к термическому разрушению фильтра практически при любых применяемых режимах напыления (во всех на-

пылительных установках) из-за малой теплоемкости тонкого слоя, плохой теплопроводности полимеров и отсутствия эффективного сброса тепла с нагретого образца.

Это, казалось бы, непреодолимое препятствие можно обойти, если перед напылением сверхтонкую пленку или жертвенный полимерный слой фильтра укрепить на мелкоструктурированной подложке с открытыми сквозными окнами микронных или субмикронных размеров. В качестве таких подложек мы использовали трековые мембраны-полимерные пленки со сквозными порами с диаметрами микронных размеров и плоские тонкие микросетки из никеля, на которые крепились в плотном контакте (приклеивались) сверхтонкие пленки из поливинилформала (формвара) с толщинами в пределах $40-60\text{ нм}$. Одна из функций сеток и мембран – сброс тепла в процессе напыления, выделяющегося при конденсации паров металла (или диэлектрика) на сверхтонкой формваровой пленке. В этом состоит основное отличие нашего метода от стандартной процедуры изготовления тонкопленочного фильтра, при которой слои предварительно напыляются на массивную подложку-теплоотвод с последующим отделением от нее слоя или многослойной структуры и с дальнейшей фиксацией слоев фильтра на опорной сетке.

С помощью предложенного нами метода были изготовлены серии взаимозаменяемых субмикронных по толщине металлических и композитных (многослойных) фильтров (металл-полимер, металл-керамика) из Al, Mo, Si, Ni, Rh, Nb, SiC и некоторых других материалов

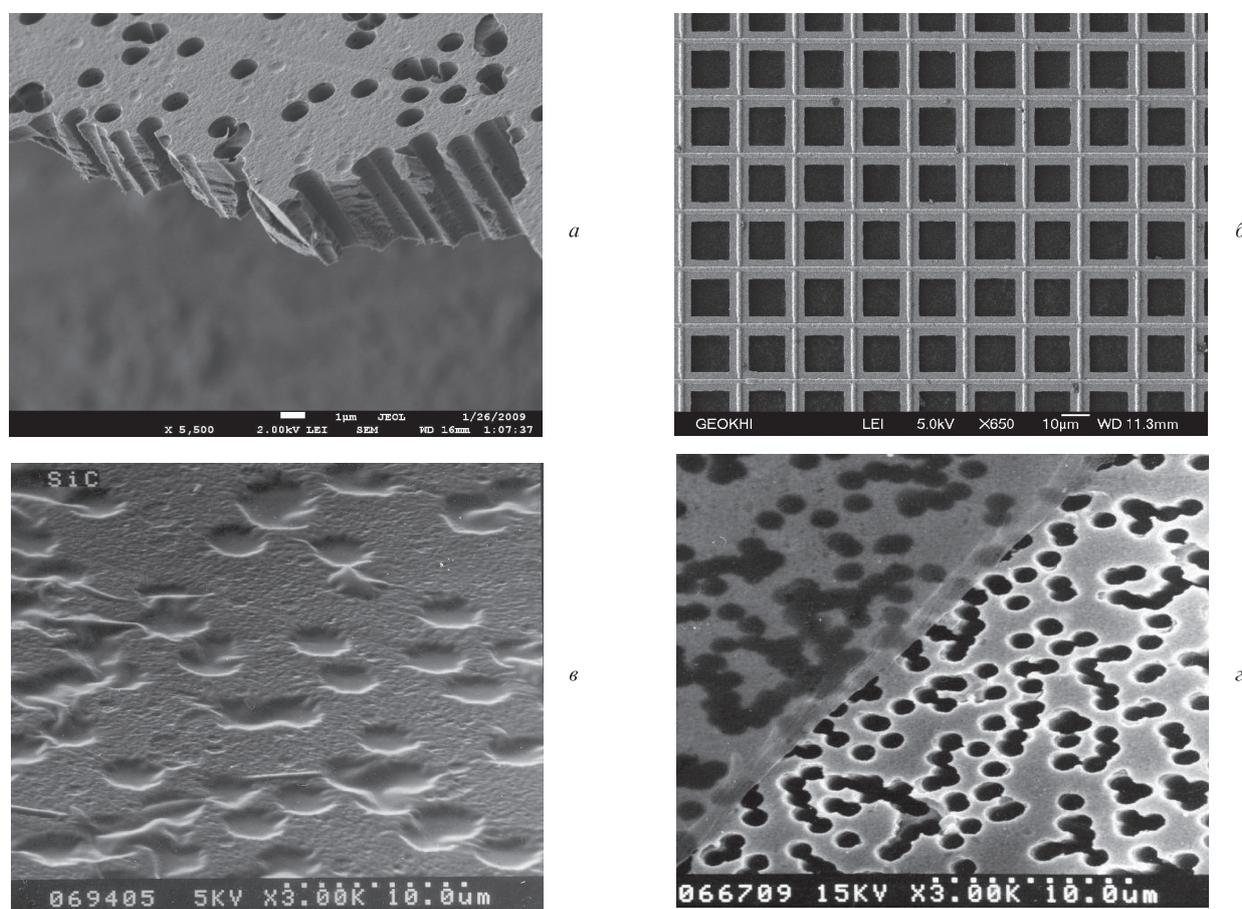


Рис.1. Электронные фотографии скола трековой мембраны (а), опорной никелевой микросетки (б), поверхности фильтра из пленки карбида кремния на трековой мембране (в) и участка поверхности тонкопленочного покрытия (никелевая пленка толщиной 0.1 мкм) на пористой мембране (з).

на сетках и пористых подложках со сквозными цилиндрическими порами при нормальной ориентации осей пор относительно поверхности фильтра. Опорные мембраны имели различную для разных фильтров толщину (5–23 мкм) и одинаковый диаметр пор (0.5–3.2 мкм). Толщина регулярных сеток из никеля с периодом структуры 20, 16 и 10 мкм составляла около 3 мкм. Важный элемент фильтра на мелкоструктурированной подложке – это оправа, выполняющая роли крепления фильтра, светового «замка», антивибрационного (демпфирующего) элемента и проводника для эффективного сброса тепла от нагреваемого фильтра к более холодному основанию телескопа или лабораторного спектрального прибора. На рис.1 представлены некоторые из используемых нами опорных мелкоструктурированных подложек, фрагменты поверхности мембран с напыленными слоями металла и фильтры «под ключ» в оправках. (Препарирование образцов и микросъемка выполнены О.Ореловичем, А.Русаковой, А.Бурмистровым и Т.Громовой).

4. Решение тепловой задачи

Рассмотрим теперь подробнее задачу о нагреве и отводе тепла со свободной однородной тонкой пленки полимера толщиной δ при напылении вещества, например алюминия, на ее поверхность. Будем считать, что пленка без подложки находится в вакууме и закреплена (натянута) с хорошим тепловым контактом по периметру на кольцевую рамку или бленду диаметром $d = 2R$. Температура рамки T_1 поддерживается постоянной, и она, вообще говоря, может заметно отличаться от комнатной температуры T_0 . Пусть $Q_c = m_t \omega$ – плотность однородного теплового потока на поверхности пленки, возникающего из-за конденсации паров металла на образце. Здесь $m_t = \rho^* \delta_t^*$ – массовая скорость осаждения вещества на подложку (для оценок считается постоянной); ω – полная энергия, выделяемая при конденсации на подложке напыляемого вещества и рассчитанная на единицу массы; ρ^* – плотность напыляемого материала (для упрощения считается независимой от толщины слоя); δ_t^* – скорость роста толщины напыляемого слоя. Нагрев образца тепловым излучением от источника паров металла и нагрев разреженным газом при низком давлении среды в камере напыления здесь не учитываются. При термическом напылении величина ω примерно равна плотности энтальпии атомизации вещества [17]:

$$\omega = c_1 \Delta T_1 + L + c_2 \Delta T_2 + q, \quad (1)$$

где c_1 и c_2 – удельные теплоемкости напыляемого металла в твердой и жидкой фазах соответственно; ΔT_1 – разность температур плавления и конденсации (температуры подложки); ΔT_2 – разность температур испарения и плавления; L и q – удельные теплоты плавления и парообразования. Так, для Al значение ω , рассчитанное по формуле (1), равно около 15 МДж/кг, или 40 ГДж/м³ [17], т.е. 4.1 эВ/атом. Если алюминий наносится на пленку в газовом разряде в высокочастотном поле (при магнетронном распылении), а не с нагретой электрическим током вольфрамовой лодочки или из подогреваемого керамического тигля, то поступающие на образец атомы более «горячие», чем при термическом напылении, т.к. они имеют дополнительно кинетическую энергию ~ 1 эВ/атом. В связи с этим тепловая нагрузка на подложку будет заметно больше, чем при

термическом напылении (формула (1)) в случае одинаковой скорости осаждения δ_t^* .

Тонкопленочные рентгеновские фильтры, изготовленные для мягкой рентгеновской или жесткой УФ области спектра, в зависимости от их назначения имеют толщину слоя металла δ^* или полную толщину функциональных слоев (в случае многослойной структуры) порядка нескольких десятков или сотен нанометров, а скорость напыления δ_t^* при изготовлении фильтра может превышать 100 нм/с [8]. Плотность потока тепла на подложку при напылении Al в этом случае в 2.5–3 раза превышает так называемую солнечную постоянную α , равную 1370 Вт/м². У фильтров, предназначенных для экспериментов в мягкой рентгеновской области, допустимый слой полимера обычно тоньше функционального слоя металла: $\delta \leq \delta^*$. Поэтому в качестве подложки удобно использовать сверхтонкие полимерные слои. Они должны быть либо очень тонкими (толщиной не более нескольких десятков нанометров), либо после изготовления фильтра их нужно удалить каким-нибудь способом, например фототравлением [9].

Рассмотрим случай, когда скорость напыления (и тепловая нагрузка ω) мала, и нагрев тонкопленочной подложки заметно меньше температуры порога разрушения пленки. В самый начальный момент напыления, когда толщина напыленного слоя δ^* много меньше толщины подложки δ , его тепловое сопротивление велико, отвод тепла происходит к границе образца из-за теплопроводности полимерной пленки и квазиравновесный (стационарный или медленно меняющийся) радиальный профиль температуры образца описывается оценочной формулой

$$T(r) = T_1 + \rho^* \delta_t^* \omega (R^2 - r^2) / (4\lambda\delta). \quad (2)$$

Здесь λ – коэффициент теплопроводности полимера, слабо зависящий от T при температурах порядка комнатной [18]; r – расстояние от центра образца до рассматриваемой точки. Это приближенное выражение, полученное при решении стационарного неоднородного уравнения теплопроводности (баланса энергии) для задачи с источником тепла и фиксированной температурой на граничном контуре. Отметим тот очевидный факт, что пространственный профиль температуры (2) в этой задаче с точностью до размерных постоянных имеет такой же вид, как и у длинного электрического провода, по которому течет постоянный ток с омическими потерями при фиксированной температуре поверхности провода, если механизм отвода тепла в проводе – это обычная теплопроводность (см. [19], с. 106, задача 670). Для пленки из формвара решение (2) не учитывает потери тепла из-за радиационного охлаждения, т.к. пленка считается оптически тонкой и полностью прозрачной для теплового излучения. Перегрев образца ΔT максимален в центре кольца ($r = 0$):

$$\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_1 = \rho^* \delta_t^* \omega d^2 / (16\lambda\delta). \quad (3)$$

На рис.2 показаны изотермы нагрева $\Delta T = \Delta T_{\max} = \text{const}$ для пленки формвара (рис. 2) толщиной 60 нм, с которой проводились эксперименты, в координатах «тепловая нагрузка – диаметр образца на оправке» ($d = 2R$). Если размер образца мал, задачу можно считать стационарной: в соответствии с формулой (2) характерное время установления профиля температуры по поверхности об-

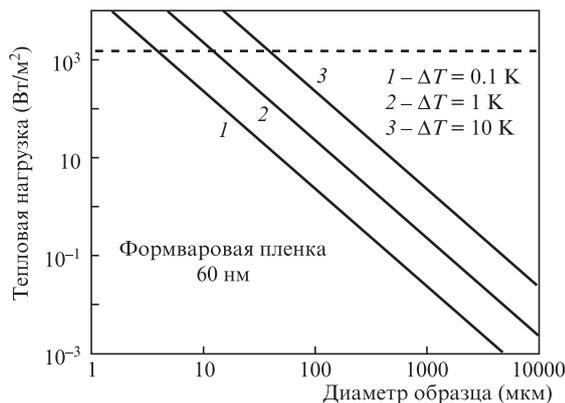


Рис.2. Тепловая нагрузка при напылении на свободную пленку формвара, закрепленную на охлаждаемой оправке, при заданной величине перегрева пленки ΔT в центре в зависимости от диаметра образца d . Толщина пленки формвара 60 нм. Штриховая линия здесь и на рис.3, 7 – уровень, соответствующий солнечной постоянной для околоземной орбиты.

разца $\tau_1 \cong R^2 \rho C_p / (4\lambda)$ меньше времени τ_2 нагрева пленки до момента, когда из-за большой скорости напыления начинается термодеструкция (разрушение) пленки полимера. В последнем случае $\tau_2 \geq C_p \rho \delta \Delta T_{\text{crit}} / (\omega \rho^* \delta_i) \geq \tau_1$. Для формвара значение ΔT_{crit} немногим больше 100 °С. Благодаря отводу тепла через границу реальное время превышает эту оценку «времени жизни» пленки. Более точно временной профиль температуры образца в разных его точках с радиусом r может быть описан формулой

$$T(r, t) = T_1 + \rho^* \delta_i^* \omega (R^2 - r^2) [1 - \exp(-t/\tau_0)] / (4\lambda \delta). \quad (4)$$

Здесь постоянная времени $\tau_0(r)$ для эволюции температурного профиля образца в процессе напыления зависит от радиальной координаты участка пленки:

$$\tau_0(r) = (R^2 - r^2) \rho C_p / (4\lambda). \quad (5)$$

Выражение (4) аналогично известной формуле для температурного профиля свободной тонкой полимерной подложки на стандартном медном кольце (трехмиллиметровой опорной бленде) при установке объекта в держатель электронного микроскопа, работающего в режиме расфокусировки зонда [20]. В приближенных оценках временных характеристик установления стационарного ре-

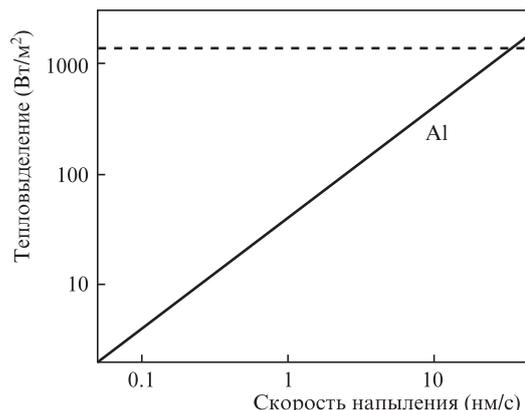


Рис.3. Зависимость тепловыделения из-за конденсации паров алюминия на формваровой пленке от скорости его напыления.

шения теплоемкость и теплопроводность формвара и других полимеров можно считать постоянными величинами, не зависящими от температуры. Численные значения тепловых постоянных некоторых материалов, используемых при изготовлении тонкопленочных рентгеновских фильтров и опорных структур, указаны в табл.1 для диапазона температур 300–400 К. Это оценочные данные, опубликованные на сайте <http://www.goodfellow.com/>.

Штриховой линией на рис.2 отмечен уровень «солнечной» постоянной (для земной орбиты). Известно, что он приблизительно соответствует мощности теплового потока, который поступал на охлаждаемую подложку при «взрывном» термическом напылении алюминия, проводимом ранее при изготовлении крупногабаритных тонкопленочных рентгеновских фильтров высокого качества для телескопической системы «Аполло» [8].

Для того чтобы результаты оценок нагрева тонкой пленки формвара сопоставить с реальными данными для разных режимов напыления, приведем зависимость тепловыделения на подложке от скорости осаждения алюминия при термическом напылении металла (рис.3) без учета доли теплового потока на подложке от нагревателя (вольфрамовая лодочка). При изготовлении тонкопленочных рентгеновских фильтров мы использовали режимы со скоростью напыления металлов, в том числе алюминия, $\delta_i^* \approx 0.1-0.3$ нм/с при высокочастотном магнетронном распылении и $\delta_i^* \approx 5-10$ нм/с в случае термического нанесения алюминиевого покрытия в вакууме. Для

Табл.1. Справочные значения тепловых характеристик некоторых материалов, используемых при напылении тонкопленочных слоев и изготовлении опорных структур для крепления пленок и отвода тепла в рентгеновских фильтрах*.

Материал	Плотность ρ (10^3 кг/м ³)	Удельная теплоемкость C_p (Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹)	Коэффициент теплопроводности λ (Вт · м ⁻¹ · К ⁻¹)	Коэффициент линейного расширения (10^{-6} К ⁻¹)
Формвар	1.23	2000	0.24	–
ПЭТФ	1.39	1300	0.14	20–80
Полиимид	1.43	1090	0.10–0.35	28**
Алюминий	2.7	900	230	23.5
Медь	8.96	390	400	17
Никель	8.9	450	90	13
Молибден	10.2	250	138	5
Цирконий	6.49	280	23	5.9
Родий	12.4	240	150	8.5

*Goodfellow.html/<http://www.goodfellow.com/catalogue/>.

**Данные для полиимидной пленки UPILEX-R (UBE Industries Ltd, Japan), аналоге полимерного материала марки Kapton H (DuPont).

выбранных режимов напыления тепловая нагрузка на формваровую пленку составляла 10–1000 Вт/м² (рис.3).

Из приведенных оценок и рис.2 и 3 следует, что прямое напыление вещества с высокой скоростью на тонкие и сверхтонкие свободно подвешенные органические пленки можно проводить без перегрева образца и тем более без его термического разрушения, если уменьшить диаметр пор или характерный размер ячеек опорной структуры вплоть до микронных размеров и одновременно обеспечить эффективный отвод выделяющегося тепла от самой опорной структуры, чтобы избежать ее перегрева по всей рабочей поверхности фильтра (до порогового значения рабочей температуры функциональных слоев фильтра).

Рассмотрим далее вопрос о способах отвода тепла от самой микроструктурированной подложки, к которой прикреплена в тепловом контакте пленка. В условиях вакуума или низкого давления охлаждать образец в процессе напыления можно либо с помощью радиационного сброса тепла с опорной структуры, либо с использованием теплопроводности из-за градиента температур, который возникает, когда подложка с напыляемым объектом или опорная бленда установлены на холодном термостатированном или охлаждаемом фланце, отводящем тепло. Для некоторых конструкций радиационное охлаждение и теплопроводность могут вносить соизмеримый вклад.

В наших работах использовались оба способа отвода тепла, выделяющегося на тонкой пленке при напылении фильтра. В качестве теплового радиатора и опорных структур были выбраны полимерные трековые мембраны [21] из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) со сквозными (открытыми) порами с одинаковыми (0.5–3.2 мкм) диаметрами и толщинами мембран 5–23 мкм (для разных образцов). Форма пор в мембранах была близка к цилиндрической или к «песочным часам» со слабой конусностью. Использовались как параллельная ориентация осей пор (по нормали к поверхности образца), так и мембраны с наклонными порами. Поры в пленке служили окнами для транспорта рентгеновского или жесткого УФ излучения в рабочем диапазоне, а полимерная матрица – «скелет» фильтра – выполняла роль теплового радиатора на этапе изготовления фильтра и при его эксплуатации в экспериментальных условиях. Некоторые полимеры, такие как полиэтилентерефталат, полиэтиленнафталят, поликарбонат, полиимиды и другие, имеют сильные полосы поглощения излучения в средней ИК области спектра 5–15 мкм [22]. Пленки из этих материалов при толщинах 10–20 мкм и более служат хорошими поглотителями теплового излучения от тел, нагретых до температуры выше комнатной на несколько десятков градусов Цельсия, и поэтому сами эффективно сбрасывают тепло в процессе излучения (рис.4). Именно радиационное охлаждение такого типа с помощью металлизированных с одной стороны полимерных пленок используется в космической технике в системах пассивного терморегулирования [23]. В этом случае полимерная поверхность, не покрытая металлом, служит внешней поверхностью радиатора, а металлизированная сторона направлена к корпусу охлаждаемого объекта.

На рис.5 приведен спектр пропускания пленки ПЭТФ марки Nostaphan (Mitsubishi Polyester Films) толщиной 23 мкм в диапазоне длин волн 2–16 мкм. (Измерения проведены О.Криставчук на ИК фурье-спектрометре Nicolet 6700 при комнатной температуре образца.) Брутто-фор-

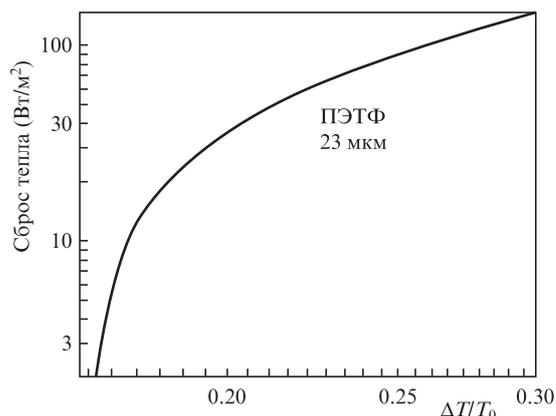
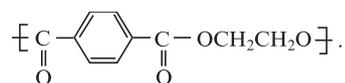


Рис.4. Скорость сброса тепла излучением с одной поверхности пленки ПЭТФ толщиной 23 мкм в зависимости от ее перегрева относительно окружающей среды.

мула этого полимера такова: C₁₀H₈O₄, а структурная имеет вид



поглощения [22]. Так, валентные колебания –C=C– представлены двумя пиками: на 1578 см⁻¹ (6.34 мкм) и на 1505 см⁻¹ (6.64 мкм). Сложное эфирное соединение проявляет себя в спектре поглощения сильными по интенсивности полосами. Наличие карбонильной группы C=O соответствует интенсивному пику на 1726 см⁻¹ (5.79 мкм). Эфирные соединения тоже имеют сильные полосы и пики поглощения в среднем ИК диапазоне спектра. Они соответствуют для ПЭТФ валентным (рис.5) колебаниям –C–O; C–C(O)–O и O–C–C с волновыми числами 1264 см⁻¹ (интенсивная полоса поглощения с центром на 7.91 мкм) и 1103 см⁻¹ (сильный пик на длине волны 9.07 мкм) для первого и второго соединений соответственно. Сильная по интенсивности полоса с волновым числом 729 см⁻¹ (13.7 мкм) соответствует деформационным колебаниям части скелета молекулы полимера –CH₂–CH₂–. Указанные пики и полосы находятся вблизи максимума излучения черного тела, нагретого на не-

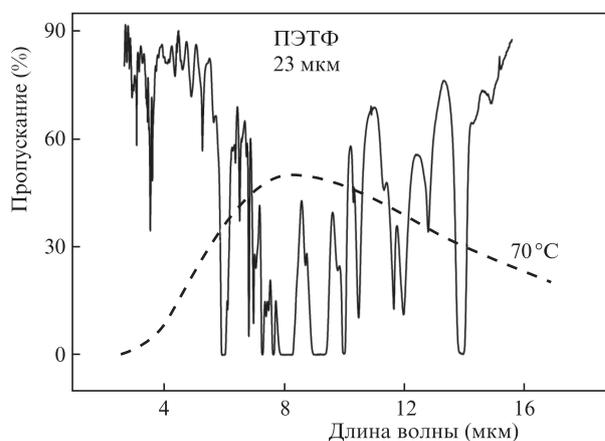


Рис.5. Спектр пропускания пленки ПЭТФ толщиной 23 мкм в средней ИК области спектра. Штриховая кривая – спектр излучения черного тела при 70 °C в относительных единицах.

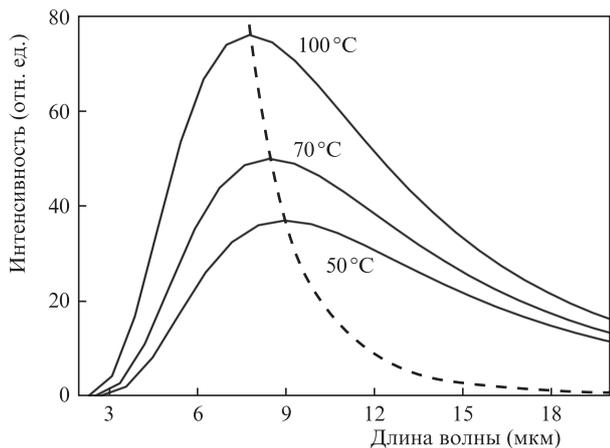


Рис.6. Спектры излучения черного тела при разных температурах.

сколько десятков градусов выше комнатной (см. рис.5 и 6). Поэтому не слишком тонкая пленка ПЭТФ может служить хорошим радиатором для эффективного сброса тепла с пленочных структур в процессе напыления.

По результатам, представленным на рис.5, можно восстановить спектральную излучательную способность $\varepsilon_\lambda(T)$ частично прозрачной полимерной пленки [24, 25] и оценить ее интегральную излучательную способность по известной формуле

$$\varepsilon(T) = \frac{\int \varepsilon_\lambda(T) U_\lambda(T) d\lambda}{\int U_\lambda(T) d\lambda}, \quad (6)$$

где $U_\lambda(T)$ — интенсивность монохроматического излучения черного тела, рассчитываемая по формуле Планка [24]. Для спектра пропускания $\tau(\lambda)$ пленки ПЭТФ толщиной 23 мкм (рис.5), нагретой до 70 °С, интегральная излучательная способность пленки $\varepsilon(T)$ в полосе 3–16 мкм оказалась равной около 0.6. Указанная температура приблизительно соответствовала реальному нагреву полимерной подложки при напылении алюминия на установку Sputron-2 (Balzers). При изменении температуры образца от комнатной до 100 °С (близкой к предельной рабочей температуре формваровой пленки, находящейся на подложке из пористой ПЭТФ-мембраны) спектральные характеристики $U_\lambda(T)$ излучения черного тела изменяются, как видно из рис.6, в соответствии с формулой Планка. Это приводит к некоторому, в пределах нескольких процентов, немонотонному изменению функции $\varepsilon(T)$, как было показано в работе [26] для данного полимера. В то же время влияние на величину $\varepsilon(T)$ небольшого уширения полос поглощения полимера, наблюдаемое с ростом температуры образца в указанном диапазоне температур, по результатам измерений авторов работы [26] оказалось незначительным по сравнению со вкладом от температурных вариаций функции $U_\lambda(T)$. Заметим, что спектры пропускания пленок из ПЭТФ другой толщины (6 и 25 мкм) при комнатной температуре приведены в монографии [25].

Хотя пленка ПЭТФ толщиной 23 мкм частично прозрачна для ИК излучения (см. рис.5), она все же эффективно сбрасывает в вакууме тепло, если ее нагреть до уровня, на несколько десятков градусов выше комнатной температуры T_0 , при которой находятся кожух и внешнее окружение напылительной установки. На рис.4 приведе-

на расчетная зависимость скорости сброса тепла излучением с одной поверхности пленки ПЭТФ толщиной 23 мкм от ее перегрева относительно температуры окружающей среды. Для этих оценок значение интегральной излучательной способности пленки принималось равным измеренному ($\varepsilon = 0.6$), а пленка считалась сплошной и однородной. Вместе с зависимостью на рис.3 эта зависимость позволяет оценить предельную скорость металлизации сверхтонкой полимерной пленки на пористой подложке из ПЭТФ, когда сброс тепла происходит только из-за теплообмена излучением. В случае напыления алюминия на пленку формвара эта скорость равна около 10 нм/с (соответствующая тепловая нагрузка чуть меньше 100 Вт/м²).

5. Роль теплопроводности опорной структуры и напыленного слоя

Оценим вклад теплопроводности в охлаждение мелкоструктурированной подложки из-за возникающего при напылении градиента температур. В начале напыления, когда толщина слоя осажденного металла мала, теплопроводность образца определяется материалом подложки с учетом эффекта пористости, из-за которой теплопроводность пористой подложки уменьшается примерно в $1 - P$ раз по сравнению с однородной, где P — эффективная пористость мелкоструктурированной опорной структуры. Такое приближение справедливо, когда размер ячейки сетки или диаметр пор трековой мембраны много меньше диаметра образца, что практически всегда выполняется. Если прозрачность мелкоструктурированной подложки не слишком велика, для грубых оценок профиля температуры подложки ее пористость можно вообще не учитывать, а образец считать однородным. Тогда для самой опорной структуры стационарный (квазиравновесный) профиль температуры находится по формуле (2), а ее максимальное значение — по формуле (3) с учетом геометрии и тепловых характеристик пленки подложки. Напомним, что по внешнему контуру подложка плотно контактирует с холодным (с температурой T_1) термостатированным фланцем.

Критерий подобия по размерному параметру $d^2/(\lambda\delta)$ при заданной скорости напыления позволяет легко пересчитать профили температуры и максимальный перегрев какого-либо образца по характеристикам опорной подложки и зависимостям из рис.2. Так, на рис.7 приведены изотермы перегрева пленки ПЭТФ толщиной 23 мкм, рассчитанные при разных тепловых нагрузках, в зависимости от диаметра образца без учета радиационного охлаждения. Представленные на рис.2 и 7 результаты использовались нами при выборе щадящего режима работы напылительной установки при металлизации однородной пленки полимера на сетке или пористых трековых мембран, выполняющих роль мелкоструктурированных подложек для тонкопленочных рентгеновских фильтров солнечных телескопов или самостоятельных дифракционных фильтров одноканальных радиометров.

С увеличением толщины слоя металла δ^* на полимерной пленке толщиной δ наступает момент, когда напыление приводит к заметному увеличению теплопроводности образца. Поскольку тепловое равновесие по толщине напыляемой структуры устанавливается практически мгновенно (по сравнению с другими характерными постоянными времени напылительного процесса), нетрудно

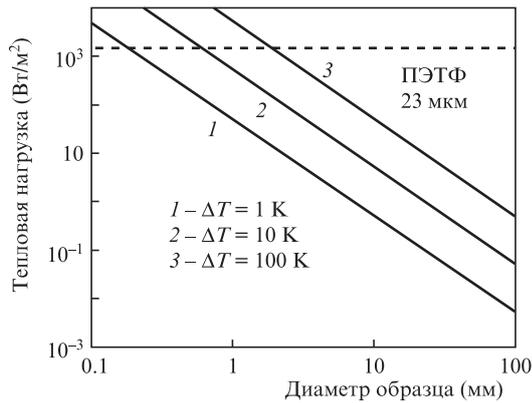


Рис.7. Равномерная (однородная) тепловая нагрузка на пленку ПЭТФ толщиной 23 мкм, закрепленную на охлаждаемой оправке, при заданной величине перегрева пленки ΔT в центре в зависимости от диаметра образца d .

показать, что эффективный коэффициент теплопроводности двухслойной пленки (без учета свойств границы раздела) есть

$$\lambda_{\text{eff}} = (\lambda^* \delta^* + \lambda \delta) / (\delta^* + \delta) = (\lambda + \lambda^* x) / (1 + x), \quad (7)$$

где $x = \delta^* / \delta$ – отношение толщин металла и полимерной пленки. Формулу (7) для двухслойного образца можно с некоторыми ограничениями распространить на случай многослойника с заданными конфигурацией и характеристиками слоев. Введение величины λ_{eff} удобно для проведения расчетов теплового режима образца при напылении слоев фильтра на мелкоструктурированную подложку или в измерениях с изготовленным фильтром при установке его перед детектором в экспериментальном оборудовании с мощным источником излучения.

На рис.8 приведены расчетные кривые $\lambda_{\text{eff}}(x)$ для композитного слоя алюминий–ПЭТФ-пленка, для алюминизированной сверхтонкой формваровой пленки и для тонкопленочного покрытия родием тонкого однородного промежуточного слоя формвара никелевой микросетки – теплового аналога мелкоструктурной гальванической никелевой сетки толщиной 3 мкм с периодом структуры 10 мкм и прозрачностью 53% [27, 28]. Заметим, что когда толщина слоя напыленного металла на пленку-подложку меньше 10–20 нм, то для строгих расчетов надо исполь-

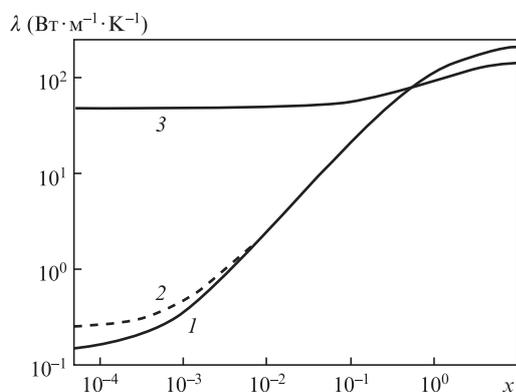


Рис.8. Эффективная теплопроводность двухслойной пленки как функция отношения толщин покрытия и пленки-подложки x для алюминизированной пленки ПЭТФ (1), алюминизированной сверхтонкой формваровой пленки (2) и пленки родия, напыленной на формваровый слой и никелевую подложку из тонкой фольги (3).

зовать не табличные данные о теплопроводности массивного материала, а реальные экспериментальные значения. Из-за размерных эффектов, роли границы и, в ряде случаев, из-за неоднородной (островковой) структуры очень тонких напыленных слоев (обычной при термическом напылении) теплопроводность сверхтонких одиночных слоев и многослойных пленок иная, чем у массивных образцов. В настоящее время вопрос об эффективной теплопроводности рентгеновских фильтров-многослойников мало изучен и, по мнению авторов работы [29], требует дальнейших исследований. Заметим, что есть также ограничения сверху по координате x для кривых на рис.8. Они объясняются тем, что слой напыленного металла не может быть слишком толстым по целому ряду причин, и прежде всего из-за соображений прочности фильтров и прозрачности в рабочем диапазоне спектра. Обычно в случае сверхтонкой (несколько десятков нанометров, рис.1) формваровой подложки, используемой для изготовленных алюминиевых фильтров, оценку эффективной теплопроводности уместно проводить при значениях x в пределах $0.3 \leq x \leq 3$. При металлизации ПЭТФ трековых мембран толщиной 23 мкм (рис.8) представленные оценочные формулы и кривые имели смысл, когда выполнялось соотношение $0.001 \leq x \leq 0.01$.

Кроме алюминия, для металлизации мембран мы использовали также другие металлы, в том числе никель, молибден и титан.

6. Экспериментальные работы, в которых использовались рентгеновские фильтры на мелкоструктурированных подложках

Мелкоструктурированные подложки для фильтров-детекторов мы установили впервые в эксперименте ТЕРЕК на космическом аппарате «Фобос-1» [2].

В ультрамягком рентгеновском канале МХ (рабочие длины волн 17.5 и 30.4 нм) перед люминесцентным конвертером помещалась тонкая (150 нм) алюминиевая пленка на никелевой сетке с периодом 20 мкм. В запасном комплекте аппаратуры вместо этого фильтра была установлена металлизированная трековая мембрана, на внешнюю (к детектору) поверхность которой была нанесена такая же по толщине алюминиевая пленка. Мембрана имела толщину 17 мкм, диаметр пор 2.8 мкм, их плотность $N = 4 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$. В дальнейшем этот тип мембран с увеличенным до 3.2 мкм диаметром пор использовался нами в солнечном телескопе ТЕРЕК-К [30].

На этом этапе создания новой аппаратуры исследовались и отработывались вопросы изготовления высококачественных алюминиевых слоев, рассматривались способы их крепления к мелкоструктурированным подложкам и проводилось тестирование физических свойств изготовленных рентгеновских фильтров. Сами слои алюминиевых пленок готовились по стандартной методике вакуумным напылением на охлаждаемые гладкие стеклянные подложки с последующим отделением слоя от подложки и перенесением его на опорную структуру. Термическое напыление осуществлялось высоковакуумной установкой SCM-451 (Alcatel) с криогенной откачкой [31].

В этой же работе [31], но уже на другой напылительной установке, нами впервые было проведено прямое напыление никеля и других металлов на свободные сверхтонкие органические подложки, которые фиксировались

в плотном контакте на трековых мембранах со сквозными порами, что позднее использовалось при изготовлении очень сложного тонкопленочного фильтра для телескопа ТЕРЕК-К [30], основным компонентом которого служила свободная пленка карбида кремния [32]. Дело в том, что в одном из каналов этого телескопа один и тот же детектор регистрировал излучение (поочередно) на длинах волн 13.2, 17.5 и 30.4 нм. Совокупность требований к пропусканию фильтра на указанных линиях спектра и к степени блокировки сильной линии Солнца на длине волны 121.7 нм ($H_{L\alpha}$), а также наличие скачков поглощения и ограниченный выбор материалов определили конечную конфигурацию этого фильтра [30, 32]. В полетном варианте фильтр детектора канала МХ состоял из пленки карбида кремния толщиной 30 нм, слоев молибдена толщиной 5 нм и слоя слегка окисленного алюминия толщиной 35 нм. Слои фильтра фиксировались на поверхности металлизированной трековой мембраны со сквозными порами диаметром около 3 мкм, формваровый жертвенный слой под пленкой карбида кремния в области каналов пор полностью удалялся фототравлением на воздухе при комнатной температуре. Кроме этого фильтра, в близком контакте перед детектором рентгеновского изображения в канале HR (17.5 нм) этого же прибора был установлен алюминий-формваровый композит на трековой мембране [30].

Дальнейший прогресс в создании тонкопленочных фильтров на мелкоструктурированных подложках был связан с улучшением пространственного разрешения рентгеновских телескопов блока СРТ-К комплекса аппаратуры СПИРИТ для спутника КОРОНАС-Ф (2001–2005 гг.). На нем были установлены два телескопа с полосами пропускания на длинах волн 17.1, 19.2, 28.4 и 30.4 нм (телескоп Т1, Ritchey-Chretien telescope) и 17.5 и 30.4 нм (телескоп Т2, Herschel telescope/coronagraphs, два канала с двумя детекторами) [3]. Для фильтров детекторов этих телескопов (рис.9,а) мы использовали одинаковые металлизированные с двух сторон трековые мембраны из ПЭТФ толщиной около 8.5 мкм со сквозными порами цилиндрической формы диаметром 1.5 мкм и плотностью пор $1.4 \times 10^7 \text{ см}^{-2}$. По отработанной нами технологии на мембраны с формваровым подслоем наносились пленки алюминия толщиной 0.12 мкм, формвар со свободной поверхности алюминиевой пленки удалялся. Фильтр на пористой подложке устанавливался с малым зазором (около 0.7 мм) перед входной поверхностью МКП. В отличие от аналогичных фильтров, сделанных в виде сэндвича «пористая мембрана – тонкая пленка», которые служили фильтрами детектора в предыдущем полете станции КОРОНАС [30], в этом случае с целью улучшения пространственного разрешения телескопов были выбраны мембраны с большей плотностью пор меньшего диаметра. Кроме улучшения разрешения, эта замена сильно уменьшила пропускание фильтрами длинноволнового фонового потока в видимой и ближней ИК областях спектра из-за дифракционной фильтрации излучения. Заметим, что рентгеновские тонкопленочные фильтры на трековых мембранах надежно отработали на орбите в течение всего длительного (около четырех лет) полета станции КОРОНАС-Ф. Использование этих фильтров помогло собрать богатый экспериментальный материал для изучения активных процессов в короне Солнца методами рентгеновской изображающей спектроскопии [4].

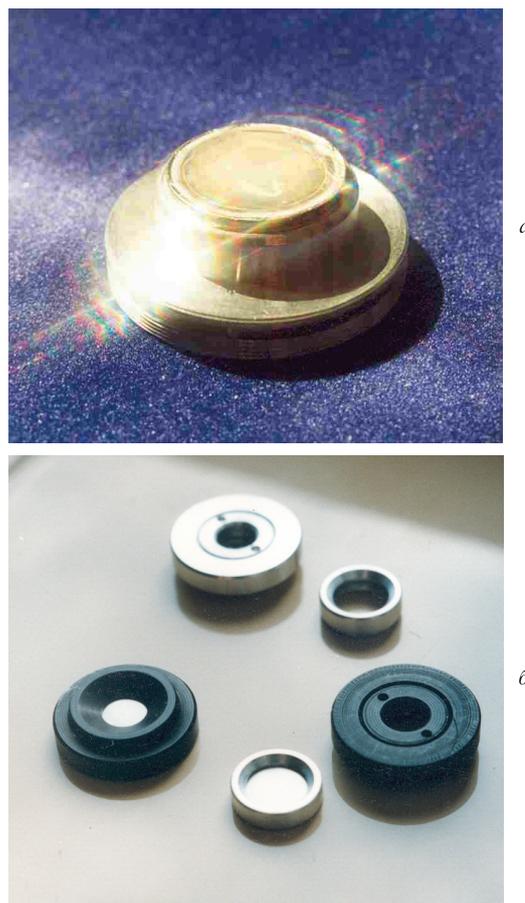


Рис.9. Фотографии фильтров на трековых мембранах в оправках: алюминиевый фильтр для детектора изображений на основе МКП одного из каналов телескопа спутника КОРОНАС-Ф [3, 4] (а) и молибденовые фильтры для диагностики лазерного излучения [33–35] (б).

Несколько слов о применении мелкоструктурированных фильтров в лазерной физике. Так, для создания квазимонохроматических пучков с использованием лазерно-плазменного источника излучения и спектральной фильтрации в области длин волн 10–14 нм в работе [28] был изготовлен и применен тонкопленочный родиевый фильтр на регулярной гальванической никелевой сетке с периодом 10 мкм (см. рис.1). Лазерная плазма возбуждалась второй гармоникой Nd-YAP-лазера с модулированной добротностью и длиной волны 0.54 мкм. Фильтр полностью блокировал нежелательное рентгеновское излучение френелевского отражения от многослойного зеркала и подавлял видимое и УФ излучения плазменного источника.

В работах по изучению физических свойств лазерных плазменных источников, применяемых в проекционной рентгеновской литографии, и их метрологии использовались тонкопленочные молибденовые фильтры на основе металлизированных трековых мембран с диаметрами пор микронного размера [33–35] (рис.9,б). Тонкие пленки тугоплавких металлов в качестве свободных пленок и рентгеновских фильтров в экспериментальной практике не столь распространены, как многослойные системы или алюминиевые пленки и фольги. Изготовление их по известным технологиям представляет собой сложную задачу, особенно если к пленкам предъявляются повышенные требования по механической прочности. Наши ис-

следования и эксперименты помогли обойти эту трудность. Как и в случае фильтра с пленкой карбида кремния на трековой мембране [30, 32], тонкие молибденовые и родиевые пленки на микроструктурированных подложках со сквозными отверстиями оказались прочными и не разрушались при изготовлении и в экспериментах, хотя напыленные структуры были напряженными из-за большой разности коэффициентов термического расширения пленки и материала опорной структуры. Малые размеры сквозных отверстий (и расстояний между ними) не только влияли на тепловые свойства фильтров, но и улучшали их механические свойства и прочность на разрыв, блокируя возникновение трещин и других механических дефектов.

7. Заключение

Рассмотрен вопрос об изготовлении тонкопленочных рентгеновских фильтров с использованием микроструктурированных подложек со сквозными отверстиями и стандартных методов напыления материалов на образец. На основе полимерных трековых мембран со сквозными порами, а также металлических микросеток с помощью прямого напыления на подложку были созданы образцы рентгеновских фильтров, которые в дальнейшем использовались в солнечных рентгеновских телескопах, изготовленных в ФИАНе, и в лабораторных приборах для диагностики лазерной плазмы. Показано, как использование массивных мелкоструктурированных подложек снимает многие проблемы, связанные с теплоотводом, перегревом и термическим разрушением тонкопленочных образцов, которые возникают при изготовлении рентгеновских фильтров, предназначенных для применений в мягкой рентгеновской и жесткой УФ областях спектра.

С признательностью, теплотой и уважением автор вспоминает И.А.Житника и И.И.Собельмана, нашу совместную работу и ту творческую атмосферу, которая создавалась ими как руководителями научного коллектива – лидерами экспериментальной рентгеновской астрономии в ФИАНе. За многолетнее сотрудничество и помощь в работах по изготовлению фильтров автор благодарит П.Ю.Апеля, В.К.Бардина, Ф.А.Пудонина и их коллег. Ряд полезных замечаний по тексту рукописи сделан А.В.Виноградовым, Е.Н.Рагозиным и Р.М.Фещенко, которым автор также благодарен. Работа выполнена в рамках Госзадания 0023-0006.

- Ораевский В.Н., Собельман И.И., Житник И.А., Кузнецов В.Д. *УФН*, **172**, 949 (2002).
- Собельман И.И., Житник И.А., Вальничек Б. и др., *Препринт ФИАН*, № 241, 18 (1988).
- Zhitnik I., Kuzin S., Afanas'ev A., Bugaenko O., et al. *Adv. Space Res.*, **32** (4), 473 (2003).
- Солнечно-земная физика: результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (М.: Физматлит, 2009, с. 488).
- Seely J.F., Korde R., Hanser F., Wise J., Holland G.E., Weaver J., Rife J.C. *Proc. SPIE*, **3764**, 103 (1999).
- Аруев П.Н., Барышева М.М., Бер Б.Я., Забродская Н.В., Забродский В.В., Лопатин А.Я., Пестов А.Е., Петренко М.В., Полковников В.Н., Салашченко Н.Н., Суханов В.Л., Чхало Н.И. *Квантовая электроника*, **42** (10), 943 (2012) [*Quantum Electron.*, **42** (10), 943 (2012)].
- Хаасс Дж., Франкомб М.Х., Гофман Р.У. (ред.). *Физика тонких пленок* (М.: Мир 1977, т. 7, с. 52).
- Томпсон Б.Дж., Шеннон Р.Р. (ред.). *Космическая оптика (Труды IX Международного конгресса по оптике)* (М.: Машиностроение, 1980, с. 243).
- Митрофанов А.В., Карбань О.В., Сугоняко А., Любомска М. *Поверхность*, № 7, 30 (2009).
- Powell Forbes R., Vedde P.W., Lindblom J.F., Powell Stephen F. *Opt. Eng.*, **26** (9), 614 (1990).
- Spiller E., Grebe K., Golub L. *Proc. SPIE*, **1160**, 66 (1989).
- Powell Forbes R. *Proc. SPIE*, **1848**, 503 (1992).
- Viitanen Veli-Pekka, Mutikainen Risto, Nenonen Seppo, Partanen Panu. *J. X-Ray Sci. Technol.*, **4**, 182 (1994).
- Bogachev S.A., Chkhalo N.I., Kuzin S.V., Pariev D.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Shestov S.V., Zuev S.Y. *Appl. Opt.*, **55**, 2126 (2016).
- Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Kluev E.B., Kuzin S.V., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Salashchenko N.N., Tsybin N.N., Zuev S.Yu. *Appl. Opt.*, **55**, 4683 (2016).
- Canfield L.R., Vest R., Woods T.N., Korde R. *Proc. SPIE*, **2282**, 31 (1994).
- Ройх И.Л., Колтунова Л.Н., Федосов С.Н. *Нанесение защитных покрытий в вакууме* (М.: Машиностроение, 1980, с. 21).
- Годовский Ю.К. *Теплофизика полимеров* (М.: Химия, 1982, с. 73).
- Гинзбург В.Л. и др. *Сборник задач по общему курсу физики*. (М.: Наука, 1964).
- Ludwig Reimer. *Transmission Electron Microscopy* (Springer series in Optical Sciences) (Berlin, Tokyo: Springer, 1997, Vol. 36, p. 468).
- Ярославцев А.Б. (ред.). *Мембранные и мембранные технологии* (М.: Научный мир, 2013, с. 126).
- Купцов А.Х., Жижин Г.Н. *Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров* (М.: Техносфера, 2013, с. 169).
- Фортегско П., Суайнерд Г., Старк Д. (ред.). *Разработка систем космических аппаратов* (М.: Альпина Паблишер, 2015, с. 408).
- Брамсон М.А. *Инфракрасное излучение нагретых тел* (М.: Наука, 1965).
- Sala Aleksander. *Radiant Properties Materials* (Amsterdam: Elsevier, 1986, p. 47).
- Адамов Д.Б., Савинич В.С. *Инженерно-физический журнал*, **37** (2), 285 (1979).
- Gruner G. (Ed.). *Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids* (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1998, Vol. 74, p. 68).
- Колачевский Н.Н., В.В. Кондратенко В.В., Митропольский М.М., Митрофанов А.В., Рагозин Е.Н., Федоренко А.И., Юлин С.А. *Кр. сообщ. по физ., ФИАН*, № 3–4, 12 (1993).
- Труды XXI Междунар. симп. «Нанофизика и нанофотоника»* (Новгород: изд. НГУ, 2017, т. 1, с. 408).
- Mitrofanov A., Pudonin F., Starodubzev N. Zhitnik I. *Proc. SPIE*, **3406**, 35 (1998).
- Mitrofanov A.V., Tokarchuk D.N. *Nucl. Instr. Meth.*, **A282**, 546 (1989).
- Mitrofanov A., Pudonin F., Zhitnik I. *Proc. SPIE*, **2280**, 272 (1994).
- Bijkerk F., Shmaenok L., Louis E., van Honk A., van der Wiel M.J., Platonov Yu.A., Shevelko A.P., Mitrofanov A.V., Voß F., Desor R., Frowein H., Nikolaus B. *Proc. SPIE*, **2015**, 128 (1993).
- Bijkerk F., Shmaenok L., van Honk A., Bastiaensen R., Platonov Yu.A., Shevelko A.P., Mitrofanov A.V., Voß F., Desor R., Frowein H., Nikolaus B. *J. Phys. III France*, **4**, 1669 (1994).
- Shmaenok L., Bijkerk F., Louis E., van Honk A., van der Wiel M.J., Platonov Yu., Shevelko A., Mitrofanov A., Frowein H., Nikolaus B., Voß F., Desor R. *Microelectronic Eng.*, **23**, 211 (1994).