

РАЗРАБОТКА МОЭМС В СГГА

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, тел. (383)-361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой наносистем и оплотехники, тел. (383)-361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Приведены краткая история и особенности разработки микро-опто-электро-механических систем (МОЭМС) в Лаборатории физических и образовательных проблем микротехнологий (ФОПМ) Сибирской государственной геодезической академии (СГГА).

Ключевые слова: микромеханика, МОЭМС.

MOEMS DEVELOPMENT IN SSGA

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10), Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Physics department, (383)-361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10), Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Nanosystems and optical engineering department, (383) 361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Brief history and features of Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems (MOEMS) development in Laboratory of Physical and Educational Problems of Microtechnologies of Siberian State Academy of Geodesy (SSGA) is presented.

Key words: micromechanics, MOEMS.

В данном сообщении рассмотрены физические модели и основы теории функционирования микромеханических оптоэлектронных преобразователей. Теоретически и экспериментально исследовались тонкоплёночные устройства с бегущими в микроволноводах упругими волнами, выполняющие функции перестраиваемых дифракционных решёток (в случае изгибных волн) или оптических дефлекторов и сканеров (в случае крутильных волн). Представлены также тонкоплёночные микрозеркальные устройства субпиксельного микросканирования; тонкоплёночные оптические затворы с субнаносекундным быстродействием, предназначенные для защиты от повреждающего лазерного излучения; технологии получения наноразмерных регулируемых воздушных промежутков между поверхностями площадью до единиц квадратных

сантиметров и оптические интерференционные электрически перестраиваемые фильтры на их основе.

Исследования по созданию микросистем интенсивно развиваются в различных странах. Первой отечественной работой, видимо, являлись разработки Дятлова В.Л. с сотрудниками в 60-70-х годах прошлого века в области плёночной электромеханики [1]. Современное состояние разработок микромеханических устройств оптического назначения рассмотрено, например, в обзорной статье [3].

Наши работы велись в области исследования плёночных микроэлектромеханических устройств оптического применения, начиная с 1970 г., среди полученных тогда результатов можно указать формулирование принципа электростатического наката плёночных электродов [2], разработку физической модели мембранных тонкоплёночных модуляторов света [4]; позже выполнены разработки физической модели и лабораторной технологии микрозеркальных магнитоуправляемых дефлекторов света [5], и др. В последние годы разработан плёночный оптический затвор с субнаносекундным быстродействием для защиты от повреждающих импульсов лазерного излучения [6], исследуются технологии получения наноразмерных (до 50–300 нм) регулируемых воздушных промежутков между поверхностями площадью до единиц см^2 и оптические интерференционные электрически перестраиваемые фильтры на их основе [7].

В настоящее время изучаются возможности использования взаимодействия медленных упругих волн в тонкоплёночных мембранах со световыми потоками для создания функциональных элементов оптики и оптоэлектроники [8].

Основным элементом тонкоплёночных устройств на медленных упругих волнах являются акустические микроволноводы (проводники упругих волн) в виде тонкоплёночных одиночных микробалок, закреплённых концами, или массивов таких микробалок, расположенных над поверхностью подложек с зазором порядка доли длины световой волны. Размеры микробалок характеризуются площадью их сечения 1–10 мкм^2 . Акустические волны могут возбуждаться модулированным световым лучом, падающим на плёночную структуру, или возбуждаются одним из электрофизических методов (электростатическим, пьезоэлектрическим), и вносят фазовые сдвиги в отражённое или проходящее световое излучение, искажая тем самым фронт световой волны. Упругая бегущая изгибаемая волна в микроволноводе может распространяться с фазовой скоростью десятки – сотни метров в секунду, в десятки раз медленнее поверхностной акустической волны; длина упругой волны (10–100) мкм , что позволяет ей взаимодействовать с оптическим излучением в диапазонах от видимого до дальнего ИК.

Для разрабатываемых микромеханических устройств, использующих бегущие или стоячие упругие волны в волноводах, может оказаться приемлемой единая базовая акустоактивная среда в виде массива установленных на плоской подложке параллельно ей тонкоплёночных полосковых микромеханических акустических волноводов (рис. 1).

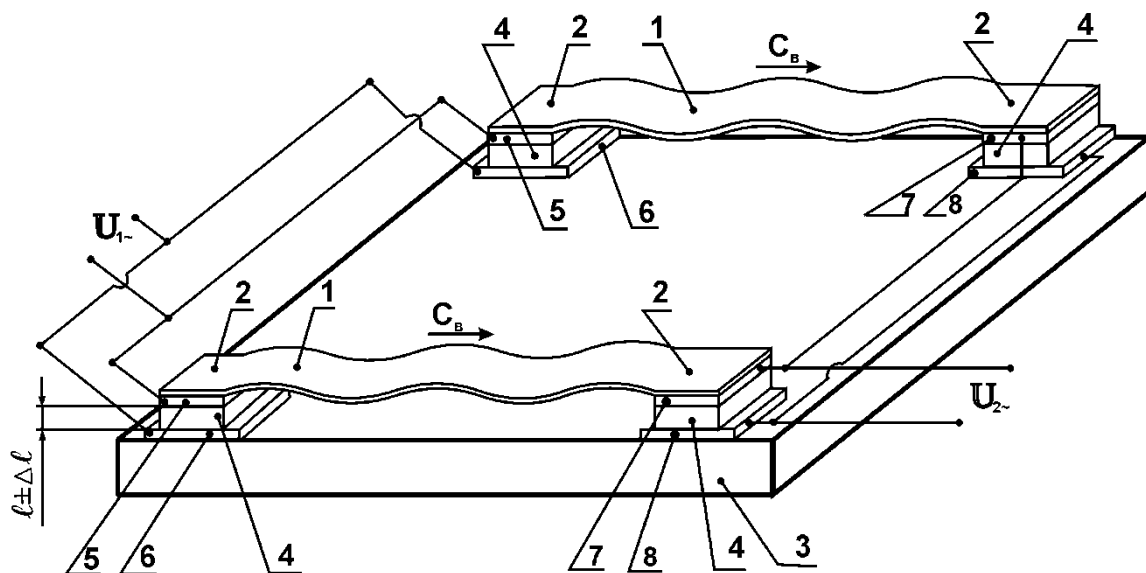


Рис. 1. Линейка микромеханических акустических волноводов

Ширина волновода меньше длины упругой волны. В этом случае его колебания одномерные и скорость изгибной волны [9] равна:

$$c_{nl} = \alpha_{nl} \sqrt{\omega E}; \quad \alpha_{nl}^4 = \frac{E_{ю} h^2}{12\rho(1-\sigma^2)}, \quad (1)$$

где h – толщина пластины, σ – коэффициент Пуассона материала пластины.

Для волновода из плёнки кремния $E_{ю} = 3 \cdot 10^{11}$ Па, $\rho = 3 \cdot 10^3$ кг/м³, $\sigma = 0,3$; при толщине $h = 10^{-6}$ м:

$$\alpha^4 = \frac{3 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-12}}{12 \cdot 3 \cdot 10^3 (1 - 0,3^2)} = 9,16 \cdot 10^{-6};$$

На частоте $f = 1$ МГц, $\omega = 2\pi \cdot 10^6$ получим:

$$C_{nl} = \alpha \sqrt{\omega} = 0,055 \sqrt{2\pi \cdot 10^6} = 137,86 \text{ м/с}.$$

Для стержня в виде тонкой пластинки фазовая скорость крутильной волны при $h \ll d$ [9]:

$$c_{фкр} = \frac{2h}{d} \sqrt{\frac{G}{\rho_0}}. \quad (2)$$

Режим бегущей волны даёт возможность плавного изменения длины волны в полоске путём непрерывного и плавного изменения частоты переменного напряжения, чему способствует также пьезовозбуждение упругой волны непосредственно на конце полоски,

Матрица микромеханических волноводов образует собой динамический транспарант. Оптическое считывание информации при облучении транспаранта на отражение монохроматическим излучением возможно по интерференционной схеме, если установить параллельно матрице волновода полупрозрачное зеркало.

В сочетании с соответствующей оптической схемой транспарант также может осуществлять оптическое преобразование Фурье, если информация вносится в динамическом режиме индивидуально в каждый волновод матрицы волноводов в виде последовательностей гармонических цугов с частотой колебаний, модулированной исследуемым процессом; матрица волноводов может осуществлять функцию дифракционной решётки с перестраиваемой постоянной при возбуждении всех волноводов электрическим сигналом одной перестраиваемой частоты.

Прогнозируемые параметры приборов на медленных упругих волнах существенно превышают параметры близких по принципам действия акустооптических устройств на поверхностных акустических волнах (на ПАВ).

Развитием концепции использования упругих волн для обработки информации являются устройства на упругих крутильных волнах. Преимуществом крутильных волн является независимость скорости их распространения от частоты колебаний и простота реализации эффективного взаимодействия со световыми потоками.

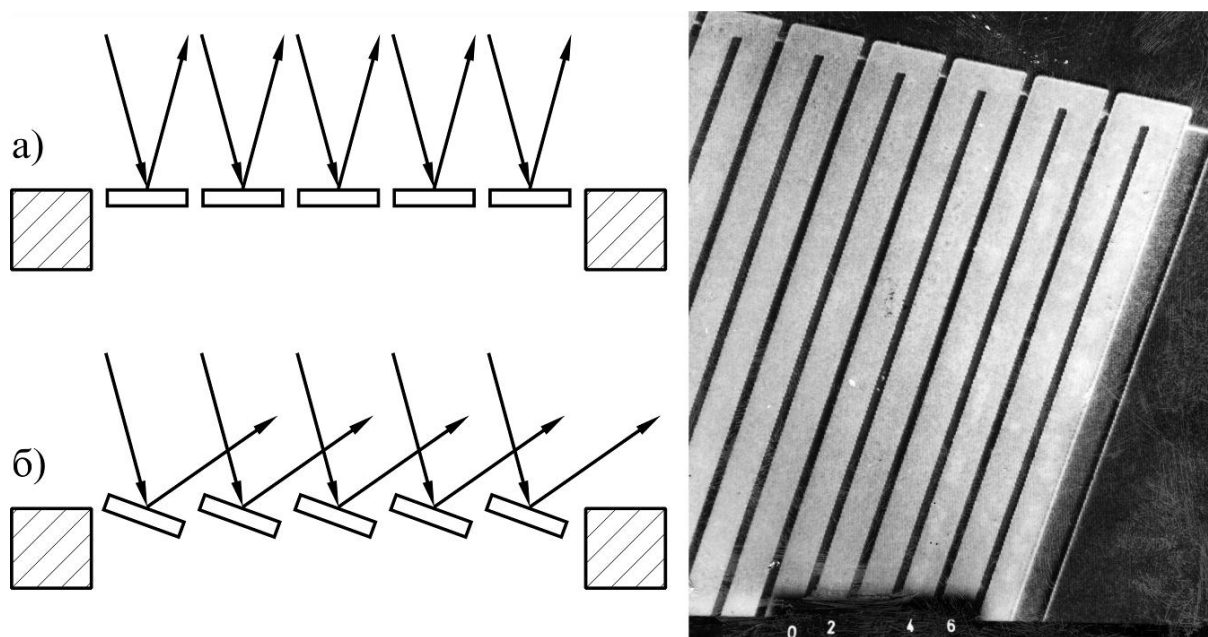


Рис. 2. Схема взаимодействия светового потока с упругиммикроволноводом, в котором возбуждена крутильная волна,и микрофотография соответствующей структуры

Разработан быстродействующий микромеханический дефлектор [10,11], содержащий одномерную матрицу кремниевых узких зеркальных полосок, совершающих крутильные колебания вокруг своей продольной оси. При этом матрица должна быть помещена в магнитное поле.

Полоски образуют составное зеркало; каждый сегмент зеркала имеет индивидуальный «движитель» – фотолитографически сформированный проволоочный виток, через который пропускается переменный ток, или напылённый микромагнит. В последнем случае переменным должно быть

внешнее магнитное поле. На рис. 2 показана принципиальная схема работы дефлектора и микрофотография соответствующей структуры.

Для изготовления дефлекторов может быть использована кремниевая планарная технология. Свободные полосы заданной толщины получаются с помощью известной методики химического травления кремниевой пластины, легированной в поверхностном слое бором до концентрации 10^{22} см^{-3} , что предотвращает растворение легированного слоя в избирательных травителях кремния. Рамка с током изготавливается гальваническим наращиванием золота по рисунку, заданному фотолитографически. Плёночные микромагниты напыляют в вакууме через маску испарением соответствующего магнитотвердого сплава.

Крутящий момент, вынуждающий полосу микрозеркала поворачиваться, возникает вследствие взаимодействия магнитного момента витка или микромагнита с внешним магнитным полем:

$$M_{\text{кр}} = P_m B \cos(\alpha \cos \omega t), \quad (3)$$

где P_m – магнитный момент, равный $P_{m,1} = iS$ в случае витка и $P_{m,2} = I_r V$ – в случае микромагнита (i – ток по витку, S – площадь витка с током, I_r – намагниченность, V – объем микромагнита); B – индукция внешнего магнитного поля; α – угол между направлением магнитного момента P_m и направлением внешнего магнитного поля; ω – частота крутильного момента; t – текущее время.

Наибольшая скорость поворота микрозеркала достигается в случае формирования в его полоске упругой стоячей волны; при этом вдоль полосы располагается половина длины упругой крутильной волны $\lambda / 2$.

Разрабатывается микрозеркальный сканер, использующий гибкие свойства тонкоплёночной зеркальной мембраны, основанный на эффекте электростатического наката гибкой зеркальной обкладки конденсатора с клиновым зазором между обкладками на вторую обкладку [2]. На рис. 3 схематически показана конструкция микромеханического сканера. На кремниевую профилированную подложку со стороны профилирования вплотную к вершинам выступов наложена тонкая металлизированная мембрана, являющаяся зеркалом дефлектора.

При подаче разности потенциалов между подложкой и слоем металлизации на мембране её участки электростатическими силами втягиваются в углубления профиля и занимают место на плоских участках наклонной части рельефа, плоское зеркало при этом разделяется на множество микрозеркал, имеющих одинаковые углы наклона относительно первоначального положения мембраны. Угол отражения света, падающего на сканер, при подаче напряжения изменяется на $\alpha = 2\gamma_0$, где γ_0 – угол наклона участков профиля.

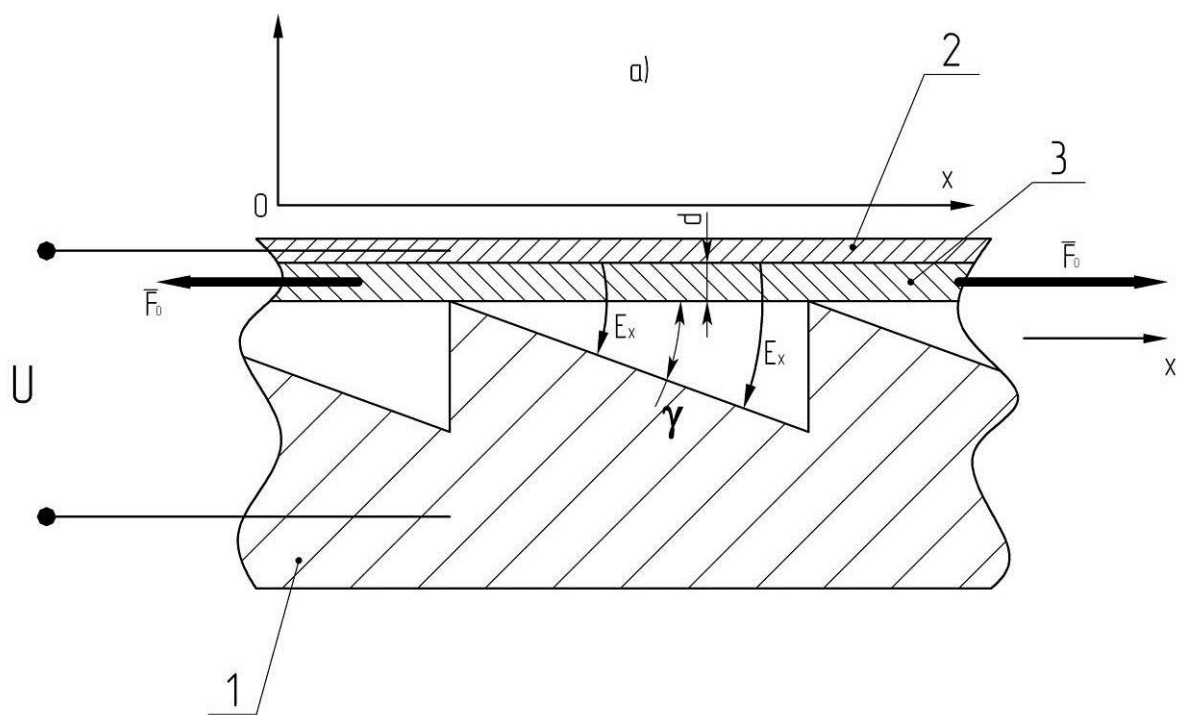


Рис. 3. Схема конструкции микромеханического оптического сканера

При снятии напряжения плоскостность мембраны восстанавливается. При требуемом угле сканирования порядка 1 угл. мин. глубина рельефа при его периодичности 0,1–0,5 мм лежит в нанометровом диапазоне размеров и примерно равна 30–150 нм. Получение подобного наноразмерного рельефа по всей поверхности подложки площадью до десятков квадратных сантиметров решается с использованием технологии анизотропного травления монокристаллического кремния.

При выводе расчётных соотношений считаем мембрану гибкой, не имеющей механической жёсткости, угол γ малым; принимаем форму силовой линии электрического поля между мембраной и наклонной плоскостью профиля частью окружности с центром в месте касания мембраны и наклонной плоскости; участок силовой линии в мембране считаем прямолинейным. При этих допущениях сила dF , действующая на бесконечно малый участок dx длины мембраны, имеющий единичную ширину, в точке координатой x , равна [2]:

$$dF = \frac{\varepsilon_0 E_x^2 dx}{2} = \frac{\varepsilon_0 U^2 dx}{2 \left(\frac{d}{\varepsilon} + \gamma_x x \right)^2}, \quad (4)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость мембраны, E_x и γ_x – напряжённость электрического поля на внутренней поверхности слоя металлизации мембраны и угол между поверхностью наклонного участка подложки и мембраной в точке с координатой x .

Базируясь на (4), можно получить уравнение для расчёта управляющего напряжения:

$$U = d \sin\left(\frac{b}{a} \gamma\right) \sqrt{\frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0}}. \quad (5)$$

Полагая в уравнении (5) отношение длин рабочего и вспомогательного участков микрозеркала $b/a = 10$, $\gamma = 3 \cdot 10^{-4}$, $d = 0,25$ мкм, механическое напряжение мембраны $\sigma = 10^6$ Па, $\varepsilon = 3$, получим: $U \approx 0,15$ В.

Рассмотренное устройство может быть применено в качестве субпиксельного микросканера для увеличения разрешающей способности матричных приёмников изображений и обладает существенно лучшими параметрами в сравнении с известными из литературы [13]. На рис. 4 показана оптическая схема тепловизионного приёмника изображения с зеркально-линзовой оптической системой, где в качестве зеркала применён субпиксельный микросканер. На рисунке: 1 – микросканер, 2 – матрица приёмника, h – сдвиг изображения в плоскости матрицы при срабатывании микросканера и повороте его зеркал на угол $\gamma = \alpha / 2$.

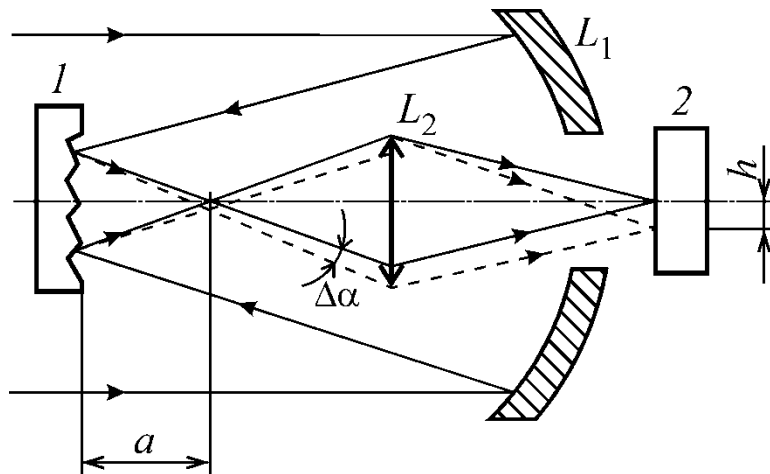


Рис. 4. Оптическая схема зеркально-линзового тепловизионного приёмника изображения со встроенным микросканером субпиксельного сканирования

Пластина микромеханического сканера устанавливается в качестве зеркала 1 на расстоянии a от плоскости формирования изображения сферическим или параболическим зеркалом L_1 . Линза L_2 формирует вторичное изображение в плоскости теплоприёмной матрицы 2. При работе сканера изображение в плоскости матрицы периодически смещается на величину h . Чувствительный элемент пиксела матрицы занимает часть площади пиксела, и при смещении изображения на чувствительный элемент попадает то одна, то другая часть изображения. Если значение h равно половине размера пиксела, то разрешение матрицы по направлению отклонения изображения увеличивается вдвое.

В течение нескольких лет нами проводились исследования уникальных свойств металлопленочных оптических зеркал, проявляющих нелинейно-оптические свойства под действием мощного лазерного излучения. Полученные теоретические и экспериментальные результаты позволили создать на их основе

оптические затворы с субнаносекундным быстродействием, не имеющие физических ограничений для работы от УФ до дальнего ИК диапазона спектра [6]. При использовании нелинейных зеркал в качестве затворов - ограничителей оптических излучений выявилось существенное превосходство таких ограничителей по оптическим параметрам над известными, например, фуллереновыми [12].

В связи с появлением в развитых странах мощного лазерного вооружения, в том числе, лазерных противоспутниковых и противоракетных систем, средств ослепления боеголовок самонаведения, и др, интенсивно разрабатываются средства оптической защиты наиболее уязвимых в условиях лазерного облучения элементов этих систем – фотоприёмных устройств. Подобные средства оптической защиты находят также и гражданское применение – в промышленности, при научных исследованиях.

Проблемами фуллереновых ограничителей при работе против мощного импульсного облучения являются, как показывают наши расчёты, а) недостаточная стойкость в связи с тем, что по принципу действия такие ограничители должны поглощать падающее излучение полностью и рассеивать его в своей среде, и б) недостаточно низкий порог срабатывания, что вызвано необходимостью поглощения падающего излучения в значительном объёме поглощающей среды.

Нелинейные зеркала размещаются в области действительного промежуточного изображения оптико-электронной системы прибора наблюдения (рис. 5).

В момент прихода ослепляющего импульса от лазерного излучателя зеркало, нагреваясь и плавясь локально в точке изображения излучателя, уменьшает свою отражательную способность практически до нуля, что ускоряет ввод тепловой энергии в вещество и является фактором, обеспечивающим быстродействие затвора менее наносекунды; при дальнейшем действии излучения металл испаряется, в месте падения излучения образуется отверстие в плёнке, и отражение от данного участка зеркальной поверхности затвора практически прекращается.

Отражённое всем зеркалом излучение объективом продолжает фокусироваться в область приёмника излучения, создавая там изображение сцены наблюдения, на котором точкой отображается место расположения ослепляющего излучателя. Порог срабатывания нелинейного зеркала наступает, как показывают наши расчёты и подтверждают эксперименты, при плотности энергии импульса падающего излучения на поверхности зеркала $0,01 \text{ Дж/см}^2$, меньшей, в сравнении с фуллереновыми ограничителями, в 60–100 раз; зеркало сохраняло работоспособность защищаемой фотоприёмной матрицы при многократном облучении импульсами излучения с плотностью энергии 10^4 Дж/см^2 , оставаясь и после этого воздействия рабочим (эксперименты проведены на длине волны $1,06 \text{ мкм}$). Наличие возникающих в зеркале малых отверстий не ухудшает ни его механических свойств, ни оптических. Зеркало в целом остаётся работоспособным, пригодным для выполнения защитных функций, его расчётный ресурс 10^5 попаданий ослепляющих импульсов.

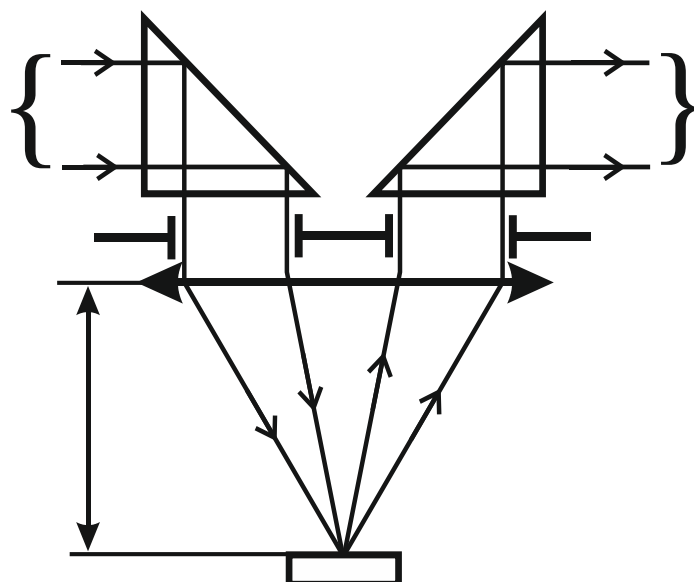


Рис. 5. Оптическая схема ограничителя энергии лазерного импульса с помощью нелинейного оптического зеркала в виде зеркальной плёнки

График на рис. 6 показывает зависимости температуры нагрева нелинейного зеркала от длительности лазерного импульса с интенсивностью падающего излучения $I_0 = 5 \cdot 10^{11}$ Вт/м².

Основные технические характеристики разработанного затвора-ограничителя. Затвор является пассивным, срабатывающим от энергии падающего излучения устройством, обеспечивает защиту от лазерного ослепления.

– Время срабатывания, нс	1,0
– Световой диаметр, мм	11,5
– Энергия срабатывания, Дж	$(5-10) \cdot 10^{-6}$
– Рабочий диапазон длин волн, мкм	0,9–1, 2
– Коэффициент защиты (доля энергии ослепляющего лазерного импульса, проходящая к защищаемому оптоэлектронному устройству, зависит от длительности импульса ослепления)	$(3-300) \cdot 10^{-5}$
– Технический ресурс, импульсов ослепления	10^4-10^5
– Максимальная энергия ослепляющего импульса	не лимитируется

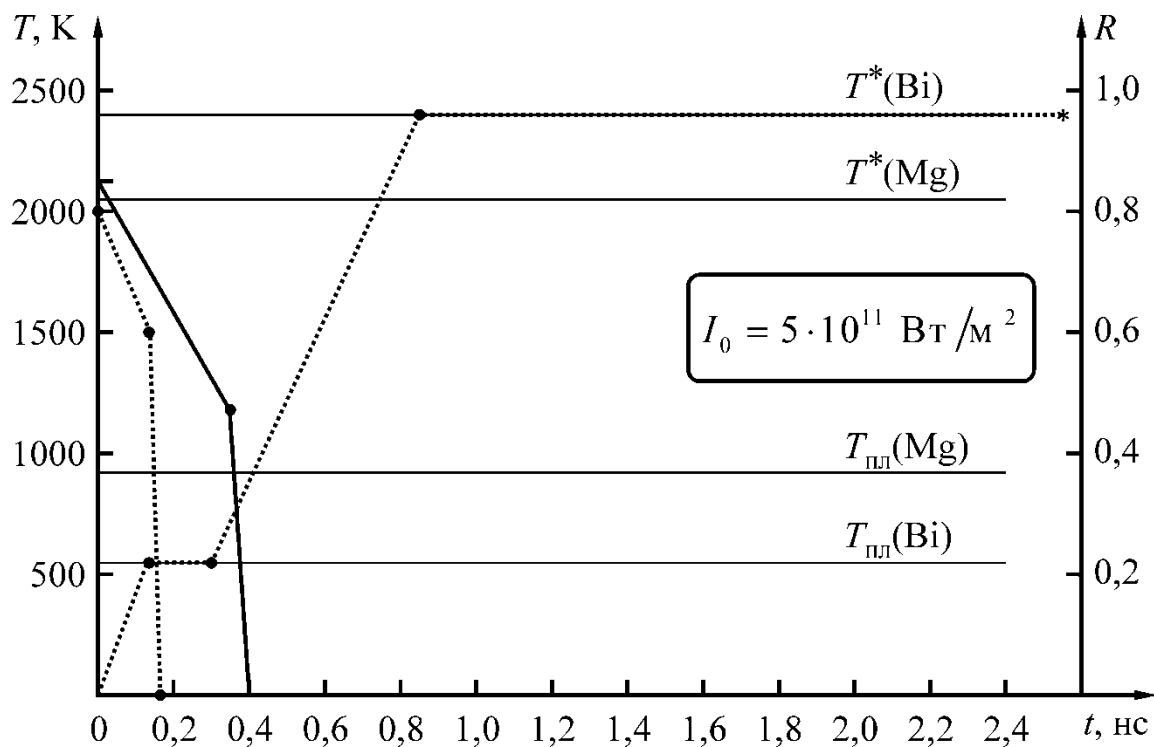


Рис. 6. График зависимости температуры T плёнок магния и висмута толщиной 100 нм и их показателя отражения R от времени облучения для интенсивности падающего излучения $I_0 = 5 \cdot 10^{11} \text{ Вт/м}^2$

Актуальность исследования обусловлена как высокими характеристиками создаваемого устройства, так и влиянием появления нелинейных зеркал на рынке на направления разработок лучевого лазерного оружия. По нашему мнению, при защите фотоприёмных устройств космических аппаратов нелинейными зеркалами способность сенсоров противостоять поражающему действию мощного лазерного облучения сравнивается с устойчивостью корпусных элементов аппаратов.

Ряд задач в области микро- и нанoeлектроники и наносистем решается при создании технологии получения наноразмерных (величиной 1–100 нм) воздушных или вакуумных промежутков между электродами или поверхностями тел. Получение таких промежутков является проблемой при разработках оптических электроуправляемых спектральных фильтров. Задача получения воздушного промежутка существенно усложняется при необходимости его выдерживания плоским или эквидистантным при большой – до см^2 – площади поверхностей, обычные способы получения с использованием жертвенных слоёв требуют значительного времени на удаление этих слоёв из нанометровых промежутков.

На рис. 7 приведена схема устройства, при изготовлении которого получение плоского или эквидистантного промежутка между зеркальными покрытиями не требует применения жертвенного слоя. Между поверхностями зеркал, как в капилляр, вводится летучая жидкость, она растекается слоем толщиной до единиц – десятков нанометра, капиллярные силы прижимают

поверхности друг к другу. После закрепления поверхностей жидкость испаряется.

Способ иллюстрируется на рис. 7.

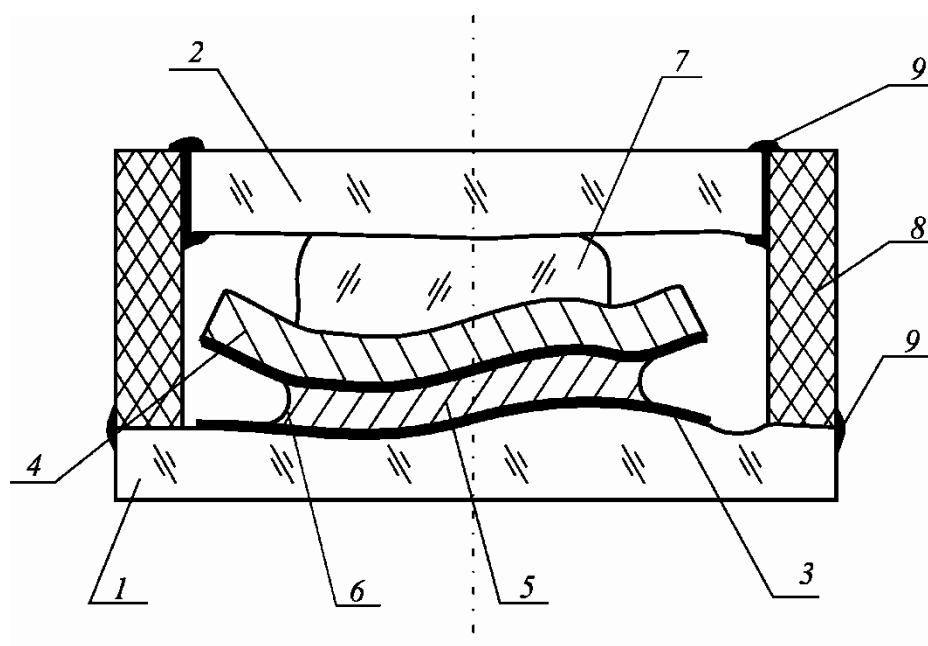


Рис. 7. Способ получения плоского или эквидистантного промежутка между зеркальными покрытиями не требует применения жертвенного слоя

На рисунке: 1 и 2 – вторая и первая прозрачные пластины, 3 – зеркальный слой на поверхности второй пластины, 4 – гибкая плёнка, 5 – смачивающая жидкость, 6 – мениск на боковой поверхности слоя жидкости, вызванный капиллярными силами в жидкости, 7 – твердеющая среда, 8 – корпус, скрепляющий пластины 1 и 2 как в процессе затвердевания среды 7, так и после удаления слоя жидкости 5, 9 – клей, соединяющий корпус и пластины.

Давление внутри слоя жидкости между смоченными поверхностями относительно давления во внешней среде можно определить в соответствии с уравнением Лапласа – Юнга как для мениска с цилиндрической симметрией:

$$\Delta p = \sigma / R, \quad (6)$$

где Δp – разница давлений внутри жидкости и снаружи, σ – поверхностное натяжение жидкости на границе с воздухом, R – радиус закругления поверхности мениска. При полном смачивании $R = d / 2$. Используем воду ($\sigma = 0,073 \text{ Н/м}$); при $d = 0,1 \text{ мкм}$ получим для отрицательного давления в капиллярном слое значение $\Delta p = 1,46 \text{ МПа}$ (14,6 атм), что подтверждает предположение о достаточности капиллярного давления для прижима гибкой плёнки.

При сближении поверхностей и перекрытии граничных слоёв возникает давление, которое имеет характер расклинивающего. В работе [14] приведён обзор современных представлений о составляющих расклинивающего

давления, в числе которых наличие двойного электрического слоя, изменение структуры жидкости, адсорбция низкомолекулярных веществ, и др.

Сравнение составляющих расклинивающего давления с капиллярным в жидкой прослойке показывает существенно большую величину капиллярного вплоть до величины зазора между поверхностями порядка единиц нанометра. Для молекулярно гладких поверхностей наименьшая физически достижимая величина зазора равна удвоенной толщине адсорбированного поверхностями мономолекулярного слоя.

Для получения воздушной среды в капиллярном промежутке жидкость должна быть из него удалена, например, нагреванием и испарением. Малая величина воздушного зазора может приводить к слипанию поверхностей под действием межмолекулярных дисперсионных сил [14, 15].

В системе «металл – воздух – металл» при величине промежутка 0,5 нм, расчётное притяжение поверхностей, обеспечиваемое дисперсионными силами, может достигать значений, при которых поверхности монолитно сцепляются. Для реальных структур оптических устройств в большей степени подходит система «силикат – воздух – силикат», в которой притяжение поверхностей существенно меньше и недостаточно для их срачивания.

Силы поверхностного притяжения при наноразмерных величинах воздушных промежутков между плоскими поверхностями деталей конструкции могут вызывать в конструкциях значительные упругие силы и деформации.

Разработка лабораторной технологии получения наноразмерных промежутков между поверхностями позволила создать макетные образцы микромеханических электрически перестраиваемых многолучевых интерферометров с шириной спектральной области перестройки порядка октавы.

За счёт использования двух интерферометров – низкого и высокого порядков – можно выделять из спектра источника излучение более монохроматическое при сохранении величины перестраиваемого диапазона – достижима полоса пропускания менее нанометра.

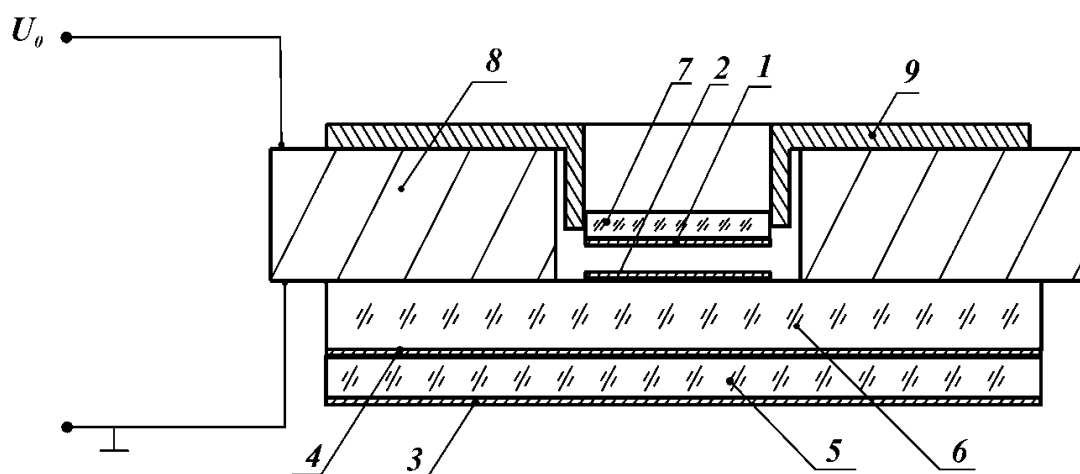


Рис. 8. Упрощённая схема электрически перестраиваемого мультиплекс-интерферометра

Упрощённая схема такого светофильтра показана на рис. 8. Светофильтр первого порядка образован зеркалами 1 и 2 и воздушным зазором между ними. Светофильтр высокого порядка образован зеркалами 3 и 10 и прозрачной пластиной 5 между ними. Зеркало 1 нанесено на прозрачную пластину 7; пьезокерамическая шайба 8 поддерживает между зеркалами 1 и 2 воздушный зазор величиной 0,2–0,4 мкм. Управление величиной воздушного зазора пьезоэлектрическое: управляющее напряжение U_0 подаётся между электродами на пьезоэлементе.

Определим возможные параметры рассматриваемого микромеханического мультиплекс-светофильтра. В мультиплекс-интерферометре при отношении оптических толщин интерферометров, кратном целому числу, область дисперсии определяется областью дисперсии тонкого интерферометра, а разрешение – толстым интерферометром.

Прозрачность мультиплекс-светофильтра аналогична прозрачности 4-х зеркального интерферометра и определяется формулой [16]:

$$T_M = \frac{T^4}{(1+R)^2 \left[(1-R)^2 + 4R \sin^2 \frac{\delta_2}{2} \right]}, \quad (7)$$

где $\frac{\delta_2}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} n L_2$ (без учёта скачков фаз на отражающих поверхностях), T и

R – энергетические прозрачность и коэффициент отражения каждого зеркала. Порядок спектра определяется выражением:

$$q = \frac{2Ln}{\lambda_{cp}}, \quad (8)$$

где Ln – оптическая ширина расстояния между зеркалами; λ_{cp} – средняя длина волны области дисперсии интерферометра.

Область дисперсии мультиплекс-светофильтра примерно равна области дисперсии тонкого светофильтра [16]:

$$\Delta\lambda_M = \frac{\lambda_{cp}}{q_1}, \quad (9)$$

где q_1 – порядок спектра тонкого светофильтра.

Разрешаемая разность длин волн в мультиплекс-светофильтре определяется выражением [16]:

$$\delta_\lambda = \frac{\lambda}{q_2} \cdot \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}}. \quad (10)$$

Аппаратная функция мультиплекс-светофильтра равна произведению аппаратных функций его составных частей, светофильтр пропускает излучение с длинами волн, одновременно присутствующими в полосах пропускания обеих составляющих его светофильтров.

При перестройке (путём изменения зазора между зеркалами) светофильтра с первым порядком интерференции его полоса пропускания смещается по спектру, происходит выделение одной полосы дисперсии, затем другой полосы

второго светофильтра, то есть, «переключение» диапазонов $\Delta\lambda_2$. Необходимо обеспечить равенство полосы пропускания светофильтра с меньшим зазором δ_{λ_1} полосе дисперсии $\Delta\lambda_2$ второго: $\delta_{\lambda_1} \approx \Delta\lambda_2$.

Число M «переключаемых» полос дисперсии равно:

$$M = \frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_2}. \quad (11)$$

Найдём полосу дисперсии второго интерферометра:

$$\Delta\lambda_2 = \frac{\lambda}{q_2}. \quad (12)$$

Соответствующее этой полосе расстояние L_2 между зеркалами второго интерферометра найдём по выражению:

$$nL_2 = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot q_2. \quad (13)$$

Здесь n – показатель преломления среды.

Количественная оценка показывает возможность работы интерферометра в первом порядке спектра и диапазоне перестройки 0,4 – 0,8 мкм.

На рис. 9 приведён расчётный график зависимости (по формуле (4)) коэффициента пропускания мультиплекс-светофильтра в видимом диапазоне спектра от величины регулируемого зазора тонкого светофильтра, которая плавно изменяется от 0,2 до 0,4 мкм. Толщина зазора толстого светофильтра $n_2L_2 = 5,8$ мкм, энергетическая прозрачность и коэффициент отражения каждого зеркала соответственно равны: $T = 0,1$ и $R = 0,85$.

Управление величиной воздушного промежутка между зеркалами осуществляется изменением управляющего напряжения, приложенного между обкладками пьезокерамической шайбы 8. Зависимость изменения её толщины от величины напряжения определяется выражением:

$$\Delta l = \ell d_{33} E = d_{33} U_0, \quad (14)$$

где d_{33} – пьезокерамический модуль материала пьезоэлемента, Δl – деформация по толщине пьезоэлемента, E – напряжённость электрического поля в пьезоэлементе, U_0 – напряжение, подаваемое на обкладки пьезокерамической шайбы.

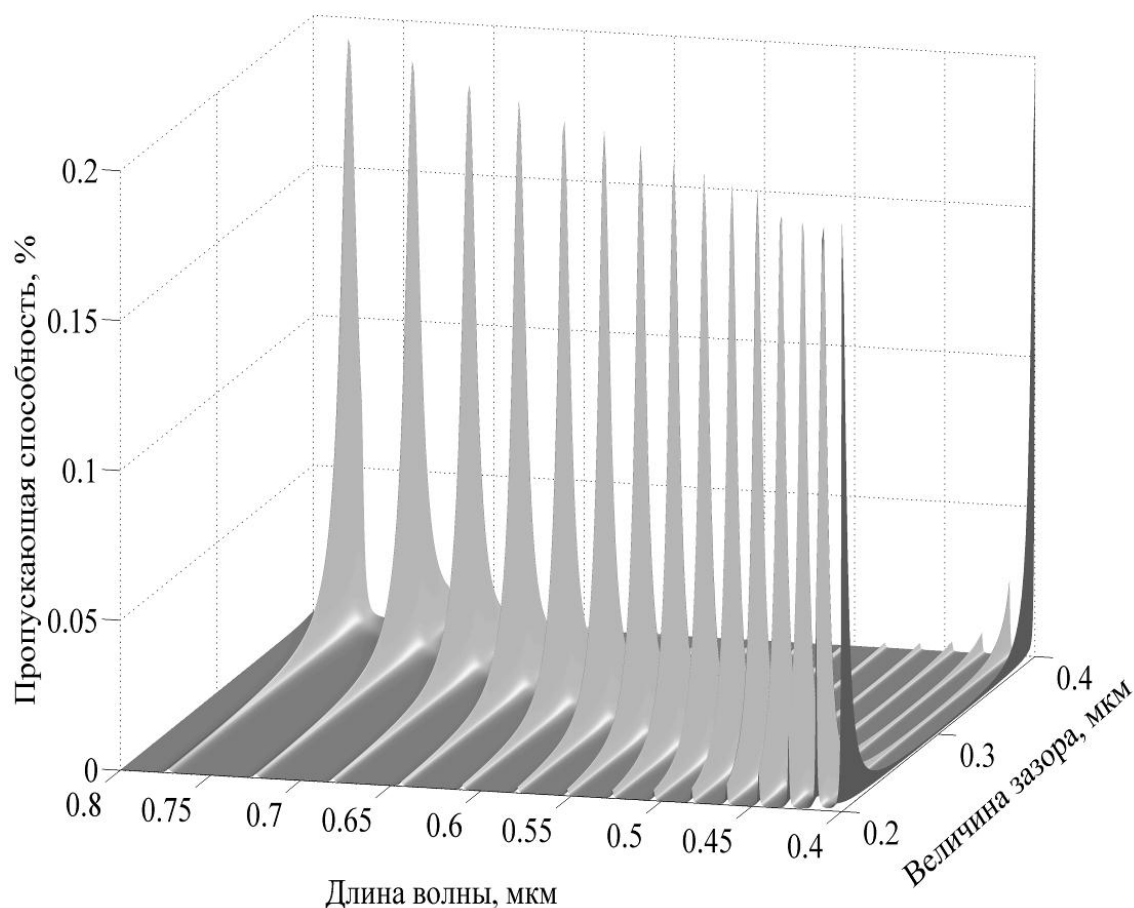


Рис. 9. Расчётный график зависимости коэффициента пропускания мультиплекс-светофильтра от длины волны излучения и от расстояния между зеркалами интерферометра первого порядка интерференции

Подобный светофильтр, по нашему мнению, может найти применение в системах экспресс-анализа химических веществ и различных промышленных жидкостей и газов, при исследованиях содержания вредных веществ в окружающей среде. Светофильтр может иметь модификации, работающие в различных участках инфракрасного диапазона спектра.

Подведены некоторые итоги работы нашего научного коллектива в области исследования плёночных микроэлектромеханических устройств оптического применения. Полученные результаты являются оригинальными, не имеют аналогов; работы продолжаются как в направлении дальнейшего исследования физических и технологических основ приборов, так и в направлении применения разработанных устройств в народном хозяйстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дятлов В.Л. Плёночная электромеханика. Новосибирск: Наука, 1991. – 248 с.
2. А.с. 314304 СССР, МКИ Н 03 К 17/52. Электростатическое реле / В.В. Чесноков – № 1395318; заявл. 02.02.70; опубл. 07.09.71, Бюл. № 27.
3. Косцов, Э. Г. Состояние и перспективы микро- и нанoeлектромеханики / Э.Г. Косцов // Автометрия. – 2009. – Т. 45, № 3. – С.3–52.
4. А.с. 363398 СССР, МКИ G 02 F 1/18. Мембранный модулятор света / В.В. Чесноков – № 1420256; заяв. 7.04.70; не опубл.

5. А.с. 1569783 СССР, МКИ G 02 В 26/10. Сканирующее магнитоэлектрическое устройство / В.В. Чесноков – № 4325366; заявл. 9.11.87; опубл. 07.06.90, Бюл. № 21.
6. Чесноков, В.В. Плёночные пассивные оптические затворы для защиты приёмников изображения от ослепления / В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, В.Б. Шлишевский // Оптический журнал. – 2011. – Т.78, № 6. – С.39–46.
7. Nikulin D.M., Chesnokov V.V., Chesnokov D.V. Tunable interference colour filter in micromechanical performance // Key Engineering Materials. – 2010. – Vol. 437. – P.412–415.
8. Nikulin D.M., Chesnokov V.V., Chesnokov D.V. The Control of Elastic Traveling Waves in Thin-film Free Structures // International School and Seminar on Modern Problems of Nanoelectronics, Micro- and Nanosystem Technologies INTERNANO'2009 (Russia, Novosibirsk, 2009, Oct. 28–31): Proc. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.119–121.
9. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. – М.: Мир, 1971.
10. Чесноков В.В. Микромеханический модулятор света // Изв. вузов СССР. Приборостроение. – 1990. – № 6. – С.82.
11. Чесноков Д.В. Микромеханический дефлектор световых потоков // Оптический журнал. – 2007. – № 4. – С.51–54.
12. Каманина Н.В. Фотофизика фуллеренсодержащих сред // Нанотехника. – 2006, – № 1. – С.86–98.
13. Резник А.Л. Повышение пространственного разрешения цифровых изображений и сигналов с помощью регулируемого субпиксельного сканирования / А.Л. Резник, В.М. Ефимов // Микросистемная техника. – 2003, №8. – С.20-25.
14. Ролдугин, В. И. Физикохимия поверхности: учебник – монография / В.И. Ролдугин. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 568 с.
15. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. – М.: Химия, 1976. – 431 с.
16. Скоков И. В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.

© В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, 2012