

УДК 681.7.026.6

Светопоглощающие покрытия на основе алмазоподобного углерода

Чекан Н.М.^{*}, Акула И.П., Логуновская Н.В.

^{*} pec@bas-net.by

Физико-технический институт НАН Беларуси

С использованием комбинированного метода физического и химического осаждения в вакууме получен новый тип поглощающих покрытий на основе алмазоподобных углеродных материалов. Красная граница фундаментальной полосы поглощения материала покрытий составляет 900 - 1000 нм, коэффициент поглощения для середины видимой области спектра достигает значения 10^5 см^{-1} . Для подложек из инвара со средней шероховатостью 0,035 и 0,18 мкм коэффициент отражения составляет 5,4% и 0,6% соответственно. Термоциклирование в вакууме показало неизменность физических и оптических характеристик покрытий. Приведены примеры использования покрытий на корпусных деталях фотоприемников с зарядовой связью, предназначенных для дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: поглощающие покрытия, алмазоподобный углерод, фотоприемники, зондирование Земли.

Введение

Антибликовые поглощающие покрытия корпусных деталей являются неотъемлемой частью всех оптических устройств. Особые требования предъявляются к таким покрытиям в случае их применения в устройствах приема оптического излучения космических аппаратов. Они должны иметь высокий коэффициент поглощения в видимом диапазоне длин волн, обладать высокой механической прочностью, противостоять абразивному износу и выдерживать значительные перепады температуры.

В практике космического оптического приборостроения наиболее широкое применение нашли покрытия, получаемые методами микродугового оксидирования алюминия с введением в структуру пористых покрытий поглощающих веществ [1]. Такие покрытия обеспечивают поглощение света на уровне 95% и обладают высокой механической прочностью. Однако из-за сильного различия в коэффициентах теплового расширения с основой (алюминий) эти покрытия не в полной мере удовлетворяют требованиям для их использования в космосе. Они также не могут применяться в случае корпусных деталей, изготовленных не из алюми-

ниевых сплавов. Поэтому необходим поиск и разработка новых антибликовых поглощающих покрытий.

В последнее десятилетие достигнут значительный прогресс в получении алмазоподобных углеродных (АПУ) тонкопленочных материалов. В зависимости от методов и условий синтеза возможно в очень широких пределах изменять их механические и физические свойства [2]. Наличие в структуре АПУ покрытий графитоподобной фазы позволяет рассматривать их в качестве поглощающего материала для видимого излучения. Сочетание высокой твердости и стойкости к абразивному износу дает возможность использовать АПУ покрытия на корпусных деталях оптических устройств при соответствующей модификации их структуры. Этот материал характеризуется стойкостью к абразивному износу при контакте с космической "пылью", высокой химической инертностью и, что особенно важно, способностью противостоять воздействию термолизованного атомарного кислорода [3].

В настоящей работе приводятся результаты исследований и разработок по использованию в качестве антибликовых поглощающих покрытий алмазоподобного углерода, полученного методом комбинированного физического и химического вакуумного осаждения.

1. Получение и исследование АПУ покрытий

Наиболее качественными из АПУ материалов являются покрытия, получаемые физическими методами осаждения и, в первую очередь, с использованием катодно-дугового метода. Они относятся к первому типу алмазоподобных материалов, так называемому аморфному тетраэдрическому углероду (ta-C), наиболее близкому по своим физическим свойствам к природному алмазу. Однако поглощающая способность ta-C материала для видимого света слишком мала для его использования в качестве антибликовых покрытий. Существенно более высокой способностью к поглощению обладают АПУ покрытия, полученные методами химического осаждения из паровой фазы, содержащие повышенное значение sp^2 гибридизированных атомов углерода. Поэтому был использован специальный метод комбинированного физического и химического осаждения АПУ покрытий [2]. Его принцип основан на диссоциации молекул углеводородного газа и активации его радикалов углеродной плазмой импульсного катодно-дугового разряда.

Поглощающие покрытия были получены при средней мощности разряда 0,5 МВт и давлении реакционного углеводородсодержащего газа - ацетилена в пределах 0,05 - 4,5 Па. Толщина осажденных покрытий варьировалась от 0,8 до 4,0 мкм. В качестве подложек использовались различные материалы: полированный монокристаллический кремний, оптическое стекло К8, а также инвар с различной средней шероховатостью поверхности: 0,18 мкм, 0,1 мкм и 0,035 мкм. Инвар является специальным сплавом железа и никеля FeNi36, характеризующийся очень низким значением температурного коэффициента термического расширения (КТР), составляющего $(0,7 - 1,2) \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Этот материал часто используется для изготовления корпусных деталей фотоприемников, работающих в открытом космосе в условиях больших перепадов температуры.

Толщина АПУ покрытий определялась на микроинтерферометре МИИ-4 по высоте ступеньки, образованной после удаления маскирующего слоя с поверхности подложки. Для определения типов химических связей углеродных покрытий использовался метод комбинационного рассеяния света (КРС). Спектры КРС регистрировались на спектрометрическом комплексе Ramalog-4 фирмы SPEX. Оптические свойства АПУ покрытий исследовались с использованием спектрофотометров Hitachi U-3400 (коэффициент отражения) и Cary 500 (коэффициент пропускания). Показатель преломления АПУ покрытий, осажденных на кремний, определялся на лазерном эллипсометре ЛЭФ-3М ($\lambda = 632,8$ нм). Испытания образцов на термоциклирование проводили в вакуумной установке УВН-73П, рабочая камера которой оснащена откачным постом, обеспечивающим давление остаточных газов порядка 10^{-3} Па, лучевым нагревателем и криогенной системой охлаждения. Образцы были подвергнуты циклическому нагреву и охлаждению в температурном диапазоне $(+150 \dots -100)^\circ\text{C}$ с шагом изменения температуры $10^\circ\text{C}/\text{мин}$.

2. Типы химических связей

Поглощение света алмазоподобным углеродом происходит благодаря наличию фрагментов структуры с sp^2 гибридизацией валентных электронов атома углерода, образующих 3 планарные σ -связи и одну перпендикулярную им π -связь. Именно переходы электронов между связывающим и антисвязывающим состоянием π -орбитали вызывают поглощение света. Энергия между основным и возбужденным состоянием, определяющая величину оптической щели, для алмазоподобных материалов в сильной степени зависит от размеров и количества графитоподобных кластеров с sp^2 гибридизацией, а также нарушений их структуры сильно напряженной матрицей sp^3 связанных атомов углерода и имеет тенденцию к уменьшению с увеличением содержания графитоподобных колец и линейных цепей, образованных sp^2 связанным углеродом [4].

Сведения о структуре АПУ покрытий можно получить из анализа спектров комбинационного рассеяния света [5]. На рисунке 1 приведены спектры КРС и их разложение на составляющие пики для покрытий, осажденных в вакууме (а), и в среде ацетилена при парциальном давлении 0,6 Па (б).

Спектры содержат один широкий пик с максимумом в области частотного сдвига 1560 см^{-1} и характеризуются небольшим нарушением симметрии – в левой части спектральной кривой около 1330 см^{-1} появляется слабо выраженный выступ. Такие спектры являются характерными для высококачественного алмазоподобного углерода с большим содержанием атомов, образующих четыре валентные σ -связи. Сравнивая спектры можно видеть, что для АПУ покрытия, осажденного в атмосфере ацетилена, искажение симметрии спектральной кривой выражено более заметно и максимум кривой смещен в область низких частот. Положение пиков D и G, а так же соотношение их интенсивностей приведено в табл. 1.

Таблица 1. Данные спектроскопии КРС для АПУ покрытий

Давление ацетилена, Па	Позиция D-пика, см ⁻¹	Позиция G-пика, см ⁻¹	Отношение интенсивностей D и G пиков
вакуум	1336,8	1564,2	0,21
0,3	1354,2	1564,3	0,24
0,6	1333,4	1533,9	0,36
1,0	1333,0	1534,0	0,37

Наличие D пика обусловлено формированием в матрице sp^3 -связанных атомов наноразмерных фрагментов со структурой графита, приводящих к появлению групповых низкочастотных колебаний атомов углерода в ароматических кольцах, в то время как G-пик появляется при взаимодействии лазерного излучения с фононами, вызванными продольными колебаниями sp^2 -связанных пар атомов, которые могут находиться как в графитовых кольцах, так и в линейных цепях неупорядоченного углерода [6]. Для АПУ покрытий, полученных в вакууме и атмосфере ацетилена при $P \sim 0,6$ Па, отношение интенсивностей D- и G-пиков I_D/I_G заметно отличается и составляет 0,21 и 0,36 соответственно.

Повышение давления ацетилена и, соответственно, увеличение содержания молекулярного углерода в плазме приводит к уширению D-пика от 170,1 до 293,4 см⁻¹ и не сказывается на ширине G-пика, которая остается практически неизменной (224,6 и 228,3 см⁻¹). Это свидетельствует об увеличенном содержании графитоподобной фазы в покрытии, полученном в атмосфере ацетилена, благодаря росту числа включений с sp^2 -гибридизацией. Исходя из этих данных и используя методику полуколичественной оценки соотношения sp^2/sp^3 связанных атомов углерода по спектрам КРС [7], можно заключить, что оно составляет не менее 85% и 65% для АПУ покрытий, полученных в вакууме и в атмосфере ацетилена соответственно. Этот показатель характерен для тетраэдрического аморфного углерода ta-C, обладающего наибольшей твердостью из всех имеющихся алмазоподобных углеродных материалов.

Полученные данные по спектроскопии КРС позволяют произвести расчет размеров кластеров графита, включенных в матрицу аморфного материала с преобладающим sp^3 типом связи. В работе [4] для кластеров с размерами более 2 нм показана возможность использования выражения Тюнстра и Кенинга для оценки линейных размеров графитовых включений в L_a матрице алмазоподобной пленки:

$$I_D / I_G = C_1(\lambda) / L_a, \quad (1)$$

где $C_1(\lambda)$ – зависящий от длины волны света параметр. Для $\lambda = 512$ нм (длина волны аргонового лазера спектрометра) $C = 4,45$ нм.

Данные табл. 1 позволяют оценить размеры поглощающих графитовых кластеров для АПУ пленок, полученных при различных давлениях ацетилена. Для $P = 0,3, 0,6$ и $1,0$ Па средний размер кластера составляет 21,1, 12,4 и 12,0 нм соответственно. Эти значения суще-

ственно ниже соответствующего параметра для пленок, полученных в вакууме, который составляет 37,0 нм. Наноразмерные графитовые частицы, состоящие из нескольких сотен атомов углерода, обладают повышенной сорбционной способностью, так как имеют большое количество оборванных связей и слабосвязанных электронов на своей поверхности, способных эффективно поглощать оптическое излучение. При этом с ростом давления ацетилена при общем возрастании количества sp^2 связей уменьшается размер кластера и повышается его эффективность в поглощении света.

3. Оптические свойства покрытий

Табл. 2 демонстрирует результаты исследования оптических свойств АПУ покрытий на пластинах полированного кремния методами эллипсометрии.

Таблица 2. Оптические свойства АПУ покрытий

Давление ацетилена, Па	Толщина покрытия, нм	Показатель преломления n	Показатель поглощения k
0	85	2,52	0,06
0,05	97	2,50	0,13
0,50	101	2,18	0,14
1,00	103	2,10	0,16
2,00	124	2,07	0,19

Анализ представленных данных демонстрирует зависимость показателя преломления n и показателя поглощения k покрытий от давления ацетилена. Эта зависимость имеет монотонный характер для всего диапазона давлений газа: n уменьшается, а k увеличивается с ростом значений давления. Для получения поглощающих покрытий присутствие ацетилена в процессе их формирования является положительным фактором.

Для антибликовых покрытий большое значение имеет величина коэффициента отражения R . Данные табл. 2 позволяют произвести расчет R , используя следующее выражение:

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2)$$

Данные расчета по формуле (2) представлены в виде зависимости $R(P)$ на рисунке 2. Существенное изменение значения R наблюдается в области давлений до 1 Па. Приведенная зависимость показывает, что регулированием содержания ацетилена в вакуумной камере возможно уменьшить отражение света на длине волны 632,8 нм (излучение лазера эллипсометра) от зеркально гладкой поверхности АПУ покрытий до 12%. По сравнению с подложкой (полированный кремний) углеродная пленка уменьшает отражение света в 4 раза. Следует заметить, что в расчетах не учтено ослабление отражения за счет интерференционных яв-

лений – расчет проведен для случая “толстых” пленок. На этом же рисунке приведены рассчитанные по формуле (2) значения спектрального коэффициента поглощения α_λ

$$\alpha_\lambda = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (3)$$

В отличие от n для k наблюдается сильная зависимость от давления ацетилена. По сравнению с покрытиями, полученными в вакууме, покрытия, осажденные в атмосфере углерода, увеличивают свою способность к поглощению света более чем в 3,5 раза.

Как известно [7], изменение показателя преломления тесно связано с изменением плотности материала оптической среды, в то время как показатель поглощения в большей степени связан со структурой и электронной конфигурацией. Из полученных экспериментальных данных следует, что происходит значительное изменение электронной структуры и конфигурации атомных связей в углеродном покрытии на фоне умеренного изменения его плотности при переходе от чисто физического осаждения к смешанному физическому и химическому осаждению.

Исследования коэффициента отражения АПУ покрытий, учитывая сильную зависимость отражения света от состояния морфологии поверхности, проводились на подложках из инвара с различной шероховатостью. В табл. 3 приведены значения параметра шероховатости Ra поверхности основы и основы с покрытием, также даны результаты исследований коэффициента отражения R .

Таблица 3. Коэффициент отражения АПУ покрытий

Давление аце- тилена	Толщина покрытия, мкм	Полированная поверхность (Ra = 0,035 мкм)		Шлифованная поверхность (Ra = 0,18 мкм)	
		Ra, мкм	R, %	Ra, мкм	R, %
Без покрытия		0,035	46,0	0,18	5,20
0,2	2,10	0,076	11,5	0,27	1,27
1,0	2,36	0,066	8,68	0,29	0,66
4,5	3,25	0,13	5,4	0,33	0,56

Можно видеть, что нанесение покрытий толщиной более 2 мкм приводит к значительному изменению рельефа поверхности, шероховатость при этом возрастает в несколько раз. Исследования выявили многократное снижение отражения света от образцов с АПУ покрытиями по сравнению с основой из инвара без покрытия. Так для полированного инвара интенсивность отраженного света уменьшается с 46% до 5,4% и для шлифованного - с 5,2% до 0,56%. При этом наименьший коэффициент отражения наблюдается для АПУ покрытий толщиной 2-3 мкм, нанесенных на шлифованную поверхность инвара.

Поглощение света было исследовано в диапазоне длин волн 200-3000 нм. Данные по поглощению оптического излучения представлены на рисунке 3. Для всех образцов покрытий

наблюдается тенденция увеличения поглощающей способности с уменьшением длины волны падающего излучения. Для видимого излучения с $\lambda = 400 - 760$ нм АПУ покрытия с толщиной более 1 мкм являются практически непроницаемыми. При этом лучшей поглощающей способностью обладают АПУ покрытия, полученные при изменяющемся во время осаждения давлении ацетилена от 0,5 до 1,5 Па. Для них на середине полосы видимого излучения поглощение составляет 99,9%. Вблизи «красной» границы видимого излучения наибольшим поглощением 99,8% обладают покрытия, полученные при давлении ацетилена 1 Па.

Экспериментальные данные по поглощению света позволяют рассчитать коэффициент поглощения

$$\alpha = -\frac{1}{t \ln(1-S)} \quad (3)$$

где S -коэффициент поглощения света покрытием, t – толщина покрытия.

Результаты расчета α_λ для вышеуказанных образцов покрытий представлены на рисунке 4. Для ряда покрытий в коротковолновой области спектра не представляется возможным рассчитать значение α из-за практически полного поглощения (видимые на графиках “шумы” связаны с недостаточной чувствительностью спектрометра для определения прошедшего излучения). Исключение составляет очень тонкое покрытие 0,25 мкм, полученное при давлении 1 Па. Для него максимальное значение спектрального коэффициента поглощения составляет величину, превышающую $1,6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$. Очевидно, что для хорошо поглощающих покрытий (например, 5 и 2) его величина будет еще больше. Значение α для центральной области видимого спектра наиболее сильно поглощающего покрытия № 5 составляет около 10^5 см^{-1} .

Базовой характеристикой неметаллического поглощающего вещества является величина оптической щели E_g , позволяющая определить край фундаментальной полосы поглощения. На рисунке 5 показано построение Тауца для исследуемых покрытий:

$$(h\nu\alpha_\lambda)^{1/2} = B(h\nu - E_g), \quad (4)$$

где $h\nu$ - энергия фотона с длиной волны $\lambda = c/\nu$, B – константа.

Из рисунка 5 видно, что при энергии фотонов более 1,5 эВ графики функций $(h\nu\alpha_\lambda)^{1/2}$ представляют собой прямые линии, продление которых до пересечения с горизонтальной осью позволяет получить значения т.н. оптической щели, приведенные в табл. 4.

Таблица 4. Значения оптической щели Тауца

Давление C_2H_2 , Па	Толщина покрытия, мкм	Значения оптической щели Тауца E_g , эВ	Длина волны края фундамен- тальной полосы поглощения, нм
1,0	0,25	1,35	919
2,5	2,0	1,07	1159
0,05-0,1	0,8-1,0	1,12	1107
0,20-0,25	1,2	1,19	992
0,5-1,5	1,0	1,25	925

Для исследованных покрытий значение E_g лежит в области 1-1,4 эВ. Для наиболее поглощающего покрытия толщиной 1 мкм, осажденного при варьируемом давлении ацетилена от 0,5 Па до 1,5 Па, ее значение составляет 1,25 эВ. Полученные значения оптической щели дают возможность определить край фундаментальной полосы поглощения. В расчете на длину волны он составляет значение около 1 мкм (см. табл. 4). Согласно данным табл. 4, красная граница поглощения АПУ покрытий может варьироваться в пределах нескольких десятков нанометров путем небольшого изменения давления ацетилена в вакуумной камере в процессе их получения.

Следует отметить, что однозначной корреляции между шириной оптической щели и давлением ацетилена не выявлено, однако наблюдается общая тенденция смещения красной границы полосы поглощения в область более длинных волн. Это хорошо согласуется с данными, полученными методами КРС - повышение давления ацетилена приводит к увеличению числа sp^2 связанных атомов углерода и формированию наноразмерных кластеров графита, увеличивающих поглощающую способность покрытий. Тот факт, что край фундаментальной полосы поглощения находится далеко за пределами длин волн видимого диапазона (400-760 нм), определяет высокую поглощающую способность покрытий аморфного углерода с наноразмерными включениями чередующихся областей алмазоподобной и графитоподобной фазы.

4. Термоциклирование

Для совместимости коэффициента термического расширения кремния ($2,6 \times 10^{-6} K^{-1}$), из которого изготавливаются чипы фотоприемников высокого разрешения, в качестве материала корпусных деталей используется специально разработанный сплав инвар с КТР, максимально близким к кремнию. Во избежание растрескивания и отслаивания в условиях частого и значительного изменения температуры антибликовое покрытие также должно иметь малое значение этого параметра, что является проблематичным для других известных черных покрытий в отличие от алмазоподобного углерода.

За основу методики проведения испытаний на термоциклирование изделий были взяты требования европейского стандарта ECSS--Q--70--04A, определяющего условия для испытаний на термоциклирование, приведенные ниже:

- характеристики должны исследоваться при температуре окружающей среды и относительной влажности $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ и RH $(55 \pm 10)\%$, соответственно, в течение шести часов до начала проведения термоциклирования;
- образец должен быть установлен на типовом держателе таким образом, чтобы иметь постоянный контакт с подложкодержателем, который не должен экранировать образец более чем на 10% от его площади;
- до начала тестов на термоциклирование вакуумная камера должна быть откачана до давления порядка 1×10^{-5} Па;
- камера термоциклируется между температурами $+ (100 \pm 5)^\circ\text{C}$ и $- (100 \pm 5)^\circ\text{C}$ при номинальной скорости нагрева или охлаждения $(10 \pm 2)^\circ\text{C}/\text{мин}$ между двумя конечными температурами, если не определено иначе. Типовое время продолжительности испытаний должно быть не менее 5 минут, максимальное время испытаний определяется испытателем для каждой температурной границы;
- окончательный осмотр и испытание образца должны проводиться при $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ и RH $(55 \pm 10)\%$ в течение шести часов после завершения термоциклирования в вакууме.

Испытания на термостойкость проводились в условиях пониженного давления на испытательном стенде на базе вакуумной установки УВН-73П (рисунок 6) при следующих параметрах:

- диапазон изменения температуры, $^\circ\text{C}$ $-60 \dots +150$;
- давление, Па $- 5 \times 10^{-3}$.

В табл. 5 приведены сводные результаты коэффициентов отражения экспериментальных образцов с АПУ покрытием при различной шероховатости поверхности, полученных в диапазоне давлений ацетилена 0,2-4,5 Па.

Таблица 5. Условия получения АПУ покрытий и значение коэффициента отражения света до и после термоциклирования

№ образца	Характеристики				
	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Толщина покрытия, мкм	Давление ацетилена, Па	Коэффициент отражения (550 нм), %	
				до термоциклирования	после термоциклирования
1	0,04	2,4	0,2	11,5	10,8
2	0,04	2,6	0,5	10,3	9,62
3	0,04	2,4	1,0	8,68	8,11
4	0,04	2,3	2,0	6,7	5,9
5	0,04	2,5	4,5	5,5	4,29

6	0,20	2,7	0,2	1,27	1,26
7	0,20	2,5	0,5	0,85	0,84
8	0,20	2,4	1,0	0,68	0,69
9	0,20	2,4	2,0	0,62	0,62
10	0,20	2,5	4,5	0,56	0,55

Как видно из полученных результатов, для образцов с высокой шероховатостью поверхности ($R_a = 0,2$ мкм) не заметно существенное изменение коэффициента отражения после проведения испытаний на термоциклирование. Результаты измерения коэффициента отражения для всех образцов находятся в пределах ошибки спектрофотометра Hitachi U-3400, которая составляет 0,3%. В то время как для образцов с полированной поверхностью термоциклирование приводит к заметному уменьшению коэффициента отражения в среднем на 10÷15%.

5. Применение антибликовых АПУ покрытий и особенности технологии их получения

Разработанные АПУ покрытия были нанесены на корпусные детали фотоприемников оптического излучения, предназначенных для космических аппаратов дистанционного зондирования поверхности Земли. Корпуса фотоприемников изготовлены из инвара.

Антибликовые АПУ покрытия наносились на установке УВНИПА-1-002, оснащенной двумя импульсными источниками углеродной плазмы. После достижения остаточного давления $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ Па осуществлялась очистка поверхности ионами аргона в течение 30 минут. Для увеличения адгезии углеродного покрытия к основе производилась бомбардировка поверхности инвара ионами углерода при подаче на корпусные детали потенциала 1000 В в течение 15 минут. На последующем этапе производился напуск в вакуумную камеру ацетилена до давления 1 Па и происходило осаждение АПУ покрытия в течение 90 минут. Толщина сформированного слоя составила около 2,0-2,5 мкм при равномерности на поверхности напыляемых деталей порядка 95%. На рисунке 7 приведен комплект корпусных деталей с антибликовыми поглощающими покрытиями.

Заключение

В результате выполненных работ было установлено, что изменением давления ацетилена в вакуумной камере представляется возможным гибко управлять структурой и типами химических связей атомов углерода. Декомпозиция ацетилена плазмой дугового разряда приводит к повышенному содержанию наноразмерных включений графитоподобной фазы в матрице алмазоподобного углерода, обеспечивающих высокую поглощающую способность АПУ покрытий. Установлено, что антибликовые свойства АПУ покрытий в значительной степени

зависят от морфологии исходной поверхности подложки, толщины покрытия и условий его получения. Исследования показали, что АПУ покрытия, полученные в атмосфере ацетилена при давлении 1 Па и напряжении катодно-дугового разряда 300 В, характеризуются наиболее высокими значениями коэффициента поглощения порядка 10^5 см^{-1} . Рассчитанное по методу Тауца значение оптической щели позволило определить край фундаментальной полосы поглощения для разработанных покрытий, который составляет 1,25 эВ, что значительно меньше энергии квантов света видимого диапазона (2,40-4,70 эВ). Покрытия на основе алмазоподобного углерода по своим оптическим характеристикам (коэффициенты отражения 0,3% и поглощения 98%) превосходят аналогичные по назначению покрытия из анодируемого алюминия.

Термоциклирование в вакууме в диапазоне температур $-100...+150^\circ\text{C}$ способствует уменьшению коэффициента отражения АПУ покрытий, полученных комбинированным методом осаждения, и благоприятно сказывается на оптических характеристиках, требуемых для корпусных деталей оптических приборов космических аппаратов высокого разрешения. Термообработка не вызывает механических повреждений покрытия.

Полученные результаты позволили разработать технологию нанесения поглощающих АПУ покрытий на корпусные детали фокальных плоскостей космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

Список литературы:

1. Shrestha S., Dunn B.D. Advanced plasma electrolytic oxidation treatment for protection of lightweight materials and structures in a space environment // Surface World. – 2007. – № 11. – P. 40-44.
2. Yuto S. Tanaka Diamond-like carbon films. – New York: NOVA Science, 2011.
3. Space environmental effects on MoS_2 and diamond-like carbon lubricating films: Atomic oxygen-induced erosion and its effect on tribological properties / M. Tagawa [et al] // Surface and Coatings Technology. – 2007. Vol. 202, № 4. –P. 1003-1010.
4. Robertson J. Diamond-like carbon // Materials Science and Engineering. – 2002. Vol. R37. – P. 129-181.
5. Ferrari A.C. Determination of bonding in diamond-like carbon by Raman spectroscopy // Diamond and Related Materials. – 2002. Vol. 11. – P. 1053-1061.
6. Ferrari A.C., Robertson J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2004. Vol. 362, №. 1824. – P. 2477-2512.
7. Ландсберг Г.С. Оптика: учебное пособие для вузов / Изд. 6-ое. стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.

Light absorbing coating based on diamond-like carbon

Chekan N.M.^{*}, Akula I.P., Logunovskaya N.V.

^{*} pec@bas-net.by

Physico-Technical Institute, National Academy of Sciences of Belorussia

Key words: absorbing coatings, diamond-like carbon, photo receivers, remote Earth probing.

Using a combined method of physical and chemical vapor deposition in a vacuum a new type of absorbing coatings based on diamond-like carbon material has been obtained. Red border of a fundamental band of absorption of the material is 900 - 1000 nm, the absorption coefficient for the middle of the visible spectrum reaches 105 cm^{-1} . For the invar substrate with an average roughness of 0.035 and 0.18 microns the reflection index is 5.4 % and 0.6 % accordingly. Thermal cycling in vacuum showed the invariability of physical and optical characteristics of the coatings. Were set examples of the photodetectors case detail coatings use with charging communication, designed for remote Earth probing.

References

1. Shrestha S., Dunn B.D. Advanced plasma electrolytic oxidation treatment for protection of light-weight materials and structures in a space environment // *Surface World*. – 2007. – № 11. – P. 40-44.
2. Yuto S. Tanaka Diamond-like carbon films. – New York: NOVA Science, 2011.
3. Space environmental effects on MoS₂ and diamond-like carbon lubricating films: Atomic oxygen-induced erosion and its effect on tribological properties / M. Tagawa [et al] // *Surface and Coatings Technology*. – 2007. Vol. 202, № 4. –P. 1003-1010.
4. Robertson J. Diamond-like carbon // *Materials Science and Engineering*. – 2002. Vol. R37. – P. 129-181.
5. Ferrari A.C. Determination of bonding in diamond-like carbon by Raman spectroscopy // *Diamond and Related Materials*. – 2002. Vol. 11. – P. 1053-1061.
6. Ferrari A.C., Robertson J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2004. Vol. 362, №. 1824. – P. 2477-2512.
7. Ландсберг Г.С. Оптика: учебное пособие для вузов / Изд. 6-ое. стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.