

УДК 539.234, 535-34, 539.24

Диагностика тонких плёнок фуллерен/теллурид кадмия и их стабильности под действием рентгеновского излучения методом ИК спектроскопии

© 2017 г. **Н. М. Романов***, **, аспирант; **И. Б. Захарова***, канд. физ.-мат. наук; **E. LÄNDERANTA****, PhD

*Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

**Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland

E-mail: nikromanov.90@gmail.com, zakharova@rphf.spbstu.ru

Поступила в редакцию 23.03.2017

Тонкие плёнки на основе фуллерена с примесью теллурида кадмия, полученные методами термического испарения в вакууме, перспективны для применения в органической микро- и оптоэлектронике. Изменение характеристик данных материалов под действием различных специальных воздействий практически не изучено. В данной работе методами ИК спектроскопии, растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа исследовались тонкие плёнки нанокompозитов фуллерен/теллурид кадмия, а также влияние облучения рентгеновскими лучами на их свойства. Тонкие плёнки, содержащие композитную смесь фуллерена C_{60} и неорганического донора CdTe в различных соотношениях, были получены методом термического испарения в вакууме из ячейки Кнудсена и методом открытого источника. Показано наличие Cd–O и Te–O связей, олигомеризованных состояний фуллерена, что свидетельствует о взаимодействии с кислородом или парами воды преимущественно примесных атомов. Показана стабильность нанокompозитных плёнок под действием рентгеновского облучения.

Ключевые слова: инфракрасная спектроскопия, нанокompозиты, фуллерен, теллурид кадмия, рентгеновское излучение.

Коды OCIS: 300.6340, 310.6860, 310.1860, 160.4890, 160.4236, 160.6000, 040.7480.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование нанокompозитных органических материалов является одним из наиболее актуальных направлений в современном материаловедении. Применение фуллерена в органической опто- и фотоэлектронике основано на сильных акцепторных свойствах молекулы фуллерена [1]. Известно, что фуллерен способен поглощать квант света с последующим образованием электронно-дырочной пары, а именно экситона Френкеля [2], а для эффективного разделения электронно-дырочной пары и получения фототока может быть использована гетерограница донорного и акцепторного органического и неорганического материалов различной размерности. Активно изучаются как молекулярные комплексы, молекулярные гетеропереходы, так и композитные наноразмерные структуры, образующие объёмный гетеропереход [1–3]. В результате взаимодействия молекулы фулле-

рена и донорной молекулы на такой гетерогранице происходит разделение экситона Френкеля на электрон и дырку. Поэтому исследование влияния добавок донорных компонент на оптические, фотоэлектрические и электрофизические свойства фуллерена представляет интерес для разработки новых органических сред для эффективных солнечных элементов [4]. Гетеропереходные неорганические структуры с использованием CdTe (в том числе наноструктурированные композитные системы) широко исследуются в качестве солнечных элементов. Использование неорганических доноров A^2B^6 представляет интерес с точки зрения увеличения перколяционной проводимости структур, расширения спектрального диапазона для повышения коэффициента полезного действия солнечных элементов [5]. Добавление CdTe в фуллереновую матрицу приводит к переносу фотовозбужденных носителей заряда с наночастиц

на молекулы органических полупроводников, что приводит к появлению фотовольтаического эффекта в таких структурах. Ранее нами были описаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодного типа в сэндвич-структурах на основе таких композитов [6]. Поэтому использование данной пары материалов представляет интерес для создания тонкоплёночных нанокомпозитных фотопреобразователей.

Важной особенностью, которую необходимо учитывать при использовании органических структур, является изменение свойств под действием различных факторов, таких как видимый свет, УФ излучение, влияние кислорода (окисление), гамма-облучение и рентгеновское облучение. Все данные факторы приводят к быстрому старению органических слоёв. В настоящее время исследование влияния различных поражающих факторов на органические композитные тонкие плёнки представлено только несколькими работами [7–11] и требует дальнейшего изучения. При этом действие рентгеновского излучения на фуллерен-содержащие композиты практически не изучено. Данная работа посвящена исследованию нанокомпозитов $C_{60}/CdTe$ и влиянию на них рентгеновского излучения методами инфракрасной спектроскопии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Тонкие плёнки чистого фуллерена C_{60} (99,95%), и нанокомпозитов $C_{60}/CdTe$ были получены методами термического испарения в вакууме по различным методикам — из ячейки Кнудсена и из открытого источника [5]. Метод напыления из ячейки Кнудсена является усовершенствованным методом напыления из молекулярного пучка и может приводить к существенному изменению состава плёнки по сравнению с исходной шихтой из-за разницы давления насыщенных паров компонентов. Преимуществом напыления из ячейки Кнудсена является возможность получения однородных плёнок на большой площади. В качестве подложек использовались пластины коммерчески доступного монокристаллического Si марки КДБ-1 и свежий скол монокристалла KBr. При этом использовалась исходная шихта в виде смеси $C_{60}/CdTe$ с массовым соотношением компонент 1:1. Методы получения, составы исходной шихты и нормализованные результаты энергодисперсионного микроанализа для образцов на кремниевых подложках, представлены в сводной таблице. Методика обработки данных микроанализа описана в работе [12]. Плёнки исследовались после хранения на воздухе в течении двух месяцев и стабилизации электрических и оптических характеристик. Измерения ВАХ плёнок показало, что наиболее значительные (на порядок) измене-

ния удельного сопротивления, связанные с взаимодействием с кислородом, происходят в первые 10–100 часов после выноса образцов на воздух. Далее характеристики стабилизируются и в дальнейшем изменяются слабо.

Инфракрасные спектры снимались на инфракрасном фурье-спектрометре ИнфраЛЮМ ФТ-08, работающем в средней инфракрасной области спектра, соответствующей диапазону волновых чисел от 4000 до 400 cm^{-1} (или диапазону длин волн от 2,5 до 25 μm). Для анализа тонких плёнок применялась приставка нарушенного полного внутреннего отражения PIKE MIRacle, оборудованная кристаллом ZnSe, позволяющим получать спектры от 4000 до 550 cm^{-1} . Разрешение составляло порядка 1 cm^{-1} . При этом в спектральной области, лежащей в районе 550 cm^{-1} и менее, наблюдались артефактные линии, связанные с ограничениями используемых оптических элементов приставки нарушенного полного внутреннего отражения. Образцы, нанесённые на различные подложки, прижимались к кристаллу приставки и фиксировались при помощи специального прижимного винта. Спектр каждого образца регистрировался несколько раз с целью проверки воспроизводимости результатов и уменьшения погрешности. При обработке экспериментальных данных полученные данные были нормализованы на базовую линию нуля. Для изучения морфологии поверхности использовался растровый электронный микроскоп (РЭМ) JEOL JSM-6390 с предельным топографическим разрешением 3 нм. Состав плёнок в выбранной области измерялся с помощью энергодисперсионной приставки микроанализа Oxford INCA Energy с предельной чувствительностью 0,1 мас. %. Поверхность плёнок и компонентный состав изучались с помощью электронов с энергией 8 keV с расстоянием 15 мм от образца до линзы при угле наклона 0°.

Для исследования воздействия рентгеновского излучения образцы облучались в течение 6 ч с помощью вольфрам-рениевой рентгеновской трубки в режиме работы 40 кВ, 90 мА. Использование вольфрам-рениевого анода позволило облучать образец линиями $K_{\alpha 1}$ и $K_{\beta 1}$ с энергиями 59,3 КэВ и 67,2 КэВ, соответственно. Источник рентгеновского излучения был откалиброван по изменению порогового напряжения на МОП-структурах относительно источника гамма-облучения. Экспозиционная доза составила $7,45 \times 10^5$ рентген.

Данные РЭМ и микроанализа подтверждают образование на подложках сплошных однородных плёнок толщиной 200–300 нм как чистого фуллерена C_{60} , так и нанокомпозитов (рис. 1). Размер кристаллитов составляет менее 100 нм. Выделения CdTe в виде включений микронного и субмикронного размера не обнаружено. В изображениях, полученных методом РЭМ, как в режиме упруго отражённых электронов, так и во вторич-

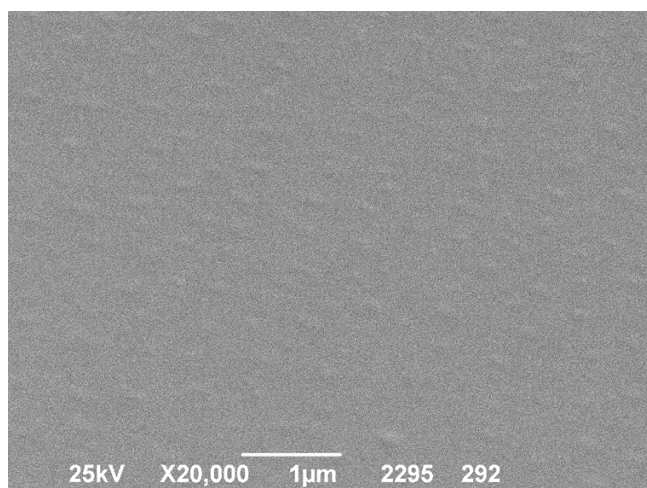


Рис. 1. Морфология поверхности тонкой плёнки $C_{60}/CdTe$ по данным РЭМ.

Методы получения, состав исходной шихты и состав тонких плёнок на Si-подложке в массовых %, полученный по данным энергодисперсионного микроанализа

Образец 1. Напыление методом Кнудсена, шихта C_{60}

	C	O	—	—
Спектр 1	97,1	2,9		
Спектр 2	97,2	2,8		
Спектр 3	98,1	1,9		
Среднее по образцу	97,5	2,5		

Образец 2. Напыление методом Кнудсена, шихта $C_{60}:CdTe$

	C	O	Cd	Te
Спектр 1	44,1	10,5	18,9	26,5
Спектр 3	44,7	9,2	18,5	27,6
Спектр 4	44,6	9,1	18,7	27,6
Спектр 5	44,7	9,7	18,5	27,1
Спектр 6	48,9	8,6	17,7	24,8
Спектр 7	49	8,6	17,5	24,9
Среднее по образцу	46	9,3	18,3	26,4

Образец 3. Напыление методом открытого источника, шихта $C_{60}:CdTe$

	C	O	Cd	Te
Спектр 1	31,8	12,2	24,8	31,2
Спектр 2	28,3	11	26,7	34
Спектр 3	41,1	9	23,9	26
Спектр 4	32,1	11,7	24,1	32,1
Спектр 5	46,6	7,7	20,1	25,6
Спектр 6	43,3	8,8	23,7	24,2
Спектр 8	47,7	7,7	19,9	24,7
Спектр 9	46	7,3	20,4	26,3
Среднее по образцу	39,6	9,4	23	28

ных электронах выявлена однородная поверхность. Состав плёнок измерялся в различных точках на поверхности образцов 1, 2, 3 (таблица) для изучения равномерности распределения примеси и затем усреднялся. Из результатов микроанализа можно сделать вывод о наличии кислорода во всех образцах. При этом содержание кислорода в композитных плёнках (порядка 10 мас. %) существенно больше, чем в чистой фуллереновой плёнке (порядка 2,5 мас. %). Однородность распределения состава композита по содержанию примеси CdTe для образцов, полученных методом напыления из ячейки Кнудсена, составляет приблизительно 6%. Для плёнок, полученных методом напыления из открытого источника, однородность значительно хуже и составляет 15%. Еще большая неоднородность по содержанию кислорода наблюдается для плёнок, полученных методом напыления из открытого источника — 25%. Это свидетельствует о локальной неоднородности окисления образцов 2 и 3, что может быть связано с различной структурой плёнок, и преимущественным окислением кристаллитов по границам раздела.

Методом ИК спектроскопии исследовались образцы чистого фуллерена и нанокомпозитов как до, так и после воздействия рентгеновского облучения. При этом сравнивались результаты для плёнок, полученных на различных подложках — кремнии (неориентирующая подложка) и KBr (ориентирующая подложка). Результаты измерений приведены на рис. 2 и рис. 3. Вид ИК спектров существенно зависит от подложки, на которой конденсировались плёнки. При этом на ИК спектрах всех образцов отмечены линии 1181 см^{-1} и 1427 см^{-1} , являющиеся линиями колебательных мод молекулы C_{60} . Пики колебаний молекулы C_{60} в районе 524 см^{-1} [13] не наблюдали из-за ограничения используемой в аппаратуре регистрации спектров. Пик колебаний молекулы C_{60} в районе 578 см^{-1} идентифицируется на спектрах плёнок на KBr-подложке при разложении начальной бесструктурной области спектра. Известно, что положение линий колебаний молекулы C_{60} может немного сдвигаться в зависимости от внешнего воздействия [13]. Линия 1107 см^{-1} присутствует на всех образцах на кремниевой подложке и отсутствует на образце KBr. Это проявление колебаний Si–O или Si–O–Si связей хорошо изучено в полупроводниковой технологии и однозначно интерпретируется [14–16]. Наличие линии связано с присутствием естественного приповерхностного оксида кремниевой подложки. Линия на 610 см^{-1} может быть связана TO+TA модами двухфононного колебания в кремниевой решётке. Линия на 737 см^{-1} 818 см^{-1} и 891 см^{-1} могут быть вызваны LO+TA или LO+LA модами двухфононного колебания в кремниевой решётке или 2TO+LA модами двухфононного колебания, а также 3TO мо-

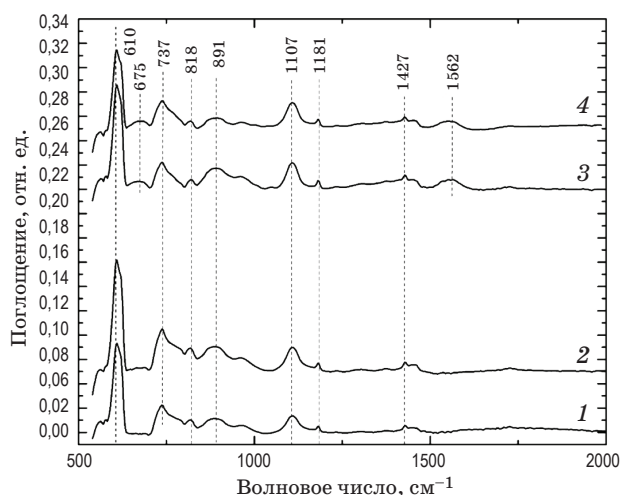


Рис. 2. Спектры ИК поглощения тонких фуллеренсодержащих плёнок. Кривые 1, 2 — образец 1 (напыление методом Кнудсена, шихта C60 на Si-подложке). Кривые 3, 4 — образец 2 (напыление методом Кнудсена, шихта C60/CdTe на Si подложке). Кривые 1, 3 — плёнки до облучения, кривые 2, 4 — после облучения. Спектры 2, 3 и 4 сдвинуты по вертикали для лучшего восприятия.

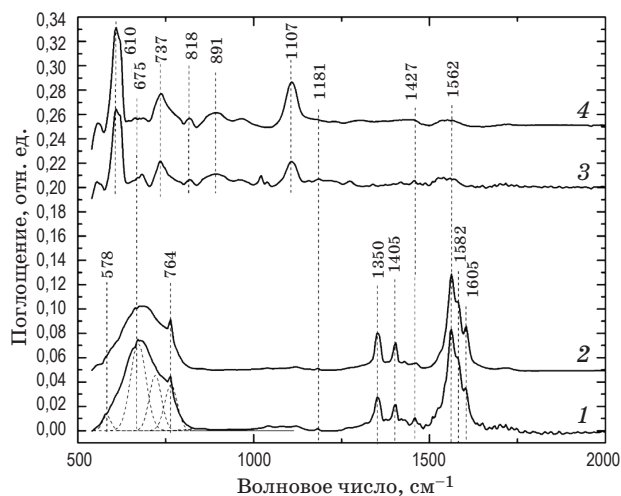


Рис. 3. Спектры ИК поглощения тонких плёнок для образца 3 (напыление методом открытого источника, шихта C60/CdTe). Спектры 1, 2 — плёнки на подложке KBr, спектры 3, 4 — на Si-подложке. Спектры 1, 3 — до облучения, 2, 4 — после облучения. Спектры 2, 3 и 4 сдвинуты по вертикали для лучшего восприятия.

дами трёхфоновного колебания в кремниевой решётке [14–16]. При анализе спектров учитывалась возможность окисления фуллерена до $C_{60}O$, образования олигомеров C_{60} и $C_{60}O$ с учётом экспериментальных и расчётных данных работ [17–19]. Олигомеризация (в основном образование димеров $(C_{60})_2$ и оксидимеров $C_{120}O$), зафиксированная при УФ облучении чистого фуллерена, проявляется в виде небольших (на 5–6 cm^{-1}) смещений основных пиков в длинноволновую область и по-

явления многочисленных слабоинтенсивных линий в районе 1450 cm^{-1} , 1273 cm^{-1} , 797–720 cm^{-1} , 622–607 cm^{-1} . К сожалению, отмеченные области в значительной степени перекрываются проявлениями возможных колебаний кремниевой подложки и отмеченных ниже кислородных соединений CdTe. Можно отметить (рис. 2) линии в области 1450 cm^{-1} , проявляющиеся в образцах как до, так и после облучения и связанные с образованием димера $C_{120}O$. Наличие этих линий до облучения говорит о значительном взаимодействии с кислородом тонких плёнок под действием естественного облучения видимым светом на воздухе.

На спектрах всех образцов, содержащих CdTe (рис. 2, 3), присутствует новая зона поглощения в области 675 cm^{-1} и 1562 cm^{-1} . Данные линии могут быть идентифицированы как колебания Te–O [19, 20] и Cd–O [21, 22] соответственно. На образце 3 на KBr-подложке линия на 675 cm^{-1} является максимумом широкого бесструктурного пика поглощения, лежащего в пределах 540–810 cm^{-1} , и проявляется при анализе этой области методом разложения. Форма данного пика и его положение характеризуют бесструктурную зону как асимметричные колебания изгиба различных конфигураций теллурид-кислородных групп [20, 21]. Острый пик при 764 cm^{-1} вызван деформационными колебаниями теллур-кислородных групп [20]. Область колебаний Cd–O более детально видна на образце 3 на подложке KBr с характерной линией на 1405 cm^{-1} [22]. Анализ литературы показал, что линии при 1350 cm^{-1} , 1582 cm^{-1} и 1605 cm^{-1} на образце 3 на подложке KBr могут являться как модами колебаний C=O, различных конфигураций фуллерена и присоединённых к нему комплексов, так и модами колебаний различных комплексов со связью C=C [23, 24]. Следует отметить, что эти линии проявляются только в плёнках, полученных на подложках KBr, что, по-видимому, связано с разной структурой нанокмозитов на ориентирующей и неориентирующей подложках. Тип подложки (аморфная, кристаллическая) в значительной степени определяет структуру и, в нашем случае, также и состав нанокмозитной плёнки, поскольку коэффициенты поверхностной диффузии адатомов, реиспарения, размеры критического зародыша для компонентов определяются не только технологическими параметрами испарения (температурой, давлением пара), но и полем подложки. После рентгеновского облучения формы всех спектров существенно не изменились. Произошли незначительные сдвиги положения некоторых линий на 2–4 cm^{-1} , что в связи со значительной шириной некоторых отмеченных зон поглощения не позволяет сделать однозначные выводы. В работе [25] было показано что при больших дозах гамма-облучения молекулы C_{60} могут образовывать олигомеры, образование которых детектировалось

с помощью рамановской спектроскопии, но не вызвало существенных изменений в ИК спектрах. Таким образом, показана стабильность ИК спектров как фуллерена, так и композитов под действием жёсткого рентгеновского облучения, что совпадает с данными работы [25]. Заметим, что при этом в аналогичных образцах нами наблюдались значительные изменения в электронном спектре нанокompозитов после рентгеновского облучения по данным измерения фотолюминесценции [26], что может быть связано с проявлением запрещённых синглетных переходов в связи с появлением дефектов и олигомеризацией плёнок.

ВЫВОДЫ

В результате проведённых исследований можно сделать вывод, что нанокompозитные тонкие плёнки $C_{60}/CdTe$ при хранении на воздухе подвергаются значительному окислению. При этом содержание кислорода существенно больше в композитах по сравнению с чистыми фуллереновыми плёнками. Данные ИК спектроскопии показывают наличие окисленных форм $CdTe$ и/или отдельных окисленных фаз кадмия и теллура. Можно предположить, что $CdTe$, а также отдельные молекулярные и атомарные включения Cd и Te_2 , заполняющие октаэдрические пустоты фуллерита [27], могут окисляться, захватывая кислород, который интеркали-

рует по этим пустотам. Значительно более сильные проявления окисленной фазы в плёнках, полученных на подложке KBr может свидетельствовать о том, что эта ориентирующая подложка влияет на процессы конденсации композитных плёнок в сторону выделения нановключений теллурида кадмия по границам кристаллитов и, соответственно, их ускоренному окислению. В то же время при конденсации на кремниевые подложки происходит, по-видимому, молекулярное диспергирование $CdTe$ в нанокристаллитах фуллерита с заполнением октаэдрических пустот, которое препятствует дальнейшей диффузии кислорода и окислению. Показана устойчивость плёнок и композитов к действию рентгеновского облучения, что совпадает с данными работы [11], где обсуждается чрезвычайная устойчивость фуллерена к воздействию гамма-облучения. Устойчивостью фуллерена и его производных к действию рентгеновского облучения может объясняться уменьшение деградации под действием рентгеновского облучения полимер-фуллереновых композитов для солнечных элементов по сравнению с чисто полимерными композитами [8]. В целом можно сделать вывод, что более однородные по структуре, составу, воспроизводимости состава исходной шихты и устойчивости к окислению и облучению нанокompозитные плёнки $C_{60}/CdTe$ получены при использовании метода напыления из ячейки Кнудсена на кремниевые подложки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Eklund P.C. Science of fullerenes and carbon nanotubes. N.Y.: Acad. Press, 1996. 965 p.
2. Nelson J. Organic photovoltaic films // Opinion Solid State Mater. Sci. 2002. V. 6. № 1. P. 20–27.
3. Katz E.A. Nanostructured materials for solar energy conversion / Ed. by Soga T. Amsterdam: Elsevier, 2006. P. 361–443.
4. Yang C.Y., Heeger A.J. Morphology of composites of semiconducting polymers mixed with C_{60} // Synth. Met. 1996. V. 83. № 2. P. 85–88.
5. Zakharova I.B., Ziminov V.M., Romanov N.M., Kvyatkovskii O.E., Makarova T.L. Optical and structural properties of fullerene films doped with Cadmium Telluride // Physics of the Solid State. 2014. V. 56. № 5. P. 1064–1070.
6. Ziminov V., Zakharova I., Aleshin A., Makarova T. Fullerene based organic-inorganic bulk heterojunction exhibiting rectifying behavior // Journal of nanoelectronics and optoelectronics. 2012. № 7. P. 410–414.
7. Banhart F. Irradiation effects in carbon nanostructures // Rep. Prog. Phys. 1999. V. 62. P. 1181–1221.
8. Li G., Yang Y. Radiation induced damage and recovery in poly (3-hexyl thiophene) based polymer solar cells // Nanotechnology. 2008. V. 19. P. 424014(1–4).
9. Pinna A., Malfatti L., Piccinini M., Falcaro P., Innocenzi P. Hybrid materials with an increased resistance to hard X-rays using fullerenes as radical sponges // J. Synchrotron Rad. 2012. V. 19. P. 586–590.
10. Banhart F. Structural transformations in carbon nanoparticles induced by electron irradiation // Physics of the Solid State. 2002. V. 44. № 3. P. 399–404.
11. Basiuk V.A., Albarrar'n G., Basiuk E.V., Saniger J.-M. Stability of interstellar fullerenes under high-dose γ -irradiation: new data advances in space research // Advances in Space Research. 2005. V. 36. P. 173–177.
12. Romanov N.M., Zakharova I.B. The composition and the structure of thin films based on metal porphyrin complexes // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. 2016. V. 2. P. 71–77.
13. Iglesias-Groth S., Cataldo F., Manchado A. Infrared spectroscopy and integrated molar absorptivity of C_{60} and C_{70} fullerenes at extreme temperatures // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2011. V. 413. № 1. P. 615–623.

14. *Seeger K.* Semiconductor physics: an introduction. Chapter 11. Optical absorption and reflection. Berlin: Springer, 2004. P. 324–401.
15. *Lau W.S.* Infrared characterization for microelectronics. Singapore: World Scientific, 1999. 160 p.
16. *Pluchery O., Costantini J.c.M.* Infrared spectroscopy characterization of 3C–SiC epitaxial layers on silicon // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012. V. 45. P. 495101(1–7).
17. *Sohn W.Y., Kim T.W., Lee J.S.* Structure and energetics of $C_{60}O$: a theoretical study // *J. Phys. Chem. A.* 2010. V. 114. P. 1939–1943.
18. *Stepanian S.G., Karachevtsev V.A., Plokhhotnichenko A.M., Adamowicz L., Rao A.M.* IR spectra of photopolymerized C_{60} films. Experimental and density functional theory study // *J. Phys. Chem.* 2006. V. 110. P. 15769–15775.
19. *Nizam R., Mahdi S., Rizvi A., Azam A.* A theoretical structure study infrared spectra of $C_{60}O$ isomers through Ab Initio method // *Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine.* 2011. V. 2. P. 011015(1–7).
20. *Jan N.A., Sahar M.R.* Effect of heat treatment on the structural modification of neodymium doped tellurite glass // *Chalcogenide Letters.* 2016. V. 13. № 9. P. 417–426.
21. *García-Amaya I.V., Zayas Ma.E., Alvarado-Rivera J., Álvarez E., Gallardo-Heredia S.A., Limón G.A., Lozada-Morales R., Rincón J.Ma.* Spectroscopic studies of the behavior of Eu^{3+} on the luminescence of cadmium tellurite glasses // *Journal of Spectroscopy.* 2015. Article ID 478329. P. 1–7.
22. *Sreekanth T.V., Pandurangan M., Dillip G.R., Kim D.H., Lee Y.R.* Toxicity and efficacy of CdO nanostructures on the MDCK and Caki-2 cells // *Journal of Photochemistry & Photobiology. B: Biology.* 2016. V. 164. P. 174–181.
23. *Slabko O.Y., Kanchanov A.V., Kaminskii V.A.* Thio- and selenocyanation reactions of quinone imines-derivatives of Pyrido[1,2-a]benzimidazole // *Synthetic Communications.* 2012. V. 42. № 16. P. 2464–2470.
24. *Osyannin V.A., Osipov D.V., Klimochkin Y.N.* Reactions of o-quinone methides with pyridinium methylides: a diastereoselective synthesis of 1,2-dihydronaphtho[2,1-b]furans and 2,3-dihydrobenzofurans // *J. Org. Chem.* 2013. V. 78. P. 5505–5520.
25. *Cataldo F., Strazzulla G., Iglesias-Groth S.* Stability of C_{60} and C_{70} fullerenes toward corpuscular and γ -radiation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2009. V. 394. P. 615–623.
26. *Elistratova M.A., Zakharova I.B., Romanov N.M.* X-ray radiation influence on photoluminescence spectra of composite thin films based on $C_{60}<CdTe>$ // *Journal of Physics: Conference Series.* 2015. V. 586. № 012002. P. 1–5.
27. *Kvyatkovskii O.E., Zakharova I.B., Ziminov V.M.* Ab initio calculations of supramolecular complexes of fullerene C_{60} with CdTe and CdS // *Physics of the Solid State.* 2014. V. 56. № 6. P. 1289–1295.