

УДК 535.5

Л. С. МАКСИМЕНКО¹, к. ф.-м. н. О. Н. МИЩУК¹, к. ф.-м. н. И. Е. МАТЯШ¹, д. ф.-м. н. Б. К. СЕРДЕГА¹, Е. Г. КОСТИН², Б. П. ПОЛОЗОВ², к. ф.-м. н. О. А. ФЕДОРОВИЧ², Г. К. САВИНКОВ³

Украина, г. Киев, ¹Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ,

²Институт ядерных исследований НАНУ, ³НТЦ «Криптон»

E-mail: i_matyash@ukr.net, oafedorovich@kinr.kiev.ua, krypton-ua@ukr.net

МОДУЛЯЦИОННАЯ ПОЛЯРИМЕТРИЯ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ, НАРУШЕННОГО АЛМАЗОПОДОБНЫМИ ПЛЕНКАМИ

Исследованы алмазоподобные пленки, специально приготовленные при различных технологических условиях. Введен параметр ρ , называемый поляризационной разностью. Из спектральных характеристик параметра ρ обнаружено, что взаимодействие электромагнитного излучения с электронной системой образцов, которое происходит в используемом спектральном диапазоне, состоит из двух поверхностных резонансов — локального и поляритонного, различающихся частотой и временем релаксации. Сделан вывод о том, что соотношение амплитуд резонансов определяется структурными свойствами образцов, что свидетельствует о перспективности метода модуляционной поляриметрии для диагностики структурной однородности композитных нанокластерных пленок.

Ключевые слова: алмазоподобные пленки, модуляционная поляриметрия, композитные нанокластерные пленки.

Современная нанофизика твердого тела оперирует большим количеством разнообразных материалов на основе металлов, диэлектриков, металлодиэлектрических и металлических композитов, но особое внимание уделяется углеродным материалам. Это графены, фуллерены, нанотрубки, алмазные и алмазоподобные пленки (АПП) [1, 2]. Интерес к этим материалам, получаемым в виде наноразмерных пленок, объясняется их нетривиальными физическими свойствами, что послужило стимулом для создания более десяти технологических приемов изготовления наноматериалов: дуговым методом [3]; электроразрядной обработкой органических материалов [4]; высокочастотными [5], СВЧ [6] и тлеющим разрядами [7]; а также разрядно-импульсными методами [8], детонационными, лазерными, электронными пучками, каталитическим пиролизом [9] и др. Это, в свою очередь, потребовало развития новых методов исследования широкого спектра свойств материалов — от механических до квантовых. Наиболее распространенным из них является метод атомно-силовой микроскопии (АСМ), и хотя его возможности ограничиваются определением лишь топологических характеристик исследуемых объектов, он остается одним из самых популярных.

Наряду с этим, изготовители наноматериалов нуждаются в диагностике их физических свойств, оперативное использование которых при корректировке параметров технологических процессов способствует конструированию материалов с заданными свойствами. Методы исследования свойств наноразмерных объектов, основанные на регистрации эффектов, зависящих от состояния поляризации электромагнитного излучения, вы-

деляются из множества других, прежде всего, своим неразрушающим действием. Использование для регистрации таких эффектов техники модуляционной поляриметрии (МП) [10] повышает как чувствительность, так и информационную способность методики, что, в свою очередь, позволяет получать новые сведения об объекте исследования. Среди поляризационных эффектов наиболее информативным с точки зрения свойств наноструктурированной пленки является поверхностный плазмонный резонанс (ППР), регистрация которого осуществляется, в частности, в условиях внутреннего отражения излучения. Целью настоящей работы является исследование алмазоподобных пленок с помощью техники модуляционной поляриметрии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Дополнительным стимулом для проведения исследований является тот факт, что явление ППР, которое ярко выражено и хорошо изучено в металлических средах (Au, Cu, Al, Ag), с помощью отмеченной методики поддается достоверной регистрации практически во всех частично проводящих средах. Это подтверждается публикациями, в которых говорится о наблюдении ППР в металлооксидных пленках, например [11].

Методика эксперимента

Пленки для исследований были получены из газовой фазы на специальной установке «Алмаз», разработанной и изготовленной в Институте ядерных исследований НАНУ. Они осаждались из плазмы высокочастотного разряда (13,56 МГц), которая возбуждалась в смеси $\text{H}_2 + (1 - 5)\% \text{CH}_4$ в скрещенном управляемом маг-

нитном поле. Рабочее давление в камере варьировалось в пределах $10^{-1} - 10^{-2}$ Торр. Прокачку камеры проводили до давления 10^{-3} Торр при помощи двухкамерного форвакуумного насоса, включенного последовательно с насосом Рутса. Контролируемое заполнение камеры газом осуществляла система напуска газа СНА-2. Ток в разряде составлял $4 - 8$ А при мощности генератора до 1 кВт. Для согласования генератора с меняющимся сопротивлением разряда использовали согласующее устройство. Напряжение смещения на подложкодержателе диаметром 110 мм регулировали от -140 до $+390$ В с помощью дополнительного источника напряжения. В процессе исследований использовали специально разработанный регулируемый источник постоянного тока с фильтрами, блокирующими проникновение в него ВЧ-напряжения. Разогревом молибденовой спирали устанавливали температуру подложкодержателя $T_{\text{пл}}$ в диапазоне $700 - 1000^{\circ}\text{C}$, которую в отсутствие разряда измеряли хромель-алюмелевой термопарой и оптическим пирометром ОППИР-09.

В качестве подложек использовали полированные пластинки из кварцевого стекла. Пластинки толщиной 1 мм, дополняя сегмент из того же материала, составляли полуцилиндр, в котором происходит полное внутреннее отражение. Контакт пластины и сегмента для исключения интерференции на зазоре осуществлялся с помощью иммерсионной жидкости (глицерина), оптические свойства которой близки к свойствам кварцевого стекла. Время напыления пленок составляло от 2 до 5 часов для разных образцов. Остальные параметры процесса напыления указаны в **таблице**.

Исследование образца 1 методом АСМ показало, что пленка толщиной 280 нм состоит из кластеров, средний размер которых составляет около 40 нм. Поверхность пленки образца 2 в виде фазовой топологии показана на **рис. 1**. Ее шероховатость — менее 10 нм, что позволяет считать пленку однородной.

Оптические свойства пленок исследовали методом внутреннего отражения, в котором регистрировали коэффициенты отражения линейно

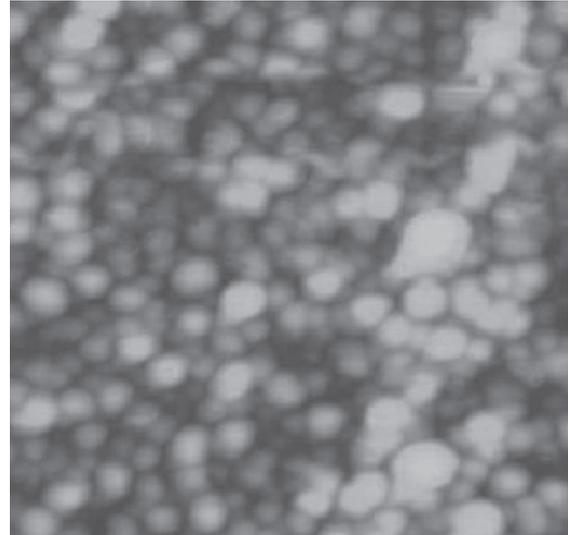


Рис. 1. Фазовая АСМ-топология образца 2

поляризованного излучения. Описание оптической схемы установки и ее функционирование подробно изложены в [12]. Здесь же только отметим, что методу НПВО присущ признак дифференцирования. Суть дифференцирования, изложенная в [13], заключается в том, что степень взаимодействия электромагнитной волны с пленкой на поверхности полуцилиндра определяется состоянием поляризации излучения. Так, это взаимодействие более существенно, когда поле волны имеет компоненту, перпендикулярную поверхности (*p*-поляризация), и менее существенно, когда компонента параллельна поверхности полуцилиндра (*s*-поляризация). Что же касается физического дифференцирования, то его техника построена на использовании модулятора поляризации — оптического элемента, роль которого заключается в управлении состоянием поляризации излучения (например, азимутом компоненты поля волны) без изменения всех остальных его параметров. Такому определению лучше всего соответствует конструкция, описанная в [14] и функционирующая так, что электрическое поле прошедшей сквозь оптический элемент волны периодически (с частотой 50 кГц)

Параметры процесса напыления алмазоподобных пленок на кварцевые пластинки

№ образца	Объемный состав газовой смеси, %	Давление газа в реакторе, 10^{-2} Торр	$T_{\text{пл}}$, $^{\circ}\text{C}$	Ток в разряде, А	Напряжение смещения, В	Время напыления, ч
1	H ₂ =19, CH ₄ =2, Ar=79	6	780	4,0	+100	5
2	H ₂ =9, CH ₄ =2, Ar=89	5			+110	3,5
3	H ₂ =98, CH ₄ =2	8			+140	5
4	H ₂ =98, CH ₄ =2	8			+80	2

становится параллельным или перпендикулярным плоскости падения. После взаимодействия с исследуемой пленкой на рабочей поверхности полуцилиндра отраженное излучение преобразуется фотодетектором (Ge-фотодиодом) в электрический сигнал. Поскольку в общем случае значения коэффициентов отражения излучений p -поляризованной (R_p^2) и s -поляризованной (R_s^2) волны различаются, токовый сигнал фотодетектора, измеряемый селективным вольтметром с синхронно-фазовым детектором на частоте модуляции, пропорционален их разности: $I \sim (R_s^2 - R_p^2)$. В этом же варианте конструкции для измерения интенсивности излучения нужной поляризации перед фотодетектором устанавливается линейный поляризатор, ориентированный на его пропускание. Нормирование каждого из перечисленных трех сигналов фотодетектора позволяло получать абсолютные значения всех трех параметров, входящих в соотношение $\rho = R_s^2 - R_p^2$.

Таким образом, измерялись коэффициенты отражения R_s^2 и R_p^2 , а также поляризационная разность ρ в зависимости от угла падения θ и длины волны λ сканирующего излучения. При измерении угловых характеристик источниками линейно поляризованного излучения служил гелий-неоновый лазер с длиной волны $\lambda = 632$ нм, а при регистрации спектральных зависимостей — монохроматор МДР-4 с галогенной лампой на входе и поляризатором на выходе.

Результаты и их обсуждение

Анализ результатов исследований начнем с образца 4, поляризационные угловые характеристики которого, представленные на **рис. 2**, объясняются наиболее просто. Подобное поведение, а именно — приближающиеся к единице коэффициенты R_s^2 и R_p^2 и к нулю их разность ρ при углах больше критического θ_{cr} , присуще, во-первых, слабо поглощающим, а во-вторых, ультратонким пленкам.

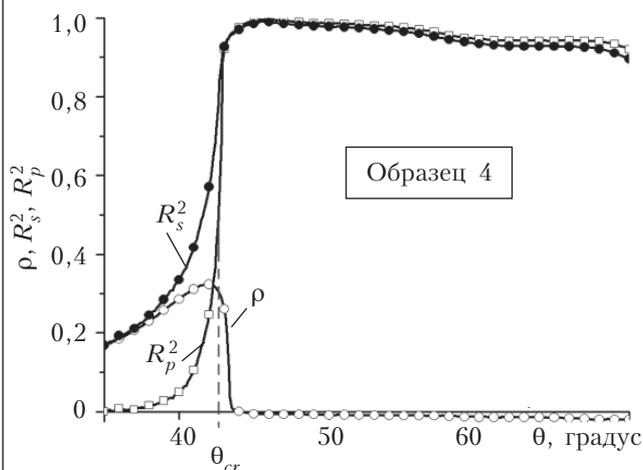


Рис. 2. Зависимости коэффициентов отражения R_s^2 , R_p^2 и их разности ρ от угла θ для образца 4 при $\lambda = 632$ нм

Более интересными с точки зрения обнаружительной способности модуляционной поляриметрии представляются остальные образцы вследствие их структурных особенностей. Их поляризационные угловые характеристики приведены на **рис. 3**. Несмотря на имеющиеся различия в форме кривых, можно выделить общие тенденции в поведении характеристик отражения p - и s -поляризованного излучения. Как видно, излучение обеих поляризаций резонансно взаи-

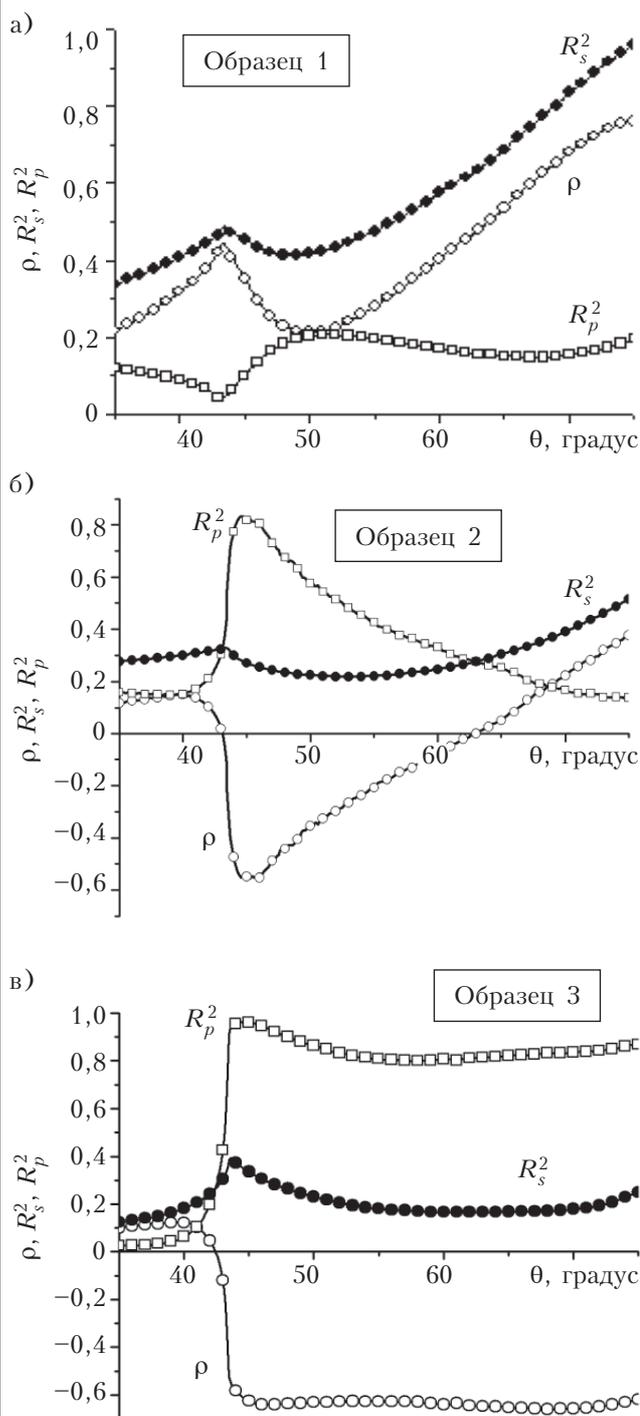


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, для образцов 1, 2 и 3

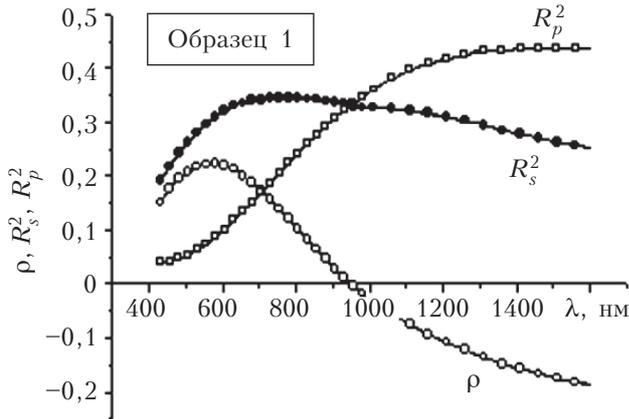


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициентов отражения R_s^2 , R_p^2 и их разности ρ при $\theta=50^\circ$

модействует с алмазоподобными пленками в большом угловом диапазоне, о чем свидетельствуют значительные по амплитуде и расширенные по углу провалы на кривых зависимостей при углах больше критического. Такой механизм взаимодействия возможен в случае когда пленка обладает кластерной структурой, а частички имеют форму, близкую к сферической. Именно в этом случае условие возникновения плазмонного резонанса может выполняться в расширенном диапазоне углов, больших критического [15].

Обращает на себя внимание значительная по величине и протяженная по углу отрицательная часть кривой зависимости поляризационной разности от θ для образцов 2 и 3 (рис. 3, б, в). Такое поведение поляризационной разности определяется «аномальным» отражением (следствие того, что $R_s^2 < R_p^2$) и также однозначно характеризует пленку как обладающую конечной величиной коэффициента поглощения. О кластерной структуре пленки свидетельствует форма кривой зависимости $\rho(\theta)$ ниже оси абсцисс, причем знак ее наклона определяется преобладанием в резонансном взаимодействии излучения с тем или иным состоянием поляризации [16]. Положительный наклон кривой, т. е. возрастающий характер зависимости (рис. 3, б), свидетельствует о доминировании p -поляризованного излучения в резонансном механизме взаимодействия, а практически горизонтальная зависимость (рис. 3, в) — о соизмеримых вкладах p - и s -поляризованного излучения.

Форма характеристики поляризационной разности образца 1 более сложная (рис. 3, а). Это связано с тем, что механизм резонансного взаимодействия пленки с излучением не единственный, к тому же, в разных механизмах возбуждения плазмонов доминируют излучения с разными состояниями поляризации. Свидетельством тому является спектральная характеристика $\rho(\lambda)$ этого же образца, измеренная в диа-

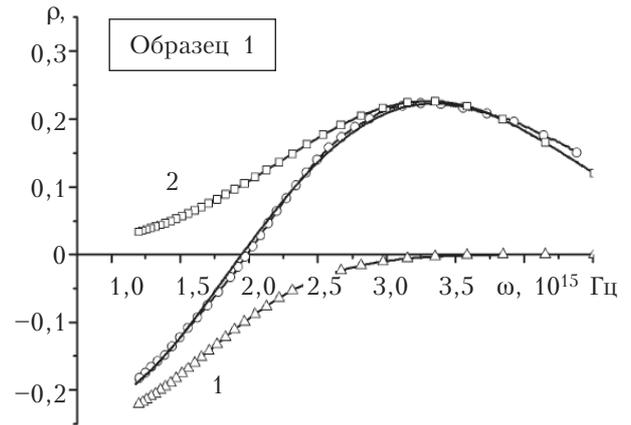


Рис. 5. Экспериментальная и расчетная зависимость ρ от частоты для образца 1 при $\theta=50^\circ$, а также элементарные функции Гаусса (кривые 1 и 2)

пазоне длин волн 0,4 — 1,6 мкм при $\theta=50^\circ$ и представленная на рис. 4. Как видно, в коротковолновой области в резонансном взаимодействии преобладает p -поляризованное, а в длинноволновой — s -поляризованное излучение.

Для определения механизмов резонансного взаимодействия необходимо перестроить спектральную характеристику поляризационной разности ρ образца 1 в зависимость от частоты (рис. 5). В этом случае два широких экстремума спектральной характеристики могут быть разложены на элементарные компоненты и отображены функциями Гаусса с основными частотами $\omega_0=0,82 \cdot 10^{15}$ Гц и $\omega_0=3,3 \cdot 10^{15}$ Гц, сумма которых дает расчетную характеристику, что подтверждается присутствием двух резонансов. Экстремум в высокоэнергетической области характерен для нанокластерных образцов и соответствует резонансному возбуждению так называемых локальных поверхностных плазмонов, возбуждаемых s -поляризованным излучением. По-видимому, экстремум на частоте $0,82 \cdot 10^{15}$ Гц связан с плазмон-поляритонным резонансом, который в кластерных объектах обусловлен диполь-дипольным межчастичным взаимодействием.

По полуширине каждой из функций Гаусса были определены коэффициенты затухания для соответствующих резонансов: $\gamma_{\text{лпр}}=2,5 \cdot 10^{-15}$ с, $\gamma_{\text{шпр}}=2 \cdot 10^{-15}$ с. Для локального плазмонного резонанса коэффициент затухания $\gamma_{\text{лпр}}$ зависит от разброса по размеру и форме наночастичек композита, а для поверхностного плазмон-поляритонного резонанса $\gamma_{\text{шпр}}$ зависит от распределения расстояния между частицами. Таким образом, из соотношения этих коэффициентов затухания можно сделать вывод, что в исследуемой пленке распределение кластеров по положению в пространстве более однородно, чем по размеру.

Для образцов 2 и 3 спектральные зависимости поляризационной разности, представленные на рис. 6, также могут быть разложены на несколько элементарных функций, хотя они ме-

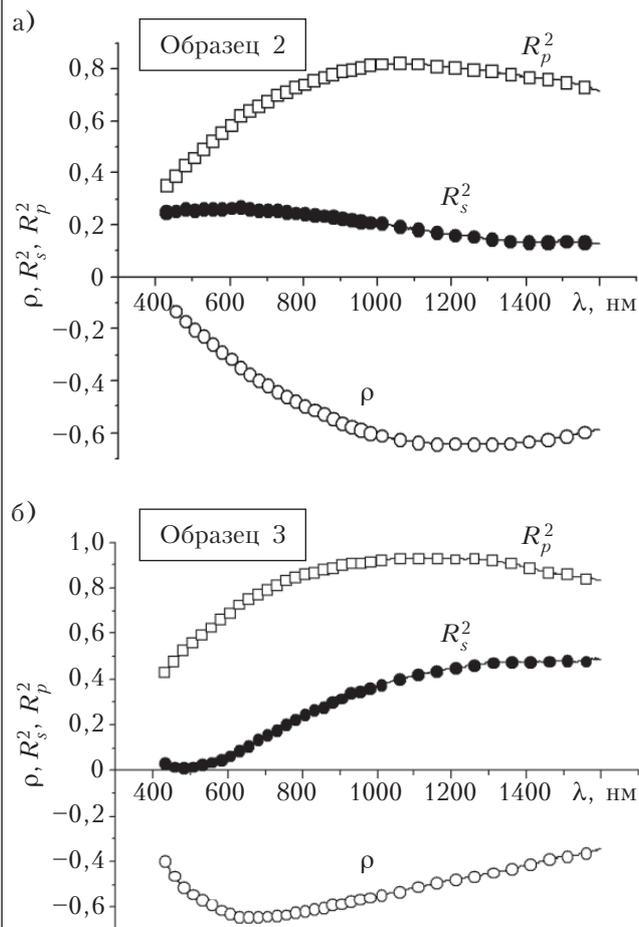


Рис. 6. Спектральная зависимость коэффициентов R_s^2 , R_p^2 и их разности ρ для образца 2 при $\theta=50^\circ$ (а) и для образца 3 при $\theta=60^\circ$ (б)

нее ярко выражены по сравнению с образцом 1. Это связано с тем, что во всем использованном диапазоне длин волн s-поляризованное излучение поглощается сильнее, функции резонансно межкластерного дипольного взаимодействия и локального резонанса перекрываются. Также из рис. 6 можно сделать вывод о том, что для образца 2 преобладающим является взаимодействие излучения с поверхностными плазмон-поляритонами, экстремум зависимости находится в длинноволновой области, а в образце 3 преобладает взаимодействие с локальными плазмонами (экстремум в коротковолновой области соответственно).

Заключение

Кластерные пленки, как металлооксидные [11], так и алмазоподобные, исследованные в настоящей работе, демонстрируют большее разнообразие механизмов взаимодействия с электромагнитным излучением, чем однородные. Об этом убедительно свидетельствуют представленные результаты исследования поверхностного плазмонного резонанса, полученные с помощью

методики поляризационной модуляции. Продуктом этой методики является параметр, называемый поляризационной разностью $\rho=R_s^2-R_p^2$. Его многовариантная характеристика в многомерном пространстве координат (угол, длина волны, толщина и т. д.) обеспечивает ему повышенную информационную способность в обнаружении физических свойств объема, относительно которого атомно-силовая микроскопия бессильна.

Из спектральных характеристик параметра ρ обнаружено, что взаимодействие электромагнитного излучения с электронной системой образцов в используемом спектральном диапазоне волн проявляется в двух поверхностных резонансах — локальном и поляритонном, различающихся частотами и временем релаксации, а соотношение амплитуд резонансов определяется структурными свойствами образцов. Это свидетельствует о перспективности метода модуляционной поляриметрии для диагностики структурной однородности композитных нанокластерных пленок.

Результаты исследований представляют интерес при конструировании и диагностике композиционных нанокластерных материалов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Елецкий А. В., Искандарова И. М., Книжник А. А., Красиков Д. Н. Графен: методы получения и теплофизические свойства. // Успехи физических наук. — 2011. — Т. 181, В. 12. — С. 233–268. [Elets'kii A. V., Iskandarova I. M., Knizhnik A. A., Krasikov D. N. // Uspekhi fizicheskikh nauk. 2011. Vol. 181, iss. 12. P. 233]
2. Алферов Ж. И., Асеев А. Л., Гапонов С. В. и др. Наноматериалы и нанотехнологии // Нано- и микросистемная техника. — 2003. — № 8. — С. 3–13. [Alferov Zh. I., Aseev A. L., Gaponov S. V. i dr. // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2003. N 8. P. 3]
3. Богданов А. А., Дайнингер Д., Дюжев Г. А. Перспективы развития промышленных методов производства фуллеренов. // Журнал технической физики. — 2000. — Т. 70, вып. 5. — С. 1–7. [Bogdanov A. A., Daininger D., Dyuzhev G. A. // Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2000. Vol. 70, iss. 5. P. 1]
4. Цолин П. Л., Петриченко С. В., Демченко О. О. Электрозрадная обработка органических жидкостей — перспективный метод получения новых углеродных наноматериалов. // Матер. 15-й Междунар. конфер. «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». — Украина, г. Николаев. — 2011. — С. 89–92. [Tsolin P. L., Petrichenko S. V., Demchenko O. O. // Mater. 15-i Mezhdunar. konfer. «Fizika impul'snykh razryadov v kondensirovannykh sredakh». Ukraine, Nikolaev. 2011. P. 89]
5. Костин Е. Г., Полозов Б. П., Федорович О. А. та ін. Плазмохімічний синтез та фізичні дослідження нанорозмірних алмазоподібних плівок // Зб. «Українська конференція з фізики плазми та КТС-2011». — Україна, м. Київ. — 2011. — С. 37. [Kostin E. G., Polozov B. P., Fedorovich O. A. ta in. // Zb. «Ukrayins'ka konferentsiya z fiziki plazmi ta KTS-2011». Ukrayina, Kiyiv. 2011. P. 37]
6. Калданов В. А. Исследование источников неравновесной плазмы на основе СВЧ разрядов, предназначенных для осаждения алмазных пленок. / Дис. ... канд. физ.-мат. наук. —

Нижегород. — 2006. [Kaldanov V. A. / Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Nizhnii Novgorod. 2006]

7. Опалев О. А., Пашнев В. К., Ковальчук И. К. и др. Синтез алмазных покрытий в тлеющем разряде, стабилизированном магнитным полем. // Вопросы атомной науки и техники, серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения». — 2000. — № 4. — С. 158–164. [Opalev O. A., Pashnev V. K., Koval'chuk I. K. i dr. // Voprosy atomnoi nauki i tekhniki, seriya «Plazmennaya elektronika i novye metody uskoreniya». 2000. N 4. P. 158]

8. Кускова Н. И., Бакларь В. Ю. Процессы получения углеродных наноматериалов электроразрядными методами // Матер. 14-й междунар. конфер. «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». — Украина, г. Николаев. — 2009. — С. 73–75. [Kuskova N. I., Baklar' V. Yu. // Mater. 14-i mezhdunar. konfer. «Fizika impul'snykh razryadov v kondensirovannykh sredakh». Ukraine, Nikolaev. 2009. P. 73]

9. Иванова В. С., Фолманис Г. Э. От наноматериалов — к интеллектуальным нанотехнологиям // Металлургия машиностроения. — 2007. — № 1. — С. 2–10. [Ivanova V. S., Folmanis G. E. // Metallurgiya mashinostroeniya. 2007. № 1. S. 2]

10. Сердега Б. К. Модуляційна поляриметрия. — Київ: Наукова думка, 2011. [Serdega B. K. Modulyatsiina poliarimetriya. Kiyiv: Naukova dumka, 2011]

11. Sarika Singh, Gupta B. D. Simulation of a surface plasmon resonance-based fiber-optic sensor for gas sensing in visible range using films of nanocomposite // Meas. Sci. Technol. — 2010. — Vol. 21, N 11. — P. 1–8.

12. Бережинский Л. И., Максименко Л. С., Матяш И. Е. и др. Поляризационно-модуляционная спектроскопия поверхностного плазмонного резонанса. // Оптика и спектроскопия. — 2008. — Т. 105, № 2. — С. 281–289. [Berezhinskii L. I., Maksimenko L. S., Matyash I. E. i dr. // Optika i spektroskopiya. 2008. Vol. 105, N 2. P. 281]

13. Харрик Н. Спектроскопия внутреннего отражения. — Москва: Мир, 1970. [Kharrik N. Spektroskopiya vnutrennego otrazheniya. Moscow: Mir, 1970]

14. Jaspersen S. N., Schnatterly S. E. An improved method for high reflectivity ellipsometry based on a new polarization modulation technique // The review of scientific instruments. — 1969. — Vol. 40, N 6. — P. 761–767.

15. Виноградов Е. А., Лескова Т. А., Рябов А. П. Радиационные поверхностные плазмо-пляритоны // Оптика и спектроскопия. — 1994. — Т. 76, № 2. — С. 311–322. [Vinogradov E. A., Leskova T. A., Ryabov A. P. // Optika i spektroskopiya. 1994. Vol. 76, N 2. P. 311]

16. Бережинский Л. И., Литвин О. С., Максименко Л. С. и др. Размерные эффекты внутреннего отражения кластерных пленок золота в модуляционно-поляризационном представлении. // Оптика и спектроскопия. — 2009. — Т. 107, № 2. — С. 281–286. [Berezhinskii L. I., Litvin O. S., Maksimenko L. S. i dr. // Optika i spektroskopiya. 2009. Vol. 107, N 2. P. 281]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 23.02 2012 г.*

Maximenko L. S., Mishchuk O. N., Matyash I. E., Serdega B. K., Kostin E. G., Polozov B. P., Fedorovich O. A., Savinkov G. K. **Modulation polarimetry of full internal reflection, broken by diamond-like films.**

Key words: spectroscopic measurements, solid state detector spectrometer system, a modular spectrometer.

This article presents research results on diamond-like films produced under different technological conditions. The parameter ρ — polarization difference — has been introduced. It has been found from spectral features of the parameter ρ that the interaction of electromagnetic radiation with the electronic system of specimens, which occurs in the used spectral range, consists of local and polariton surface resonances, differing in frequencies and times of relaxations. The authors concluded that the correlation in resonance intensity is defined by the structural characteristics of the specimens. These results show that modulation polarimetry is a perspective technique for diagnostics of the structural homogeneity of composite nanocluster films.

Ukraine, Kiev, ¹V. Ye. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NASU, ²Kiev Institute for Nuclear Research of NASU, ³«Krypton» STC.

Максименко Л. С., Мищук О. Н., Матяш И. Е., Сердега Б. К., Костін Є. Г., Полозов Б. П., Федорович О. А., Савінков Г. К. **Модуляційна поляриметрия повного внутрішнього відбиття, порушеного алмазоподібними плівками.**

Ключові слова: алмазоподібні плівки, модуляційна поляриметрия, композитні нанокластерні плівки.

Досліджено алмазоподібні плівки, спеціально приготовані за різних технологічних умов. Запропоновано параметр ρ , що названо поляризаційною різницею. Із спектральних характеристик параметру ρ виявлено, що взаємодія електромагнітного випромінювання з електронною системою зразків, яке відбувається у використуваному спектральному діапазоні, складається з двох поверхневих резонансів — локального та поляритонного, що різняться частотою та часом релаксації. Зроблено висновок, що співвідношення амплітуд резонансу визначається структурними властивостями зразків, що свідчить про перспективність методу модуляційної поляриметрії для діагностики структурної однорідності композитних нанокластерних плівок.

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ, Інститут ядерних досліджень НАНУ, НТЦ «Криптон».