

Таким образом, использование данной системы позволит осуществлять дифференциальную диагностику поверхностей с параметром шероховатости $R_z < 50$ нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988.–191 с. 2. Сенько С.Ф., Зеленин В.А. Оптическая топография – новый метод контроля материалов электронной техники // Известия Белорусской инженерной академии. № 1(9)/2. – 2000. – С.167–169. 3. Hahn S. et al. Characterization of mirror-like wafer surfaces using magic mirror method. J. of Crystal Growth. – 1990. – V. 103, № 1–4, p. 423–432. 4. Сенько А.С., Сенько С.Ф., Зеленин В.А.. Компьютерная диагностика топографических дефектов полупроводниковых пластин // Материалы докладов Международной научно-технической конференции “Новые технологии изготовления многокристалльных модулей”. 25–29 сентября 2000 г., Минск – Нарочь, Беларусь. – Мн., 2000. – С.136.

УДК 621.37/39:534

В.М. Колешко, В.В. Баркалин, Е.В. Польшкова

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЕ МИКРОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ И АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

В настоящее время в различных областях микротехники и технологии все более широкое применение находят алмазоподобные пленки (АПП), обладающие рядом ценных с прикладной точки зрения свойств, недостижимых при использовании других материалов. Свойства АПП существенно зависят от параметров технологического процесса их получения, что связано со способностью атомов углерода образовывать прочные химические связи различного характера, отличающиеся типом sp -гибридизации. Получаемые пленки обычно гетерофазны и содержат следующие фазы: 1) алмазная (sp^3 -гибридизация); 2) графитовая (sp^2); 3) полимерная ($CH_{n=1,2,3}$, sp^2 и sp^1); 4) карбин. Свойства углеродных пленок могут существенно отличаться от свойств как алмаза, так и графита, варьируясь в этом диапазоне, при этом химические потенциалы углеродных фаз различаются слабо, что приводит к высокой вероятности термодинамических переходов между ними. Это качество углеродных пленок позволяет ставить задачу технологического управления их параметрами для создания “интеллектуального” углеродного материала для использования в составе интеллектуальных микроэлектромеханических систем (МЭМС), в частности, акустоэлектронных [1,2].

С принципиальной точки зрения задача получения АПП ставится как проблема получения алмаза при низких давлениях на базе закономерностей кристаллизации различных фаз углерода. Выделяются две группы способов получения алмазоподобного материала: высокотемпературные, при использовании которых получают алмазные поликристаллические пленки, и низкотемпературные, позволяющие создавать аморфные углеродные пленки. Низкотемпературные процессы в большой степени удовлетворяют требованиям микротехнологии. Это касается в первую очередь процессов на основе низкотемпературной газоразрядной плазмы, в частности, магнетронного [3]. Температура молекул в такой плазме сравнима с температурой окружающей среды, а электроны достаточно энергичны для их возбуждения, ионизации и диссоциации.

Особенностью АПП независимо от способа получения является сильный эффект внутренних механических напряжений, что обусловлено их многофазностью и большой величиной модуля Юнга алмазной фазы. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы в микротехнологии является применение редкоземельных элементов (РЗЭ) и их химических соединений, небольшие добавки которых способствуют снижению механических напряжений в различных пленках [3]. В табл. 1 представлены данные по электрофизическим свойствам пленок углеродного материала с добавками оксидов и фторидов РЗЭ, полученных магнетронным распылением мишеней на основе графита в атмосфере аргона, в зависимости от величины отрицательного электрического смещения, подаваемого на кремниевую подложку при напылении.

Из представленных данных следует, что высокоомные пленки получают при достаточно высоком давлении аргона и не слишком большой мощности магнетронной системы (≤ 1 кВт). Эти параметры соответствуют сильному перемешиванию потока атомов углерода и бомбардировке растущей поверхности пленки ионами аргона, которые должны обладать энергией 30–50 эВ. Высокоомные аморфные пленки углерода обладают неоднородной структурой на атомно-молекулярном уровне, с нелокальными электронными состояниями в областях графитоподобных фазы и локализованными – в областях алмазоподобной фазы, и являются типичным представителем объектов мезоэлектроники. Алмазоподобная фаза требует для своего образования достаточно высокого уровня внутренних механических напряжений, которые реализуются при бомбардировке растущей пленки ионами аргона. Управление пространственным распределением углеродных фаз и создание упорядоченных мезоструктур может быть достигнуто путем целенаправленного создания областей с высокими и низкими напряжениями на поверхности подложки. В качестве оптимального для магнетронного получения АПП установлен процесс при давлении аргона 0,04 мм рт.ст., токе магнетрона 0,35 А, напряжении 600 В, напряжении смещения подложки – 40 В. Скорость осаждения углеродной пленки при этом составляет 5–8 нм/мин [2].

Электромеханические параметры пленок углеродного материала с добавками РЗЭ на подложках из кремния (001)-среза (давление аргона при напылении 0,04 мм рт.ст, ток магнетрона 0,35 А, напряжение питания магнетрона 600 В)

Напряжение смещения подложки при напылении углеродного материала, В	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15
Оптическая ширина запрещенной зоны, эВ	2,30	2,28	2,07	1,44	0,74	0,22	0,12
Удельное электрическое сопротивление, Ом·см	2,5* *10 ⁹	7,1* *10 ⁶	6,9* *10 ²	89	48	22	10
Твердость по Виккерсу		2410	2230	1590	1180	990	920

Аморфные пленки углерода представляют собой материал с запрещенной зоной подвижностей, определяющей их диэлектрические свойства. Частотную зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости углеродного материала можно определить ширину на основе соотношения [2]

$$\omega^2 \epsilon''(\omega) = B(h\omega - E_0)^2 \quad (1)$$

где ω – угловая частота электромагнитного поля, B – константа, слабо зависящая от концентрации РЗЭ в углеродном материале, E_0 – оптическая ширина запрещенной зоны, представленная в табл. 1. В диапазоне частот 1,5–5,0 эВ электромагнитного спектра вещественная часть диэлектрической проницаемости углеродного материала при этом принимает значения от 4,5 до 1,1 в зависимости от величины электрического смещения подложки, а мнимая – от 0,01 до 3,2. В основе резкого роста удельного электрического сопротивления пленок при малом изменении напряжения смещения подложки (от –35 до –40 В) в процессе напыления, по-видимому, лежит перколяционный эффект, т.е. резкое уменьшение вероятности образования связанного кластера графитоподобной проводящей фазы. Это подтверждается близостью значений объемной доли графитоподобной фазы в получаемых высокоомных пленках и критической концентрации проводящей фазы $V_c=0,15$, при которой образуется бесконечный проводящий кластер в трехмерных системах.

Механическая твердость углеродных покрытий, представленная в табл. 1, исследовалась вдавливанием индентора по Виккерсу, а их адгезия к подложке – механическим царапанием. Достаточно высокую адгезию углеродных пленок удалось получить на подложках из кремния, кварцевого стекла, кварца, ниобата лития, арсенида галлия, стали.

Ввиду высокой скорости поверхностных акустических волн (ПАВ) в алмазе и высокой химической инертности углеродных покрытий, исследованы их акустоэлектронные свойства. Для оценки дисперсионных зависимостей фазовой скорости ПАВ в углеродном материале использованы значения модулей упругости и плотности алмаза и графита, которые ввиду аморфности углеродного материала усреднялись по мето-

дике [4]. Результаты такого усреднения представлены табл.2 вместе с соответствующими значениями фазовой скорости ПАВ V и фактора материала звукопровода F в чувствительности фазовой скорости ПАВ к нагружению поверхности слоем из DN молекул с молекулярной массой M , которая определяется соотношением

$$\frac{\Delta V}{V} = -f \cdot F \cdot M \cdot \Delta N, \quad (2)$$

где f – частота ПАВ. Указанные величины рассчитывались в соответствии с алгоритмом, изложенным в [5,6].

Таблица 2

Параметры предельных фаз углеродного материала

Параметр	Алмаз	Графит
Плотность, 10^3 кг/м^3	3,515	2,267
Модули упругости $C_{11}, 10^{11} \text{ Н/м}^2$	12,850	0,3855
$C_{12}, 10^{11} \text{ Н/м}^2$	0,210	0,2065
Диэлектрическая проницаемость, 10^{-11} Ф/м	5,047	0,8854
Фазовая скорость ПАВ, 10^3 м/с	11,7619	1,8575
Фактор $F, 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{с/кг}$	5,217	27,475

Для акустоэлектронных применений особый интерес представляют особенности модовой структуры ПАВ в многослойных структурах на основе аморфного углеродного материала. На рис. 1 представлены дисперсионные зависимости фазовой скорости ПАВ в структуре а-CVZnO для фундаментальной моды (кривая 0) и десяти высших мод (кривые 1-10), свидетельствующие, в частности, о возможности многомодовых режимов распространения ПАВ в таких структурах, что можно использовать в устройствах обработки аналоговой информации на ПАВ.

На рис. 2 представлены дисперсионные зависимости фазовой скорости ПАВ. Преобладание алмазоподобной фазы характеризуется высокой скоростью ПАВ, в случае преобладания графитоподобной фазы справедливо обратное. Верхние (нижние) кривые соответствуют предельной алмазной (графитовой) фазам углерода, точками указаны экспериментальные данные для ПАВ-структур со слоями углерода, напыленными при отрицательном смещении подложки -40 В (алмазоподобная пленка) и -30 В (графитоподобная пленка). Высокоомной пленке при этом соответствует величина модуля упругости $C_{11} = 8 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, а низкоомной – $2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$.

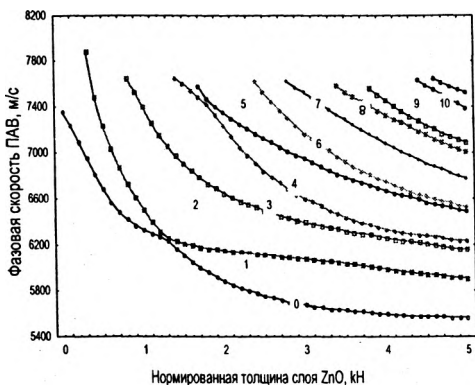


Рис. 1. Дисперсионные кривые фазовой скорости ПАВ в структуре $a\text{-C}/\text{ZnO}$. 0 – фундаментальная мода, 1–10 – высшие моды

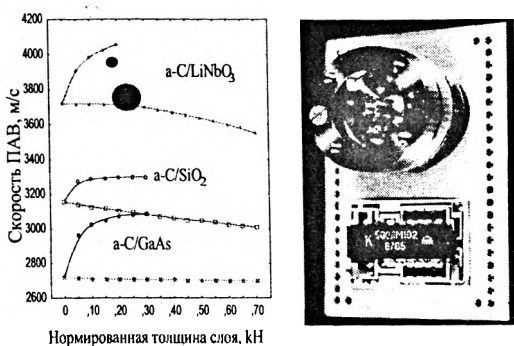


Рис. 2. Дисперсионные зависимости фазовой скорости ПАВ в структурах с углеродным слоем (k – волновое число ПАВ). Верхняя кривая – алмазоподобная высокоомная фаза, нижняя – графитоподобная низкоомная фаза. \cdot – экспериментальные данные для углеродного материала, полученного при отрицательном напряжении смещения подложки 40 В, –30 В.

Исследовано влияние слоя углеродного материала на характеристики ПАВ в звукопроводах из монокристаллического кварца, ниобата лития, арсенида галлия, кремния и других материалов.

Изучение влияния а-С слоя на чувствительность ПАВ к массовому адсорбционному нагружению поверхности показывает (рис. 3), что графитоподобная пленка на

поверхности звукопровода незначительно влияет на фактор F , в то время как наличие алмазоподобной пленки в некоторых случаях приводит к качественно новому эффекту: при приближении к частоте отсечки величина фактора F обращается в ноль, что соответствует росту глубины проникновения ПАВ в подложку и, следовательно, увеличению стабильности ПАВ-структур.

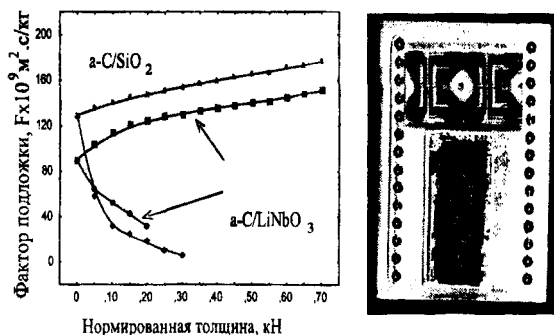


Рис. 3. Дисперсионные зависимости фактора подложки в чувствительности фазовой скорости ПАВ к массовому нагружению поверхности в структурах с углеродным. Нижняя кривая – алмазоподобная высокоомная фаза, верхняя – графитоподобная низкоомная фаза.

На рис. 2 и 3 представлены также примеры микросистем гироскопа и “электронного носа” на ПАВ соответственно, в которых реализованы интеллектуальные функции углеродного материала.

Покрyтия из углеродного материала с технологически управляемыми свойствами перспективны для применения в интеллектуальных устройствах на ПАВ из кварца, кремния, арсенида галлия, ниобата лития, стекла как для управления их параметрами, так и для защиты поверхности звукопровода от вредных воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В.М., Мешков Ю.В., *Зарубежная электронная техника*, 9, 3(1985).
2. Koleshko V.M., Barkaline V.V., Polynkova E.V., Shevchonok A.A. Nanophase Diamond-like carbon films doped by rare-earth elements. – “Functional Gradient Materials and Surface Layers Prepared by Fine Particles Technology” NATO Advanced Study Institute, Kiev, June 18- 28, 2000 (Ukraine)// Proceedings, p.99.
3. Колешко В.М., Баркалин В.В., Шевченко А.А., Полинкова Е.В. Мишени для магнетронного нанесения алмазоподобных пленок углерода. – Международная конференция “Вибротехнология’2000”, Одесса, Украина, 2000// Тезисы докладов.
4. Smith F.W., *J.Appl.Phys.*, 55, 764(1984).
- 5.

УДК 621.88.084

В.М.Колешко, И.А.Таратын, А.В.Сергейченко

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСЕНСОРЫ – ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ “ЭЛЕКТРОННОГО НОСА” ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГАЗОВЫХ СРЕД

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Электронный нос – это тип анализатора газовой среды на основе сенсоров, имитирующий работу органов обоняния человека и/или высших млекопитающих.

К настоящему времени разработаны и производятся множество сенсоров для определения содержания газов и пахучих веществ в атмосфере, использующих различные физические принципы работы. Но, несмотря на это, во всем мире продолжают исследования, направленные на разработку новых сенсорных микросистем, обладающих высокой чувствительностью, быстродействием, пониженным энергопотреблением и т.п. Это связано с тем, что экологическая ситуация на планете и безопасность жизнедеятельности с каждым годом все больше приближается к критической. Поэтому первым шагом по предотвращению глобальной экологической катастрофы должна стать установка детекторов вредных и токсичных газов на всех их возможных источниках.

Интегральные микросенсоры, входящие в состав электронного носа выполнены по планарной технологии. В качестве подложки используется кремниевый кристалл толщиной 100 мкм, размером 0,8x0,8 мм. Платиновые нагреватель и сенсорный электроды сформированы на одной стороне кристалла. Определенную сложность при использовании планарной технологии представляет формирование на плоской поверхности однородной (без дефектов и трещин) полупроводниковой структуры.

Для создания образца №1 использовались следующие растворы: нитратов In и Sn, ацетата Co и HAuCl_4 . Слои наносились последовательно на нагретую подложку с последующим отжигом. В результате сформировался однородный активный слой (АС) толщиной 100 мкм типа “сэндвич”. АС образца №2 имеет состав $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$ (~ 5 % вес.). Для его создания был приготовлен гель соответствующего состава, обладающий слабокислой средой (рН~3-4). Для формирования АС образца №3 использовался сильнокислый (рН ~1) раствор сплава ИТО с содержанием компонентов 95% In и 5% Sn.

Как известно [1], принцип работы полупроводниковых сенсоров основан на изменении проводимости АС при адсорбции на нем детектируемого газа. На рис. 1 представлен вид выходного сигнала образцов № 1-№ 3 на примере воздействия водорода.