

©1994 г.

## УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГИДРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК АМОРФНОГО УГЛЕРОДА

*В.А. Лизачев, А.И. Попов, С.Н. Стукач*

Московский энергетический институт (Технический университет),  
Москва, Россия

(Получена 22 февраля 1994 г. Принята к печати 6 июня 1994 г.)

Приведены результаты исследований гидрированных пленок углерода (С:Н). Пленки получены методом высокочастотного ионно-плазменного распыления графитовой мишени в атмосфере газовой смеси аргон-водород. Результаты исследований оптических свойств в диапазоне энергий фотонов 1.3–6.0 эВ и электрических свойств в переменном поле с частотой 100 Гц–35 МГц интерпретировались на основе данных электронно-микроскопических исследований, показавших существенную неоднородность пленок. Предполагается, что формирование неоднородностей с различными характерными размерами обусловлено кинетикой поведения различных комплексов на поверхности растущих пленок. Сопоставляются результаты анализа компонентного состава пленок, полученные из оптических измерений и методом электронной микроскопии. Обнаружено, что изменение условий приготовления пленок С:Н ведет к изменению соотношения в материале алмазоподобного, графитоподобного компонентов и «соединительной ткани» полимерного типа.

### 1. Получение тонких аморфных и аморфно-кристаллических гидрированных пленок углерода (С:Н)

Пленки аморфного углерода получали методом высокочастотного (ВЧ) ионно-плазменного распыления графитовой мишени в атмосфере газовой смеси аргон-водород на установке УРМ-3.279.014, снабженной генератором ВУД-2.5/13-СД-Л01 с рабочей частотой 13.56 МГц. В качестве мишени использовались квадратные пластины ядерно-чистого графита толщиной 4 мм. Процентное содержание примесей (Al, Fe, Mn, Mg, Cd) составляло  $(1-5) \cdot 10^{-3}\%$ , Bi —  $6 \cdot 10^{-5}\%$ , Cu —  $10^{-4}\%$ . Газовая смесь аргон-водород содержала 15 об% водорода. В качестве подложек использовались кристаллы NaCl, поликор и стекло. Температура образцов в процессе напыления контролировалась с помощью хромель-копелевых термопар. Перед напылением образцов проводилась очистка мишени распылением в течение 2 ч в атмосфере аргон-водород (ВЧ мощность — 450 Вт). Перед каждым процессом напыления рабочая камера установки откачивалась до предельного вакуума (остаточное давление не выше  $4 \cdot 10^{-5}$  Тор).

Для исследования электрических свойств использовались пленки, осажденные на поликоре. Перед напылением пленок углерода на подложке из поликора формировались планарные никелевые электроды. Напыление электродов проводилось на той же установке при температуре подложки 350–400 °С, рабочем давлении  $P = 7 \cdot 10^{-3}$  Тор, ВЧ мощности распыления  $W = 500$  Вт. Время напыления — 30 мин. Геометрия электродов: длина — 10 мм, ширина — 2,5 мм, расстояние между электродами — 1 мм. Для проведения оптических исследований пленки углерода напылялись на стеклянные подложки, для электронно-микроскопических исследований использовались слои на кристалле NaCl. Температура подложек во время осаждения пленок углерода варьировалась в диапазоне от 150 до 400 °С. Другие технологические параметры — ВЧ мощность распыления (150 Вт), рабочее давление в камере ( $7 \cdot 10^{-3}$  Тор) — оставались постоянными. Время напыления всех образцов одинаковое — 90 мин.

В дальнейшем образцы, полученные при температурах подложки  $150 \leq T_s \leq 200$  °С, будут называться низкотемпературными (НТ), при температурах  $200 < T_s < 300$  °С — среднетемпературными (СТ), а пленки, напыленные при температурах подложки  $T_s \geq 300$  °С — высокотемпературными (ВТ) образцами.

## 2. Структура и морфология гидрированных пленок углерода

Изучение структуры пленок C:H проводилось с помощью электронографии, что позволяет качественно судить о степени упорядоченности структуры пленок, а также проводить количественную оценку параметров ближнего порядка их атомной структуры. Наряду с этим проводились электронно-микроскопические исследования морфологии пленок.

На электронограммах образцов, полученных при температуре подложки  $T_s \leq 300$  °С, наблюдались широко размытые кольца, характерные для аморфного состояния вещества. В случае  $T_s = 400$  °С наблюдались узкие кольца, характерные для поликристаллов. При расшифровке дифракционной картины поликристаллического образца получено, что первое интерференционное кольцо соответствует межплоскостному расстоянию 0,126 нм, что характерно для алмаза [1], а второе — межплоскостному расстоянию 0,107 нм.

Электронограммы, снятые в режиме дифракции, фотометрировались на микрофотометре. Далее по известной методике [2] была рассчитана сферически симметричная функция радиального распределения атомов (ФРРА). Анализ ФРРА позволил провести расчет параметров ближнего и среднего порядка атомной структуры пленок. В табл. 1 содержатся рассчитанные координационные числа ( $n_1, n_2, n_3$ ) для образцов, полученных при  $T_s = 250$  °С, а также для сравнения приведены соответствующие числа для графита и алмаза [1].

Из таблицы видно, что координационные числа материала, полученного при  $T_s = 250$  °С, занимают промежуточные положения по сравнению с соответствующими значениями параметров в графите и алмазе. Судя по первому координационному числу, в этом материале преобладающим является алмазоподобный компонент. Таким образом, структура пленок определяется наличием алмазоподобного и графитоподобного компонентов.

**Таблица 1.** Координационные числа для пленок С:Н, полученных при  $T_s = 250^\circ\text{C}$ , и аналогичные данные для графита и алмаза

Материал	$n_1$	$n_2$	$n_3$
С:Н	3.68	11	24
Графит	3	6	-
Алмаз	4	12	24

Результаты дифракционных исследований структуры материала можно обобщить следующим образом. Образцы, полученные при  $T_s \leq 300^\circ\text{C}$ , были идентифицированы как аморфные, а образцы, полученные при  $T_s = 400^\circ\text{C}$ , как аморфно-кристаллические. Высказано предположение, что в НТ образцах преобладает графитоподобная фаза, тогда как в ВТ и СТ — алмазоподобная.

На основе анализа микрофотографий поверхности исследуемых пленок в [3] было сделано предположение о столбчатой структуре НТ материала, которая представляет собой суперпозицию сравнительно крупных (размерами около 5 мкм) и относительно более мелких (размерами около 0.5 мкм) столбов. Столбчатая структура с одним характерным размером порядка 0.5 мкм присутствует также в СТ и ВТ образцах, при этом в СТ образцах обнаружен большой разброс поперечных размеров столбов как в большую, так и в меньшую стороны от среднего значения [3]. Установлено, что характерные поперечные размеры элементов кристаллической фазы, выявленной в ВТ образцах с помощью дифракционных исследований, составляют около 1.5 мкм.

### 3. Частотные зависимости параметров пленок

Данные по электропроводности на постоянном токе исследованных в настоящей работе пленок приводились в работе [3]. Здесь этот материал дополняется результатами исследований параметров пленок С:Н в поле переменного тока. В диапазоне температур от 20 до  $250^\circ\text{C}$  и в диапазоне частот  $f = 100\text{ Гц} - 35\text{ МГц}$  были измерены частотные зависимости емкости  $C$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$ -конденсаторов, диэлектриком в которых служили исследуемые пленки. В области 100 Гц–100 кГц для измерения частотных зависимостей использовался мост переменного тока Р5083, а в области 50 кГц–35 МГц — измеритель добротности Е4-7.

Характер частотных зависимостей определяется температурой осаждения образцов. Из кривых  $C-f$  и  $\text{tg } \delta-f$  (рис. 1, 2), снятых при комнатной температуре, видно, что в образцах, полученных при  $T_s \leq 200^\circ\text{C}$ , интенсивные процессы поляризации сосредоточены в сравнительно узком диапазоне частот (30–100 кГц), переход через  $T_s = 250^\circ\text{C}$  характеризуется заметным уменьшением интенсивности процессов релаксации во всем исследуемом частотном диапазоне, а если  $T_s \geq 300^\circ\text{C}$ , их интенсивность вновь увеличивается, сдвигаясь при этом в более высокочастотную область (2–3 МГц). При температуре окружающей среды  $150^\circ\text{C}$  (рис. 3) процессы поляризации во всех образцах серии проходят в диапазоне частот (10–35 кГц). При более высоких температурах

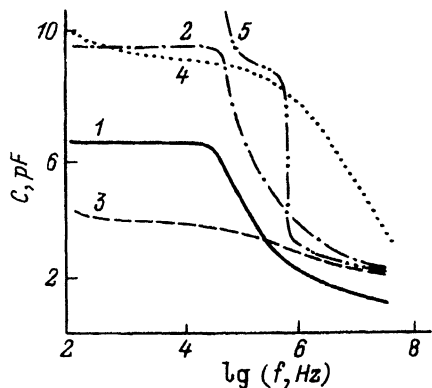


Рис. 1. Частотные зависимости емкости конденсаторов, диэлектриком в которых служили исследуемые пленки НТ(1,2), СТ(3), ВТ(4,5). Температура получения образцов  $T_s$ , °C: 1 — 150, 2 — 200, 3 — 250, 4 — 300, 5 — 400; Температура измерения — комнатная.

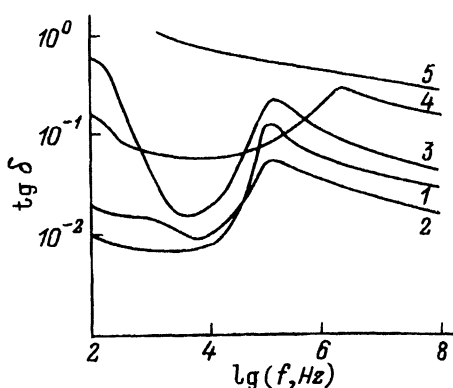


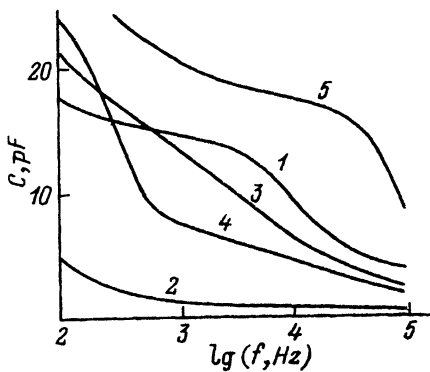
Рис. 2. Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов ( $\text{tg } \delta$ ), диэлектриком в которых служили исследуемые пленки. Нумерация кривых та же, что на рис. 1. Температура измерения — комнатная.

окружающей среды процессы поляризации в исследуемых образцах в диапазоне частот 100 Гц–100 кГц не наблюдались.

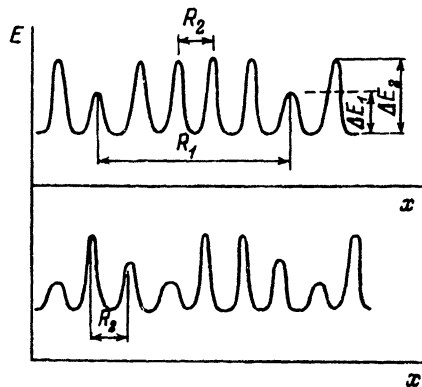
Интерпретация частотных зависимостей параметров материала основана на данных электронной микроскопии, показавшей существенную пространственную неоднородность материала. Одной из весьма распространенных моделей процессов диэлектрической релаксации в неоднородных полупроводниках и диэлектриках является модель релаксатора Фрелиха. В простейшей модели релаксатора Фрелиха (иначе, модели двухцентральной потенциальной ямы) [4] исходят из представления о том, что энергетический барьер, соответствующий «соединительной ткани», разделяет энергетические минимумы (положения равновесия для носителей заряда), соответствующие материалу внутри столбов. В отсутствие электрического поля положения равновесия по разные стороны от энергетических барьеров эквивалентны. За счет термического возбуждения системы наблюдаются ее постоянные переходы из одного положения равновесия в другое. Для не очень сильных полей ( $q\delta F \ll 2kT$ ) среднее время надбарьерного перехода системы между двумя устойчивыми состояниями определяется выражением [4]

$$\tau = \frac{1}{2\nu} \exp \frac{\Delta E}{kT}, \quad (1)$$

где  $\nu$  — частота фоновых колебаний системы в одном из положений равновесия,  $\Delta E$  — высота потенциального барьера между положениями равновесия или энергия активации,  $F$  — напряженность электрического поля,  $q$  — заряд электрона,  $\delta$  — расстояние между положениями равновесия в потенциальных ямах. По известным значениям времен релаксации и температуры образцов были найдены энергии актива-



**Рис. 3.** Частотные зависимости емкости конденсаторов, диэлектриком в которых служили исследуемые пленки. Нумерация кривых та же, что на рис. 1. Температура измерения — 150 °С.



**Рис. 4.** Схематическое представление системы энергетических барьеров в пленках С:Н, принадлежащих к различным группам образцов: вверху — НТ и ВТ, внизу — СТ.

ции процесса поляризации для исследуемой серии образцов:

$$\Delta E = kT \ln(\tau \nu_0), \quad (2)$$

где  $\nu_0 = 5 \cdot 10^{12}$  Гц является характерным значением для тетраэдрических полупроводников.

Результаты расчетов параметров релаксаторов в исследуемом материале схематически представлены на рис. 4. Видно, что в пленках выявлены энергетические барьеры разной высоты, разделяющие положения равновесия в системе. Энергетический барьер высотой  $\Delta E_2 = 0.7 \pm 0.03$  эВ присутствует во всех образцах. В НТ и ВТ образцах положения равновесия разделены дополнительным энергетическим барьером. Высота этого барьера  $\Delta E_1 = 0.45$  эВ в НТ образцах и меняется в пределах  $\Delta E_1 = (0.30-0.38)$  эВ для ВТ образцов. СТ образцы характеризуются широким набором времен релаксации и соответственно широким диапазоном высот барьеров: 0.3–0.7 эВ. На наш взгляд, это обусловлено большим разбросом характерных размеров столбов в СТ пленках.

#### 4. Оптические параметры пленок С:Н

Исследования оптических параметров выполнены с помощью спектрофотометра SPECORD-M40, использующего двухлучевую схему измерений и снабженного стандартными приставками для измерения коэффициента отражения, которые обеспечивают угол падения светового пучка, близкий к нормальному. Это позволяло измерять спектры в указанном диапазоне с погрешностью, не превышающей 3%. Все описываемые далее измерения выполнены при комнатной температуре. На первом этапе исследований были получены спектры пропускания и отражения стеклянных подложек без пленок и систем «пленка С:Н–стеклянная подложка» в диапазоне длин волн 200–900 нм с шагом 5 нм при свободном канале сравнения. На рис. 5 представлены полученные таким образом спектры пропускания и отражения стеклянной

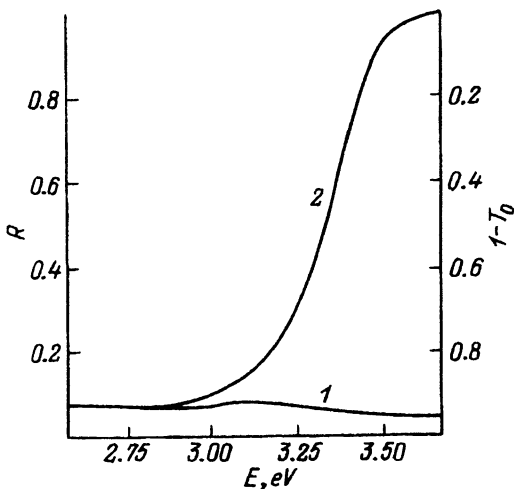


Рис. 5. Измеренные при комнатной температуре спектры отражения (1) и пропускания (2) стеклянной подложки.

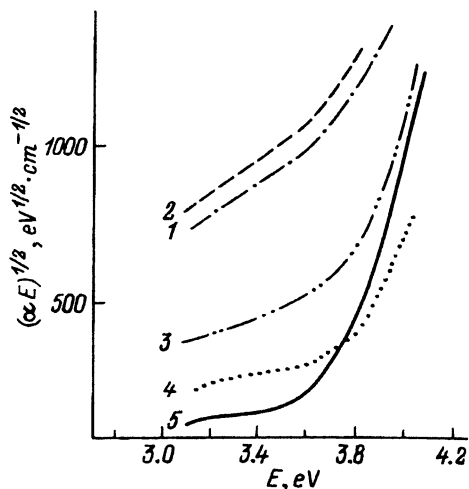


Рис. 6. Спектры коэффициента поглощения в координатах Тауца для пленок С:Н. Нумерация кривых та же, что на рис. 1.

подложки. Анализ спектров подложки показал, что в диапазоне энергий фотонов 1.3–3.0 эВ стекло можно рассматривать как слабо поглощающую подложку. Однако в диапазоне 3.0–6.0 эВ поглощение стеклянной подложки оказывается настолько значительным, что его нельзя не учитывать при расчете оптических параметров пленок. В такой ситуации возможны два способа получения корректных значений оптических параметров пленок во всем исследуемом диапазоне. Первый из них связан с таким изменением методики расчета параметров пленок, которое позволило бы решать задачу при произвольных значениях компонентов комплексного показателя преломления подложки. Второй способ основан на изменении схемы измерения оптических параметров. Поскольку методика расчета оптических параметров пленок на подложках с существенным поглощением [5] намного сложнее соответствующей методики для пленок на слабо поглощающих подложках, более приемлемым оказался способ, связанный с изменением схемы измерения оптических параметров систем пленка-подложка. Изменения схемы измерения сводились к помещению в свободный (при измерениях на первом этапе работы) канал сравнения стеклянной подложки, вырезанной из той же пластины, что и подложка исследуемого образца.

По известным значениям коэффициентов пропускания ( $T_{14}$ ) и отражения ( $R_{14}$ ) по методике [5] (вариант «пленка на прозрачной и слабо поглощающей подложке») были рассчитаны спектральные зависимости комплексного показателя преломления пленок ( $N = n_2 + ik_2$ ). Индексы в обозначениях оптических параметров системы пленка-подложка определяются в соответствии с [5] направлением распространения светового луча: воздух (1)–пленка (2)–подложка (3)–воздух (4). Определение компонентов комплексного показателя преломления подложки осуществлялось в каждой точке спектра с помощью численного решения

системы двух уравнений,

$$T_{\text{exp}} - T_{14} = 0,$$

$$R_{\text{exp}} - R_{14} = 0, \quad (3)$$

в которой в качестве экспериментальных значений для отражения  $R_{\text{exp}}$  и пропускания  $T_{\text{exp}}$  использовались выходные данные спектрофотометра, а зависящие в конечном итоге от  $n_2$ ,  $k_2$  и параметров подложки расчетные значения  $T_{14}$  и  $R_{14}$ ,

$$T_{14} = \frac{1 - R_{12}}{1 - R_{12}R'} T,$$

$$R_{14} = \frac{R_{12}T^2}{1 - R_{12}R'} + R, \quad (4)$$

подбирались таким образом, чтобы минимизировать абсолютную величину разностей в левых частях системы (3). Значения  $n_2$  и  $k_2$ , при которых такая минимизация достигалась, принимались за искомые значения компонентов комплексного показателя преломления пленок в данной точке спектра. В формулах (4) в соответствии с [6] использовались следующие обозначения:  $R_{12} = (n_2 - 1)/(n_2 + 1)^2$  — френелевский коэффициент отражения на границе пленка-воздух;  $R$ ,  $R'$ ,  $T$  — константы, зависящие от свойств исследуемой пленки.

Итак, решение систем (3), (4) позволило в каждой точке спектра определить компоненты комплексного показателя преломления пленок. Далее вычислялись зависящие от энергии фотона  $E = \hbar\omega$  значения компонентов  $\varepsilon'(\hbar\omega)$  и  $\varepsilon''(\hbar\omega)$  комплексной диэлектрической проницаемости и коэффициента оптического поглощения  $\alpha(E)$ . Наконец, с помощью линейной экстраполяции зависимости  $[\alpha(E) \cdot E]^{1/2}$  от  $E$  в области края поглощения определялись оптическая ширина щели материала  $E_g$  и тангенс угла наклона экстраполированной прямой — параметр  $B$ . Полученные результаты представлены на рис. 6.

Поскольку спектральные зависимости коэффициента оптического поглощения в координатах Тауца (рис. 6) всех без исключения исследованных образцов содержали два-три линейных участка, вслед за авторами работы [6] каждый такой участок мы отождествляли с присутствием в материале определенной фазы, которая обладает собственными оптическими параметрами (в частности  $E_g$  и  $B$ ). Так, в НТ образцах отчетливо видны два участка (назовем их 1 и 2), в СТ образцах три (1, 2 и 3) и в ВТ образцах в основном 2 и 3. Правомерность идентификации каждого линейного участка на графике Тауца с определенной фазой в пленках С:Н подтверждается тем, что для различных образцов диапазоны энергий, соответствующие участкам 1, 2 и 3, практически совпадают. В соответствии с приведенными выше результатами исследований каждая фаза может состоять из алмазоподобных и графитоподобных компонентов и, возможно, соединительной ткани полимерного типа, заполняющей промежутки между неоднородностями. Соотношения между концентрациями компонентов в разных

**Таблица 2.** Оптические параметры пленок С:Н

$T_s, \text{ }^\circ\text{C}$		150	200	250	300	400
	$E_g, \text{ эВ}$	1.78	1.71	3.57	3.65	3.70
	$B, \text{ отн.ед.}$	527	561	2127	1927	2853
1	$E_1, \text{ эВ}$	1.78	1.71	1.69	—	—
	$B_1, \text{ отн.ед.}$	527	561	343	—	—
2	$E_2, \text{ эВ}$	2.94	3.05	3.27	3.31	3.52
	$B_2, \text{ отн.ед.}$	1354	1241	1249	1384	1493
3	$E_3, \text{ эВ}$	—	—	3.57	3.65	3.70
	$B_3, \text{ отн.ед.}$	—	—	2127	1927	2853

фазах могут существенно различаться. Более подробно этот вопрос будет обсуждаться в следующем разделе работы. Оптическая ширина щели  $E_g$  и параметр  $B$  определялись отдельно для каждого линейного участка (фазы), выявленных на графике Тауца для данного образца. Их параметры приведены в табл. 2. В соответствии с [6] за величину  $E_g$  и значение параметра  $B$  пленки приняты результаты зависимостей Тауца в области сильного поглощения ( $10^4 \leq \alpha(\hbar\omega) \leq 10^5 \text{ см}^{-1}$ ).

### 5. Компонентный состав пленок С:Н по данным оптических измерений

В работе была предпринята попытка анализа компонентного состава материала в рамках теории эффективной среды Вебмана [7]. Исходной предпосылкой служило предположение, которое вытекает из анализа исследований структуры материала, его электрических и оптических свойств, что гидрированные пленки углерода — это гетерогенные среды, в состав которых входят несколько компонентов. Предположение о многокомпонентной структуре пленок не является новым. Так, большинство исследователей [1,8,9] считают, что в состав материала изучаемых пленок входят различные полиморфные образования углерода (в основе которых лежат атомы с  $sp^3$ -,  $sp^2$ -,  $sp^1$ -гибридизацией валентных электронов). В случае распространения света с многократным рассеянием через неоднородную систему, рассматриваемую как среда с комплексной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon(\hbar\omega)$ , справедливо равенство

$$\sum_{i=1}^n V_i \frac{\varepsilon_i(\hbar\omega) - \varepsilon(\hbar\omega)}{\varepsilon_i(\hbar\omega) + 2\varepsilon(\hbar\omega)} = 0, \quad (5)$$

где  $n$  — число компонентов, входящих в состав системы,  $\varepsilon_i(\hbar\omega)$  — комплексная диэлектрическая проницаемость  $i$ -го компонента, соответствующая энергии фотона  $\hbar\omega$ ,  $V_i$  — концентрация  $i$ -го компонента, такая что  $\sum V_i = 1$ . В нашем случае  $n = 3$ ,  $i$  принимает значения  $i = 1, 2, 3$  и относится к алмазоподобным, графитоподобным и полимерным компонентам соответственно.

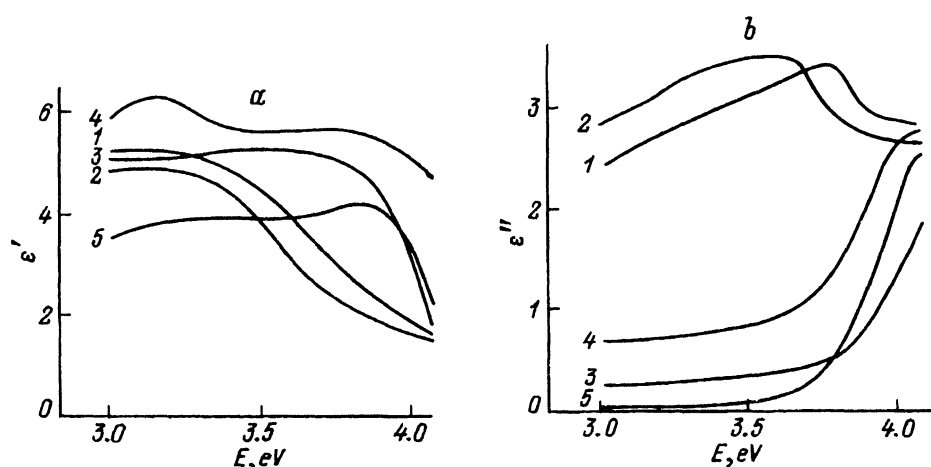


**Таблица 3.** Компонентный состав пленок С:Н, рассчитанный по данным оптических измерений

$T_s, ^\circ\text{C}$	150	200	250	300	400
$V_1, \%$	42.3	32.1	68.3	93.0	39.1
$V_2, \%$	57.6	67.8	16.2	6.6	1.6
$V_3, \%$	0	0	15.5	0.4	59.3

Значения диэлектрической проницаемости для алмазоподобного компонента заимствованы из работы [10]. В первом приближении в качестве прообраза аморфного полимерного компонента можно рассматривать материал тонких полиэтиленовых пленок, значения диэлектрической проницаемости для которых приведены в работе [11]. Для аморфных графитоподобных компонентов за  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  были приняты значения соответствующих параметров для пленок углерода, полученных напылением [9], где, как показывают структурные исследования, преобладают короткие графитовые образования.

Считая комплексную диэлектрическую проницаемость различных компонентов известной и используя измеренные значения  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  для пленок С:Н (рис. 7, а и 7, б соответственно), мы рассчитали объемные доли каждого компонента, входящего в состав исследованного материала. Значения  $\epsilon_i(\hbar\omega)$  для всех образцов взяты при одном и том же значении энергии фотонов — 3.20 эВ. Результаты расчета концентраций фаз, входящих в состав изучаемых пленок, представлены в табл. 3. Как видно из данных этой таблицы, состав пленок существенно зависит от условий их приготовления. Наиболее сильно изменения выражены, когда температура осаждения пленок находится в области от 200 до 250 °С. Более чем двукратное увеличение  $E_g$  и четырехкратное увеличение  $B$  в пленках С:Н (табл. 2) также подтверждает предположение о резком изменении состава исследуемых пленок в указанных пределах изменения температуры подложки.



**Рис. 7.** Спектральные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей комплексной диэлектрической проницаемости пленок С:Н. Нумерация кривых та же, что на рис. 1.

На основе вышеприведенного анализа можно предложить следующую модель состава гидрированных пленок углерода. Материал пленки С:Н — это композиция алмазоподобных и графитоподобных компонент, а аморфные полимерные компоненты служат соединительной тканью, или «клеем», который связывает другие компоненты. Доля компонент в составе пленки сильно зависит от технологических факторов ее получения.

## 6. Заключение

Обнаруженная методами электронной микроскопии и диэлектрической релаксации столбчатая структура может быть сформирована графитоподобным (НТ образцы) или алмазоподобным (ВТ образцы) материалом, связанным соединительной тканью. Точнее, это относится только к крупным столбам и кристаллическим включениям, разделенным энергетическим барьером высотой 0.3–0.45 эВ, сформированным из соединительной ткани. В СТ образцах такой барьер отсутствует, поскольку концентрации всех трех компонентов в этом материале соизмеримы, что препятствует формированию столбчатой структуры одного из указанных выше типов. Косвенно это подтверждается как данными электронной микроскопии [3], которая свидетельствует о непостоянстве размеров более крупных неоднородностей в СТ пленках, так и результатами исследования частотных зависимостей параметров, показавших наличие широкого спектра времен диэлектрической релаксации (а следовательно, и набора высот энергетических барьеров в материале). Еще одно косвенное подтверждение такой модели неоднородных пленок можно получить, сопоставляя данные оптических измерений с энергией связи атомов в алмазе и графите. Учитывая, что в процессе формирования пленок подвижность комплексов на поверхности роста (а в итоге и размер неоднородностей) определяется энергией связи комплексов того или иного типа с подложкой, то следует ожидать что в НТ образцах могут присутствовать как графитоподобный, так и алмазоподобный компоненты (энергия связи для графита — 1301.9 кДж/моль и для алмаза — 1423.6 кДж/моль [1]). Однако при достижении  $T_s = 250^\circ\text{C}$  ( $kT = 1085$  кДж/моль) ситуация меняется: комплексы, основу которых составляют атомы графита, имеют большую вероятность быть реиспаренными с поверхности подложки, чем быть захваченными растущей пленкой, в то время как алмазоподобные комплексы по-прежнему имеют большую вероятность захвата в структуру пленки. Это приводит к кардинальному изменению состава пленок (табл. 3) и их свойств (рис. 1–4, 6, 7, табл. 2).

Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность Н.Д. Васильевой за содействие при проведении электронографических исследований.

## Список литературы

- [1] Н. Tsai, D.B. Bogy. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 5, 3287 (1987).
- [2] Л.И. Татаринова. *Электронография аморфных веществ* (М., Наука, 1972).
- [3] А.А. Данченков, В.А. Лигачев, А.И. Попов. *ФТП*, 27, 1233 (1993).
- [4] А.С. Гороховатский, Г.А. Бороодовский. *Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков* (М., Наука, 1991).

- [5] А.В. Раков. *Спектофотометрия тонкопленочных полупроводниковых структур* (М., Сов. радио, 1975).
- [6] Е.Н. Понарина. Автореф. канд. дис. (М., МГУ, 1992).
- [7] I. Webman, H. Jortner, M.N. Coher. *Phys. Rev. B*, **15**, 5713 (1977).
- [8] F.W. Smith. *J. Appl. Phys.*, **55**, 764 (1984).
- [9] R.A. Roberts, W.C. Walker. *Phys. Rev.*, **161**, 730 (1967).
- [10] E.T. Arakawa, M.W. William, T. Inagaki. *J. Appl. Phys.*, **48**, 3176 (1977).
- [11] L.R. Painter, E.T. Arakawa, M.W. William, J.C. Ashley. *Rad. Res.*, **83**, 1 (1980).

Редактор Л.В. Шаронова

---