

04;06;11;12

## ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЧ-ПЛАЗМЫ С ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫМ РЕЗОНАНСОМ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК

© *Н.Н.Былинкина, С.П.Муштакова, В.А.Олейник,  
А.В.Скрипаль, Д.А.Усанов, Н.М.Ушаков, Р.К.Яфаров*

Благодаря уникальным свойствам алмазоподобные углеродные пленки (АПП) занимают все более существенное место в современной микро- и наноэлектронике. АПП обладают широким диапазоном механических, химических, оптических и электрических свойств. Они могут быть сравнимы с природными кристаллами алмаза по твердости, оптической прозрачности в ИК диапазоне, химической инертности, высокой температурной и низкой электрической проводимости. При этом свойства АПП существенно зависят от метода их получения, исходных материалов и условий проведения процессов осаждения.

Представляется актуальным изучение совместимости технологий осаждения этих пленок с существующими низкотемпературными вакуумно-плазменными технологиями микроэлектроники, в частности изучение влияния режимов воздействия СВЧ-плазмы с электронно-циклотронным резонансом (ЭЦР) на скорость роста, структуру, оптические и электрофизические свойства АПП, полученных при использовании различных плазмообразующих сред.

В экспериментах использовался оригинальный многомодовый реактор с соленоидно-мультипольным магнитным полем, обеспечивающим создание сосредоточенно-распределенного ЭЦР в плазме газового СВЧ-разряда частоты 2.45 ГГц на диаметре до 6 дюймов (рис. 1) [1]. Ввод СВЧ энергии в многомодовый реактор осуществлялся с помощью ступенчатого согласованного перехода и одномодового волновода низшим типом волны  $H$ . Соленоид располагался на одномодовом вводе СВЧ-энергии, а мультипольная магнитная система с преимущественно продольным пристеночным магнитным полем — на многомодовом реакторе. Мощность источника СВЧ-энергии в экспериментах была фиксированной и составляла 200 Вт.

Температура подложек в экспериментах составляла 300°C и была обусловлена требованиями обеспечения необходимой адгезии пленок к используемой подложке. Диапазон рабочих давлений плазмообразующих газов составлял

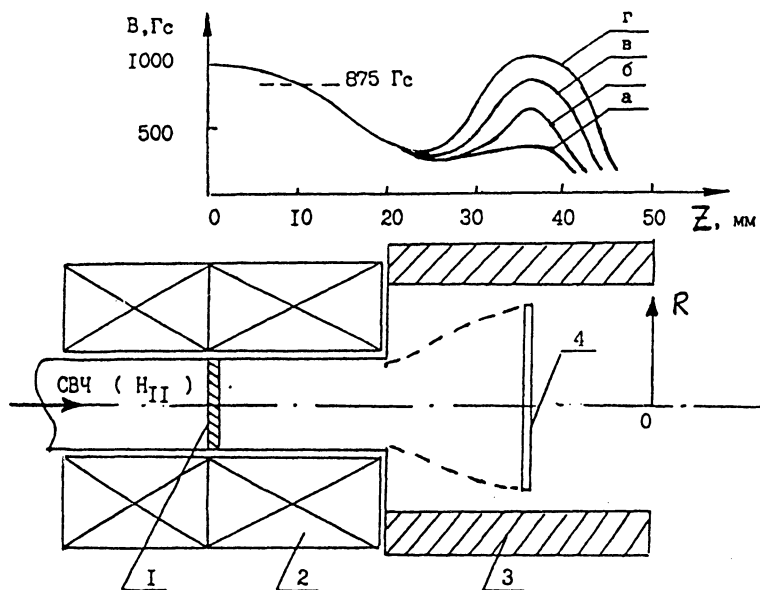


Рис. 1. Распределение индукции магнитного поля по длине и центральному поперечному сечению ЭЦР СВЧ-реактора с соленоидно-мультипольной магнитной системой (*а* —  $R = 0-20$  мм, *б* —  $R = 35$  мм, *в* —  $R = 50$  мм, *г* —  $R = 65$  мм): 1 — вакуумно-плотное керамическое окно, 2 — соленоидные катушки, 3 — мультипольная магнитная система, 4 — обрабатываемая пластина.

от 0.1 до 5 Па. Использовались пары этилового спирта, ацетилена, метана с добавками водорода, кислорода и без них. Пленки осаждались на стеклянные подложки.

В зависимости от используемых режимов генерации плазмы получены алмазоподобные пленки с широким диапазоном механических и электрофизических свойств.

Измерения удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости пленок проводились методом поверхностного зондирования с помощью планарного тонкопленочного зонда и цифрового автоматического измерителя Е7-8 [2]. Однако в отличие от указанной работы топологии измерительного и периферийного электродов были одинаковыми (рис. 2), что позволяло по фактору взаимности судить об однородности свойств объекта. Расстояние между электродами подчинялось условию

$$d \ll l = [W/(EE'WR)]^{1/2},$$

где  $d$  — расстояние между электродами;  $l$  — характеристическая длина, равная скин-слою;  $W$  — глубина области пространственного заряда;  $w$  — рабочая частота из-

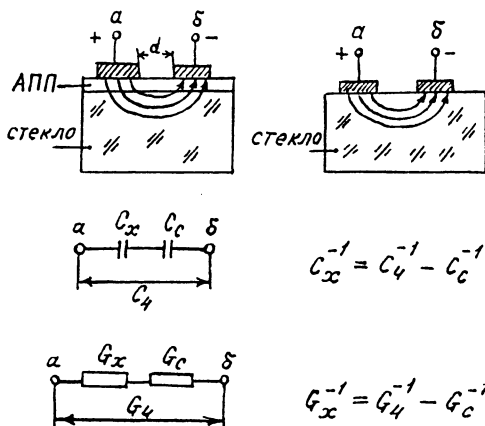


Рис. 2. Методика измерения удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости АПП.

мерения (1 МГц);  $R$  — сопротивление слоя тонкой пленки;  $E$  — диэлектрическая постоянная измеряемой пленки. АПП наносились на поверхность стеклянной подложки. Поэтому в представлении эквивалентной схемы такое включение выглядело как последовательное включение двух емкостей или двух проводимостей, соответствующих измеряемой пленке и стеклу. С учетом влияния подложки величины емкости  $C$  и проводимости  $G$  оценивались как

$$C = C' / (1 - C' / C'') \quad \text{и} \quad G = G' / (1 - G' / G''), \quad (1)$$

где  $C'$  и  $G'$  — измеряемые емкость и проводимость АПП;  $C''$  и  $G''$  — емкость и проводимость стеклянной подложки.

Измерения емкости и проводимости стеклянных подложек проводились с помощью тонкопленочных электродов аналогичной топологии. Диэлектрическая проницаемость  $E$  АПП определялась как

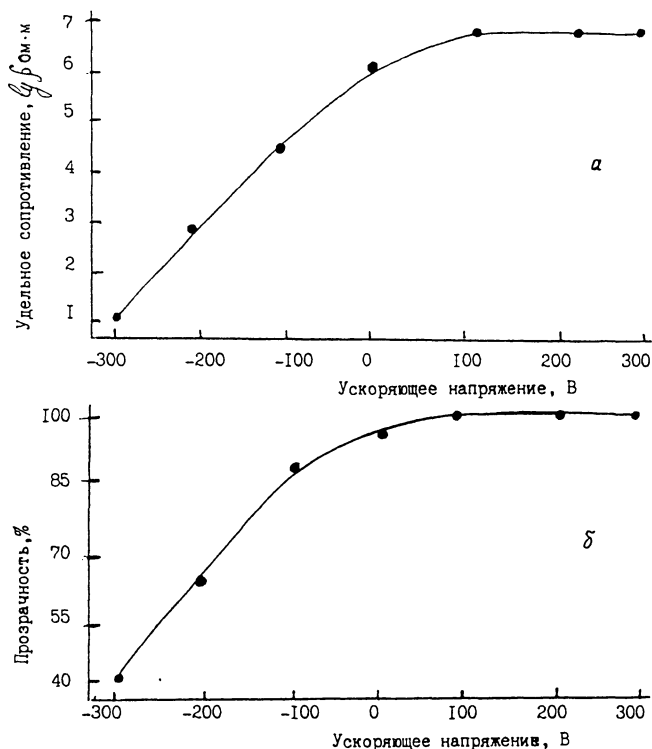
$$E = E'(C' - C'') / (C'' - C'), \quad (2)$$

где  $E'$  диэлектрическая проницаемость стекла;  $C'$  — измеренная емкость проводов, держателя и т.д. На основании (1) и (2) удельное сопротивление  $r$  находилось как

$$r = C / E E' G, \quad (3)$$

где  $[r] = \text{Ом} \cdot \text{м}$ ;  $[C] = \text{пФ}$ ;  $[G] = \text{мкС}$ ;  $E' = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ .

На рис. 3, а приведены зависимости удельного сопротивления АПП от потенциала на подложке. С изменением знака потенциала на противоположный удельное сопротивление возрастало от 10 до 10 Ом · м, а диэлектрическая проницаемость изменялась от 2 до 8. Последние значения этой



**Рис. 3.** Влияние ускоряющего напряжения на удельное сопротивление (а) и прозрачность (б) алмазоподобных углеродных пленок при ЭПР СВЧ-осаждения из паров этилового спирта ( $P = 0.5 \text{ Па}$ ,  $T = 200^\circ \text{С}$ ).

величины соответствуют характеристикам природного алмаза. Показатель преломления полученных пленок, измеренный эллипсометрическим методом, изменялся от 1.4 до 2.5. Скорость осаждения пленок возрастала при изменении ускоряющего напряжения от минус 300 к плюс 300 В примерно в 3 раза и достигала 5 нм/мин.

С использованием фотометрии на приборе ЛМФ-72 установлена корреляция прозрачности АПП (рис. 3, б) и их электропроводности от потенциала на подложкодержателе с растущей пленкой (рис. 3, б). Наблюдалось монотонное увеличение пропускания с увеличением длины волны. Низкая прозрачность АПП (коэффициент прозрачности 40–70% — “темные” пленки) характеризует преобладание проводящей фазы графита, в то время как хорошая прозрачность (“светлые” пленки, коэффициент прозрачности 98–100%), кото-

рая характеризует высокоомные образцы, свойственна алмазной фазе углерода. Это было подтверждено с помощью рентгенофазного анализа на дифрактометре ДРОН-3.0 с  $\text{Fe-K}\alpha$  излучением в интервале брэгговских углов  $2\theta = 51-59^\circ$ . Обнаруживались фазы алмазоподобного углерода пяти различных структурных модификаций. В “светлых” пленках присутствовали в основном фазы С (лонсдейлит) и С(20Н). В “темных” пленках кроме названных присутствовали также фазы С(16Н), С(12Н) и С(8Н). Во всех пленках преобладающими были фазы с большим числом атомов углерода на элементарную ячейку. Кроме того, на дифрактограммах в интервале  $2\theta = 31-35^\circ$  было установлено, что “темные” пленки имели также отражение от плоскостей (002). Этот пик имел широкий пьедестал, что свидетельствует о наличии мелкокристаллической фазы графита. В пленках, полученных из ацетилена, графит фиксировался более отчетливо, чем в пленках, полученных из паров спирта. При этом наблюдались рефлексы, соответствующие как дефектной, так и бездефектной упаковке слоев графита. На “светлых” пленках имелись как пик, принадлежащий графиту — (002), так и более узкий пик — отражение от плоскостей (111) алмаза.

Разработанные технологии позволяют осуществлять пассивацию чувствительных к температурному воздействию изделий и материалов электронной техники, увеличить в несколько раз срок их эксплуатации и придать им новое качество (например фото- и рентгеношаблонов, оптических элементов, пар трения, режущего инструмента и изделий медицинской техники), создать принципиально новые приборы и изделия. В мире эти пленки широко используют для создания элементарной базы наноэлектроники, функциональных слоев в СБИС, самозасвечивающихся экранов плоских видео- и компьютерных дисплеев, холодных катодов, которые не боятся воды, кислорода и имеют большой срок службы, фотоприемников оптического и детекторов рентгеновского излучения.

#### Список литературы

- [1] Яфаров Р.К. // Электронная промышленность. 1992. № 1. С. 8–11.
- [2] Карамышев В.П., Лаврищев В.П., Мурылева И.В., Панасенко П.В. // Микроэлектроника. 1989. Т. 18. Вып. 1. С. 9–14.

Поступило в Редакцию  
10 октября 1995 г.