

К. ф.-м. н. С. М. РОТНЕР, д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ,
В. В. ЛАГУТИН, Ю. С. МЕДВЕДЕНКО

Украина, г. Одесса, СП «ЛАЭТ», Одесский национальный
политехнический университет
E-mail: mokrickiy@mail.ru

Дата поступления в редакцию
03.05 2006 г.

Оппонент к. т. н. Н. М. ВАКИВ
(НПП "Карат", г. Львов)

МОЩНЫЕ РЕЗИСТОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ (АЛМАЗОПОДОБНЫХ) ПЛЕНОК

Рассматриваются свойства и предлагаются условия синтеза и легирования углеродных (алмазоподобных) пленок для изготовления на их основе мощных резисторов нового поколения.

Проблема получения качественных резисторов состоит в достижении сочетания высокой надежности, линейности, высокой стабильности, низкого значения ТКС, высокой коррозионной стойкости. Технологический процесс получения такого рода элементов должен быть достаточно производителен и относительно дешев.

Известно, что резистивные материалы, используемые в настоящее время, не имеют комплекса вышеперечисленных свойств, а их технология строится в основном на применении электропроводящих пленок и паст, имеющих высокую зернистость структуры, а значит, и высокую степень износа, т. е. низкую надежность.

Предлагаемые резисторы создаются на основе углеродных пленок, имеющих структуру алмаза. Это позволяет называть их алмазоподобными пленками (АПП). К основным функциональным достоинствам АПП и резисторов на их основе относятся термостойкость, высокая стабильность, стойкость к сверхвысокой плотности тока, отсутствие реактивного сопротивления.

Введение в АПП легирующей примеси позволяет получить промежуточные свойства материала от металла до диэлектрика. Однако до настоящего времени не было эффективного решения задачи легирования углеродных пленок. Такое решение найдено в СП «ЛАЭТ» (г. Одесса).

Целью работы является анализ свойств резисторов нового поколения, полученных на основе углеродных (алмазоподобных) пленок.

Исходная углеродная пленка — диэлектрик. Для практического применения ее в качестве пассивного элемента необходимо иметь возможность изменять ее удельное поверхностное сопротивление. Это достигается легированием углеродной пленки различными металлами. Наиболее рационально совмещать легирование с процессом синтеза АПП, основными методами которого являются термическое испарение, ВЧ-распыление, магнетронное распыление, химическое парофазное осаждение.

В данной работе АПП получали путем совмещения синтеза пленки при химическом осаждении углерода, получаемого в плазматроне при разложении кремнийорганического масла, с легированием ее атомами различных металлов, поток которых получали распылением мишени магнетронным методом. Плазматрон и магнетрон конструктивно совмещаются под колпаком вакуумной установки и работают одновременно. Получаемые в них потоки атомов углерода и металла одновременно осаждаются на подложку в условиях воздействия на нее ВЧ-поля. В результате структура АПП представляет собой углеродную матрицу с внедренными в нее атомами металла.

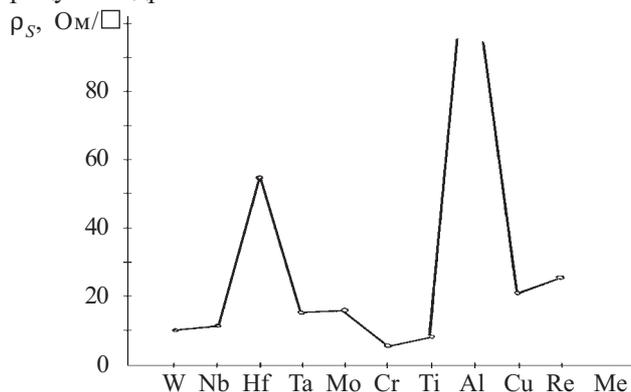


Рис. 1. Диаграмма изменения удельного поверхностного сопротивления АПП ρ_s в зависимости от типа легирующего металла

В процессе работы проводилось легирование АПП различными металлами. На **рис. 1** представлена диаграмма зависимости удельного поверхностного сопротивления АПП от типа легирующего металла. Почти все использованные металлы дают близкие результаты. Отличие данных по гафнию и алюминию объясняется, вероятно, частичным их окислением компонентами плазмы.

Для исследования состава пленок использовали резерфордовское обратное рассеяние, а для определения содержания углерода и водорода — ядерные реакции. Было установлено, что распределение углерода и водорода по глубине слоя достаточно однородно. Измерения проводимости также показали, что за исключением очень тонких слоев с высоким сопротивлением, формирующихся в начале осаждения, распределение удельного сопротивления однородно по всей толщине АПП.

Для определения механизма внедрения металла в матрицу АПП исследовалась плотность пленок в зависимости от степени легирования (удельного сопротивления). На **рис. 2** представлена зависимость плотности пленок от удельного сопротивления для АПП:Hf и АПП:Nb. Характер зависимости весьма схож. Тип металла заметно влияет на результирующую плотность пленки.

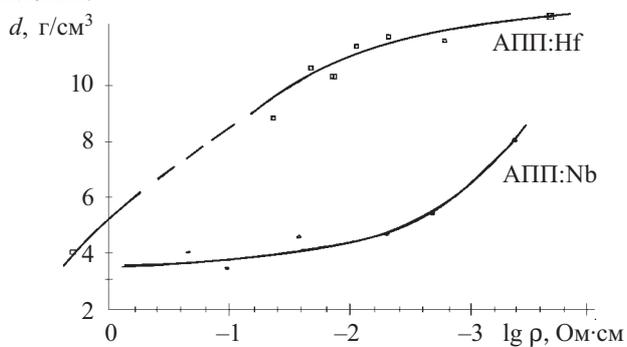


Рис. 2. Зависимость плотности d пленок АПП:Hf и АПП:Nb от удельного сопротивления

Существенным фактором, влияющим на структуру и свойства пленок, являются механические напряжения, возникающие в структуре при совместном распылении металла и синтезе АПП. Причины возникновения напряжений могут быть различны. Это и различие коэффициентов линейного расширения подложки и пленки, и собственные напряжения в ней, возникающие при больших концентрациях легирующей примеси. Определение суммарных напряжений структуры "подложка—пленка" производилось путем измерения изгиба кремниевой пластины с нанесенной пленкой методом рентгеновской дифракции.

После ионной очистки в стандартном режиме шероховатость поверхности подложки улучшается за счет удаления микрорельефа. Макрорельеф при этом практически не изменяется. После нанесения АПП:Ме ее поверхностная шероховатость не повторяет структуру исходной поверхности.

Исследование структуры пленок проводилось методами просвечивающей электронной микроскопии, оже-электронной спектроскопии, электронографии, рентгеновской дифракции, растровой электронной микроскопии. Пленки для исследований выращивали на подложках из ситалла, графита, кремния и арсенида галлия. Было изучено также, как влияет на структуру отжиг пленок при $T=600^\circ\text{C}$. Отжиг проводился в вакууме с остаточным давлением $(2,6...3,9)\cdot 10^{-3}$ Па в течение 30 мин. При исследовании пленок на подложках из ситалла с помощью просвечивающей электронной микроскопии образцы готовились по двум методикам: 1) механической шлифовкой с последующим утоньшением ионным травлением; 2) скальванием.

Для исследования распределения легирующей примеси в АПП:Ме использовалась электронная оже-спектроскопия. В пленках, легированных Си, наблюдается образование кластеров меди размером 20—30 мкм. В пленках, легированных Сг и Hf, распределение примеси более равномерное. Исследование структурного состояния пленки с легирующей примесью после осаждения и после отжига проводилось

методом съемки в камере Дебая с помощью косоугольного шлифа. Точечные рефлексы на дебаеграммах соответствуют отражениям от монокристаллической подложки. Установлено, что структурное состояние пленки и примеси при легировании Сг дифракционно-аморфное до и после отжига в вакууме. Легирование пленок гафнием приводит к образованию карбида гафния, который присутствует в пленке и после отжига. При легировании пленки медью образуется структура, устойчивая к отжигу.

С целью установления состояния и фазового состава поверхностного слоя пленки был проведен электронографический фазовый анализ. Он осуществлялся на электронографе ЭМР-100 при ускоряющем напряжении 75 кВ в режиме съемки «на отражение». На электронограммах пленок, легированных Hf и Сг, отсутствовали дифракционные рефлексы, что свидетельствовало о дифракционно-аморфном состоянии приповерхностного слоя. На электронограмме пленки, легированной Си, присутствовали рефлексы от оксида меди.

Электропроводные пленки имеют специфические и важные для нужд электроники и электротехники свойства:

- низкая величина ТКС — $10^{-6}—10^{-4} \text{ K}^{-1}$;
- широкий диапазон удельного сопротивления: от 10^{-4} до $10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$;
- высокая стойкость к сверхвысоким плотностям тока (более 10^6 А/см^2);
- высокая радиационная стойкость;
- высокая однородность, термостойкость и низкий уровень шумов.

Эти свойства позволили разработать новый класс резисторов на основе алмазоподобных пленок. В них в качестве подложки используется керамика из Al_2O_3 (ВК-94, ВК-100), AlN , Si_3N_4 . Это позволяет увеличить теплоотдачу и уменьшить ТКС элементов.

К безусловным преимуществам резисторов на основе АПП следует отнести: низкую материалоемкость, термостойкость резистивной пленки, высокую стабильность во времени, стойкость к сверхвысоким токам (до 10^6 А/см^2), возможность получения мощных резисторов с малыми значениями ТКС, отсутствие реактивного сопротивления [3].

В АПП наблюдается зависимость ТКС от сопротивления (**рис. 3**). При напылении АПП с сопротивлением выше 3000 Ом/ отрицательное значение ТКС

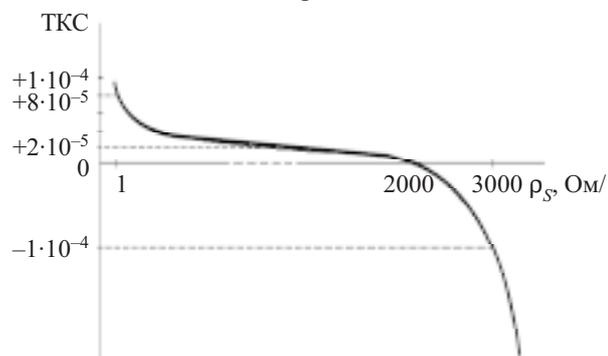


Рис. 3. Зависимость ТКС от удельного поверхностного сопротивления напыленной резистивной пленки АПП:Ti

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Сравнение мощных резисторов, выпускаемых разными фирмами

Производитель	Марка резистора	Тип резистора	Размеры, мм	Масса, г, не более	Диапазон сопротивлений	ТКС, 10^{-5} K^{-1}	Рабочая температура при номинальной мощности, $^{\circ}\text{C}$	Предельная температура, $^{\circ}\text{C}$	Напряжение пробоя, В, не менее	Индуктивность	Особенности установки	Дополнительные особенности
СП "ЛАЭТ", Одесса	РА-6-100 Вт	Пленочный	16×22×3,2	5	0,1 Ом — 10 МОм	20—80	-60—+80	250	3000	Нет	Установка на шасси, радиатор	Электроизолирован
То же	РА-7-100 Вт	То же	16×31×3,8	8	0,1 Ом — 10 МОм	20—80	-60—+300	550	3000	"	То же	Электроизолирован. Может быть использован как нагреватель для бытовой техники, пресс-форм и т. д.
"	РА-7-250 Вт	"	16×31×3,8	8	0,1 Ом — 10 МОм	20—80	-60—+120	550	3000	"	"	То же
РЕОМ, С.-Петербург	Р1-69-100 Вт	Металлопленочный	300×21×21	180	17; 21; 37,5; 50,75 Ом	200—500	-60—+55	200	...	"	Радиатор не требуется	Поставляется без отвода. Не изолирован
Pacific resistor (США)	110СН	Проволочный	89×45×71	400	До 90 кОм	20—90	-60—+25	275	5500	Низкая	Установка на шасси, радиатор	Электроизолирован
То же	MP9100	Пленочный	16×21×4,95	5	0,05 Ом — 100 Ом	20—80	-55—+25	175	1500	Нет	Установка на радиатор, шасси	То же
"	HDP247	То же	16×20×4	5	0,05 — 10 кОм	100	-55—+25	200	750	"	То же	Не изолирован

растет. Полученный резистор будет иметь неудовлетворительную зависимость изменения сопротивления от температуры. Поэтому для получения резисторов с низким значением ТКС и высоким сопротивлением необходимо использовать подгонку его величины к заданным значениям с определенной точностью.

В качестве инструмента подгонки используется лазерная установка для обработки твердых тел.

Сравнительный анализ свойств резисторов, производимых СП «ЛАЭТ», и резисторов других фирм представлен в **таблице**. К безусловным достоинствам мощных резисторов на основе алмазоподобных пленок СП «ЛАЭТ» относятся широкий диапазон сопротивлений (от 0,1 Ом до 10 МОм), низкое значение ТКС (не более $2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$), широкий диапазон рабочих температур, высокая термостойкость резистивной пленки (не менее 550°C), напряжение пробоя не менее 3000 В.

Выводы

1. Используемый метод легирования углеродных пленок позволяет вводить в них в качестве примеси такие металлы как W, Mo, Ta, Ti, Nb, Hf, Cr, Al, Cu, Re в концентрации, достаточной для управления элект-

рическим сопротивлением в широком диапазоне (от 0,1 Ом до 10 МОм).

Отличительной особенностью таких пленок от ранее известных является возможность управления температурным коэффициентом сопротивления от $-2 \cdot 10^{-5}$ до $+10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Их выгодно отличает способность выдерживать плотность тока до 10^6 A/cm^2 и отсутствие реактивного сопротивления.

2. Указанные свойства позволили получить резисторы нового поколения, способные рассеивать мощность до 250 Вт при размерах 16×31×3,8 мм и сохранять работоспособность до температуры 270°C . Подобные резисторы не имеют аналогов в мировой практике изготовления пассивных элементов радиоэлектроники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Kumar S., Trodahl H. J. Nonmetallic films precipitation machine // Thin Solid Films.— 1990.— N 193/194.— P. 72—76.
2. Biederman H., Chnctacek J., Slavinska D. et al. Diamondlike materials thin films // Vacuum.— 1989.— Vol. 39, N 1.— P. 13—15.
3. Dimigen H., Hubsh H., Memming R. Diamondlike resistors properties // Appl. Phys. Lett.— 1987.— Vol. 50, N 16.— P. 1056—1058.