

which satisfy the condition $\rho_k < 1$. So, the condition of phase locking is corresponding to the condition of existence of real value of multiplier for which the recursion relation is convergence.

REFERENCES

1. Buhstaber N. M., Karpov O. V., Tertichny S. I. Electrodynamics properties of Josephson junction which is driven by a set of δ -function pulses.// Journ. of. Eksp. and Theor. Phys. 2001. Vol. 120. №. 6(12). P.1478–1484 (in Russian).
2. Buhstaber N. M., Karpov O. V., Tertichny S. I. Some properties of differential equations which is described dynamic of strongly shunted Josephson junction.//Uspechi Matematicheskikh Nauk. 2004. Vol. 59. № 2. P.187–188 (in Russian).
3. Buhstaber N. M., Karpov O. V., Tertichny S. I. Dynamic of transitional process in strongly shunted Josephson junction which is driven by a set of shot impulses of current with variable parameters.//Journ. of Eksp. and Theor. Phys. 2003. Vol. 124. №. 3(9). P. 691–699 (in Russian).
4. Chiricalov V. A. Application of impulsive differential equation to the study of pulse-driven Josephson junction.//In: «Nanostructure materials–2008»: Belarus-Russia-Ukraine (NANO-2008), p. 62: Materials of first intern. scient. conf. (Minsk, April 22–25, 2008). Editors: P. A. Vityaz and others. Minsk: Publishing house «Belarussian science», 2008. 765 p.

ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЕ ОСАЖДЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ

В. К. Гончаров, Г. А. Гусаков, Д. Р. Исмаилов,
О. В. Кречотень, М. В. Пузырев

*Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Савченко
Белорусского государственного университета, ruzhyrev@bsu.by*

Известно, что безводородные алмазоподобные углеродные пленки (АУП) с высоким (более 80 %) содержанием sp^3 -связанного углерода обладают близкими к алмазу физическими характеристиками, среди которых можно отметить высокое удельное сопротивление, высокую механическую, химическую и радиационную стойкость, высокое напряжение пробоя [1, 2]. Перечисленные свойства делают АУП одним из наиболее перспективных диэлектрических материалов современной микроэлектроники и стимулируют исследования в области совершенствования технологий получения таких покрытий. Одним из наиболее перспективных методов получения алмазоподобных пленок является метод лазерно-плазменного осаждения [3, 4]. Настоящая работа посвящена исследованию влияния условий осаждения на электрические характеристики углеродных пленок, получаемых данным методом.

Для осаждения углеродных пленок применялся YAG:Nd³⁺ лазер фирмы Lotis-TII. Лазерное излучение длиной волны $\lambda = 1064$ нм и длительностью импульса $\tau = 20$ нс фокусировалось на графитовую мишень, расположенную в вакуумной камере при давлении около $2.6 \cdot 10^{-3}$ Па. Диаметр лазерного пучка во всех экспериментах составлял 2 мм. Плотность мощности излучения варьировалась в диапазоне $(1-5) \cdot 10^8$ Вт/см² при постоянном диаметре лазерного пучка. Частота следования лазерных импульсов изменялась от 1 до 5 Гц. Количество лазерных импульсов во всех экспериментах равнялось 4000. Мишени были изготовлены из графита МГ10СЧ и устанавливались под углом 45° к оси лазерного пучка. Для предотвращения образования на поверхности мишени эрозийного кратера производилось сканирование

лазерного пучка по поверхности мишени со скоростью от 0.5 до 2 мм/с. В результате взаимодействия лазерного излучения с графитом происходило испарение поверхностного слоя и формировался плазменный факел. Частицы углерода, содержащиеся в факеле, осаждались на подложки, расположенные параллельно мишени на расстоянии 100 мм от нее. В качестве подложек использовались пластины, изготовленные из кварцевого стекла. Температура подложек в процессе осаждения варьировалась в диапазоне от 300 до 500 К. Толщина покрытий определялась при помощи профилометра Talystep (США). Удельное сопротивление покрытий измерялось 4-зондовым методом.

На рис. 1 приведены зависимости толщины углеродных пленок, осажденных при температурах 300 и 500 К, от плотности мощности лазерного излучения. Видно, что толщина осаждаемых покрытий увеличивается с ростом плотности мощности. Полу-

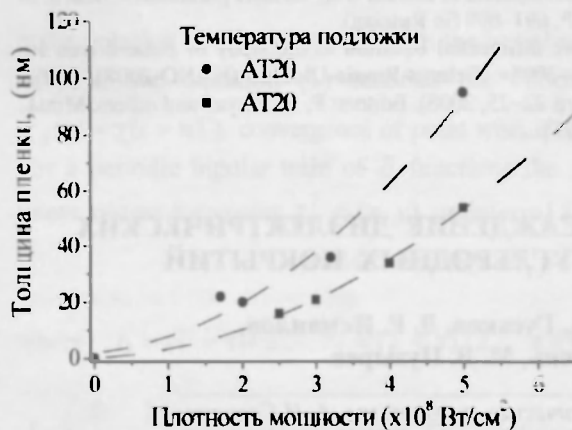


Рис. 1. Зависимости толщины углеродных пленок, осажденных при температурах 300 и 500 К, от плотности мощности лазерного излучения

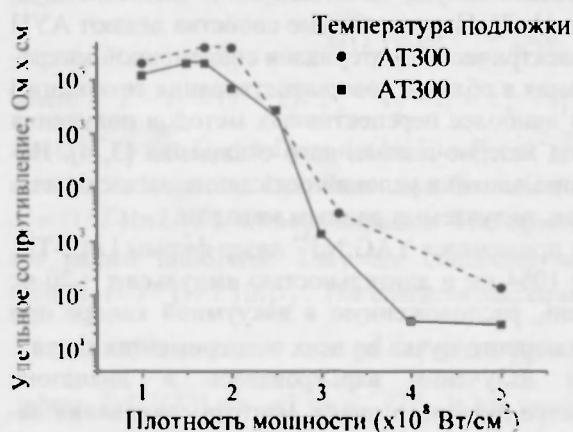


Рис. 2. Зависимости удельного сопротивления углеродных пленок, осажденных при температурах 300 и 500 К, от плотности мощности лазерного излучения

ченные зависимости хорошо описываются полиномами второй степени. Скорость осаждения углеродных пленок уменьшается с ростом температуры подложки. Зависимости удельного сопротивления углеродных пленок, осажденных при температурах 300 и 500 К, от плотности мощности лазерного излучения приведены на рис. 2. Для обеих температур зависимости имеют максимум в интервале $P = (1.5-2) \cdot 10^8$ Вт/см². Дальнейшее увеличение плотности мощности лазерного излучения приводит к резкому падению удельного сопротивления на 4 порядка. На рис. 3 приведена зависимость удельного сопротивления углеродных пленок, осажденных при постоянной плотности мощности $P = 1.7 \cdot 10^8$ Вт/см², от температуры подложки. Видно, что увеличение температуры подложки с 300 до 500 К приводит к плавному уменьшению удельного сопротивления осаждаемых покрытий ~ в 2 раза. С ростом плотности мощности влияние температуры подложки усиливается (рис. 2). Так, при плотности мощности $5 \cdot 10^8$ Вт/см² увеличение температуры подложки с 300 до 500 К приводит к уменьшению удельного сопротивления осаждаемых покрытий ~ в 4 раза.

В настоящей работе также установлено, что на удельное сопротивление углеродных пленок, осаждае-

мых лазерно-плазменным методом, существенное влияние оказывают такие параметры процесса, как скорость сканирования лазерного пучка по поверхности мишени и частота следования лазерных импульсов. Так при плотности мощности $1.7 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$ увеличение скорости сканирования лазерного пучка от 0.5 до 2 мм/с или уменьшение частоты следования лазерных импульсов от 5 до 1 Гц приводят к увеличению удельного сопротивления осаждаемых покрытий в 1.5–2 раза.

Наблюдаемые зависимости электрофизических характеристик углеродных пленок от плотности мощности лазерного излучения,

по-видимому, связаны с изменением эффективности формирования на подложках кластеров sp^2 - и sp^3 -связанного углерода. Так, по данным [5] удельное сопротивление более 10^6 Ом·см говорит о преобладании в структуре углеродных пленок кластеров sp^3 -связанного углерода. Переход кластеров sp^3 -связанного углерода в sp^2 -связанное состояние приводит к резкому снижению сопротивления покрытий. Отсюда следует, что при плотности мощности менее $2 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$ во всем исследованном интервале температур подложки в структуре пленок преобладают кластеры алмазоподобного углерода, что обуславливает высокие значения удельного сопротивления покрытий. При больших плотностях мощности структура пленок изменяется на графитоподобную. Полученный результат близок к результатам [5]. Наблюдаемый при больших плотностях мощности рост количества sp^2 -связанного углерода авторы [5] связывают с разупорядочением sp^3 -кластеров под воздействием частиц углеродной плазмы. Энергия частиц, испаряемых с поверхности мишени, увеличивается с ростом плотности мощности лазерного излучения. При достижении определенного порога этой энергии должно хватить для конвертации метастабильного sp^3 -связанного состояния углерода в стабильное sp^2 -связанное. На наш взгляд, еще одной возможной причиной перехода от осаждения алмазоподобных пленок к формированию графитоподобной структуры при больших плотностях мощности лазерного излучения является загрязнение углеродной плазмы фрагментами графитовой мишени. В пользу последнего предположения говорит зависимость удельного сопротивления пленок от скорости сканирования лазерного пучка по поверхности мишени и частоты следования лазерных импульсов.

Таким образом, в настоящей работе показано, что путем изменения таких параметров процесса, как плотность мощности лазерного излучения, температура подложки, скорость сканирования лазерного пучка по поверхности графитовой мишени и частота следования лазерных импульсов, можно варьировать удельное сопротивление углеродных пленок, получаемых лазерно-плазменным методом, в широких пределах от 10^1 до 10^7 Ом·см .

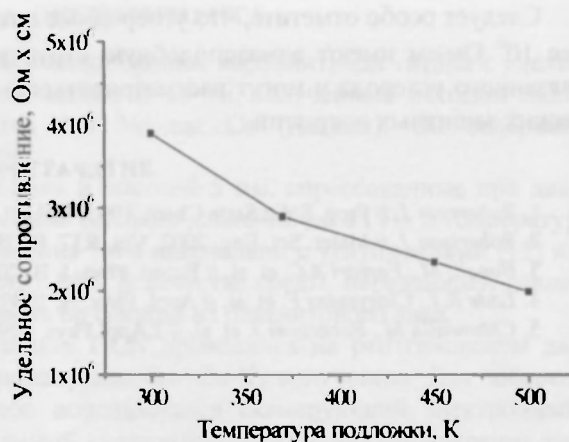


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления углеродных пленок, осаждаемых при постоянной плотности мощности $P = 1.7 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$, от температуры подложки

Следует особо отметить, что углеродные пленки с удельным сопротивлением более 10^6 Ом·см имеют алмазоподобную структуру с преобладанием кластеров sp^3 -связанного углерода и могут рассматриваться в качестве перспективных диэлектрических защитных покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Robertson J. // Prog. Solid State Chem. 1991. Vol. 21. P.199–333.
2. Robertson J. // Mater. Sci. Eng. 2002. Vol. R37. P.129–281.
3. Bonelli M., Ferrari A.C. et al. // Europ. Phys. J. B. 2002. Vol. 25. P.269–280.
4. Lade R.J., Claeysens F. et al. // Appl. Phys. A. 1999. Vol. 69. P.935–939.
5. Chhowalla M., Robertson J. et al. // J.Appl.Phys. 1997. Vol. 81. P.139–145.

СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КАРБОНИТРИДА ТИТАНА

Г. К. Zubovich¹, В. С. Urbanovich¹, И. А. Викторov¹,
B. Krolchka², L. Jaworska², P. Klimczyk²

¹Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению

²The Institute of Advanced Manufacturing Technology, Cracow

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что многие тугоплавкие соединения обладают высокими электрофизическими свойствами, а также высокими термостойкостью и термоэмиссионными свойствами. Совокупность этих свойств открывает возможность их использования в качестве нагревателей для электропечей, термоэлектродов высокотемпературных термогенераторов, катодов мощных устройств современной электроники (циклотронов, синхрофазотронов, электронных пушек), а также для установок по преобразованию тепловой энергии в электрическую [1].

К числу таких тугоплавких соединений может быть отнесен карбонитрид титана, интерес к изучению которого обусловлен сочетанием высоких электрофизических и физико-механических характеристик, определяющих перспективу его применения в экстремальных условиях, и возможностью варьирования этими свойствами за счет изменения его стехиометрического состава и микроструктуры [2–10].

Большинство работ по изучению свойств карбонитрида титана выполнено на образцах с микрокристаллической структурой. Однако в последнее время значительно возрос интерес к исследованию условий получения и свойств нанокристаллических тугоплавких материалов, в том числе и системы Ti-C-N [11]. Такие материалы обладают более высокими физико-механическими свойствами. Электрофизические свойства нанокристаллического карбонитрида титана не изучены.

В данной работе приводится анализ результатов исследования микроструктуры и электрического сопротивления нанокристаллического карбонитрида титана в зависимости от условий спекания под высоким давлением.