

ра. Нагрев подложки приводил к снижению поглощения на связях C–O и , наоборот, росту поглощения на связи O=C=O.

#### Литература

1. Murarka S.P. Low dielectric constant materials for interlayer dielectric application / S.P. Murarka //Solid State Technology. 1996. – № 3. – P. 83–89.

2. Телеш Е.В. Формирование оптических покрытий прямым осаждением из ионных пучков / Е.В. Телеш, Н.К. Касинский // Контенант, 2014. – Т. 13. – № 2. – С. 27–30.

3. Телеш Е.В. Применение вторичного разряда в ускорителе с анодным слоем для формирования оптических покрытий из диоксида кремния / Е.В. Телеш, А.П. Достанко // Контенант. – 2014. – Т. 13. – № 2. – С. 31–33.

УДК 621.382.002

### СИНТЕЗ ПЛЕНОК НИТРИДА УГЛЕРОДА ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Телеш Е.В., Романович Я.Г.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники*

*Минск, Республика Беларусь*

Ранее было установлено, что  $\beta$ - $C_3N_4$ , аналогичный  $\beta$ - $Si_3N_4$ , может обладать твердостью, сравнимой с твердостью алмаза. Дальнейшие расчеты показали, что другие кристаллические фазы  $C_3N_4$  должны иметь стабильность, сравнимую или большую, чем стабильность  $\beta$ - $C_3N_4$ , и что многие из этих структур должны быть твердыми по природе.  $C_3N_4$ -структуры включают  $\alpha$ -,  $\beta$ -, кубический, псевдокубический и графитообразный нитрид углерода. Пленки из нитрида углерода обладают высокой износостойкостью и устойчивостью к царапанию, являются коррозионностойкими и более устойчивыми к воздействию высоких температур по сравнению с алмазоподобными покрытиями [1].

Тонкие пленки нитрида углерода имеют широкий спектр применений. Например, их используют в качестве защитных покрытий для жестких дисков. Покрытия из нитрида углерода могут использоваться для таких областей применения, как износостойкие и противокоррозионные покрытия, в качестве диэлектрических слоев в микроэлектронных устройствах, как оптические покрытия [2, 3]. Такие пленки получают в основном реактивным испарением или распылением графита в среде азота. Нами предложен новый метод синтеза пленок нитрида углерода – прямое осаждение из ионных пучков, формируемых ускорителем с анодным слоем в режиме ионно-пучкового фокуса [4].

Проведено исследование влияния состава рабочего газа, напряжения на диафрагме и температуры подложки на электрофизические и механические характеристики покрытий из нитрида углерода, полученных осаждением из вторичного ионного пучка, формируемого ускорителем с анодным слоем в режиме ионно-пучкового фокуса. Экспериментальные исследования проводили на установке ВУ-1А, оснащенной ионным источником на основе ускорителя с анодным слоем (рисунок 1). В качестве рабочих газов использовались метан и азот. Покрытия наносились на

неподвижные подложки из кремния и стекла. Остаточное давление составляло  $\sim 3,5 \cdot 10^{-3}$  Па, ускоряющее напряжение – (2,3–2,4) кВ, ток разряда – 75–80 мА. Толщина покрытий определялась с помощью микроскопа-интерферометра МИИ-4. Скорость нанесения изменялась в диапазоне 0,1–0,16 нм/с и зависела от парциального давления азота и напряжения на диафрагме. Электрофизические параметры пленок (удельное объемное сопротивление  $\rho_v$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\tan \delta$ ) покрытий осуществляли путем измерения характеристик структур металл–пленка нитрида углерода–кремний. Металлические контакты диаметром 0,35 мм формировались путем напыления через маску пленки никеля толщиной  $\sim 0,2$  мкм. Сопротивление и  $\tan \delta$  тестовых структур измерялись с помощью измерителя иммитанса Е7-20 на частоте 1 МГц. Результаты исследования влияния режимов синтеза на электрофизические параметры слоев приведены в таблице.



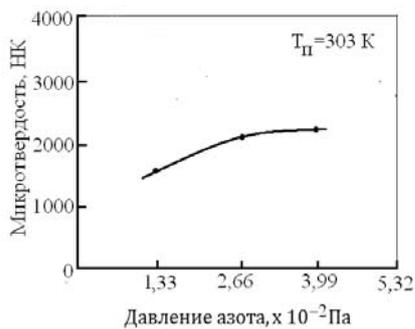
Рисунок 1 – Внешний вид внутрикопачного объема установки ВУ-1А

Измерение электрофизических характеристик показало, что покрытия обладали удельным объемным сопротивлением в широком диапазоне от  $0,65 \cdot 10^4$  до  $3,5 \cdot 10^5$  Ом·м. Тангенс угла диэлектрических потерь изменялся от 0,04 до 0,40. Увеличение парциального давления азота способствовало увеличению  $\rho_v$  и снижению диэлектрических потерь. Наилучшие параметры были

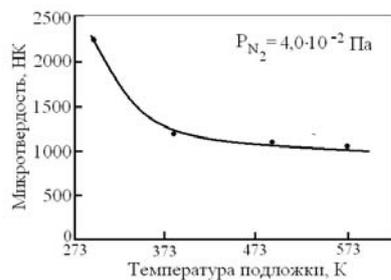
получены при парциальном давлении азота  $4,0 \cdot 10^{-2}$  Па. Нагрев подложки неоднозначно влиял на вышеуказанные параметры. При температуре подложки 573 К были достигнуты минимальное значение  $\text{tg}\delta = 0,04$  и  $\rho_v = 1,4 \cdot 10^5$  Ом·м. При наличии напряжения на диафрагме  $U_d = 85$  В удалось синтезировать покрытия с наилучшими электрофизическими характеристиками.

Таблица 1 – Исследования влияния режимов синтеза на электрофизические параметры слоев нитрида углерода

Давление азота, Па	Рабочее давление, Па	$U_d$ , В	$T_n$ , К	$\rho_v$ , Ом·м	$\text{tg}\delta$
–	$8,1 \cdot 10^{-2}$	–	303	$2,0 \cdot 10^5$	0,055
$1,3 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	–	303	$0,65 \cdot 10^4$	0,39
$2,6 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	–	303	$0,88 \cdot 10^4$	0,40
$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	–	303	$2,3 \cdot 10^5$	0,05
$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	–	393	$9,8 \cdot 10^4$	0,11
$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	–	483	$7,0 \cdot 10^4$	0,26
$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	–	573	$1,4 \cdot 10^5$	0,04
$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	45	303	$3,0 \cdot 10^4$	0,26
$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	85	303	$3,5 \cdot 10^5$	0,04



а



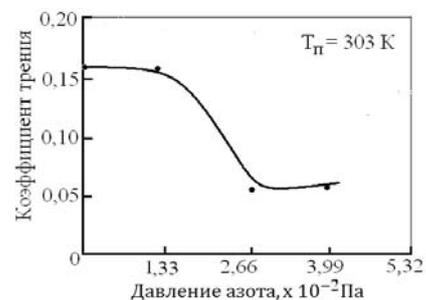
б

Рисунок 2 – Зависимости микротвердости пленок нитрида углерода от парциального давления азота (а) и температуры подложки (б)

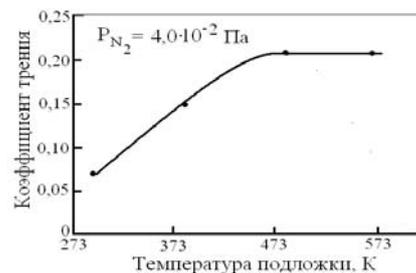
Полученные пленки исследовались на микротвердость по шкале Кнуппа с использованием твердомера VMHT MOT фирмы Leica. На рисунке 2 представлены зависимости микротвердости пленок от парциального давления азота и темпе-

ратуры подложки. Микротвердость незначительно зависела от парциального давления азота. Максимальная микротвердость 2260 НК была получена при давлении азота  $4,0 \cdot 10^{-2}$  Па. Повышение температуры подложки приводило к монотонному снижению микротвердости. Это можно объяснить десорбцией азота из конденсирующегося покрытия. При напряжении на диафрагме 55 В была получена максимальная микротвердости 2424 НК.

Трибологические характеристики измерялись с использованием микротвердомера МТ-4. В качестве индентора применяли шарик из стали ШХ15 диаметром 4 мм. Нагрузка в условиях сухого трения составляла 0,5 Н. Установлено, что увеличение доли азота снижает значение коэффициента трения почти в 3 раза (рисунок 3, а).



а



б

Рисунок 3 – Зависимости коэффициента трения пленок нитрида углерода от парциального давления азота (а) и температуры подложки (б)

Нагрев подложки способствовал значительному ухудшению трибологических характеристик покрытий (рисунок 3, б). Это также можно связать с десорбцией азота их конденсирующегося на подложке покрытия. Увеличение потенциала на мишени с нуля до 110 В привело к росту коэффициента трения с 0,07 до 0,21.

Адгезия покрытий из нитрида углерода к стеклу и кремнию определялась методом поперечных насечек. Установлено, что покрытия, нанесенные на холодную и подогретую до 423 К подложки имели отличную адгезию, соответствующую 5В по шкале ASTM. Покрытия, полученные при  $U_d = 60$ –110 В и  $T_n = 303$  К, обладали неудовлетворительной адгезией, соответствующей 0–2 В по шкале ASTM.

### Литература

1. Takadoun J. Comparative study of mechanical and tribological properties of CN<sub>x</sub> and DLC films deposited by PECVD technique / J. Takadoun, J.M. Rauch, L.M. Cattenot, N. Martin // Surface and Coating Materials Technology. – 2003. – V. 174–175. – P. 427–433.
2. Cohen M.L. Structural, electronic and optical properties of carbon nitride / M.L. Cohen // Material Science Engineering A. – 1995. – V. 209. – P. 1–4.

3. Khurshudov A.G. Tribological properties of carbon nitride overcoat for thin-film magnetic rigid disks / A.G. Khurshudov, K. Kato // Surface and Coatings Technology. – 1996. – V. 9. – P. 537–542.

4. Телеш Е.В. Оптические характеристики тонких пленок диоксида кремния, полученных прямым осаждением из ионных пучков / Е.В. Телеш, А.П. Достанко, А.Ю. Вашуров // Доклады БГУИР. – № 8(94). – С. 81–85.

УДК 531.746

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРСИОННЫХ ПОДВЕСОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МЭМС-ДАТЧИКА УГЛА НАКЛОНА

Федькин В.А., Таратын И.А., Плескачевский Ю.М.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Для определения угла наклона различных объектов относительно гравитационного поля Земли используется прибор, который называется инклинометр [1].

Инклинометрия является перспективным направлением для научно-технических разработок, которая включает в себя множество современных разработок из таких научных областей, как математика, электроника, гироскопия и микроэлектромеханические системы (МЭМС).

С развитием технологий инклинометрия получила широкое распространение в строительстве для определения отклонений от горизонтали различных объектов.

Другими важными задачами являются минимизация габаритов прибора для удобства использования и его эргономика.

На сегодняшний момент для минимизации габаритов прибора используют микромеханические электронные компоненты, так называемые МЭМС-системы.

МЭМС-системы представляют собой устройства, которые объединяют в себе микромеханические и микроэлектронные компоненты [2].

Инклинометры на основе микромеханического акселерометра обладают уникально малыми массой и габаритами, низким потреблением электроэнергии, полным отсутствием подвижных узлов, возможностью функционирования в повседневных условиях эксплуатации и меньшей стоимостью, чем их традиционные аналоги.

Инклинометры находят широкое применение в различных сферах. В зависимости от сферы использования, инклинометры могут быть разных видов, структуры и содержать различные вспомогательные устройства. Микромеханический акселерометр входит в состав инерциального измерительного модуля, который предназначен для измерения угла поворота различных объектов.

Основным недостатком автономного инерциального измерительного модуля является накопление ошибки спустя некоторого времени рабо-

ты устройства. Накопление ошибки связано с дрейфом нуля и шумами акселерометра.

Для устранения выше перечисленных погрешностей необходимо использовать точную модель МЭМС-акселерометра.

На первом этапе производится цикл модального анализа для подбора собственных частот микромеханического устройства. Меняются параметры геометрии в программе SOLIDWORKS 2019 и подготавливается импортируемая модель в ANSYS – производится модальный анализ. Цикл повторяется до получения необходимых значений собственных частот. После подбора собственных частот можно производить температурный анализ.

Создание геометрических моделей торсионных подвесов акселерометров производилось в программе SOLIDWORKS 2019.

На основании библиотеки торсионных подвесов были созданы 6 параметрических 3D-моделей.

Моделирование влияния размеров торсионных подвесов, проводилось по методике, которая изображена на рисунке 1.

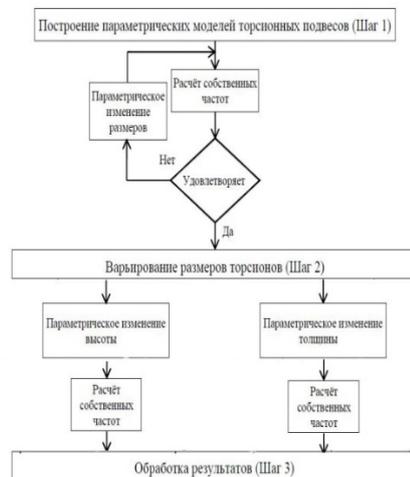


Рисунок 1 – Алгоритм оптимизации торсионных подвесов