

азота меняли также свою окраску – со светло-серой металлической на радужную.

Температура подложки варьировалась от 313 до 673 К, давление азота составляло  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па. Исходя из графика, приведённого на рисунке 4,  $\rho_v$  покрытий из TiBN значительно зависит от температуры подложки. Это можно объяснить некоторым ростом зерна, уплотнением структуры покрытия, десорбцией аргона и активных газов из пленки. Установлено, что покрытия, полученные распылением составной мишени 50 % BN/Ti, показали меньшее сопротивление.

На рисунке 4 представлена зависимость ТКС пленок TiBN от парциального давления азота. Покрытия наносились при и температуре подложки – 313 К.

Для покрытий, полученных распылением составной мишени 25 % BN/Ti, ТКС имеет знакопеременные значения. Увеличение давления выше  $0,66 \cdot 10^{-2}$  Па приводит к снижению уровня ТКС и переход в отрицательную область. Это можно связать с ростом диэлектрической фазы BN, наличие которой способствует механизму токопереноса путем туннелирования электронов через диэлектрический барьер. Для покрытий, полученных распылением составной мишени 50 % BN/Ti, ТКС имеет отрицательные значения.

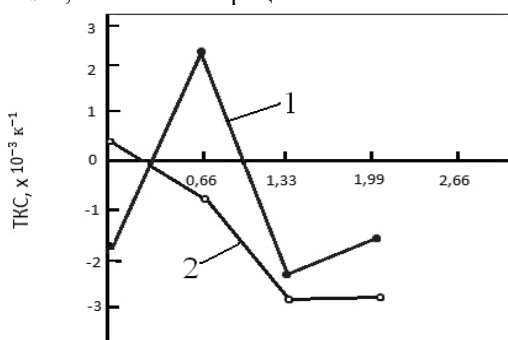


Рисунок 4 – Зависимость ТКС пленок TiBN от парциального давления азота

УДК 621.382.002

### ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК SiOF РЕАКТИВНЫМ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ КВАРЦЕВОЙ МИШЕНИ

Телеш Е.В., Гуревич О.В., Юшкевич С.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Развитие микроэлектроники требует применения для межуровневой изоляции диэлектрических слоёв с низким значением диэлектрической проницаемости. Это необходимо для уменьшения потребляемой мощности и увеличения быстродействия в сверхбольших интегральных схемах с раз-

На рисунке 5 представлена зависимость ТКС пленок TiBN от температуры подложки. Парциальное давление азота составляло  $(1,0-1,33) \cdot 10^{-2}$  Па.

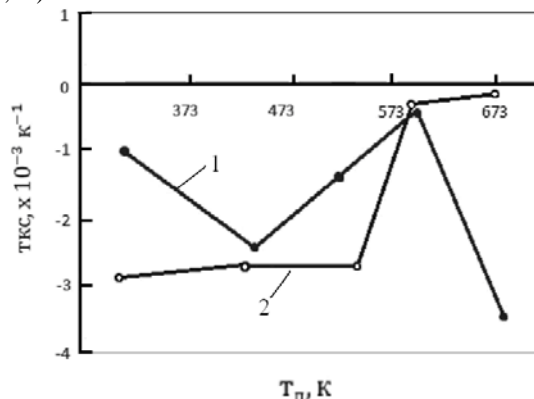


Рисунок 5 – Зависимость ТКС пленок TiBN от температуры подложки

При увеличении температуры подложки ТКС пленок уменьшается и достигает минимума  $\sim 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  при  $T_{п} \sim 600 \text{ K}$ .

Следует отметить, что ТКС у TiBN имеют отрицательный знак и относительно небольшую величину, что делает эти материалы весьма перспективными для производства стабильных тонкопленочных резисторов.

#### Литература

- Garcia-Gonzalez, L. Structure and mechanical properties of TiBN coatings fabricated by dc reactive sputtering technique / L. Garcia-Gonzalez, J. Hernandez-Torres, P.J. Garcia-Ramirez, J. Martinez-Castillo, A. Saucedo, A.L. Herrera-May, F.J. Espinoza-Beltran // Journal of Materials Processing Technology.–2007.– V. 186. – PP. 362–366.
- Mollart, T.P. Nanostructured titaniumboronitride coatings of very high hardness / T.P. Mollart, M. Baker, J. Haupt, A. Steiner, P. Hammer, W. Gissler. // Surface and coatings technology. – 1995. – V.74–75. – P. 491–496.

мерами элементов менее 0,25 мкм [1]. Традиционные диэлектрики, например  $\text{SiO}_2$ , имеют  $\epsilon=3,9$  и выше, что не удовлетворяет современным требованиям. Для снижения диэлектрической проницаемости плёнок диоксида кремния применяют насыщение их фтором [2]. В данной работе фторированные плёнки диоксида кремния формировались

реактивным ионно-лучевым распылением мишени из кварца.

Формирование пленок осуществлялось в модернизированной установке вакуумного напыления УРМ 3.279.017, оснащённой ионно-лучевым источником на основе ускорителя с анодным слоем. Распыляемая мишень представляла собой диск из кварца высокой чистоты (ТУ0284409–108–85) диаметром 75 мм и толщиной 10 мм. Остаточный вакуум не превышал  $3,3 \cdot 10^{-3}$  Па. Рабочими газами служили аргон и фреон-218 ( $C_3F_8$ ). Плёнки формировались на подложках из кремния и кремния, покрытого пленкой никеля. Температура подложки не превышала 343 К. Толщина покрытий определялась с помощью микроскопа-интерферометра МИИ-4. Компенсация положительного заряда на мишени осуществлялась термоэлектронами. Электрофизические характеристики покрытий исследовались с применением МДМ-структур. Емкость и тангенс угла диэлектрических потерь измерялись на частоте 1 МГц с помощью прибора Е7-20, а пробивное напряжение с применением характеристикографа TR-4805.

Проведено исследование влияния состава ионного пучка (состава рабочего газа) на характеристики тонкопленочных слоев из SiOF. Покрытия формировались при варьировании парциального давления фреона от 0 до  $5 \cdot 10^{-2}$  Па. Ускоряющее напряжение составляло 3 кВ, ток разряда ~80 мА, ток термокомпенсатора –13 А. Скорость нанесения снижалась при увеличении парциального давления фреона до  $3,99 \cdot 10^{-2}$  Па. На рисунке 1 приведены зависимость скорости нанесения пленок от парциального давления фреона.

На рисунке 2 приведена зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg} \delta$  и электрической прочности пленок от парциального давления фреона.

Установлено, что до парциального давления фреона  $3,3 \cdot 10^{-2}$  Па эти первые два параметра практически не изменяются. Минимальное значение  $\epsilon$  составило 2,92 при давлении фреона  $1,2 \cdot 10^{-2}$  Па, самые низкие диэлектрические потери  $\text{tg} \delta = 0,026$  – при давлении  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па. Однако дальнейшее повышение содержания фреона в рабочем газе приводило к резкому росту как  $\epsilon$ , так и  $\text{tg} \delta$ .

Увеличение парциального давления фреона привело к росту электрической прочности. При давлении  $C_3F_8 \sim 2,66 \cdot 10^{-2}$  Па она составила  $6,8 \cdot 10^6$  В/см.

Проведено исследование влияния энергии ионного пучка, степени компенсации и температуры подложки на характеристики тонкопленочных слоев SiOF. Энергия распыляющего ионного пучка варьировалась путем изменения ускоряющего напряжения на аноде ионного источника. Режимы нанесения

покрытий и результаты измерений приведены в табл. 1. Температура подложек для первых трех образцов составляла около 345 К, для последнего образца – 310 К.

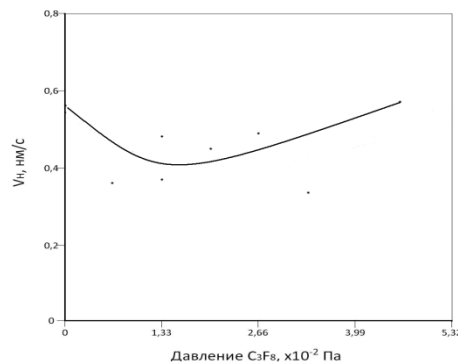
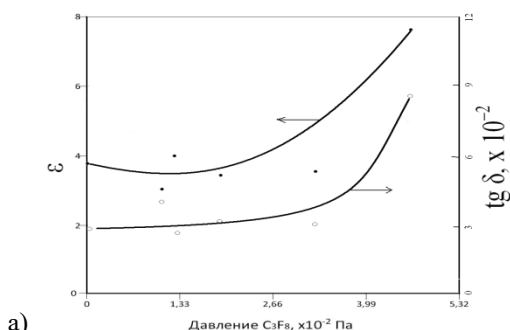
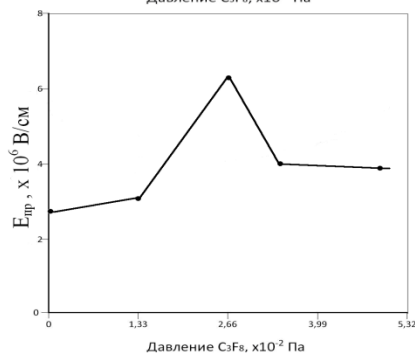


Рисунок 1 – Зависимость скорости нанесения от парциального давления фреона



а)



б)

Рисунок 2 – Зависимость диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь (а) и электрической прочности (б) пленок SiOF от парциального давления фреона

Таблица 1 – Режимы нанесения покрытий и результаты измерений электрофизических характеристик тонкопленочных слоев из SiOF

$P_{CF}$ , Па	$U_a$ , кВ	$I_k$ , А	$\text{tg} \delta$	$\epsilon$	$E_{пр}$ , в/см
$2,66 \cdot 10^{-2}$	1,5	13	0,063	3,50	$2,75 \cdot 10^6$
$2,66 \cdot 10^{-2}$	2,2	13	0,028	3,01	$7,96 \cdot 10^6$
$2,66 \cdot 10^{-2}$	3,0	13	0,032	3,37	$5,30 \cdot 10^6$
$2,66 \cdot 10^{-2}$	3,0	0	0,032	4,50	$5,10 \cdot 10^6$

Было установлено, что повышение энергии ионного пучка способствует уменьшению диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, повышению электрической

прочности. Для формирования качественных слоев из SiOF оптимальная энергия пучка должна составлять 1450...1600 эВ. Влияние степени компенсации на характеристики слоев из SiOF незначительно.

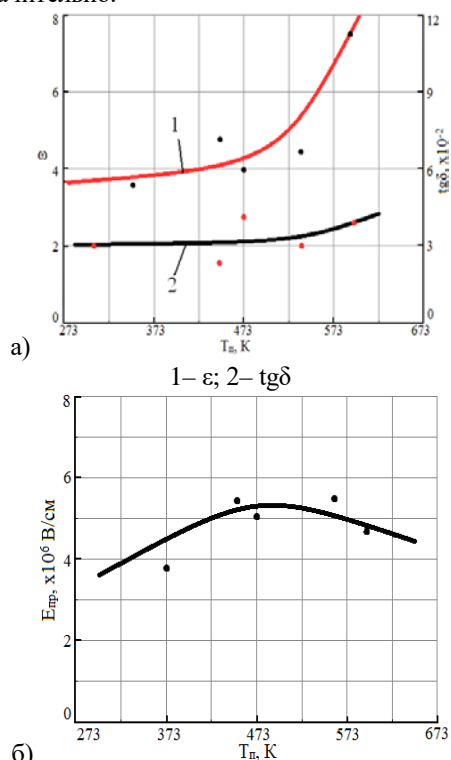


Рисунок 3 – Зависимость  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  (а) и  $E_{\text{пр}}$  (б) пленок SiOF от температуры подложки

Проведено исследование влияния температуры подложки при нанесении на электрофизические характеристики покрытий из диоксида кремния, полученных осаждением из вторичного ионного пучка. Температура подложек составляла 345, 453, 473, 538 и 593 К. Парциальное содержание фреона-218 составляло  $2,66 \cdot 10^{-2}$  Па, аргона –  $6,66 \cdot 10^{-2}$  Па, ускоряющее напряжение – 3,0 кВ, ток компенсатора 13 А. Исследовано влияние температуры нанесения на  $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$  и  $E_{\text{пр}}$ . Скорость нанесения изменялась в диапазоне 0,41...0,49 нм/с. Результаты измерения электрофизических параметров приведены на рисунке 3.

Установлено, что повышение температуры подложки свыше 523 К приводит к резкому росту значения диэлектрической проницаемости, что может быть связано с десорбцией фтора. В тоже время влияние температуры подложки на  $\text{tg}\delta$  и  $E_{\text{пр}}$  незначительно.

#### Литература

1. Murarka, S.P. Low dielectric constant materials for interlayer dielectric application/ S.P.Murarka // Solid State Technology. – 1996. – No 3. – P.83–89.
2. Максиль, О.В. Получение пленок SiOF прямым ионным осаждением /О.В. Максиль, Е.В. Телеш// Материалы 4-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2008», 12–14 апреля 2008 г. – Севастополь. – С. 306.

УДК 666.655

### ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Дятлова Е.М.<sup>1</sup>, Сергиевич О.А.<sup>1</sup>, Шамкалович В.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Как известно [1], электроизоляционные материалы работают в условиях одновременного воздействия высоких значений электрического напряжения и температуры. Такие изоляторы должны обладать высоким удельным объемным сопротивлением при нагревании, нулевым водопоглощением, высокой химической устойчивостью и т.д. Сочетание высокой механической прочности, низких диэлектрических потерь, высокого электрического сопротивления, стабильности размеров и стойкости к воздействию агрессивных сред делает керамические высокоглиноземистые материалы наиболее приемлемыми для вышеуказанных целей.

В качестве исходных сырьевых материалов, как правило, используют тугоплавкие и огнеупорные глины, каолины, пегматиты, полевые шпаты, технический глинозем, тальк, циркон, борную кислоту и др. Такие изделия изготавливают в

основном методом двухступенчатого прессования из порошкообразных масс, подготовленных совместным и тонким помолом сырьевых компонентов. При шликерной подготовке пресс-порошка необходим процесс обезвоживания суспензии. Изделия обжигаются в диапазоне температур 1320–1400 °С; щелочесодержащие компоненты позволяют снизить температуру синтеза, но при этом уменьшаются показатели электрического сопротивления и температуры эксплуатации изделий. Использование волластонита и кварцсерицитового фарфорового камня способствуют увеличению механической прочности до 80 МПа; флогопит (маложелезистая слюда изоморфного ряда биотита) уменьшает тангенс угла диэлектрических потерь и увеличивает электрическую прочность; тальк, карбонат лития и диоксид титана позволяют снизить значение ТКЛР [2].