

## СИНТЕЗ ПЛЕНОК SiOF, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Данилевич Д.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Телеш Е.В. – старший преподаватель

**Аннотация.** Исследовано влияние состава рабочего газа и температуры подложки на электрофизические характеристики пленок SiOF, полученных прямым осаждением из ионных пучков моносилана, аргона, кислорода и хладона-14. Установлено, что увеличение парциального давления хладона-14 привело к существенному уменьшению диэлектрической проницаемости. Повышение температуры подложки привело к росту диэлектрической проницаемости, что это может быть связано с десорбцией фтора из покрытия.

**Ключевые слова:** low-k диэлектрики, SiOF, прямое осаждение, ионный пучок, торцевой холловский ускоритель, ускоритель в анодном слое, электрофизические характеристики

**Введение.** Для увеличения быстродействия и уменьшения энергопотребления микроэлектронных устройств актуальной проблемой является поиск новых материалов с низкой диэлектрической проницаемостью (low-k-диэлектрики) и разработка современных технологий формирования тонкопленочных слоев из этих материалов [1]. Метод ионно-лучевого синтеза тонких пленок непосредственно из пучков ионов химически активных газов представляется одним из перспективных методов нанесения функциональных слоев, используемых при создании структур твердотельной электроники, в связи с рядом принципиальных достоинств по отношению к существующим методам получения тонких пленок в вакууме [2]. В данной работе пленки легированного фтором диоксида кремния (SiOF) наносились прямым осаждением из ионных пучков моносилана, аргона, хладона-14 и кислорода, формируемых торцевым холловским ускорителем (ТХУ) и ускорителем с анодным слоем (УАС) в режиме ионно-пучкового фокуса.

**Основная часть.** Покрытия наносились на неподвижные подложки из кремния и стекла К8 с применением ТХУ. Расстояние подложка-ионный источник составляло ~ 150 мм.

Схема процесса нанесения покрытий представлена на рисунке 1.

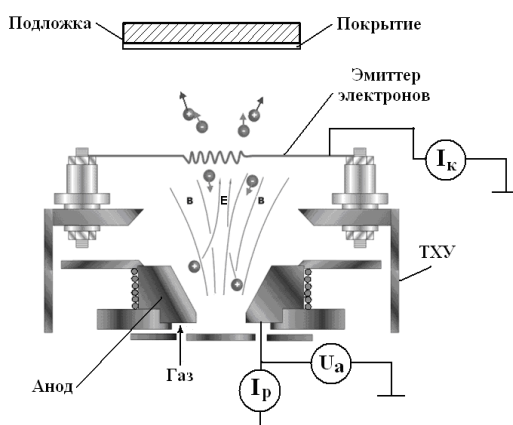


Рисунок 1– Схема процесса для нанесения пленок SiOF методом прямого осаждения из ионных пучков

Ток соленоида составлял 3 А, ток эмиттера электронов – 12–14 А, напряжение на аноде–75–80 В, ток разряда–3,0 А. Температура подложек составляла ~333–603 К. Толщина покрытий определялась с применением микроскопа-микроинтерферометра МИИ-4. Парциальное давление кислорода было постоянным и составляло  $4,0 \cdot 10^{-2}$  Па. Давление фреона варь-

ровалось от нуля до  $1,2 \cdot 10^{-1}$  Па. Общее рабочее давление составляло  $2,66 \cdot 10^{-1}$  Па. При таких режимах скорость нанесения составляла  $0,40\text{--}0,53$  нм/с, а толщина покрытий –  $100\text{--}160$  нм.

Установлено, что увеличение парциального давления хладона-14 привело к существенному уменьшению диэлектрической проницаемости. В тоже время влияние парциального давления кислорода на диэлектрические потери и удельное сопротивление структур было неоднозначным. Повышение температуры подложки привело к росту диэлектрической проницаемости. Это может быть связано с десорбцией фтора из покрытия. Результаты измерения электрофизических характеристик пленок приведены в таблице 1.

При синтезе пленок с использованием УАС температура подложки не превышала 313 К. Результаты исследования состава рабочего газа на электрофизические параметры слоев приведены в таблице 2.

Анализ данных таблицы показывает, что увеличение парциального давления хладона-14 способствовало существенному улучшению электрофизических параметров слоев. Диэлектрическая проницаемость существенно снижалась до  $\epsilon=2,89$  при давлении хладона  $4,0 \cdot 10^{-2}$  Па, диэлектрические потери – до  $\text{tg}\delta=0,06$ , а удельное объемное сопротивление возросло более, чем в 5 раз.

Таблица 1 – Результаты измерения электрофизических характеристик

№	$P_{O_2}$ , Па	$P_{CF_4}$ , Па	$P_{SiH_4}$ , Па	$T_p$ , К	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$	$\rho_v$ , Ом·м
1	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-2}$	$2,66 \cdot 10^{-1}$	335	3,76	0,025	$1,8 \cdot 10^5$
2	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	335	1,84	0,045	$2,0 \cdot 10^5$
3	$8,0 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	335	1,35	0,070	$1,6 \cdot 10^5$
4	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	398	4,20	0,057	$0,9 \cdot 10^5$
5	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	483	4,40	0,110	$0,4 \cdot 10^5$
6	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	573	3,80	0,090	$0,4 \cdot 10^5$

Таблица 2 – Результаты исследования состава рабочего газа на электрофизические параметры слоев

№	$P_{O_2}$ , Па	$P_{CF_4}$ , Па	$P_{SiH_4}$ , Па	d, нм	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$	$\rho_v$ , Ом·м
1	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	270	5,70	0,18	$1,8 \cdot 10^4$
2	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$	280	3,11	0,39	$1,4 \cdot 10^4$
3	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$	260	2,89	0,06	$1,05 \cdot 10^5$

На рисунке 2 приведены зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь от температуры подложки  $T_p$ . Парциальное давление хладона-14 составляло  $3,6 \cdot 10^{-2}$  Па.

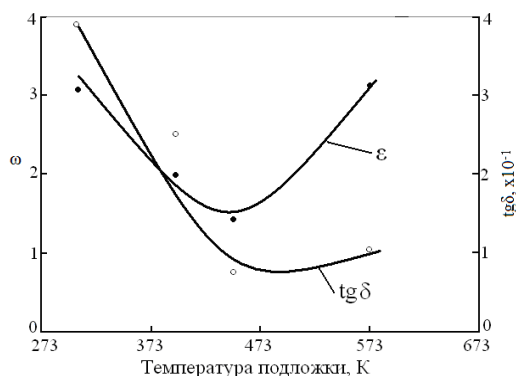


Рисунок 2 – Зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пленок SiOF от температуры подложки

Установлено, что эти зависимости имеют экстремальный характер. Лучшие параметры

слои SiOF имели при  $T_{\text{п}} \sim 450\text{--}470$  К. Зависимость удельного объемного сопротивления от  $T_{\text{п}}$  также носила похожий характер. Максимальное значение  $\rho_v = 1,63 \cdot 10^5$  Ом·м было достигнуто при нагреве подложки до 453 К.

Критерием качества покрытий из диэлектриков являются оптические параметры последних. При синтезе пленок SiOF с использованием ТХУ было установлено, что повышение давления хладона способствует небольшому снижению пропускания и увеличению поглощения покрытий. Нагрев подложки приводил к улучшению оптических характеристик пленок SiOF. Максимальное пропускание 94,5 % было получено при 543 К и парциальном давлении хладона-14 –  $8,0 \cdot 10^{-2}$  Па. Нагрев подложки до 603 К привел к росту поглощения и снижению прозрачности до 91,8 %, что может быть связано с десорбцией фтора из покрытия.

Измерение спектров оптического пропускания и поглощения пленок SiOF, полученных при применении УАС в режиме ионно-пучкового фокуса показало, что покрытия имели прозрачность около 90 % в широком диапазоне частот, что свидетельствует об их высоком качестве. Нагрев подложки приводил к улучшению оптических характеристик пленок SiOF.

**Заключение.** В результате проведенных исследований установлены экспериментальные закономерности процессов синтеза тонкопленочных слоев диоксида кремния, легированного фтором, установлены взаимосвязи между электрофизическими и оптическими свойствами слоев и параметрами ионных пучков и условий нанесения. На основании проведенных экспериментов были определены оптимальные режимы формирования тонкопленочных изолирующих и пассивирующих слоев из SiOF прямым осаждением из ионных пучков. При использовании торцевого холловского ускорителя парциальное давление кислорода должно составлять  $(3\text{--}6) \cdot 10^{-2}$  Па, давление хладона-14 –  $(6\text{--}8) \cdot 10^{-2}$  Па, температура подложки – 350 К. При использовании ускорителя с анодным слоем в режиме ионно-пучкового фокуса парциальное давление кислорода должно составлять  $(1,8\text{--}2,0) \cdot 10^{-2}$  Па, давление активного газа (хладон-14) –  $(2,3\text{--}2,5) \cdot 10^{-2}$  Па, температура подложки – не выше 340 К.

### Список литературы

1. Зайцев, Н.А. Физико-технологические проблемы проектирования ультрабольших интегральных схем с пониженной мощностью потребления / Н.А. Зайцев, И.В. Матюшкин, А.И. Сухопаров // Электронный научный журнал «Исследовано в России». – 2007. – № 836.
2. Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро- и нанoeлектроники: монография / А.П. Достанко [и др.]; под общей ред. А.П. Достанко, А.М. Русецкого. – Минск: Бестпринт, 2011. – 210 с.

UDC 621.371.39–537.311.32

## SYNTHESIS OF SIOF FILMS OBTAINED BY DIRECT DEPOSITION FROM ION BEAMS

*Danilevich D.S.*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Telesh E.V. – senior lecturer*

**Annotation.** The effect of the composition of the working gas and the substrate temperature on the electrophysical characteristics of SiOF films obtained by direct deposition from ion beams of monosilane, argon, oxygen, and freon-14 is investigated. It was found that an increase in the partial pressure of freon-14 led to a significant decrease in the dielectric constant. An increase in the substrate temperature led to an increase in the dielectric constant, which may be due to the desorption of fluorine from the coating.

**Keywords.** Low-k dielectrics, SiOF, direct deposition, ion beam, end-Hall accelerator, anode layer accelerator, electrophysical characteristics