

## ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР SiOF/Si ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Е. В. Телеш

---

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: etelesh@mail.ru*

Исследовано влияние состава рабочего газа и температуры подложки на электрофизические характеристики структур SiOF/Si, полученных прямым осаждением из ионных пучков моносилана, 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, это может быть связано с десорбцией фтора из покрытия. Анализ ИК спектров пропускания показал, что нагрев подложки привел к снижению интенсивности полосы поглощения фторида кремния и к увеличению поглощения на связях C–O и O=C=O.

**Ключевые слова:** фторированный диоксид кремния; прямое осаждение; ионный пучок; торцевой холловский ускоритель; диэлектрическая проницаемость; ИК спектр.

## FORMATION OF THIN-FILM SiOF/Si STRUCTURES BY DIRECT DEPOSITION FROM ION BEAMS

E. V. Telesh

---

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovki str., 6, 220013 Minsk, Belarus  
Corresponding author: E. V. Telesh (etelesh@mail.ru)*

The effect of the composition of the working gas and the substrate temperature on the electrophysical characteristics of SiOF / Si structures obtained by direct deposition from ion beams of monosilane, oxygen, and freon-14 is studied. 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. Analysis of IR transmission spectra showed that heating of the substrate led to a decrease in the intensity of the absorption band of silicon fluoride and to an increase in absorption at the C–O and O=C=O bonds.

**Key words:** fluorinated silicon dioxide; direct deposition; ion beam; end Hall accelerator; the dielectric constant; IR spectrum.

### ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения перехода на меньшие проектные технологические нормы в микроэлектронной индустрии разрабатываются новые технологии формирования систем металлизации с использованием медных проводников и изолирующих диэлектрических слоев с низкой ( $\epsilon < 3,8$ ) и с ультранизкой ( $\epsilon < 2,2$ ) диэлектрической проницаемостью для увеличения быстродействия и уменьшения энергопотребления сверх-

больших интегральных схем. Диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), широко применяющийся в кремниевой технологии, является одним из перспективных материалов для получения диэлектрических пленок, т.к. изменяя его структуру и состав, можно значительно понизить диэлектрическую проницаемость  $\text{SiO}_2$  [1]. Существенно понизить значение  $\epsilon$  удаётся с помощью легирования диоксида кремния фтором или углеродом. При легировании оксида кремния фтором получается материал  $\text{SiOF}$  с  $\epsilon = 3,5$  (по сравнению с  $\epsilon \text{SiO}_2 = 3,9$ ) [2]. Слои обладают высокими защитными свойствами, устойчивы к воздействию влаги и могут использоваться в качестве изолирующих защитных слоев и для изоляции межсоединений в интегральных схемах. Существующие вакуумные методы формирования межуровневого диэлектрика, основанные на термическом испарении, ионном распылении, связаны с использованием дорогостоящих мишеней и материалов для испарения. Энергия осаждаемых на подложку атомов составляет  $0,01\text{--}5$  эВ, что не позволяет получать тонкопленочные покрытия с высокой адгезией и требуемой микроструктурой при низких температурах подложки. Прямое осаждение из ионных пучков предполагает использования только рабочего газа, причем стоимость последнего намного ниже стоимости мишеней [3].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования проводили на модернизированной установке ВУ-1А, оснащенной ионным источником на основе торцевого холловского ускорителя (ТХУ). Покрытия наносились на подложки из кремния марки КДБ-10, устанавливаемые на неподвижный держатель. Расстояние подложка-ионный источник составляло  $\sim 150$  мм. Схема процесса нанесения покрытий представлена на рис. 1. В качестве рабочих газов использовались смесь моносила с аргоном (5%  $\text{SiH}_4 + 95\%$   $\text{Ar}$ ), хладон-14 ( $\text{CF}_4$ ) и кислород. Остаточный вакуум в процессе нанесения не превышал значения  $3,0 \cdot 10^{-3}$  Па. Ток соленоида составлял 3 А, ток эмиттера электронов – 12–14 А, напряжение на аноде – 75–80 В, ток разряда – 3,0 А. При таких режимах скорость нанесения составляла 0,40 – 0,53 нм/с, толщина покрытий – 100–160 нм.

Исследование электрофизических параметров (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ , удельное объемное сопротивление  $\rho_v$ ) диэлектрика из  $\text{SiO}_2$  осуществляли путем измерения характеристик структур металл-диэлектрик-полупроводник. Полученные тестовые образцы измерялись с помощью моста E7-20 на частоте 1 МГц. Значения  $\epsilon$  и  $\rho_v$  определяли расчетным путем из величины емкости и сопротивления тестовой структуры соответственно. Исследования

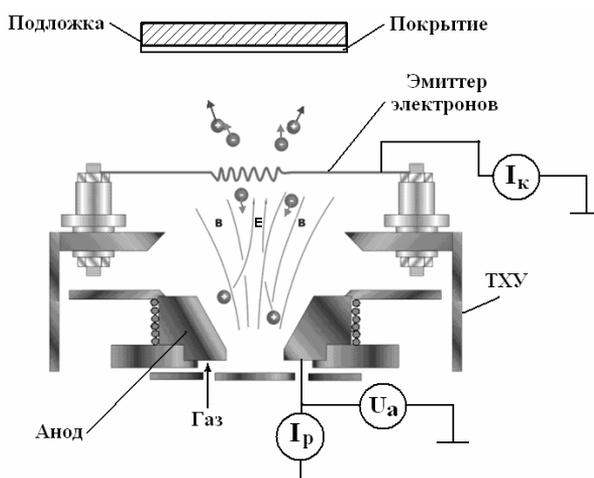


Рисунок 1 – Схема процесса для нанесения слоев  $\text{SiOF}$  методом прямого осаждения

инфракрасных (ИК) спектров пропускания осуществлялось с помощью установки Фурье ИК спектроскопии Vertex 70 РАМ II фирмы BRUKER.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовано влияние состава рабочего газа и температуры подложки на электрофизические характеристики структур SiOF/Si. Режимы нанесения и результаты измерений представлены в таблице. 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. Проведенные ранее исследования показали, что это может быть связано с десорбцией фтора из покрытия [2]. На рис. 2 представлены ИК спектры пропускания пленок SiOF, полученных при разных температурах подложки. На спектре имеются следующие три характерные полосы поглощения SiO<sub>2</sub>:  $\nu_{as}=1085\text{ см}^{-1}$ , соответствующую валентным антисимметричным колебаниям Si $\leftarrow$ O $\rightarrow$ Si,  $\nu_s=820\text{ см}^{-1}$ , соответствующую валентным симметричным колебаниям Si $\rightarrow$ O $\leftarrow$ Si,  $\delta_{as}=450\text{ см}^{-1}$ , соответствующую деформационным дважды вырожденным колебаниям Si-O-Si. Также на спектре имеется четко выраженная полоса поглощения кремниевой подложки с частотой  $\sim 607\text{ см}^{-1}$ . Установлено наличие полосы поглощения фторида кремния Si-F на частоте  $\sim 935\text{ см}^{-1}$ .

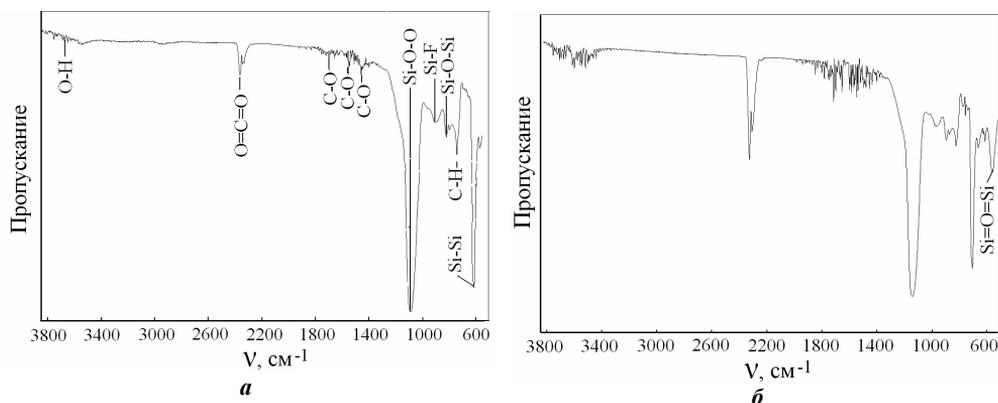


Рисунок 2. – ИК спектры пропускания покрытий SiOF, нанесенных при температурах подложки 335 К (а) и 573 К (б)

Наблюдались также полосы поглощения на связях C-N и C-O. Полоса поглощения на  $\nu=2300\text{--}2400\text{ см}^{-1}$  соответствует связи O=C=O. В спектре также были замечены полосы поглощения связи O-N ( $3800\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ ). Нагрев подложки привел к снижению интенсивности полосы поглощения фторида кремния и к увеличению поглощения на связях C-O и O=C=O. Химическое взаимодействие между углеродом и кислородом вызовет дефицит последнего в покрытии. Кроме того при нагреве будет происходить и десорбция кислорода, как с поверхности, так и из объема пленки SiOF. Дефицит кислорода приводит к недостаточному окислению кремния, что, в свою очередь, вызовет рост тангенса диэлектрических потерь и снижение удельного объемного сопротивления пленки.

## Результаты измерения электрофизических характеристик

№	$P_{O_2}$ , Па	$P_{CF_4}$ , Па	$P_{SiH_4}$ , Па	$T_p$ , К	$\epsilon$	$tg\delta$	$\rho_v$ , 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	$8,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	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	$0,4 \cdot 10^5$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали перспективность нового метода формирования структур диэлектрик/кремний с низкой диэлектрической проницаемостью.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

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. Телеш, Е.В. Формирование пленок SiOF реактивным ионно-лучевым распылением кварцевой мишени / Е.В. Телеш, О.В. Гуревич, С.А. Юшкевич // Приборостроение – 2017: материалы 10-й Международной научно-технической конференции, г. Минск, 01–03 ноября 2017 г. БНТУ; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2017. – С. 287–289.
3. 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.

## БЕСКОНТАКТНОЕ КАРТИРОВАНИЕ ПРИМЕСИ ЖЕЛЕЗА В КРЕМНИИ ЗОНДОВЫМ ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ МЕТОДОМ

А. К. Тявловский<sup>1</sup>, А. Л. Жарин<sup>1</sup>, К. Л. Тявловский<sup>1</sup>, К. В. Пантелеев<sup>1</sup>,  
Р. И. Воробей<sup>1</sup>, А. И. Свистун<sup>1</sup>, В. А. Пилипенко<sup>2</sup>, А. Н. Пеглицкий<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65,  
220013 Минск, Беларусь, e-mail: nil\_pt@bntu.by

<sup>2)</sup> ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца, 121А,  
220108 Минск, Беларусь, e-mail: office@bms.by

Для определения и картирования примеси железа в кремнии *p*-типа разработана методика контроля, основанная на использовании методов сканирующей зондовой электрометрии и дополнительных неразрушающих воздействий, таких как освещение поверхности и нагрев полупроводниковой пластины. Приведено краткое описание реализующей методику измерительной установки, показаны примеры получаемых с её помощью результатов. Выполняемые измерения носят полностью бескон-