

Курчатовский институт [Электронный ресурс]: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2012/documents/kms2012-046.pdf> (дата доступа 21.10.2020).

3. Чернов А.А., Исследование состояния металла корпуса водо-водяных реакторов на образцах-свидетелях // Актуальные проблемы энергетики – 2016 – с. 339-347

## РЕАКТИВНЫЙ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ СИНТЕЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК HfO<sub>2</sub>

Зырянова А. С.

Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

e-mail: zyrianova5555@mail.ru

**Summary.** *The effect of the composition of the working gas, the substrate temperature and the target potential and characteristics of thin films of hafnium dioxide on a silicon substrate, obtained by reactive ion-beam sputtering of a metal target, has been studied. It has been established that with an increase in the partial pressure of oxygen from  $2.52 \cdot 10^{-2}$  to  $5.85 \cdot 10^{-2}$  Pa, the dielectric constant decreases by almost 2 times. The transmission and absorption of the films only slightly depend on the composition of the working gas. The band gap is equal to 5.63 eV. With an increase in the substrate temperature, the dielectric constant increases, but at the same time the dielectric losses sharply increase, and a decrease in the specific volume resistance is also observed. Moreover, an increase in the substrate temperature to 573 K leads to a deterioration in the optical characteristics. There is a decrease in transmission and an increase in absorption in the range 450–800 nm. These processes can be associated with the desorption of oxygen from the growing HfO<sub>2</sub> film. At a target potential of  $U_t = 40\text{--}80$  V, a significant decrease in dielectric losses occurred, and at  $U_t = 40$  V, a sharp increase in the specific volume resistance (almost 5 times) was observed, which indicates an intensification of the interaction between oxygen and hafnium.*

Исследовано влияние состава рабочего газа, температуры подложки и потенциала мишени на характеристики тонких пленок диоксида гафния на кремниевой подложке, полученных реактивным ионно-лучевым распылением металлической мишени. Установлено, что при увеличении парциального давления кислорода с  $2,52 \cdot 10^{-2}$  до  $5,85 \cdot 10^{-2}$  Па диэлектрическая проницаемость снижается почти в 2 раза. Пропускание и поглощение пленок незначительно зависели от состава рабочего газа. Ширина запрещенной зоны составила 5,63 эВ. При повышении температуры подложки диэлектрическая проницаемость увеличивается, однако при этом резко увеличиваются диэлектрические потери, а также наблюдается снижение удельного объемного сопротивления. Более того, повышение температуры подложки до 573 К привело к ухудшению оптических характеристик. Произошло снижение пропускания и рост поглощения в диапазоне 450–800 нм. Эти процессы могут быть связаны с десорбцией кислорода из растущей пленки HfO<sub>2</sub>. При потенциале мишени  $U_m = 40\text{--}80$  В происходило значительное снижение диэлектрических потерь, а при  $U_m = 40$  В наблюдалось резкое увеличение удельного объемного сопротивления (почти в 5 раз), что свидетельствует об интенсификации взаимодействия между кислородом и гафнием.

В настоящее время в микроэлектронике отмечается повышенный интерес к тонкослойным пленочным структурам на кремниевой подложке, одним из основных компонентов для которых является гафний. Структуры на его основе могут использоваться в качестве диффузионных барьеров для металлизации (силицид гафния) или материала оптических покрытий (диоксид гафния) [1,2]. Широкий круг соединений гафния относится к так называемым «high-k» материалам, которые перспективны для формирования тонкого подзатворного диэлектрика МОП транзисторов [3].

Формирование пленок HfO<sub>2</sub> осуществляли реактивным ионно-лучевым распылением мишени из гафния. В качестве рабочих газов использовались аргон и кислород. В качестве материала мишени использовался металлический гафний марки ГФИ-1 ГОСТ 22517-77. Расстояние мишень-подложка составляло ~ 80 мм, остаточный вакуум составлял (3,7–3,9)•10<sup>-3</sup> Па, рабочее давление смеси аргона и кислорода – 5•10<sup>-2</sup> Па, ускоряющее напряжение – 3,0 кВ, ток мишени – 65–105 мА. Емкость, сопротивление и тангенс угла диэлектрических потерь tg $\delta$  структур металл/ HfO<sub>2</sub>/металл измеряли с помощью прибора Е7-20 на частоте 1 МГц. Спектры оптического пропускания и поглощения пленок HfO<sub>2</sub> определялись с применением спектрофотометра МС-121 PROSCAN в диапазоне 350...900 нм. Толщина пленок измерялась с помощью микроскопа-интерферометра МИИ-4.

Были проведены исследования зависимости оптических и электрофизических характеристик тонких пленок диоксида гафния от парциального давления кислорода, температуры подложки и потенциала мишени. Пленки обладали пропусканием 88–94 % и поглощением 0,03–0,06 % на длине волны 555 нм. Ширина запрещенной зоны при парциальном давлении кислорода 4,4•10<sup>-2</sup> Па составила 5,63 эВ. Установлено, что диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  снижается почти в 2 раза при увеличении парциального давления кислорода с 2,52•10<sup>-2</sup> до 5,85•10<sup>-2</sup> Па. При увеличении давления происходит рост удельного объемного сопротивления  $\rho_v$ , что свидетельствует о большей степени окисления гафния. Зависимость tg $\delta$  от давления кислорода показала, что содержание кислорода в рабочем газе практически не влияет на диэлектрические потери, которые изменялись в диапазоне 0,046–0,065.

Нагрев подложки приводит к изменению характеристик пленок HfO<sub>2</sub>. Анализ спектральной зависимости пропускания пленок. Так ширина запрещенной зоны составила 4,4 эВ при парциальном давлении кислорода 4,0•10<sup>-2</sup> Па и температуре подложки 573 К. Установлено, что диэлектрическая проницаемость увеличивается до  $\epsilon=37$  при нагреве до 573 К, что является хорошим результатом. Однако при этом резко увеличиваются диэлектрические потери до tg $\delta=0,25$ . Также наблюдается и снижение удельного объемного сопротивления. Эти процессы могут быть связаны с десорбцией кислорода из растущей пленки HfO<sub>2</sub>, что приведет к более низкой степени окисления металлического гафния. Таким образом, установлено, что оптимальный диапазон температуры подложки должен составлять 300–423 К.

Наличие напряжения на мишени незначительно влияло на величину диэлектрической проницаемости. В тоже время при  $U_m=40-80$  В происходило значительное снижение диэлектрических потерь. Дальнейшее повышение напряжения на мишени приводило к росту tg $\delta$ . При  $U_m=40$  В наблюдалось резкое увеличение  $\rho_v$  (почти в 5 раз), что свидетельствует об интенсификации взаимодействия между кислородом и гафнием. Анализ оптических спектров показал, что дополнительная плазменная активация процесса реактивного ионно-лучевого распыления способствовала росту пропускания в ИК области спектра (800–900 нм). Было установлено, что ширина запрещенной зона  $E_g$  находилась в пределах 4,37...4,39 эВ и практически не зависела от напряжения на мишени.

Проведенные исследования показали, что электрофизические и оптические характеристики тонких пленок HfO<sub>2</sub> сложным образом зависят от условий формирования.

### *Литература*

1. Khorin, I.A. Hf based layers for Cu metallization / I.A. Khorin, Yu.I. Denisenko, V.N. Gusev// Ed. by K.A. Valiev, A.A. Orlikovsky. Int. Conf. on Micro and Nano Electronics.–2009. Proc. of SPIE. –2010. V. 7521.–P. 173–180.
2. Khoshman, J. M. Amorphous hafnium oxide thin films for antireflection optical coatings / J. M. Khoshman, A. Khan, M. E. Kordesch // Surf. Coat. Technol. – 2008. – Vol. 202., № 11. – P. 2500–2502.

3. Huang, A.P. Hafnium based high k gate dielectrics / A.P. Huang, Z.C. Yang, P.K. Chu; Ed. by: P. K. Chu // *Advances in Solid State Circuits Technologies*. – 2010. – P. 333–350.

УДК 676.031/.032

## ЛЮМИНИСЦЕНТНАЯ ДРЕВЕСИНА КАК ВОЗМОЖНОСТЬ ВТОРИЧНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Сорокин М. А., научный руководитель – Костюкович О.В. ст. преподаватель  
Белорусский национальный технический университет  
e-mail: srkmm Maxim@gmail.com*

**Summary.** *Indoor lighting materials have a profound effect on the physical and psychological well-being of building occupants. There is a growing consumer demand for environmentally friendly biomaterials for optical applications. In this regard, it is beneficial to use materials that are recyclable and recyclable. A team of scientists from the Swiss Higher Technical School of Zurich has developed a bio-based, polymer matrix-free, luminescent and hydrophobic film with excellent mechanical properties for optical illumination purposes. The proposed optical lighting material can be attractive for interior structures (e.g. lamps and laminated coating panels), photonics and laser devices.*

Материалы внутреннего освещения оказывают сильное влияние на физическое и психологическое благополучие жильцов здания. Эти материалы, как правило, изготавливаются из нетекучего материала на основе устойчивых источников стекла, кремния, пластика и полимерных гибридных композитов, с отсутствием способности к биологическому разложению, что создает нагрузку на окружающую среду в конце срока службы. Тем не менее, существует растущий потребительский спрос на экологически чистые биоматериалы для оптических применений. В связи с этим выгодно использовать материалы, которые пригодны к переработке и вторичному использованию. Это позволяет более эффективно использовать объем лесозаготовок, снизить углеродный след и повысить экономическую эффективность предприятий. Недавний научный прогресс открывает возможности для использования природных материалов, таких как целлюлоза и древесина. Тонкие пленки на основе нановолокнистой целлюлозы используются для широкого спектра оптических применений (оптические датчики, электроника, дисплеи и устройства солнечных батарей) благодаря благоприятным механическим свойствам целлюлозы, оптическим характеристикам и низкому коэффициенту теплового расширения.

Структура и оптические свойства пленок целлюлозы поддаются перестройке, но повышение механических свойств этих пленок целлюлозы ограничено случайной ориентацией нановолокон целлюлозы. Механические свойства целлюлозных материалов с анизотропной структурой улучшаются путем выравнивания волокон с помощью гидродинамической сборки, мокрого прядения, механического растяжения, выравнивания электрического и магнитного полей или подходов сверху вниз. Эти материалы с выровненными волокнами целлюлозы обладают улучшенными механическими свойствами, но сопутствующая анизотропия оптических свойств ограничивает их использование для внутренних систем освещения или солнечных батарей из-за неравномерного освещения и рассеяния. Другим ограничивающим фактором является гидрофильность целлюлозных материалов, так как водно-целлюлозные взаимодействия вредны для производительности и качества продукции.

Для решения проблемы механической стабильности, материалы на основе целлюлозы нуждаются в покрытии или химической обработке для превращения их гидрофильных гидроксильных групп в гидрофобные фрагменты, например гексадецилтриметоксисиланом