ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР HfO₂/Si, ПОЛУЧЕННЫХ РЕАКТИВНЫМ ИОННО–ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

А.С.Зырянова, Е.В. Телеш

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: zyrianova5555(@mail.ru

Исследовано влияние состава рабочего газа, температуры подложки, потенциала мишени и электрофизические 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. При повышении температуры подложки диэлектрическая проницаемость увеличивается, однако при этом резко увеличиваются диэлектрические потери, а также наблюдается снижение удельного объемного сопротивления. Эти процессы могут быть связаны с десорбцией кислорода из растущей пленки HfO₂. При увеличении потенциала мишени от 40 до 80 В происходило значительное снижение диэлектрических потерь, при этом рост потенциала от 0 до 40 В приводит к резкому увеличению удельного объемного сопротивления к взаимодействия между кислородом и гафнием.

Ключевые слова: диоксид гафния; реактивное ионно-лучевое распыление; диэлектрическая проницаемость; тангенс угла диэлектрических потерь; удельное объемное сопротивление.

INVESTIGATION OF THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF HfO₂/Si THIN FILM STRUCTURES OBTAINED BY REACTIVE ION BEAM SPUTTERING

A. S. Zyrianova, E. V. Telesh

Belarusian state university of informatics and radioelectronics, P.Brovka str. 6, 220013 Minsk, Belarus, Corresponding author: A. S. Zyrianova (zyrianova5555@mail.ru)

The effect of the composition of the working gas, the substrate temperature and the target potential and the electrophysical 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. 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. These processes can be associated with the desorption of oxygen from the growing HfO₂ film. At a target potential of Um = 40–80 V, a significant decrease in dielectric losses occurred, and at Um = 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.

Key words: hafnium dioxide; reactive ion beam sputtering; dielectric constant; dielectric loss factor; tangent delta; volume resistivity.

введение

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 (оксинитриды, силикаты, оксиды) относится к так называемым «high-k» материалам, которые перспективны для формирования тонкого подзатворного диэлектрика МОП транзисторов [3]. Это объясняется, что при равной удельной емкости такие диэлектрики гораздо толще и, соответственно, имеют существенно более низкие уровни туннельных токов утечки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Формирование пленок HfO₂ осуществляли реактивным ионно-лучевым распылением мишени из гафния на модернизированной установке вакуумного напыления УРМ 3.279.017.В качестве рабочих газов использовались аргон газообразный, чистый марки «А», ГОСТ 10157-73 и кислород ГОСТ 6331-78. В качестве материала мишени использовался металлический гафний марки ГФИ-1 ГОСТ 22517-77. Расстояние мишень-подложка составляло ~ 80 мм, остаточный вакуум составлял $(3,7-3,9)\cdot10^{-3}$ Па, рабочее давление смеси аргона и кислорода – $5\cdot10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение –3,0 кВ, ток мишени – 65–105 мА.

Для подложек применялся кремний марки КДБ-10. Электрофизические параметры пленок (диэлектрическая постоянная є, тангенс угла диэлектрических потерь tgδ, удельное объемное сопротивление ρ_v) определялись путем измерения характеристик структуры металл/диэлектрик/металл. Металлические контакты диаметром 300 мкм формировались путем ионно-лучевого напыления через маску пленки никеля толщиной ~0,3 мкм. Емкость, сопротивление и tgδ данной структуры измеряли с помощью прибора E7-20 на частоте 1 МГц. Толщина пленок измерялась с помощью микроскопа-интерферометра МИИ-4.

При реактивном ионном распылении требуемое химическое соединение получают, подбирая материал распыляемой мишени и рабочий газ. При реактивном ионнолучевом распылении (ИЛР) необходимо максимально интенсифицировать процесс химического взаимодействия между распыленным материалом мишени и активным рабочим газом. Добиться поставленной цели можно путем организации в промежутке мишень-подложка вторичного плазменного разряда с разностью потенциалов в десятки вольт.

При ионно-лучевом распылении мишень, как правило, заземлена через миллиамперметр, который измеряет ток ионов на мишени. Если же мишень изолировать от земли, то на ней появится положительный потенциал, величина которого будет определяться ускоряющим напряжением на аноде и ионным током. Кроме того, потенциал можно плавно регулировать, заземлив мишень через переменный резистор. Так как корпус источника и подложка заземлены, то в пространстве между ними и мишенью возникнет электрическое поле. Силовые линии магнитного поля ионного источника буду пересекать линии электрического поля, то есть образуются скрещенные ExH поля. Таким образом создаются условия для возникновения дополнительного плазменного разряда в промежутке мишень-корпус источника. Возникший вторичный низковольтный плазменный разряд будет способствовать диссоциации молекул кислорода и дополнительному возбуждению молекул кислорода, атомов аргона и распыленных атомов гафния. Эти процессы приведут к интенсификации химической реакции между металлом и кислородом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рисунках 1(*a*, *б*) приведены зависимости диэлектрической проницаемости є и удельного объемного сопротивления ρ_v от парциального давления кислорода в рабочем газе. Установлено, что диэлектрическая проницаемость снижается почти в 2 раза при увеличении парциального давления кислорода с $2,52 \cdot 10^{-2}$ до $5,85 \cdot 10^{-2}$ Па. Не было обнаружено сильной зависимости удельного объемного сопротивления от содержания кислорода. Однако, при увеличении давления происходит рост ρ_v , что свидетельствует о большей степени окисления гафния. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от давления кислорода показала, что содержание кислорода в рабочем газе практически не влияет на диэлектрические потери, которые изменялись в диапазоне 0,046–0,065.



Рисунок 1. – Зависимости диэлектрической проницаемости (*a*) и удельного объемного сопротивления (*б*) пленки от парциального давления кислорода

Нагрев подложки приводит также к изменению электрофизических характеристик пленок HfO₂. На рисунках 2 (*a*–*6*) приведены зависимости диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и удельного объемного сопротивления от температуры подложки. Парциальное давление кислорода составляло $4,0\cdot10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение – 3,0 кВ, ток мишени – 85 мА. Установлено, что диэлектрическая проницаемость увеличивается до $\varepsilon = 37$ 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 HfO₂, что приведет к более низкой степени окисления металлического гафния.



Рисунок 2. – Зависимости диэлектрической проницаемости (*a*), тангенса угла диэлектрическихпотерь пленки (*б*) и удельного объемного сопротивления (*в*) пленки от температуры подложки

Результаты исследований зависимостей электрофизических параметров от напряжения на мишени $U_{\rm M}$ приведены на рисунках 3 (*a*, *б*).



Рисунок 3. – Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь (*a*) и удельного объемного сопротивления (*б*) пленки от напряжения на мишени

Парциальное давление кислорода составляло $4,0\cdot10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение –3,0 кВ, температура подложки –313 К. Наличие напряжения на мишени незначительно влияло на величину диэлектрической проницаемости. В тоже время при U_м=40–80 В происходило значительное снижение диэлектрических потерь. Дальнейшее повышение напряжения на мишени приводило к росту величины тангенса угла диэлектрических потерь. При увеличении потенциала мишени от 0 до 40 В наблюдалось резкое увеличение удельного объемного сопротивления (почти в 5 раз), что свидетельствует об интенсификации взаимодействия между кислородом и гафнием. Дальнейшее повышение напряжения на мишени приводило к некоторому снижению величины ρ_v .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что электрофизические характеристики тонкопленочных структур HfO₂/Si сложным образом зависят от условий формирования. Были определены наиболее оптимальные режимы нанесения оксида гафния для получения покрытий с максимальными диэлектрической проницаемостью и удельным объемным сопротивлением и минимальными диэлектрическими потерями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 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.
- 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.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТНОГО СЛОЯ САПФИРОВЫХ ПОДЛОЖЕК НА УСТРОЙСТВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Ю. В. Клунникова¹, С. П. Малюков², А. В. Филимонов^{3,4}

¹⁾ Южный федеральный университет, Таганрог, Россия, e-mail: yvklunnikova@sfedu.ru ²⁾ Южный федеральный университет, Таганрог, Россия, e-mail: spmalyukov@sfedu.ru ³⁾ Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук

⁴⁾ Санкт – Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия e-mail: filimonov@rphf.spbstu.ru

Изменения структуры и свойств поверхностных слоев сапфировых подложек оказывают существенное влияние на эксплуатацию микроэлектронных устройств на их основе. Проведено исследование появления приповерхностных дефектов в сапфировых подложках, которое явилось основой для оптимизации процессов обработки кристаллов сапфира, а также для формирования рекомендаций по определению свойств приповерхностных слоев сапфира, усовершенствованию качества кристалла.

Ключевые слова: сапфировая подложка; микроэлектронные устройства; дефекты; оптимизация.