

Литература

1. Rogalski, A. Infrared Detectors for the Future / A. Rogalski // Acta physica polonica A. – 2009. – Vol. 116 (3). – P. 389–406.
2. Нгуен, Т. Д. Электрофизические свойства пленок оксида ванадия, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления / Т. Д. Нгуен [и др.] / Доклады БГУИР. – 2020. – Т. 18, № 6. – С. 94–102.
3. Mauger, A. Review V₂O₅ thin films for energy storage and conversion / A. Mauger, M. J. Christian // AIMS Materials Science. – 2018. – Vol. 5 (3). – P. 349–401.
4. Semiconductor to metal phase transition in the nucleation and growth of VO₂ nanoparticles and thin films / J. Y. Suh [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 96 (2). – P. 1209–1213.

УДК 621.3.049.77: 621.793

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК ОКСИДА ГАФНИЯ-ЦИРКОНИЯ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ МИШЕНИ

аспирант Доан Х. Т.¹,
младший научный сотрудник Вилья Н.,
магистрант Пивоварчик С. С.²,
магистрант Лам Н. Н.¹

¹Научный руководитель – канд. техн. наук Голосов Д. А.

²Научный руководитель – канд. техн. наук Завадский С. М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Беларусь

Введение. В последние годы оксид гафния HfO₂ стал рассматриваться в микроэлектронике как наиболее перспективный диэлектрик с высокой диэлектрической проницаемостью для замены традиционного применяемого в качестве подзатворного диэлектрика в структурах металл – диэлектрик – полупроводник диоксида кремния SiO₂ [1]. Оксид гафния сочетает в себе высокую диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 16\text{--}25$ и большую ширину запрещенной зоны $E_g = 5.6\text{--}5.8$ эВ, высокую термодинамическую совместимость на границе раздела с кремнием и высокие энергетические барьеры для электронов и дырок относительно кремния (соответственно 2.0 и 2.5 эВ) [2-4]. Как следствие, электрофизические свойства тонких пленок HfO₂ активно исследовались, и было показано, что аморфный оксид гафния обладает улучшенными диэлектрическими свойствами, по сравнению с сильной кристаллической фазой [5]. Однако оксид гафния не обладает достаточной термической стабильностью, и проявляет тенденцию к кристаллизации при температурах 400 – 450 °С [6]. В результате в структуре поликристаллических пленок формируется ряд дефектов, которые приводят к увеличению токов утечки по границам зерен [6, 7].

Один из способов получения термостойких аморфных пленок HfO₂ основан на легировании оксида гафния аморфизирующими примесями (Si, Al, Y, Gd, La и др.). До 2011 года пленки легированного оксида гафния рассматривались исключительно в качестве линейных диэлектриков, и интерес был обусловлен поиском материалов с высокой диэлектрической проницаемостью. В 2011 году были впервые получены сегнетоэлектрические слои при легировании HfO₂ оксидом циркония ZrO₂ (HZO) [8]. Было установлено, что наибольшая поляризация получена для пленок состава Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂. Метод реактивного магнетронного распыления как раз и является низкотемпературным процессом, который позволяет наносить многокомпонентные тонкие пленки высокого качества с управляемым стехиометрическим составом путем распыления мозаичных мишеней.

Таким образом, целью работы было исследование возможности получения пленок HZO методом реактивного магнетронного распыления и влияния параметров процесса на диэлектрические характеристики этих пленок.

1. Эксперимент. Схема экспериментальной установки для нанесения пленок HZO представлена на рис. 1. Установка выполнена на базе вакуумного поста Leybold-Heraeus A550 VZK. Камера вакуумной установки оборудована внешним фланцевым ионным источником (ИИ) на основе ускорителя с анодным слоем DBIS-001, который использовался для предварительной очистки подложек. Для распыления сегнетоэлектрических мишеней использовалась магнетронная распылительная система RIF.041 с мишенью \varnothing 41 мм. Магнетронная распылительная система (МРС) устанавливалась вместо мишенного узла ионного источника.

Пленки HZO наносились методом импульсного реактивного магнетронного распыления комбинированной Hf-Zr мишени в Ar/O₂ смеси газов. Комбинированная мишень \varnothing 41 мм и толщиной 1 мм состояла из двух секторов из Hf и Zr в соотношении площадей 10:12 (рис. 2). Соотношение секторов выбиралось из условия получения пленок с равным соотношением Hf и Zr в наносимой пленке с учетом коэффициентов распыления каждого из материалов.

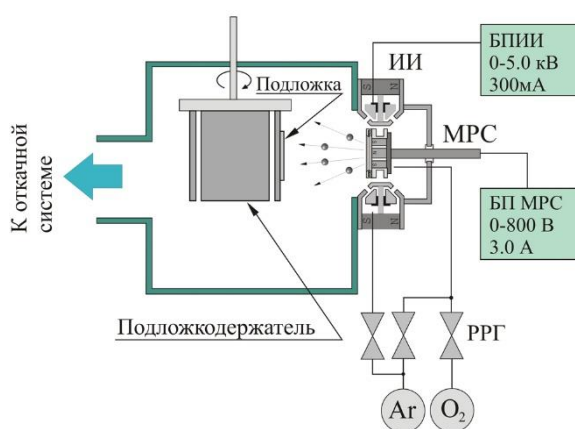


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для нанесения пленок HZO методом реактивного магнетронного распыления

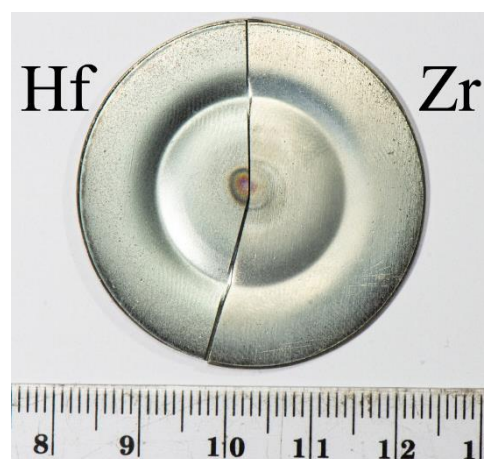


Рис. 2. Общий вид комбинированной Hf-Zr мишени после распыления

В качестве подложек использовались подложки высоколегированного монокристаллического кремния *p*-типа КДБ0.05(100). В ходе экспериментов подложки устанавливались на вращаемый подложкодержатель карусельного типа на расстоянии 82 мм от поверхности мишени магнетрона. Камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления 8×10^{-4} Па и производилась ионная очистка подложек. Для этого рабочий газ Ar подавался ионный источник до рабочего давления 0.02 Па. Время очистки, энергия ионов и ток разряда во всех экспериментах было постоянным и составляло соответственно 2 мин (режим вращения подложкодержателя), 500 эВ, 50 мА соответственно.

Затем производилось нанесение пленок HZO. Для этого подложки последовательно подводились в зону нанесения. В газораспределительную систему магнетрона подавались рабочие газы. Распыление мишени Hf-Zr осуществлялось в Ar/O₂ смеси газов. В процессе экспериментов содержание кислорода в Ar/O₂ смеси газов (G_{O_2}) изменялось от 0 до 40 % при общем расходе газа 50 мл/мин. Для поддержания заданного расхода газов использовались автоматические регуляторы расхода газа РРГ-1. Для питания магнетрона использовался источник питания АРЕL-М-1.5ВР-800-2 (ООО «Прикладная электроника», Россия) мощностью 1.5 кВт. При распылении использовался биполярный

ассимметричный импульсный ток (частота следования импульсов $F = 10$ кГц, амплитуда положительного импульса 60 В и длительность 3 мкс). В процессе нанесения ток разряда магнетрона поддерживался постоянным $I_t = 350$ мА. При этом напряжение разряда в зависимости от содержания кислорода изменялось от 295 до 354 В. Толщина нанесенных пленок составляла около 100 нм и регулировалась временем нанесения в зависимости от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов.

Толщина нанесенных пленок определялась на оптическом интерферометрическом профилометре ПОИ-08. Для измерения диэлектрических характеристик пленок HZO формировались МОП структуры. Для этого на пленку HZO методом ионно-лучевого распыления через маску наносился верхний Ni электрод толщиной 100 нм. Площадь обкладки конденсатора составляла 0.096 мм². Емкость и тангенс угла диэлектрических потерь измерялись с использованием измерителя иммитанса Е7-20 на частотах 25 – 10⁶ Гц. Значения диэлектрической проницаемости рассчитывались исходя из толщины диэлектрического слоя и емкости конденсаторной структуры.

2. Результаты и обсуждение. Проведены исследования влияния концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов на скорость нанесения пленок HZO (рис. 3). При распылении Hf-Zr мишени в среде Ar скорость нанесения составляла 0.55 нм/с и снижалась до 0.18 нм/с при $\Gamma_{O_2} = 20$ %. Далее при увеличении Γ_{O_2} скорость нанесения снижалась незначительно до 0.15 нм/с при концентрации кислорода 40 %. По-видимому, при Γ_{O_2} более 20 % система переходила в реактивный режим работы, при котором мишень полностью была покрыта тонким слоем оксида.

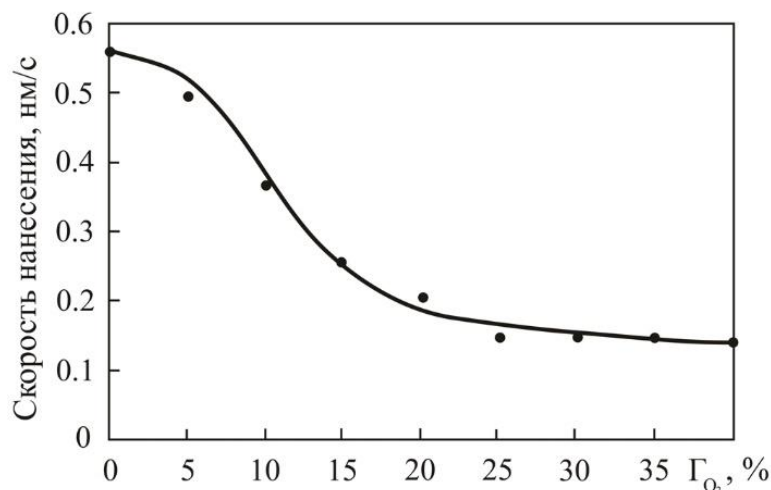


Рис. 3. Зависимость скорости нанесения пленок HZO от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов

Проведены исследования влияния параметров процесса импульсного реактивного магнетронного распыления на диэлектрические характеристики пленок HZO. На рис. 4 представлены частотные зависимости емкости и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\varphi$ пленок HZO. Установлено, что независимо от концентрации кислорода в процессе нанесения, частотные зависимости емкости и тангенса угла диэлектрических потерь имели сходный характер. В диапазоне частот от 1.0 кГц до 1.0 МГц емкость конденсаторов практически не зависела от частоты (рис 4 а). Однако на низких частотах (менее 1.0 кГц) емкость резко увеличивалась и превышала емкость на низких частотах в 2 – 5 раз.

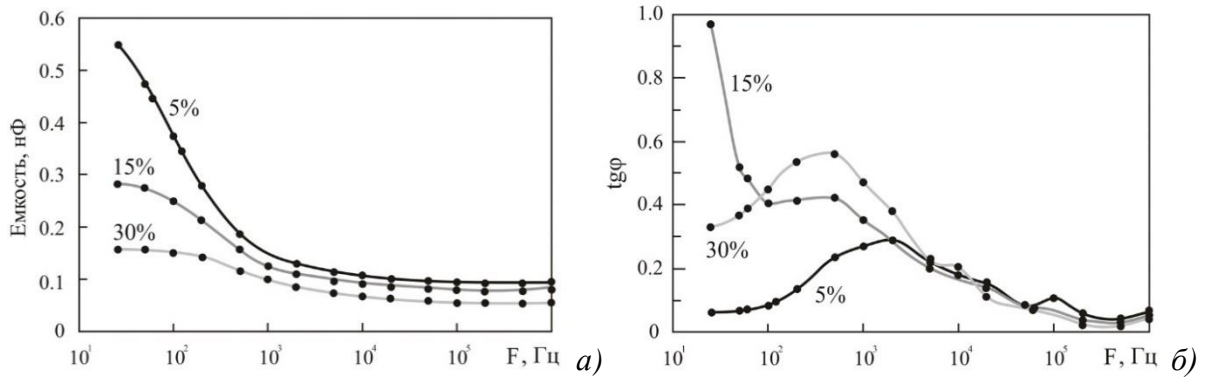


Рис. 4. Частотные зависимости емкости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) пленок HZO, нанесенных при различной концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов

Тангенс угла диэлектрических потерь на высоких частотах составлял около 0.05, но на низких частотах диэлектрические потери резко увеличивались (рис. 4 б). Максимум диэлектрических потерь наблюдался на частотах 400 Гц – 1.0 кГц и достигал значения 0.3 – 0.5. На рис. 5 представлены зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пленок HZO на частотах 1.0 кГц и 1.0 МГц от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов. Как видно из рисунка диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь зависели от Γ_{O_2} . При увеличении концентрации кислорода отмечалось снижение ϵ на частоте 1.0 МГц с 10.5 единиц при $\Gamma_{O_2} = 5\%$ до 4.5 единиц при $\Gamma_{O_2} = 40\%$. На частоте 1 кГц ϵ снижалось с 17 до 7.2. Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 1.0 МГц практически не зависел от Γ_{O_2} и составляло $tg\phi = 0.05$. На частоте 1.0 кГц диэлектрические потери увеличивались с 0.17 при $\Gamma_{O_2} = 5\%$ до 0.36 единиц при $\Gamma_{O_2} = 40\%$.

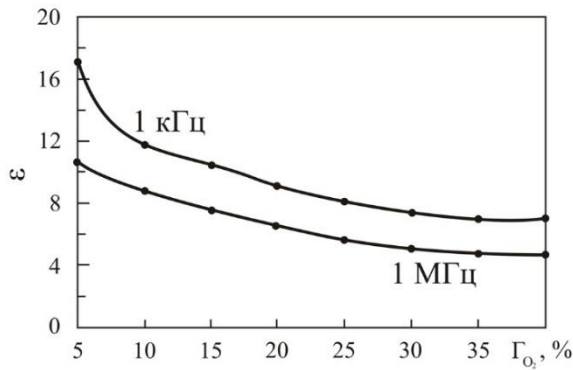


Рис. 5. Зависимость диэлектрической проницаемости пленок HZO на частотах 1.0 кГц и 1.0 МГц от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов

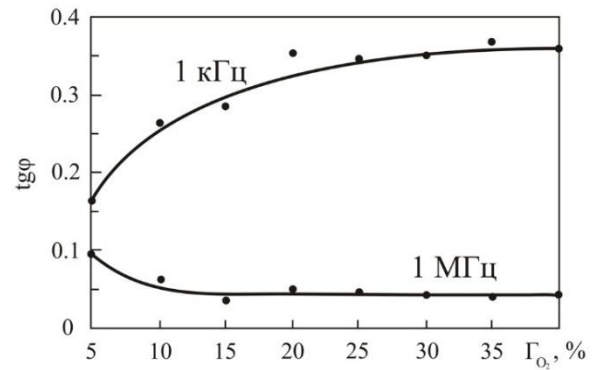


Рис. 6. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь пленок HZO на частотах 1.0 кГц и 1.0 МГц от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов

Анализ полученных результатов показывает, что методом импульсного реактивного магнетронного распыления возможно получение пленок HZO с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4.5 - 10.5$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $tg\phi = 0,05$ на частоте 1.0 МГц. Сравнение полученных результатов с характеристиками ранее исследованных пленок оксида гафния и оксида циркония [9, 10] показывает, что пленки HZO имеют более низкие значения ϵ и более высокие значения диэлектрических потерь. Для сравнения значения ϵ и $tg\phi$ для пленок оксида циркония составляли $\epsilon = 9 - 14$, $tg\phi = 0,05 - 0,09$ и для оксида гафния $\epsilon = 17 - 22$ и $tg\phi = 0,03 - 0,05$ соответственно. Однако все эти результаты были получены на подложках из монокристаллического кремния *n*-типа. Снижение значения ϵ и увеличение диэлектрических потерь, по-видимому, связано с

формированием барьерного заряда на границе контакта слоя диэлектрика с полупроводником *p*-типа.

Заключение. Проведены исследования диэлектрических свойств пленок HfO₂, полученных методом реактивного магнетронного распыления комбинированной Hf-Zr мишени. Анализ полученных результатов показывает, что метод реактивного магнетронного распыления Hf-Zr мишени в Ar/O₂ смеси газов применим для нанесения пленок оксида гафния-циркония. Без нагрева подложек и последующего отжига получены пленки HfO₂ с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4.5 - 10.5$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\tan\delta = 0,05$ на частоте 1.0 МГц.

Литература

1. Wong, H. On the scaling issues and high- κ replacement of ultrathin gate dielectrics for nanoscale MOS transistors / H. Wong, H. Iwai // *Microelectronic Engineering*. – 2006. – Vol. 83 (10). – P. 1867–1904.
2. Jones, M. N. Dielectric constant and current transport for HfO₂ thin films on ITO / M. N. Jones, Y. W. Kwon, D. P. Norton // *Appl. Phys. A*. – 2005. – Vol. 81 (2). – P. 285–288.
3. Robertson, J. High-K materials and metal gates for CMOS applications / J. Robertson, R. M. Wallace // *Mater. Sci. Eng.* – 2015. – Vol. 88. – P. 1–41.
4. Zhang, H. H. Scaling behavior and structure transition of ZrO₂ films deposited by RF magnetron sputtering / H. H. Zhang, C. Y. Ma, Q. Y. Zhang // *Vacuum*. – 2009. – Vol. 83 (11). – P. 1311–1316.
5. Annealing effects of HfO₂ gate thin films formed by inductively coupled sputtering technique at room temperature / W. J. Choi [et al.] // *J. Korean Phys. Soc.* – 2004. – Vol. 45. – P. S716-S719.
6. High- κ ($\kappa = 30$) amorphous hafnium oxide films from high rate room temperature deposition / F. M. Li [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – Vol. 98. – P. 252903-1–3.
7. Choi, J. H. Development of hafnium based high- κ materials – A review / J. H. Choi, Y. Mao, J. P. Chang // *Materials Science and Engineering R*. – 2011. – Vol. 72 (6). – P. 97–136.
8. Boescke T.S., Mueller J., Brauhaus D., et al. Ferroelectricity in hafnium oxide thin films // *Appl. Phys. Lett.*, – 2011. – Vol. 99. – P. 102903.
9. Диэлектрические характеристики пленок оксида гафния / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, Н. Вилья // *Российские нанотехнологии*. – 2017. – Т. 12, № 9–10. – С. 63–68.
10. Формирование пленок оксида циркония методом реактивного магнетронного распыления / Н. Вилья, Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, Д. Э. Окоджи // *Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 12-й международной конференции, Минск, 19–22 сентября 2017 г.* – С. 438–440.

УДК 004.77

РЕАБИЛИТАЦИОННЫЕ ЭКЗОСКЕЛЕТЫ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА: ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ

Магистрант Дубовик А.В.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Гулай А.В.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Реабилитационные экзоскелеты объединяют в себе сенсорные, управляющие и другие технологии и проявляют характеристики бионики, робототехники, науки об управлении, медицины и других междисциплинарных областей. В последние годы был