

ЛИТЕРАТУРА

1. Суздаев, И.П. Многофункциональные наноматериалы / И.П. Суздаев // Успехи химии. 2009. Т.78. № 3. С. 266.
2. Catalan, J. Physics and application of bismuth ferrite / J. Catalan, F. Scott // Adv. Mat. 2009. Vol. 21. P. 2463.
3. Ce-Wen, N. Multiferroic-magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions / N. Ce-Wen [et al.] // J of Appl. Phys. 2008. Vol. 103, P. 031101-1.
4. Volkova, L.M. Magnetoelectric ordering of BiFeO₃ from the perspective of crystal chemistry / L.M. Volkova, D.V. Marinin // J Supercond Nov Magn. 2011. 24. P. 2161.
5. Lazenka, V.V. Structural transformation and magnetoelectric behaviour in Bi_{1-x}GdxFeO₃ multiferroics / Lazenka, V.V [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys., 2012 Vol. 45, P. 125002-1.
6. Sosnowska, I. Spiral magnetic ordering in bismuth ferrite / I. Sosnowska, T.P. Neumaier, E. Steichele // J. Phys. C.: Solid State Phys. 1982. Vol.15. P.4835.
7. Salinas-Sanchez, A. The global instability index / A. Salinas-Sanchez [et al] // J. Solid State Chem. 1992. №100. P. 201.
8. Урусов, В.С. Кристаллохимия. Краткий курс / В.С. Урусов, Н.Н. Еремин – Ч.2. – Изд. Московского университета, 2005. 125 с.
9. Lufaso, M.W. The prediction of the crystal structures of perovskites using the software program SPuDS / M.W. Lufaso, P.M. Woodward // Acta Cryst. 2001. Vol. B57. P. 725.

ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВЫХ МОП-СТРУКТУР С ПЛЕНКАМИ СИЛИКАТА ДИСПРОЗИЯ

Н. В. Бабушкина¹, С. А. Малышев¹, Д. В. Жигулин², Л. И. Романова¹

¹Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,
n.babushkina@ifanbel.bas-net.by

²Открытое Акционерное Общество «Интеграл»,
Научно-технический центр «Белмикросистемы», Минск

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оксид диспрозия Dy_2O_3 считается одним из перспективных материалов для использования в современной CMOS технологии. Было показано, что нанесение пленки оксида диспрозия на пленку $HfSiON$ позволяет уменьшить пороговое напряжение, улучшить подвижность носителей заряда в канале и однородность величины порогового напряжения по площади кремниевой пластины в современных МОП-транзисторах [1]. Перспективным направлением является применение пленок оксида диспрозия в качестве двухслойного туннельного диэлектрика $Dy_2O_3-SiO_2$ в элементах памяти типа SONOS. Использование в качестве туннельного диэлектрика двухслойной пленки позволяет получить большую физическую толщину диэлектрика, которая необходима для низких токов утечки в режиме хранения, и высокий туннельный ток в режиме записи при средних напряжениях. Это может быть достигнуто соединением двух диэлектрических пленок с сильно различающимися диэлектрическими проницаемостями [2]. Одним из методов получения двухслойных пленок $Dy_2O_3-SiO_2$ является нанесение пленок диспрозия Dy на пленки SiO_2 с последующим их окислением в кислороде. В процессе окисления пленок диспрозия при относительно низких температурах могут образовываться пленки силикатов диспрозия $DySiO$ различного состава.

В работе проведено исследование вольт-фарадных характеристик МОП-структур *Me-DySiO-Si* с пленками силиката диспрозия *DySiO*, полученными в процессе термического окисления пленок диспрозия, осажденных на пленки диоксида кремния.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе в качестве подложек использовались пластины кремния р-типа проводимости. После стандартной химической обработки кремниевые пластины термически окислялись для образования пленки диоксида кремния SiO_2 . Физическая толщина пленок SiO_2 измерялась на лазерном эллипсометре. Далее на пленки SiO_2 термическим испарением в вакууме наносились пленки диспрозия. Полученные структуры окислялись в потоке сухого кислорода при $T_{ок} = 500-600^\circ C$ в течение $t_{ок} = 10-20$ мин для формирования пленок силиката диспрозия *DySiO*. Отжиг пленок *DySiO* проводился в потоке азота. Зарядовые свойства МОП-структур *Me-DySiO-Si* исследовались методом вольт-фарадных (1 МГц) характеристик. Площадь индиевых полевых электродов составляла $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Физическая толщина пленок SiO_2 на кремниевых пластинах, измеренная на лазерном эллипсометре, составляла ~ 5 нм. Физическая толщина пленок Dy_xO_y измерялась на лазерном эллипсометре после окисления пленок *Dy*, осажденных на кремниевые пластины, при температуре $T_{ок} = 600^\circ C$ и времени окисления $t_{ок} = 10-20$ мин. Затем для формирования пленок силиката диспрозия *DySiO* в тех же режимах осаждалась и окислялась пленка *Dy* аналогичной толщины, нанесенная на пленку SiO_2 толщиной ~ 5 нм. Оксидные пленки толщиной 5-6 нм, полученные окислением пленки *Dy* на кремнии, имеют квазиаморфную структуру, шероховатость поверхности ~ 1.5 нм и гладкую границу раздела с кремнием [3]. Состав образующихся при окислении *Dy* пленок можно представить как силикат диспрозия $Dy_xO_y-DySiO-SiO_2$ [4]. Слои Dy_xO_y на внешней поверхности силикатной пленки *DySiO* и SiO_2 на границе с кремнием являются очень тонкими.

На рисунках 1 и 2 представлены типичные вольт-фарадные характеристики МОП-структур *Me-DySiO-Si* с эквивалентной (электрической) толщиной пленок *DySiO* ~ 5 нм, полученными при температуре $T_{ок} = 600^\circ C$ и времени $t_{ок} = 10$ и 20 мин окисления пленок диспрозия, нанесенных на пленки SiO_2 . Вольт-фарадная характеристика МОП-структуры с исходной пленкой SiO_2 толщиной ~ 5 нм имела аналогичный вид (не показана). МОП-структуры с пленками *DySiO* и SiO_2 имеют практически одинаковые максимальные емкости в режиме аккумуляции основных носителей заряда ~ 500 пФ. Таким образом, при окислении пленки диспрозия толщиной, соответствующей толщине пленки оксида диспрозия ~ 5 нм, на поверхности пленки SiO_2 физической толщиной также ~ 5 нм образуется пленка *DySiO*, эффективная (электрическая) толщина которой, определенная по максимальной емкости вольт-фарадной характеристики, равна физической толщине исходной пленки SiO_2 . В МОП-структурах с пленками *DySiO* и SiO_2 наблюдается практически одинаковый положительный общий поверхностный заряд с плотностью $N_{ss} \sim (1-3) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Наклон *C-V* кривых, характеризующий величину плотности поверхностных состояний D_{it} на границе раздела с кремнием, также мало отличается в исследованных МОП-структурах с пленками *DySiO* и SiO_2 . Низкая плотность поверхностных состояний на границе раздела туннельный диэлектрик-кремний является необходимым условием для рабо-

ты МОП-транзисторов и элементов памяти, так как в присутствии большого количества поверхностных состояний на данной границе значительная часть носителей заряда, инжектируемых из Si подложки, будет захватываться на эти поверхностные состояния. МОП-структуры с пленками $DySiO$ и SiO_2 имеют гистерезис $C-V$ кривых инжекционного типа < 0.01 В. Таким образом, зарядовые свойства МОП-структур $Me-DySiO-Si$ остаются, в основном, одинаковыми с зарядовыми свойствами исходных МОП-структур $Me-SiO_2-Si$.

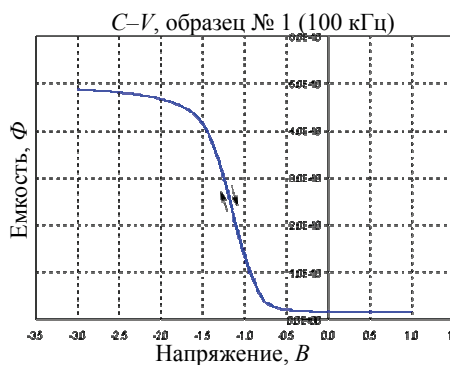


Рис. 1. Вольт-фарадная характеристика МОП-структуры $Me-DySiO-Si$, $T_{ок}=600^{\circ}C$; $t_{ок}=10$ мин

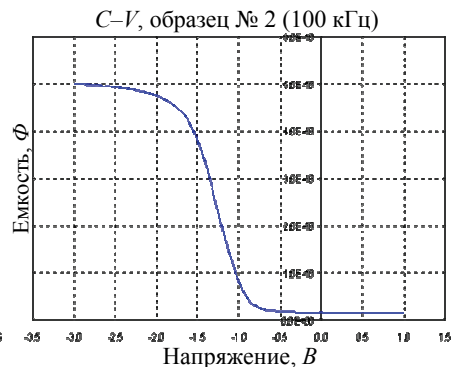


Рис. 2. Вольт-фарадная характеристика МОП-структуры $Me-DySiO-Si$, $T_{ок}=600^{\circ}C$; $t_{ок}=20$ мин

Исследовано влияние времени окисления пленок диспрозия, осажденных на пленки SiO_2 толщиной ~ 5 нм, на зарядовые свойства кремниевых МОП-структур с пленками $DySiO$. При $T_{ок}=600^{\circ}C$ и $t_{ок}=10$ мин формируется МОП-структура с положительным эффективным зарядом (рис. 1). С увеличением времени окисления с 10 до 20 мин наблюдается небольшое увеличение положительного эффективного заряда (сдвиг вольт-фарадной характеристики в сторону отрицательных напряжений) (рис. 2). Величина максимальной емкости в режиме аккумуляции и наклон $C-V$ характеристики практически не изменяются. Нагрев кремниевой пластины с пленкой SiO_2 до температуры $T_{подл}=250^{\circ}C$ в процессе напыления пленки диспрозия с последующим ее окислением при $T_{ок}=600^{\circ}C$ и $t_{ок}=10-20$ мин слабо влияет на величину емкости в режиме аккумуляции вольт-фарадных характеристик МОП-структур с пленками $DySiO$. Однако приводит к увеличению наклона $C-V$ характеристик, что свидетельствует об увеличении плотности поверхностных состояний на границе $DySiO-Si$.

Увеличение толщины пленки диспрозия, осажденной и окисленной на пленке SiO_2 , приводит к уменьшению максимальной емкости МОП-структуры в режиме аккумуляции и формированию гистерезиса $C-V$ характеристики ионного типа. Последний факт свидетельствует об образовании на поверхности кремния двойной пленки $Dy_xO_y-DySiO-Si$ с разной проводимостью и разными величинами ϵ .

Таким образом, при взаимодействии пленок диспрозия с пленками SiO_2 с физической толщиной ~ 5 нм могут формироваться пленки силиката $DySiO$ с эквивалентной толщиной ~ 5 нм, которые по электрическим характеристикам в МОП-структуре являются однослойным диэлектриком, несмотря на присутствие тонких слоев Dy_xO_y и SiO_2 . При увеличении толщины пленок диспрозия образуется диэлектрик из двух

слоев $Dy_xO_y-DySiO$, являющийся по электрическим характеристикам двухслойным диэлектриком.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Cho H.-J.* Nitrogen profile and dielectric cap layer (Al_2O_3 , Dy_2O_3 , La_2O_3) engineering on Hf-silicate: Proceedings EEE International Conference "Integrated Circuit. Design and Technology. ICICDT '07" / H.-J. Cho [et al.]. May 30-June 1 2007. USA. P. 1-4244-0757-5/07.
2. *Blomme, P.* Write/erase cycling endurance of memory cells with SiO_2/HfO_2 tunnel dielectric / P. Blomme [et al.] // IEEE Transactions on Device and Material Reliability. 2004. Vol.4, №3. P.345.
3. *Lawniczak-Jablonska, K.* Surface morphology of Dy_xO_y films grown on Si / K. Lawniczak-Jablonska, N.V. Babushkina, E. Dynowska, S.A. Malyshev, Romanova, D.V. Zhygulin, T. Laiho // Applied Surface Science. 2006. Vol. 253, №2. P. 639.
4. *Бабушкина Н.В.* Инфракрасные и Оже-спектры пленок силиката диспрозия / Н.В. Бабушкина, С.А.Малышев и др.//Журнал прикладной спектроскопии. 2011. №4.С.51.

СПЕКТРЫ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ГЕТЕРОГЕННЫХ НАНОСТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ ОБЛУЧЕНИЕМ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ИОНАМИ ГЕЛИЯ

Д. С. Белявский, А. В. Леонтьев, Л. А. Власукова, И. Н. Пархоменко

Белорусский государственный университет, Belyavskds@gmail.com

Изучение влияния ионно-лучевой модификации на различные свойства диэлектрических материалов проводилось с начала 80-х гг. Эти исследования показывали, что ионное облучение могло быть использовано для изменения свойств поверхности, таких как химическая стойкость, электропроводность, показатель преломления [1,2].

В настоящей работе рассматривается влияние ионного облучения на оптические свойства кремнийорганических полимеров, таких как полигидрометилсилоксан (SOG), которые могут быть подходящими материалами для изготовления оптических устройств. Для изучения зависимости коэффициента преломления (Δn) от дозы ионно-лучевого облучения использовались образцы SOG толщиной 520 нм, нанесенные на кремниевые подложки и облученные различными дозами ионов гелия.

Основу способов определения оптических свойств разнообразных покрытий составляют явления отражения, пропускания, поглощения, а также интерференции и поляризации в тонких пленках, которые находят практическую реализацию в двух методах измерений: спектрофотометрических и эллипсометрических. Эти методы не только обеспечивают возможность контроля оптической толщины и показателя преломления пленок, но дают возможность оценить их однородность, потери на поглощение и другие свойства, присущие реальным пленкам, обладающим различной структурой [3,4].

Коэффициенты преломления определялись при помощи метода лазерной эллипсометрии с использованием 4-зонной схемы измерения при 3 углах падения (69° , 70° и 71°) лазерного луча ($\lambda=0,6328$ мкм) на образец.

Получено, что облучение покрытий SOG, нанесенные на кремниевые подложки и облученные различными дозами ионов гелия с энергией 1МэВ в диапазоне доз от $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ до $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ позволяет изменить величину показателя преломления n с 1,46 до 1,59, что составляет 8%.