

ванная в плоскости  $xy$  имеет волновой вектор не зависящий от угла преломления, что отвечает типу обыкновенной, у которой сечение волновой поверхности сфера. Волна, поляризованная нормально к плоскости падения ( $xz$ ) имеет волновой вектор, а именно показатель преломления как характеристику, зависящую от угла преломления  $\psi$ . При антисимметрии тензора магнитной проницаемости рассматриваемая волна будет также обыкновенной, если диагональные компоненты  $\mu_{ii}$  равны.

#### Список использованных источников

1. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. / Г.С. Кринчик. – М.: Изд-во МГУ. 1985. – 336 с.
2. Hornreich W.F. Possibility of visual observation of antiferromagnetic domains / W.F. Hornreich, S. Shtrikman // Phys. Rev. – 1968. – V. 171, № 3. – P. 1065 – 1074.
3. Смоленский Г.А. Сегнетомагнетики / Г.А. Смоленский, И.Е.Чупис // УФН. 1982. – Т. 137, № 3. – С. 415–448.

УДК 621.793.184

Михалкович<sup>1</sup> О.М., к.ф.-м.н, Куликаускас<sup>2</sup> В.С., к.ф.-м.н. ВНС,  
Барайшук<sup>3</sup> С.М., к.ф.-м.н., доцент

<sup>1</sup>Белорусский государственный педагогический университет  
имени Максима Танка, г. Минск,

<sup>2</sup>«Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына» Москва,

<sup>3</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет,  
г. Минск

### ГЛУБИННОЕ ПРОНИКНОВЕНИЕ В ПОДЛОЖКУ Si КОМПОНЕНТОВ МОЛИБДЕНОВОЙ ПЛЕНКИ ПРИ ЕЕ ФОРМИРОВАНИИ КАТОДНЫМ ВАКУУМНЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ С ИОННЫМ АССИСТИРОВАНИЕМ

Катодное вакуумное распыление в сочетании с ассистированием ионами осаждаемого металла является очень эффективным методом получения композиционных покрытий [1]. Известно, что образующиеся при этом силициды переходных металлов, обладая низким электрическим сопротивлением, используются в микро-

электронике для создания омических контактов, шин металлизации в солнечных элементах (СЭ) и других полупроводниковых приборах [2] используемых в альтернативной энергетике.

В нашей работе вакуумным катодным распылением осаждались Мо пленки при ассистировании ионами молибдена на образцы кремния. Ускоряющий потенциал составлял 5 кВ, 7 кВ, 15 кВ и 20 кВ. Плотность ионного тока варьировалась в пределах 50-100 мкА/см<sup>2</sup>. Элементный послыйный анализ конструкций пленка/кремний выполняли, используя резерфордовское обратное рассеяние (РОР) ионов гелия He<sup>+</sup> с E<sub>0</sub> = 1.45 МэВ (ΔE=15 кэВ) и геометрией рассеяния θ<sub>1</sub>=0°, θ<sub>2</sub>=12°, θ=168°, и компьютерное моделирование по программе RUMP.

Композиционный состав Мо пленок, сформированных на кремнии обсуждался ранее [3]. Распределение элементов в массиве пленки практически равномерное. Концентрация атомов Мо, Si, С, О, Н в пленке составляет в среднем 7, 4,5, 55, 28, 6 ат.% соответственно. Мо в кремнии идентифицируется на глубине в 800-1000 нм с концентрацией 0,05 ат.%. Атомы С и О проникают в Si на сравнительно малую глубину в 40 нм с концентрацией 0,6 и 0,3 ат.% соответственно. Наличие кремния в пленке с концентрацией порядка 5 ат. % свидетельствует о его диффузии в пленку в составе силицида, в то время как, С,О,Н идентифицируются из гидроксильной группы вакуумного масла

Об глубинном проникновении компонентов осаждаемых пленок в кремний уместно замечать в сравнении с проективным пробегом ионов, рассчитанных используя программу SRIM. Произведены расчеты проективного пробега ионов Мо<sup>+</sup> в кремнии. Расчеты осуществлялись для значений ускоряющего потенциала на мишени равных U = 7 кВ, U = 15 кВ, а также U = 20 кВ. Значение проективного пробега ионов Мо<sup>+</sup> в кремнии составляет 16,1 нм, 26,6 нм и 32,8 нм для значений ускоряющего потенциала 7 кВ, 15 кВ и 20 кВ соответственно. Значение страгглинга пробега ионов Мо<sup>+</sup> в Si составляет 5,4 нм, 8,2 нм и 9,8 нм для значений ускоряющего потенциала 7 кВ, 15 кВ и 20 кВ соответственно.

Были определены значения слоевых концентраций компонентов системы Мо/Si при варьировании потенциала смещения на мишени. Значение слоевой концентрации атомов углерода (Nz)<sub>C</sub> при осаждении Мо пленки в течение одного часа на Si составляет

$0.6 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup>,  $1.7 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup> и  $2.7 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup> для значений ускоряющего потенциала 7 кВ, 15 кВ и 20 кВ соответственно. Значение слоевой концентрации атомов кислорода  $(Nz)_O$  составляет  $10.6 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup>,  $3.5 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup> и  $5.4 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup> для значений ускоряющего потенциала 7 кВ, 15 кВ и 20 кВ соответственно. Значение слоевой концентрации атомов молибдена  $(Nz)_{Mo}$  составляет  $0.6 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup>,  $1.7 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup> и  $2.7 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup> для значений ускоряющего потенциала 7 кВ, 15 кВ и 20 кВ соответственно. Отношение слоевых концентраций  $(Nz)_c/(Nz)_O$  увеличивается с увеличением ускоряющего потенциала. Увеличение содержания кислорода в сравнении с углеродом связано с повышенной химической активностью молибдена по отношению к кислороду.

Локализация атомов Мо в кристаллической решетке кремния при различных значениях потенциала смещения на держателе определялась дифференциацией случайных и осевых спектров резерфордского обратного рассеяния в сочетании с каналированием ионов гелия. Эти сведения позволяют также предположить механизм глубинной диффузии атомов покрытия в кристаллическую подложку. Атомы молибдена в приповерхностной области подложки локализуются преимущественно в междоузлиях (на глубине 100 нм Мо – 83%). Доля атомов металлов, находящихся в замещающем положении, увеличивается при увеличении глубины анализа. Так на большей глубине доля атомов молибдена, находящихся в узлах кристаллической решетки, увеличивается с 17%, достигая значения 44% на глубине около 760 нм. Основным является замещающий механизм диффузии атомов металлов в решетке Si. На малых глубинах проникновения в кремнии создается в процессе осаждения высокоградиентная область атомов металлов в неравновесном состоянии, что обуславливает наличие значительного количества атомов металла в междоузлиях.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь № ГР 20211394 и № ГР 20211250.

#### **Список использованных источников**

1. Mao J., Ding S., Li S., Li Y., Lin F., Zeng X. [et. al] Preparation and investigation of MoSi<sub>2</sub>/SiC coating with high infrared emissivity at high temperature // Surface & Coatings Technology, 2019, №358, P. 873–878.

2. Пилипенко В.А., Горушко В.А., Шведов С.В., Петлицкая Т.В., По-  
нарядов В.В. Влияние быстрой термообработки на структуру  $TiSi_2$  и про-  
водимость шин металлизации на его основе. // Взаимодействие излучений  
с твердым телом: материалы 8-й Междунар. конф., Минск, 23–25 сент.  
2009г. – 2009. – С. 271–272.

3. Михалкович О.М. Исследование свойств пленки на основе Mo на  
подложке Si для создания тонкопленочного ИК-излучателя. /  
О. М. Михалкович, С. М. Барайшук, Т. М. Ткаченко // Взаимодействие из-  
лучений с твердым телом: материалы 15-й Междунар. конф., Минск, Бе-  
ларусь, 26–29 сент. 2023 г. / Белорус, гос. ун-т ; редкол.: В. В. Углов  
(гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2023. – С. 414–416.

**УДК 621.316.99**

**Барайшук С.М., к.ф.-м.н., доцент,**

**Павлович И.А., ст. преподаватель**

*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
г. Минск*

## **ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРУНТА В МЕСТЕ ЗАЛОЖЕНИЯ КОНТУРА ЗАЗЕМЛЕНИЯ**

Обеспечение стабильных параметров заземляющих устройств в высокоомных грунтах представляет сложную техническую задачу [1]. Удельное сопротивление грунта значительно зависит от температуры и влажности, что вызывает сезонные колебания характеристик [2]. Особую проблему представляет резкое увеличение сопротивления при отрицательных температурах, когда происходит фазовый переход воды в лед [2].

В ходе работы исследована композиционная смесь на основе гидрогеля, обеспечивающего стабилизацию влажности, и графита, повышающего электропроводность [3]. Методика исследований включала экспериментальное определение удельного сопротивления смеси в зависимости от температуры и влажности [4].

На основании экспериментальных данных установлена экспоненциальная зависимость изменения сопротивления грунта, при использовании данной смеси: