

Работа выполнялась при поддержке БРФФИ и РФФИ договор № Т16Р-040.

1. Матюк, В.Ф. Состояние неразрушающего контроля штампуемости листового проката сталей / В.Ф. Матюк // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 3. – С. 15-42.
2. Востриков, А.А. Использование комплексного показателя для оценки штампуемости холоднокатаного листового проката / А.А. Востриков [и др.] // Сталь. – 1993. – № 7. – С. 47-49.
3. Щербинин, В.Е. Магнитный контроль качества металлов / В.Е. Щербинин, Э.С. Горкунов. – Екатеринбург, 1996. – 266 с.
4. Счастный, А.С. Исследование возможности контроля анизотропии листового проката / А.С. Счастный, А.А.Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 20-33.
5. Счастный, А.С. Механическая анизотропия и параметры петли магнитного гистерезиса листового проката низкоуглеродистых сталей / А.С. Счастный, А.А.Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2015. – № 3. – С. 15-27.
6. Счастный, А.С. Исследование возможности использования приборов магнитного контроля для оценки механической анизотропии листового проката / А.С. Счастный, А.А.Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2015. – № 3. – С. 54-66.

УДК 621.382.002

### ФОРМИРОВАНИЕ МЕЖУРОВНЕВОГО ДИЭЛЕКТРИКА ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Телеш Е.В., Вашуров А.Ю., Святохо С.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

Существующие вакуумные методы формирования межуровневого диэлектрика, основанные на термическом испарении, ионном распылении, связаны с использованием дорогостоящих мишеней и материалов для испарения. Энергия осаждаемых на подложку атомов составляет 0,01–5 эВ, что не позволяет получать тонкопленочные покрытия с высокой адгезией и требуемой микроструктурой при низких температурах подложки. Прямое осаждение из ионных пучков предполагает использования только рабочего газа, причем стоимость последнего намного ниже стоимости мишеней [1].

Формирование слоев межуровневого диэлектрика из SiO<sub>2</sub> осуществляли осаждением из ионных пучков смеси 5 % SiH<sub>4</sub> + 95 % Ar и кислорода. Остаточный вакуум в процессе нанесения не превышал значения (2–3)·10<sup>-3</sup> Па. Покрытия осаждались на неподвижные подложки из кремния. Режимы работы ионного источника на основе торцевого холлового ускорителя были следующими: анодное напряжение – 75 – 136 В, ток разряда – 1–4 А, ток соленоида – 3–4 А, ток эмиттера электронов – 11–12 А. Температура подложек составляла 333–613 К.

Исследование электрофизических параметров (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ , электрическая прочность  $E_{\text{пр}}$ ) межуровневого диэлектрика из SiO<sub>2</sub> осуществляли путем изменения характеристик структур металл–диэлектрик–полупроводник. Полученные тестовые образцы измерялись с помощью моста E7-20 (емкость и  $\text{tg}\delta$ ) и харак-

териографа TR-4805 (пробивное напряжение). Значение  $\epsilon$  определяли расчетным путем из величины емкости тестовой структуры.

Исследовалось влияние тока и напряжения разряда, состава рабочего газа и температуры подложки на  $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$  и  $E_{\text{пр}}$ . Было обнаружено, что для покрытий из SiO<sub>2</sub> увеличение парциального давления кислорода с 4,0·10<sup>-2</sup> до 2,0·10<sup>-3</sup> Па приводит к возрастанию  $\epsilon$  с 1,9 до 4,8. Тангенс угла потерь был минимален (0,04) при давлении 6,65·10<sup>-2</sup> Па, затем возрастал до 0,41 при 9,3·10<sup>-2</sup> Па. Значения  $E_{\text{пр}}$  практически не изменялись. Увеличение парциального давления SiH<sub>4</sub> приводило к снижению  $\epsilon$  с 5,8 до 3,7,  $\text{tg}\delta$  и  $E_{\text{пр}}$  почти не изменялись. Повышение тока разряда с 1 до 4 А способствовало возрастанию  $\epsilon$  до 4,3, а  $E_{\text{пр}}$  – уменьшению с 8,0·10<sup>6</sup> В/см до 3,2·10<sup>6</sup> В/см. Тангенс угла потерь находился в пределах 0,25 – 0,45 и не коррелировал однозначно с величиной  $I_p$ . Установлено также, что величина напряжения разряда практически не влияет на электрофизические параметры пленок SiO<sub>2</sub>. Повышение температуры подложки с 413 до 613 К способствовало увеличению  $\epsilon$  с 1,2 до 5,61 а также повышению  $E_{\text{пр}}$  с 3,4·10<sup>6</sup> до 5,2·10<sup>6</sup> В/см, т.е. улучшению диэлектрических параметров. На тангенс угла диэлектрических потерь температура подложки практически не влияла –  $\text{tg}\delta=0,15-0,18$ .

Тонкопленочные покрытия для межуровневого диэлектрика должны обладать высокой адгезией к металлу нижнего уровня, иметь минимальную пористость, обеспечивать конформное

заполнение ступеньки на металле нижнего уровня.

Важным требованием к межуровневому диэлектрику является его низкая пористость. Поэтому было проведено исследование влияния технологических режимов на пористость пленок диоксида кремния.

Для исследования пористости покрытия осаждались на неподвижные подложки из арсенида галлия. Температура подложек составляла 333–353 К. На поверхность диэлектрического покрытия наносилась тонкая пленка из алюминия. Полученная структура подвергалась нагреву при 953 К в течение 5 мин. После охлаждения проводился подсчет количества пор с использованием оптического микроскопа. Результаты измерений представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1 – Результаты исследования пористости покрытий от режимов нанесения

№ обр.	$P_{O_2}$ , Па	$P_{SiH_4}$ , Па	$U_a$ , В	$I_p$ , А	$N$ , $см^{-2}$
1	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$	100	1,5	112
2	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$	75	4,0	182
3	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$	75	3,0	73
4	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$	75	3,0	29

Анализ полученных результатов показал, что повышение мощности разряда со 150 до 300 Вт привело к возрастанию пористости с 112 до 182  $см^{-2}$ . Это означает, что высокая скорость нанесения способствует росту покрытия с неплотной структурой, что может привести к увеличению числа пор. На пористость оказывает сильное влияние и толщина слоя диэлектрика, о чем свидетельствуют данные по образцам 3 и 4. Увеличение толщины диэлектрика ~ в 2 раза привело к снижению количества пор в 2,5 раза.

Пористость и неоднородная структура пленки диэлектрика может привести к короткому замыканию между нижним и верхним слоем металла. Было проведено исследование влияния режимов нанесения на число короткозамкнутых МДМ структур. Внешний вид тестовой структуры приведен на рисунке 2. Режимы нанесения и результаты измерений приведены в таблице 2.

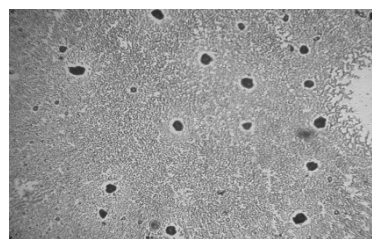
Установлено, что увеличение скорости нанесения и толщины диэлектрика приводит к снижению числа короткозамкнутых структур.

Для определения качества заполнения ступеньки на металле нижнего уровня использовалась тестовая структура, представленная на рисунке 3. В нижнем слое металла с применением обратной фотолитографии осуществлялось формирование проводников первого уровня. После нанесения межуровневого диэлектрика осуществлялось нанесение второго уровня металла. Конфигурация последнего формировалась с использованием металлической маски. Межуровневый диэлектрик наносился на неподвижную

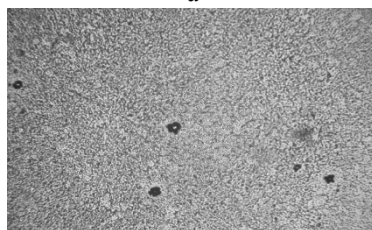
подложку и при вращении последней. Установлено, что во втором случае число короткозамкнутых проводников меньше.

Таблица 2 – Результаты исследования количества процентов незамкнутых (НЗ) МДМ структур от режимов нанесения

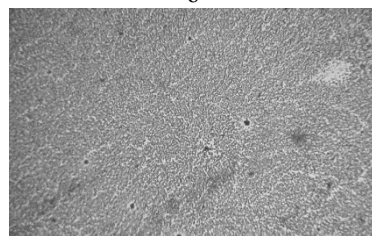
№ обр.	$P_{O_2}$ , Па	$P_{SiH_4}$ , Па	$U_a$ , В	$I_p$ , А	$t$ , мин	НЗ, %
1	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$	100	1,5	17	2,1
2	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$	75	4,0	6	0,5
3	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$	75	3,0	10	0,8
4	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$	75	3,0	22	1,8



а



б



в

а – образец 3; б – образец 3; в – образец 4  
Рисунок 1 – Результаты исследования пористости покрытий

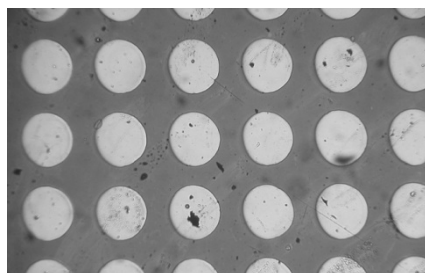


Рисунок 2 – Внешний вид тестовой структуры

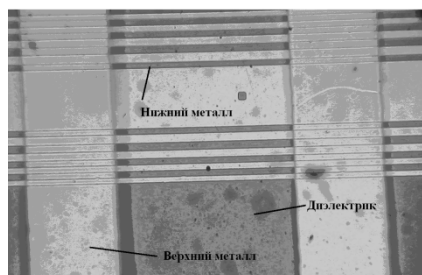


Рисунок 3 – Внешний вид тестовой структуры для исследования заполнения ступеньки на металле нижнего уровня

Для оценки адгезии межуровневого диэлектрика к металлу первого уровня осуществлялось нанесение на подложки из кремния, покрытые пленками алюминия и меди. Установлено, что покрытия имели адгезию, соответствующую уровню 4В–5В ASTM в диапазоне анодного напряжения 55–125 В.

1. Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро- и нанoeлектроники: монография / А.П. Достанко [и др.]; под общей ред. А.П. Достанко, А.М. Русецкого. – Минск: Бестпринт, 2011. – 210 с.

УДК 621.793.7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ИОННО-ЛУЧЕВОГО РАСПЫЛЕНИЯ НА СТЕХИОМЕТРИЮ ПЛЕНОК ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Телеш Е.В., Гуревич О.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

Диэлектрические пленки из диоксида кремния широко применяются в микроэлектронике и оптике. Например, важной задачей в арсенид-галлиевой технологии является формирование высококачественных диэлектрических слоев различного функционального назначения, т.к. существующие технологии не позволяют получать на поверхности GaAs качественные слои из собственного оксида, в отличие от кремниевой технологии.

Нестехиометрический состав диэлектрика приводит к росту плотности поверхностных состояний на границе раздела, увеличивает токи утечки и частотную дисперсию диэлектрической проницаемости, снижает электрическую прочность. Это приводит к гистерезису  $C-V$  характеристик гетероструктур «диэлектрик–GaAs», гистерезису стоковых характеристик и долговременному дрейфу напряжения стока полевых транзисторов. Поэтому проблема формирования диэлектрических слоев стехиометрического состава является весьма актуальной.

Инфракрасный спектральный анализ является одним из основных методов исследования состава пленок диоксида кремния. Критерием стехиометричности пленок является положение в ИК спектре поглощения основной полосы  $\nu_{as}$ , соответствующей валентным антисимметричным колебаниям  $Si \leftarrow O \rightarrow Si$ . Чем выше частота колебаний этих связей, тем состав пленки ближе к стехиометрическому.

Исследования стехиометрии пленок  $SiO_x$ , полученных ВЧ магнетронным распылением кварца, показали, что основная полоса находилась на частоте  $1060 \text{ см}^{-1}$ . Пленки наносились на холодную подложку. Отжиг при  $1473 \text{ К}$  привел к смещению полосы в высокочастотную об-

ласть до  $1080 \text{ см}^{-1}$ . Повышение температуры подложки с  $373$  до  $723 \text{ К}$  при ВЧ диодном распылении кварцевой мишени привело к увеличению частоты с  $1057$  до  $1072 \text{ см}^{-1}$ .

Исследование свойств пленок  $SiO_x$ , полученных реактивным диодным распылением кремния, показало, что сдвиг основной полосы в высокочастотную область наблюдался при снижении скорости нанесения, уменьшения парциального давления кислорода в рабочем газе и увеличении температуры подложки. Это было связано с увеличением плотности пленок, уменьшением пористости и содержания влаги.

Пленки диоксида кремния, полученные ИЛР кварцевой мишени ионами аргона с энергией  $1400 \text{ эВ}$  и с ионным током  $25 - 40 \text{ мА}$ , имели основную полосу поглощения на частоте  $1050 \text{ см}^{-1}$ . Пленки со скоростью  $0,09 - 0,11 \text{ нм} \cdot \text{с}^{-1}$  наносились на холодные подложки. В работе [1] проведено исследование стехиометрии  $SiO_x$ -пленок, полученных ИЛР мишени, изготовленной из чистого ( $99,9984 \%$ )  $SiO_x$ . Энергия распыляющих ионов составляла  $\sim 4000 \text{ эВ}$ , ток ионного пучка –  $200 \text{ мА}$ , температура подложки –  $473 \text{ К}$ . Установлено, что положение полосы  $\nu_{as}$  сложным образом зависит от процентного содержания кислорода в рабочем газе. При оптимальном  $8 \%$  -м содержании кислорода были получены пленки состава  $SiO_{1,92}$ .

Таким образом, практически отсутствуют сведения о влиянии на стехиометрию  $SiO_x$ -пленок различных технологических факторов (энергия распыляющих ионов, ток компенсатора, температура подложки) при ИЛР кварцевой мишени, а также влияния состава рабочего газа, температуры подложки при реактивном ИЛР мишени из кремния. В данной работе будет ис-