

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

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 ν_{as} , соответствующей валентным антисимметричным колебаниям $Si \leftarrow O \leftarrow Si$. 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 см^{-1} . Пленки наносились на холодную подложку. Отжиг при 1473 К привел к смещению полосы в высокочастотную об-

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

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

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.

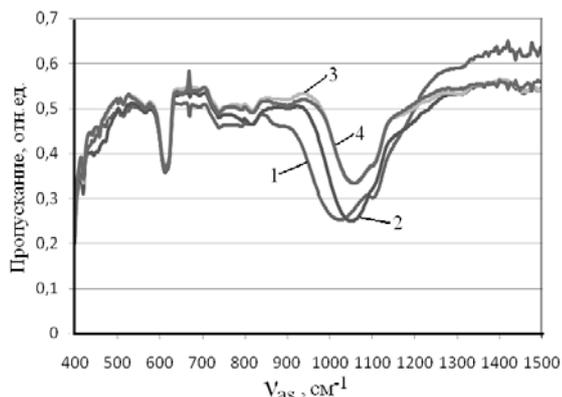
Пленки диоксида кремния, полученные ИЛР кварцевой мишени ионами аргона с энергией 1400 эВ и с ионным током $25 - 40 \text{ мА}$, имели основную полосу поглощения на частоте 1050 см^{-1} . Пленки со скоростью $0,09 - 0,11 \text{ нм} \cdot \text{с}^{-1}$ наносились на холодные подложки. В работе [1] проведено 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 мА , температура подложки – 473 К . Установлено, что положение полосы ν_{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-

следовано влияние вышеуказанных факторов на положение основной полосы поглощения ν_{as} при ИЛР кварцевой и кремниевой мишеней.

Для формирования SiO_x -пленок использовался ионный источник на основе ускорителя с анодным слоем. В качестве материала мишеней использовались кварц (ТУ 0284409-108-85) и кремний поликристаллический КП-4. Пленки наносились на полированные с двух сторон подложки из монокристаллического кремния КДБ-10. Рабочими газами являлись аргон ГОСТ 10157-73 и кислород ГОСТ 6331-78. Толщину покрытий определяли с помощью микроскопа МИИ-4. Толщина SiO_x -пленок составляла 220...420 нм при реактивном ИЛР и 150...250 нм при ИЛР кварца. ИК спектры измерялись на FTIR спектрометре Vertex 70 в диапазоне 400–1500 см^{-1} . Композиционный индекс x определялся по зависимости, приведенной в работе [1].

На рисунке 1 представлены спектры поглощения пленок, полученных реактивным ИЛР кремниевой мишени при температуре подложки $T_p=313$ К и при разных парциальных давлениях кислорода. На спектре имеются следующие три характерные полосы поглощения: $\nu_{as}=1085$ см^{-1} , соответствующую валентным антисимметричным колебаниям $\text{Si} \leftarrow \text{O} \leftarrow \text{Si}$, $\nu_s=800$ см^{-1} , соответствующую валентным симметричным колебаниям $\text{Si} \rightarrow \text{O} \leftarrow \text{Si}$, $\delta_{as}=450$ см^{-1} , соответствующую деформационным дважды вырожденным колебаниям $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$. Также на спектре имеются четко выраженная полоса с частотой ~ 607 см^{-1} и небольшое поглощение на 1107 см^{-1} . Это полосы поглощения кремния.



1– $P_{O_2}=1,33 \cdot 10^{-2}$ Па; 2– $P_{O_2}=2,66 \cdot 10^{-2}$ Па;
3– $P_{O_2}=3,99 \cdot 10^{-2}$ Па; 4– $P_{O_2}=5,32 \cdot 10^{-2}$ Па

Рисунок 1– ИК-спектры пропускания пленок, полученных реактивным ИЛР кремния

Пленки из диоксида кремния были нанесены при разном составе рабочего газа, температуре подложки, а также при наличии положительного потенциала на мишени. Энергия распыляющих ионов составляла ~ 1950 эВ. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты исследований SiO_x -пленок, полученных реактивным ИЛР кремния

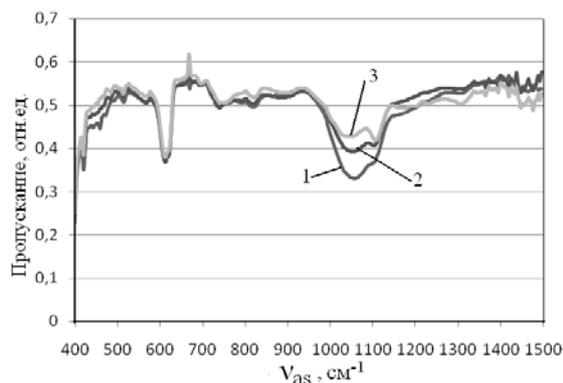
№	V_{H_2} , нм·с ⁻¹	P_{O_2} , Па	T_p , К	U_m , В	ν_{as} , см ⁻¹	x
1	0,63	$1,33 \cdot 10^{-2}$	313	0	1023	1,41
2	0,60	$2,66 \cdot 10^{-2}$	313	0	1053	1,70
3	0,47	$3,99 \cdot 10^{-2}$	313	0	1059	1,77
4	0,40	$5,32 \cdot 10^{-2}$	313	0	1059	1,77
5	0,47	$3,33 \cdot 10^{-2}$	373	0	1060	1,78
6	0,53	$3,33 \cdot 10^{-2}$	473	0	1067	1,83
7	0,47	$3,33 \cdot 10^{-2}$	573	0	1073	1,86
8	0,51	$3,33 \cdot 10^{-2}$	393	35	1062	1,80

С ростом парциального давления кислорода в рабочем газе происходит увеличение композиционного индекса до $x=1,77$. Распыление в чистом кислороде не привело к повышению x .

Повышение температуры подложки T_p стимулирует процесс химического взаимодействия между кремнием и кислородом. Это приводит к формированию SiO_x -пленок с повышенным композиционным индексом (при $T_p=573$ К, $x=1,86$). При этом парциальное давление кислорода было относительно невысоко, что позволяет не снижать скорость нанесения покрытий.

При наличии положительного напряжения на мишени U_m между мишенью и подложкой возникает вторичный плазменный разряд, который также стимулирует взаимодействие между кремнием и кислородом и способствует увеличению частоты основной полосы даже при невысокой T_p .

На рисунке 2 приведены ИК спектры SiO_x -пленок, полученных ИЛР кварцевой мишени при разном ускоряющем напряжении U_a и токе компенсатора I_k . Температура подложки составляла 333–350 К. В таблице 2 приведены режимы нанесения и полученные результаты.



1– $U_a=2$ кВ, $I_k=12$ А; 2– $U_a=3,8$ кВ, $I_k=12$ А;
3– $U_a=3$ кВ, $I_k=10$ А

Рисунок 2– ИК-спектры пропускания пленок, полученных ИЛР кварца

Таблица 2 – Результаты исследований SiO_x-пленок, полученных ИЛР кварца

№	U _{аб} , кВ	I _к , А	V _н , нм·с ⁻¹	P _{O2} , Па	v _{ас} , см ⁻¹	х
1	2,0	12	0,46	–	1060	1,78
2	3,8	12	0,37	–	1055	1,72
3	3,0	10	0,30	–	1050	1,68
4	3,0	13	0,41	–	1054	1,71
5	3,0	12	0,42	6, 65·10 ⁻³	1057	1,74
6	3,0	12	0,39	1, 19·10 ⁻²	1057	1,74
7	3,0	0	0,28	–	1038	1,56

Установлено, что снижение U_а (энергии ионов) способствует повышению частоты основной полосы. К такому же результату приводит и увеличение тока компенсатора. Добавка кислорода в рабочий газ также способствовала улучшению стехиометрии пленок диоксида кремния.

1. Достанко, А.П. Инфракрасный спектральный анализ SiO_x-пленок, полученных ионно-лучевым распылением кварцевых мишеней / А.П. Достанко, Е.С. Акулич, В.Я. Ширипов, С.А.Соболев // Журнал прикладной спектроскопии. – 1989. – Т.50. – 33. – С.436–439.

УДК 004.932.4

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ВИЗУАЛИЗИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ КАРТИРОВАНИИ ДЕФЕКТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

Тявловский А.К.¹, Жарин А.Л.¹, Гусев О.К.¹, Воробей Р.И.¹, Тявловский К.Л.¹,
Пантелеев К.В.¹, Микитевич В.А.¹, Пилипенко В.А.², Петлицкий А.Н.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

В проводимых исследованиях картирование дефектов полупроводниковых пластин выполняется на основе регистрации пространственного распределения контактной разности потенциалов (КРП) поверхности, в том числе с использованием дополнительных воздействий, с помощью электрометрического зонда Кельвина, работающего в сканирующем режиме. Сканирование осуществляется по точкам, вследствие чего визуализированное изображение (карта) состоит из отдельных пикселей. При этом значения КРП либо определяемого посредством ее измерений параметра (поверхностной фотоЭДС, длины диффузии неравновесных носителей заряда, относительной концентрации примеси и т.д.) обозначаются условными индексными цветами или градациями яркости черно-белого изображения. Преобразование электрофизических параметров в индекс цвета либо яркости является линейным, и получаемое таким образом визуализированное изображение в большинстве случаев субъективно воспринимается как слабоконтрастное, что затрудняет выявление дефектов пластины на изображении. Для повышения контрастности изображения требуется его дополнительная обработка, которая может осуществляться на основе следующих механизмов.

1. Линейная растяжка гистограммы.

Алгоритм линейной растяжки заключается в изменении индексов цветов (значений яркости) каждого пиксела изображения на основании вида

$$Z_{new} = a + bZ_{old}, \quad (1)$$

где Z_{new} – новое значение индекса;

Z_{old} – старое значение индекса;

a, b – константы, выбираемые исходя из условия совпадения минимального Z_{new_min} и максимального Z_{new_max} значений индекса с соответствующими границами гистограммы.

При определении границ гистограммы недостающие крайние столбцы (содержащие от 1 до 5 % общего количества пикселей изображения, в зависимости от задачи картирования) могут быть отброшены без существенного ухудшения качества изображения, если это способствует улучшению контраста.

Благодаря простоте алгоритма операция линейной растяжки может быть легко автоматизирована с использованием простейших программных средств. Так, в экспериментальных работах по картированию дефектов полупроводниковых пластин использовалось программное обеспечение (ПО) на языке LabTalk, работающее в программной среде OriginPro. На рисунке 1(а) показан результат картирования дефектов полупроводниковой пластины с автоматическим назначением минимального и максимального индексов градаций яркости по левой и правой границам гистограммы, при этом индексу 0 оказалось поставлено в соответствие значение КРП минус 230 мВ, а индексу 255 – значение 170 мВ. Анализ гистограммы распределения значений КРП показал, что на диапазоны от минус 230 мВ до минус 130 мВ и от 60 мВ до 170 мВ приходится менее 3 % от общего количества пикселей. На основании этого были назначены новые границы гистограммы, приписывающие индекс 0 значению минус 130 мВ, а индекс 255 – значению 170 мВ (коэффициент растяжки b = 2,105).