

УДК 539.231

# АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

К.т.н. Б.О. Малик, Д.В. Гурин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

В статье приведен анализ электрофизических свойств диэлектрических пленок в зависимости от параметров технологического процесса. Описаны основные факторы, влияющие на свойства пленок, представлены графики зависимости от этих факторов. Проведенный анализ позволяет определить оптимальные управляющие воздействия, для построения математической модели получения диэлектрических пленок.

У статті наведено аналіз електрофізичних властивостей діелектричних плівок в залежності від параметрів технологічного процесу. Описано основні фактори, які впливають на властивості плівок, представлені графіки залежності від цих факторів. Проведений аналіз дозволяє визначити оптимальні керуючі впливи, для побудови математичної моделі отримання діелектричних плівок.

The article analyzes the electrophysical properties of dielectric films depending on the parameters of the process. The main factors influencing the properties of films are described, graphs of dependence on these factors are presented. The analysis allows to determine the optimal control actions for the construction of a mathematical model for the production of dielectric slicks.

**Ключевые слова:** диэлектрические пленки, вольтамперные характеристики, электрические свойства пленок, управляющие воздействия, катодное распыление.

## Введение

Для получения заданных свойств наноструктурированных диэлектрических пленок необходимо создание автоматизированной системы управления технологическим процессом. Для создания такой системы требуется установить связь между свойствами диэлектрических пленок и параметрами технологического процесса, обеспечивающих получение качественных пленок с заданными свойствами. Данная статья посвящена решению этой задачи.

**Электрофизические свойства пленок**  
 $SiO_2, Si_3N_4, Al_2O_3, AlN, TiO_2, Si_xO_yN_z$

**Влияние условий осаждения распыленного вещества на электрофизические свойства пленок**

Известно, что основными факторами, влияющими на свойства пленок, полученных методом катодного распыления, являются давление рабочего газа, мощность разряда, температура подложки.

Связь этих факторов с параметрами получаемых диэлектрических пленок, тангенсом угла

диэлектрических потерь  $tg\delta$ , электрической прочностью  $E_{нр}$ , диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  имеет первостепенное значение [1].

## Электрические свойства пленок

Процесс получения диэлектрических пленок реактивным катодным распылением в магнетронной распылительной системе характеризуется составом рабочего газа, его давлением (Р) в подколпачном устройстве, температурой подложки при напылении ( $T_n$ ), удельной мощностью разряда ( $W/S$ ) пропорциональной скорости осаждения конденсата [2].

В областях давлений рабочего газа 0,133-0,665 Па для пленок  $SiO_2, Al_2O_3, TiO_2$ , 0,266-0,931 Па для пленок  $Si_3N_4, AlN$  тангенс угла диэлектрических потерь и электрическая прочность пленок с ростом давления изменяются незначительно, принимая значения:

$$tg\delta - SiO_2 \ 6 \div 5 \cdot 10^{-3},$$

$$TiO_2 \ 11 - 13 \cdot 10^{-3},$$

$$Si_3N_4 \ 5 \div 8 \cdot 10^{-3},$$

$$Al_2O_3 \ 5 \div 8 \cdot 10^{-3},$$

$$AlN \ 4 \div 8 \cdot 10^{-3};$$

$$E_{нр} - SiO_2 \ 3 \frac{MB}{cm^2},$$

$$Al_2O_3 \ 5 \div 6 \frac{MB}{cm^2},$$

$$TiO_2 \ 0,5 - 2 \frac{MB}{cm^2},$$

$$Si_3N_4 \ 7 \div 8 \frac{MB}{cm^2},$$

$$AlN \ 3 \frac{MB}{cm^2}.$$

В областях рабочих давлений ниже 0,133 Па и выше 0,665 Па для окисных пленок ниже 0,133 Па и выше 0,931 Па для нитридных пленок  $tg\delta$  растет пропорционально  $P^2$ , а  $E_{нр}$  уменьшается.

Анализ зависимостей  $tg\delta$  и  $E_{нр}$  от удельной мощности разряда показывает, что в диапазоне удельных



мощностей  $3 \div 7 \text{ Вт/см}^2 \text{ tg}\delta$  и  $E_{\text{нр}}$  практически не изменяются.

Распыление при удельных мощностях меньше  $3 \text{ Вт/см}^2$  и больших  $7 \text{ Вт/см}^2$  приводит к росту  $\text{tg}\delta$  и уменьшению  $E_{\text{нр}}$ .

В исследуемом диапазоне температур 293–623 К увеличение температуры подложки вызывает уменьшение  $\text{tg}\delta$  и рост  $E_{\text{нр}}$ .

Можно выделить две характерные области изменения  $\text{tg}\delta$  и  $E_{\text{нр}}$ , появляющиеся с ростом температуры.

Для оксидных пленок наиболее существенные изменения  $\text{tg}\delta$  и  $E_{\text{нр}}$  происходят в диапазоне температур 293–373 К, а для нитридных – 293–423 К. Например, для пленки  $\text{SiO}_2$   $\text{tg}\delta$  изменяется от 3 до  $1 \cdot 10^{-3}$  а  $E_{\text{нр}}$  от 2,5 до  $4,5 \text{ МВ/см}^2$ .

Дальнейший рост температуры до 623 К не оказывает влияния на изменение этих параметров.

Диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) пленок  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{TiO}_2$  медленно уменьшается (в пределах  $0,1 \div 0,15$ ) в диапазоне изменения давлений  $0,133 \div 0,665 \text{ Па}$ .

Дальнейшее увеличение давления приводит к резкому уменьшению  $\epsilon$ . Так, для пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при увеличении давления с  $0,133$  до  $0,665 \text{ Па}$   $\epsilon$  изменяется с  $10$  до  $9,9$  и в диапазоне давлений  $0,665 \div 1,33 \text{ Па}$  – с  $9,9$  до  $9,6$ ; для пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  –  $\epsilon$  изменяется с  $6,85$ – $6,8$  в первом случае, с  $6,8$  до  $6,6$  – во втором случае.

Удельная мощность разряда и температура подложки также оказывают влияние на величину  $\epsilon$ .

Наибольшее увеличение значений  $\epsilon$  ( $0,2$ – $0,3$ ) происходит при росте удельной мощности разряда от  $0,5$  до  $2 \text{ Вт/см}^2$  и температуры подложки от  $293$  до  $33 \text{ К}$  для окисных пленок, от  $253$  до  $423 \text{ К}$  для нитридных пленок. При дальнейшем увеличении удельной мощности разряда и температуры подложки в исследуемом диапазоне удельных мощностей и температур  $\epsilon$  медленно растет и изменяется в пределах  $0,1$ .

Наиболее существенное влияние на электрические свойства пленок оказывает температура подложки.

На рис. 1 представлены зависимости  $\text{tg}\delta$ ,  $E_{\text{нр}}$ ,  $\epsilon$  от температуры подложки для пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Для всех кривых можно выделить две области: область низких температур ( $< 623 \text{ К}$ ) и область высоких температур ( $> 623 \text{ К}$ ).

Как было показано ранее, до температуры  $623 \text{ К}$  диэлектрическая проницаемость медленно растет до значения  $6,5$ .

На втором участке эта зависимость более резкая. Одновременно наблюдается увеличение  $\text{tg}\delta$  и снижение электрической прочности.

Следует отметить, что характер пробоя для двух указанных областей различный.

Низкотемпературные пленки после пробоя не теряют изоляционных свойств [3].

Пробой высокотемпературных пленок приводит к полной потере ими изоляционных свойств. Их вольтамперные характеристики, в отличие от низкотемпературных пленок, не имеют срывов тока и уровень тока на два порядка выше рис. 2.

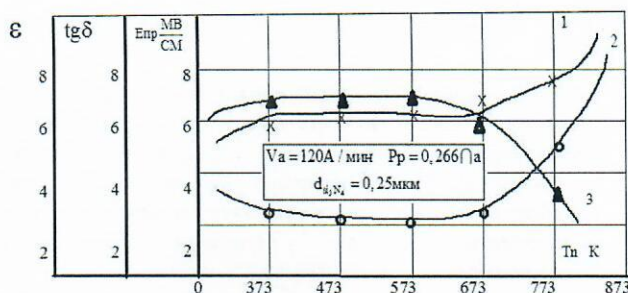


Рис. 1. Зависимость  $\epsilon$  (1),  $\text{tg}\delta$  (2),  $E_{\text{нр}}$  (3), пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  от температуры ( $T_n$ ) при осаждении

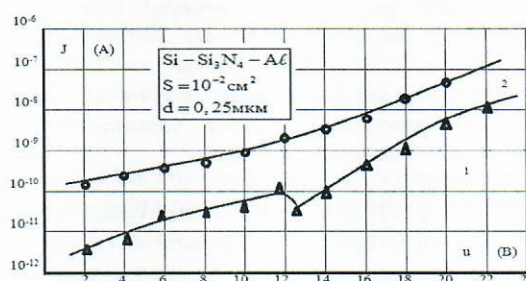


Рис. 2. Вольтамперные характеристики структуры  $\text{Si} - \text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}$  1 –  $T_n = 298 \text{ К}$ , 2 –  $T_n = 673 \text{ К}$

Промежуточными свойствами между  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  обладают пленки оксинитрида кремния, синтезированные нами при распылении кремния и газовой смеси азота с кислородом при разном процентном содержании кислорода.

В зависимости от процентного содержания кислорода в газовой смеси получены пленки оксинитрида кремния состава  $\text{Si}_2\text{O}_3\text{N}_2$  и  $\text{SiO}_{1,75}\text{N}_{0,2}$ . Пленки  $\text{SiO}_{1,75}\text{N}_{0,2}$  получались всегда при однопроцентном содержании кислорода в смеси. Увеличение содержания кислорода в смеси газов до 3% приводит к образованию соединения  $\text{Si}_3\text{O}_3\text{N}_2$ .

При содержании кислорода в смеси газов выше 5% получались пленки чистой двуокиси кремния.

Скорость осаждения пленок оксинитрида кремния с увеличением удельной мощности разряда возрастает от  $50 \text{ Å/мин}$  при  $W/S = 1 \text{ Вт/см}^2$  до  $270 \text{ Å/мин}$  при  $W/S = 6 \text{ Вт/см}^2$ .

Изменение процентного содержания кислорода в газовой смеси от  $0,5$  до  $4,5\%$  приводит к уменьшению скорости осаждения оксинитрида кремния в  $1,35$  раза. Зависимость скорости осаждения пленок оксинитрида кремния состава  $\text{SiO}_{1,75}\text{N}_{0,2}$  от удельной мощности разряда представлена на рис. 3.



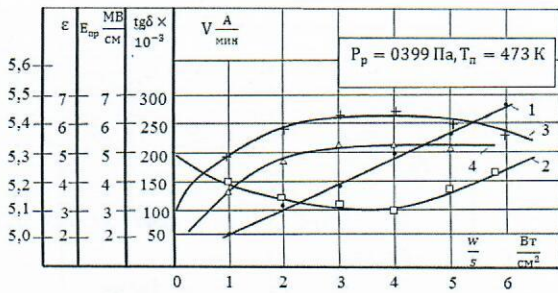


Рис. 3. Зависимость скорости осаждения  $V$  (1),  $\text{tg}\delta$  (2),  $E_{np}$  (3),  $\varepsilon$  (4) пленок оксинитрида кремния от удельной мощности разряда

На этом же рисунке представлены зависимости электрических характеристик пленок оксинитрида кремния.

Давление рабочего газа в камере существенно влияет на свойства полученных пленок.

Зависимость  $\text{tg}\delta$ ,  $E_{np}$ ,  $\varepsilon$  от давления рабочего газа показана на рис. 4. Анализ зависимостей, представленных на рисунке, показывает, что благоприятная область давления рабочего газа лежит в пределах 0,133–0,665 Па.

В этой области  $\text{tg}\delta$  принимает значение  $3 \div 4 \cdot 10^{-3}$ ,

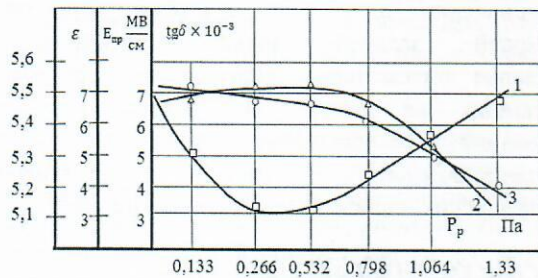


Рис. 4. Зависимость  $\text{tg}\delta$  (1),  $E_{np}$  (2),  $\varepsilon$  (3) пленок оксинитрида кремния от рабочего давления  
 $E_{np} = 6,8-7,0 \text{ MB/cm}^2$ ,  $\varepsilon = 5,45-5,5$ .

Пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$  с большим содержанием кислорода – сжимающие напряжения.

Исследование электрических свойств диэлектрика с показателем преломления 1,75–1,82 показали, что оксинитрид кремния имеет диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon = 5,2 \div 5,5$ , электрическую прочность

$E_{np} = 4 \div 6 \text{ MB/cm}$ ,  $\text{tg}\delta = 3 \div 7 \cdot 10^{-3}$ , удельное сопротивление  $\rho = 10^{15} \div 10^{16} \text{ Ом см}$ .

При исследовании проводимости диэлектрических пленок установлено, что температурные и полевые зависимости проводимости для пленок  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$  носят качественно одинаковый характер. ВАХ структур  $\text{Si} - \text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}$  и  $\text{Si} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}$ , снятые при температуре 298 К в интервале электрических полей  $1 \cdot 10^5 \leq E \leq 6 \cdot 10^6 \text{ В/см}$  представлены на рис. 5. Для всех исследуемых толщин

пленок ( $500 \leq d \leq 3000 \text{ Å}$ ) наблюдались качественно одинаковые ВАХ. Металлический электрод находился под положительным потенциалом.

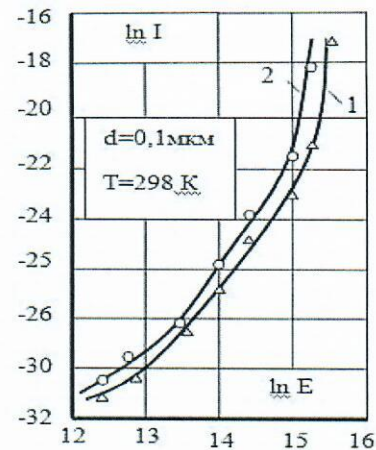


Рис. 5. Вольтамперные характеристики структур  $\text{Si} - \text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}$  (1),  $\text{Si} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}$  (2)

Плотность тока, протекающего через МДП структуру при  $T = \text{const}$ , возрастала сверхлинейно с увеличением  $E$ . Увеличение температуры при  $E = \text{const}$  также приводило к росту плотности тока.

Обработка  $j$ – $E$ – $T$  характеристик рассматриваемых объектов, показала, что зависимость  $j$  от  $E$  и  $T$  для всех образцов подчиняется соотношению:

$$j = 2eNi(KT)^3 \mu \beta^{-1} \exp(-E_i/KT) f(xshx),$$

$$\text{где } x = \frac{\partial U_{\frac{1}{2}}}{KT}; \quad \theta = \frac{\beta}{d^{\frac{1}{2}}};$$

$Ni$  – плотность эмиссионных центров в аморфном диэлектрике;

$\mu$  – дрейфовая подвижность носителей тока;

$E_i$  – энергия ионизации эмиссионных центров;

$\beta = l^{\frac{3}{2}}(\pi \varepsilon \varepsilon_0)$  – постоянная Пула–Френкеля;

$\varepsilon$  – низкочастотная диэлектрическая проницаемость;

$f(xshx)$  – гиперболическая функция указанного аргумента.

Надежным критерием справедливости результатов, полученных при обработке экспериментальных фактов, является нормализация вольтамперных характеристик в обобщенных координатах:

$$\ln[jT^{-3} \exp(\frac{E_i}{KT})] - \ln U^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

На рис. 6 приведены нормализованные вольтамперные характеристики пленок  $\text{Si}_3\text{O}_4$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Точки на графике – результат обработки экспериментальных данных. Гладкая кривая – аналитическая зависимость  $y(xshx)$ . Как видно на рисунке, полученные результаты хорошо согласуются с



теоретически применительно к механизму Пула-Френкля [4].

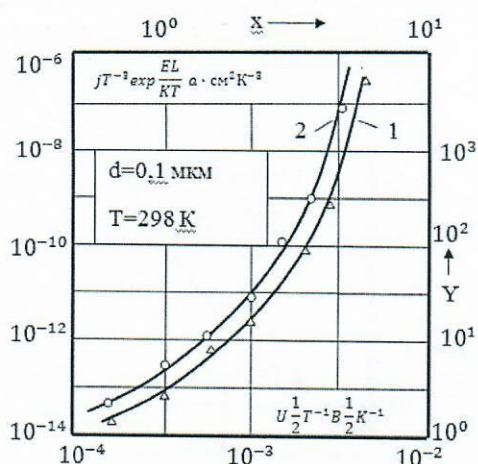


Рис. 6. Нормализованные вольтамперные характеристики пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (1),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2)

Электронные токи, протекающие через пленки, экспоненциально растут с увеличением температуры рис. 7. В области низких температур (<200 К) этот рост незначителен, а энергия активации проводимости не превышает 0,03 эВ. При температурах выше 300 К наблюдается резкое увеличение тока с ростом температуры при изменении энергии активации до 0,35 эВ.

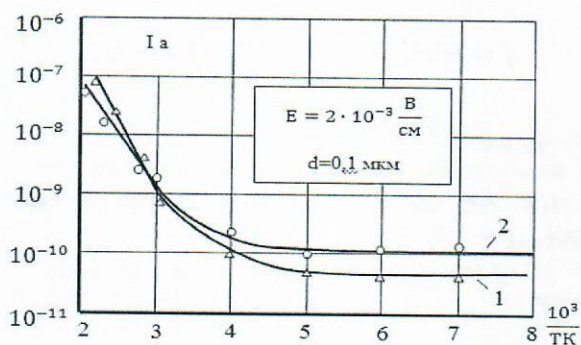


Рис. 7. Температурные зависимости тока для структур  $\text{Si} - \text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}$  (1),  $\text{Si} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}$  (2)

Зависимость проводимости диэлектрических пленок от частоты измерительного сигнала, снятая в диапазоне частот  $1 \text{ кГц} \leq \omega \leq 100 \text{ кГц}$  для пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , представлена на рис. 8. Для всех пленок преобладает зависимость  $\sigma \sim f^m$ . Значения  $m_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0,79$  и  $m_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 0,81$ . По абсолютной величине проводимость пленок на переменном токе в 20–30 раз превышает проводимость на постоянном токе [5].

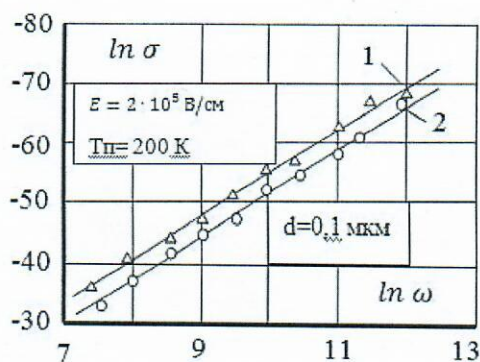


Рис. 8. Частотные зависимости проводимости пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (1),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2)

### Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что параметром-критерием качества диэлектрических пленок можно выбрать  $\text{tg} \delta$ .

Параметрами технологического процесса, определяющими свойства диэлектрических пленок, являются: ток разряда (мощность), остаточная атмосфера в подколпачном пространстве (остаточное давление паров воды), давление рабочего газа и температура подложки. Варьирование этими параметрами позволяет выбрать необходимый режим для формирования диэлектрических пленок с нужными параметрами. Дальнейшей задачей является математическое определение оптимальных управляющих воздействий, вычисленных на основе полученных результатов исследований, что послужит основой для создания автоматизированной системы получения диэлектрических пленок с заданными свойствами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гурін Д.В. Аналіз методів отримання наноструктурованих діелектричних плівок [Текст] / А.О. Андрусевиц, Д.В. Гурін, І.Н. Малая // В сб: Технологія приборостроєння, вип 3, Харків 2016 – 7с
2. Плешинцев, Н.В. Катодное распыление [Текст] / Н.В. Плешинцев. – М.: Атомиздат, 2001. – 343 с.
3. Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г. Ионно-лучевые методы получения тонких пленок. Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета // Казань, 2010. – 87 с.
4. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. М.: Техносфера, 2010. – 528с
5. Гури́н В.Н. Влияние проникающей плазмы на свойства диэлектрика и границы раздела полупроводник-диэлектрик при реактивном катодном распылении. Радиотехника и информатика, №4 2001г., с.29-32