

# Исследование и модификация технологии производства тонкопленочного конденсатора на подложке $\text{Al}_2\text{O}_3$ с целью повышения пробивного напряжения конденсатора

Д.В. Маркус, И.А. Рогачев, А. А-А. Бостанов

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

**Аннотация:** в данной работе исследованы процессы интервального осаждения диэлектрика и ионной обработки слоя металлизации нижней обкладки конденсатора, с целью исследования возможности повышения пробивного напряжения конденсатора на подложке сапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Измерялись зависимости удельного пробивного напряжения от времени ионной обработки и различных параметров осаждения диэлектрика. По результатам измерений получены оптимальные параметры процессов ионной обработки и осаждения диэлектрика, позволяющие повысить пробивное напряжение конденсатора без существенного изменения в технологическом цикле

**Ключевые слова:** конденсатор, пробивное напряжение, осаждение  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , ионная обработка, сапфир

## 1. Введение

В настоящее время подложки сапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) широко применяются в технологии производства не только в качестве основания для производства приборов КНИ (кремний на изоляторе), но и в качестве самостоятельной подложки для пассивных плат [1, 2]. Они получили большое распространение ввиду того, что, в отличие от корунда, на сапфире возможно сформировать тонкопленочные элементы, а также, ввиду того, что сапфир дешевле полупроводниковых подложек и более удобен в работе. Поскольку подобные пассивные платы используются, в основном, в качестве защитных устройств, к элементам данных схем предъявляются высокие требования по качеству и стабильности работы. Для конденсаторов в таких платах одним из самых важных параметров является пробивное напряжение. Несмотря на то, что в качестве диэлектриков для таких конденсаторов широко применяются оксид тантала ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) и оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), а также проводятся исследования для улучшения параметров этих материалов [3], в данной работе в качестве диэлектрика был выбран нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), поскольку его пленки имеют большую диэлектрическую проницаемость, чем пленки  $\text{SiO}_2$ , а также имеют хорошо отлаженную технологию осаждения.

## 2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Подготовленные пластины представляли из себя подложки сапфира диаметром 76 мм, предварительно прошедшие термообработку при 1000 °С. После термообработки проводилась ионная обработка поверхности и напыление тонкой пленки алюминия толщиной 300 нм, выступающей в роли нижней обкладки конденсатора. Готовый конденсатор в каждом из экспериментов представлял из себя тестовую структуру 1x1 мм, толщина верхней и нижней обкладок из алюминия по 300 нм. Толщина диэлектрика 250 нм. Напыление металлизации проводилось методом ионно-лучевого распыления, диэлектрик осаждался методом плазма стимулированного осаждения из газовой фазы из смеси газов моносилан ( $\text{SiH}_4$ ) + аммиак ( $\text{NH}_3$ ). Конденсаторы,

полученные без модификации технологии, имели пробивное напряжение 60-75 В. Образцы были разделены на три группы для экспериментов с ионной обработкой, интервальным осаждением диэлектрика и для объединения двух экспериментов.

Первая группа образцов использовалась для отработки и проверки ионной обработки нижней обкладки конденсатора для уменьшения шероховатости пленок. Поскольку металлическая пленка не сплошная, а имеет зернистость, распределение электрического потенциала не равномерно, и возможен термоэлектрический пробой в местах наиболее крупных зерен. Также наблюдался эффект увеличения зернистости на подложках сапфира, что еще больше увеличивало шероховатость пленки и снижало пробивное напряжение готового прибора. Для уменьшения этого эффекта проводилась ионная обработка поверхности алюминия, который выступал в роли нижней обкладки конденсатора. При ионной обработке происходит уменьшение шероховатости за счет того, что ионы аргона (Ar) распыляют верхний слой металла, который затем частично переосаждается на подложку, уменьшая тем самым шероховатость. Косвенно это можно отследить по уменьшению размера зерна пленки.

Для подбора оптимальных параметров обработки проводилась серия опытов с различным временем обработки металлизации. После обработки проводилось осаждение  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и последующее напыление верхней металлизации алюминия. Результаты измерений среднего размера зерен металлизации в зависимости от времени ионной обработки для различных образцов представлены на рис. 1.

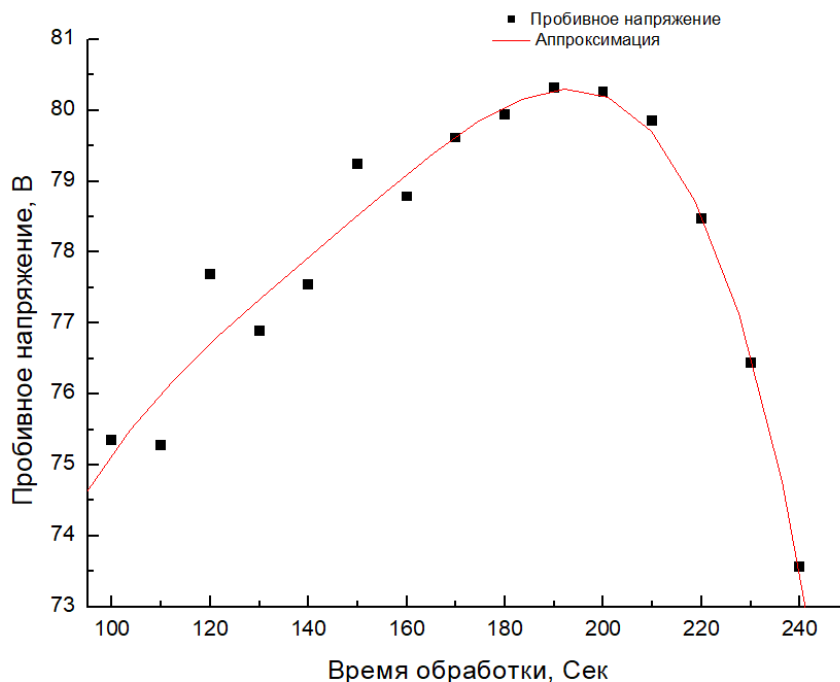


Рисунок 1. Зависимость пробивного напряжения от времени ионной обработки.

В результате анализа результатов был выбран оптимальный режим обработки: время обработки 210 сек, ток 200 мА. Значение тока выбиралось заранее, исходя из того, что высокие значения энергии ионов приводят к процессам ионной имплантации в пленку, а также к сильному распылению поверхностного слоя. График, полученный в ходе экспериментов иллюстрирует то, что при длительной обработке пластина со структурой на ней нагревается слишком сильно, в результате чего падает стабильность параметров и могут возникать дефекты пленки, вплоть до растрескивания. При этом необходимо учитывать инертность температуры, имеющую большое значение для сапфира ввиду его низкой теплопроводности. Результат до и после обработки проанализирован с помощью электронного микроскопа (рис.2,3)

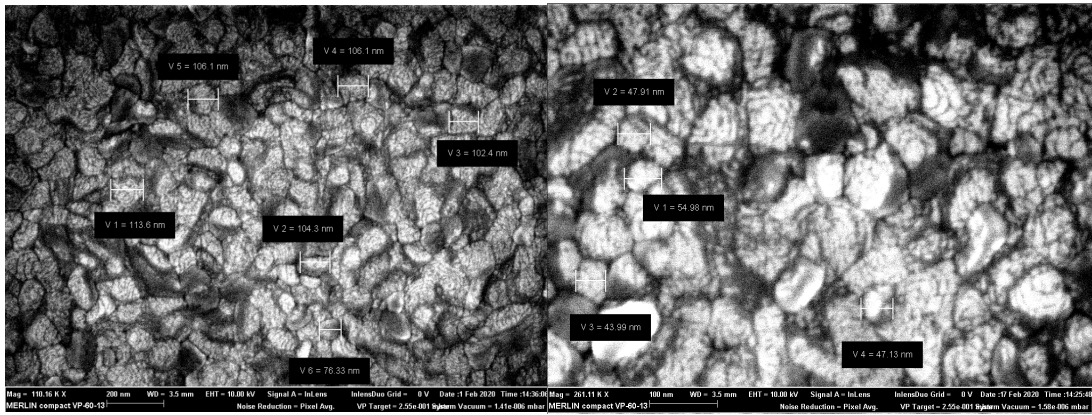


Рисунок 2,3. Размер зерен тонкой пленки алюминия до и после ионной обработки.

Вторая группа образцов использовалась для проверки и отработки процесса интервального осаждения диэлектрика  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . На практике было замечено, что при осаждении диэлектрического слоя неизменной толщины, но в несколько слоев, значение емкостей и пробивного напряжения оказываются более стабильными. На основе этого была проведена серия опытов по осаждению тонкой пленки диэлектрика на подготовленные образцы с различными интервалами перерыва между шагами осаждения и различным временем осаждения каждого слоя диэлектрика. После проводилось напыление верхней металлизации алюминия. Перерывы в процессе осаждения достигались тем, что в камеру прекращалась подача моносилана ( $\text{SiH}_4$ ), при этом генератор не отключался, и плазма продолжала гореть, дополнительно обрабатывая поверхность формирующейся пленки. По истечению времени перерыва моносилан вновь вводился в камеру. Результаты измерений удельного пробивного напряжения в зависимости от количества слоев диэлектрика представлены на рис. 4.

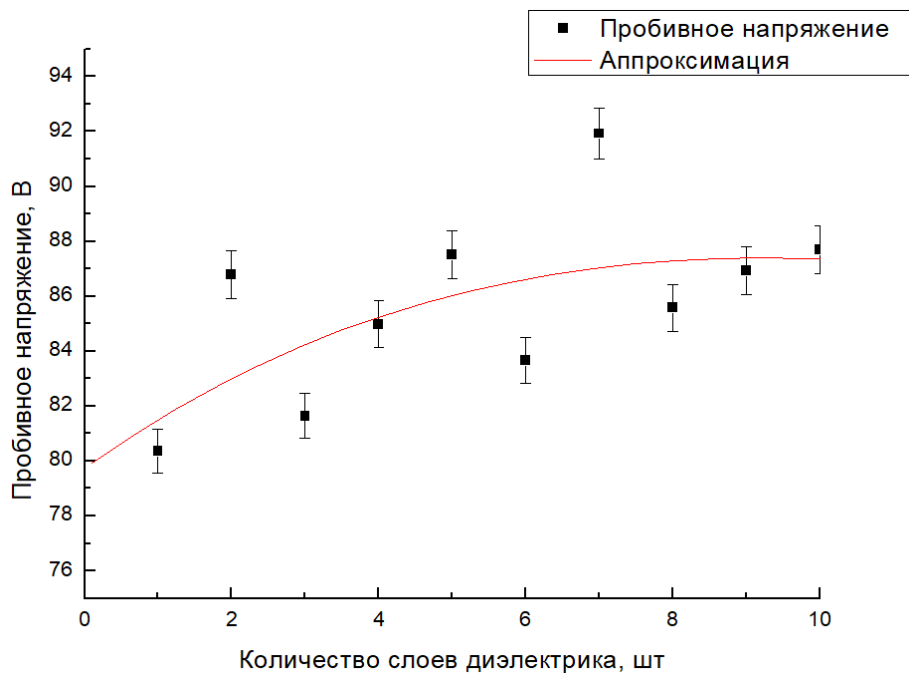
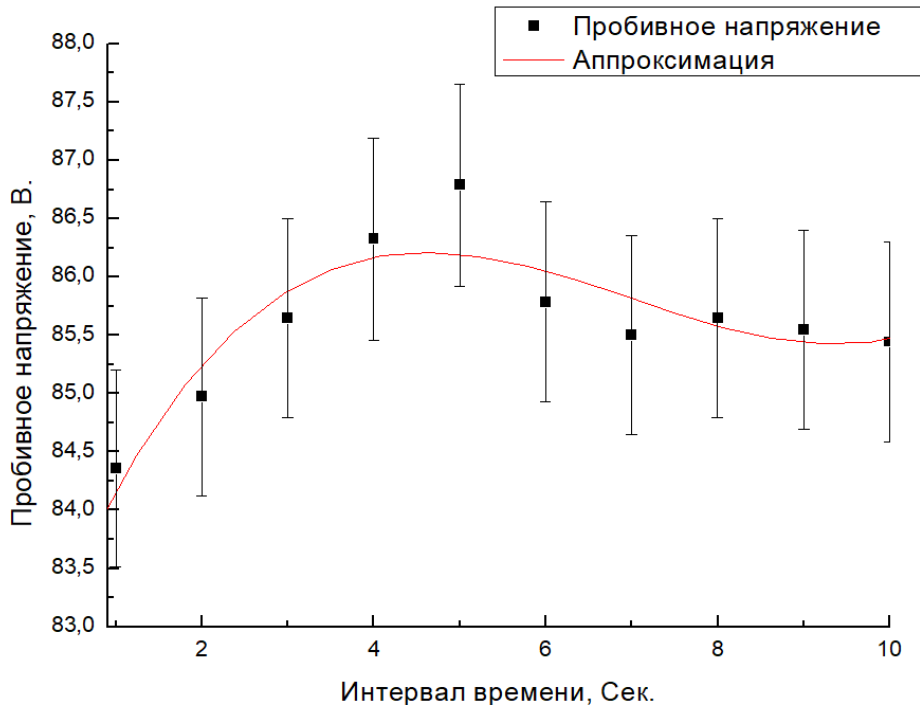


Рисунок 4. Зависимость пробивного напряжения от количества слоев диэлектрика.

Количество слоев осаждаемого диэлектрика не увеличивало общую толщину диэлектрической пленки за счет тонкой настройки параметров процесса плазмохимического осаждения и параметров процесса поджига плазмы. Толщина пленки в каждом опыте контролировалась с помощью эллипсометра.

Согласно опытам, оптимальным количеством слоев осаждения является 5-7 слоев, поскольку дальнейшее увеличение не приводит к значимым эффектам. Результаты исследования влияния интервала перерыва между шагами осаждения при осаждении 5 слоев представлены на рис. 5.



**Рисунок 5.** Значения пробивного напряжения в зависимости от интервалов между осаждениями диэлектрика.

Время перерыва менее 2 и более 5 секунд не оказывает положительного воздействия на величину пробивного напряжения. Ввиду этого оптимальным временем перерыва принято 4 секунды.

Третья группа образцов была использована для исследования комбинации двух ранее описанных экспериментов. По полученным данным были определены оптимальные параметры ионной обработки поверхности алюминия и режима осаждения диэлектрика, используя которые были сформированы тестовые конденсаторы. Комбинация двух методов позволила поднять пробивное напряжение до 95 В, поскольку позволила избежать как наличия шероховатости поверхности нижней обкладки, так и получить более плотный диэлектрик.

### 3. Заключение

В ходе работы были исследованы два метода повышения пробивного напряжения тонкопленочного конденсатора. В ходе проведения опытов было выявлено, что оба исследуемых метода, а также их комбинация, приводят к повышению пробивного напряжения итогового прибора. Механизмом повышения пробивного напряжения в случае ионной обработки служит сглаживание шероховатостей вследствие

перераспыления ионным пучком поверхностного слоя. Сглаживание микрорельефа позволяет избежать пиков с высокой напряженностью электрического поля и, как следствие, термоэлектрического пробоя в этих местах.

Механизмом повышения пробивного напряжения, в случае интервального осаждения, выступает уплотнение диэлектрика и уменьшение количества водорода в пленке, который можно удалить посредством нагревания. Эти эффекты достигаются посредством увеличения времени нахождения в реакторе установки при температуре 250 °С и уменьшения толщины осаждаемого слоя диэлектрика, при этом, поверхность формирующейся пленки получает дополнительную ионную обработку, что увеличивает ее равномерность.

Оптимальные параметры для процесса ионной обработки: 210 сек, ток 200 мА. Дальнейшее увеличение времени обработки вызывает нежелательные эффекты перегрева подложки из-за относительно низкой теплопроводности сапфира. Дальнейшее увеличение энергии ионов вызывает большое количество дефектов, связанных с ионной имплантацией, а также, начинает увеличивать шероховатость пленки ввиду сильного перераспыления приповерхностного слоя металлизации и может привести к растрескиванию пленки. Итоговое повышение пробивного напряжения с данным методом модификации с 75 В до 80 В.

Оптимальные параметры осаждения диэлектрика, а именно: количество слоев диэлектрика равное 5, а время перерыва между стадиями осаждения равное 4 секунды, выбраны исходя из того, что дальнейшее увеличение времени интервалов и уменьшение толщины слоев не дает значимых эффектов, при этом увеличивая время процесса. При этом, снижение пробивного напряжения при интервале прерывания от 4 до 1 секунды объясняется тем, что прерывание процесса влечет за собой сложности со стабилизацией плазмы и состава газовой смеси, поэтому перерывы менее 4 секунд усложняют контроль и могут приводить к ухудшению качества пленки. Экспериментально установлено, что уменьшение толщины слоя также может приводить к неравномерности толщины осаждаемого диэлектрика, что крайне нежелательно. Итоговое повышение пробивного напряжения данным методом модификации с 75 В до 85 В.

Комбинация двух методов также дает повышение пробивного напряжения, выше, чем каждый из методов по отдельности. Итоговое повышение пробивного напряжения с 75 В до 95 В.

Таким образом целесообразно в технологии производства использовать метод интервального осаждения диэлектрика вместе с ионной обработкой слоя металлизации, выступающей в роли нижней обкладки. Несмотря на усложнение технологических операций и более требовательного контроля, данная модификация технологии позволяет увеличить пробивное напряжение тонкопленочных конденсаторов без изменения технологических маршрутов или изменения конструкции готовых приборов, а также позволяют уменьшить площадь уже разработанных и производимых приборов.

#### Список литературы

1. Галкин, В. И. Промышленная электроника: Учеб. пособие / В. И. Галкин. – М.: Выс. шк., 1989. – 336 с.
2. Маскаева Л. Н. Технология тонких пленок и покрытий: учеб. пособие / Л. Н. Маскаева, Е. А. Федорова, В. Ф. Марков; [под общ. ред. Л. Н. Маскаевой]; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург.: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 236 с.
3. Метлицкая Т. В. МОП-конденсаторы повышенной емкости для субмикронных СБИС / Т. В. Метлицкая // Доклады БГУИР. – 2003. – Т. 1.– № 1. – С. 70-74.