

ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА АЛЮМИНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИС СВЧ НА ОСНОВЕ GaN

Внедрение новых конструкторско-технологических решений в производство СВЧ МИС требует всестороннего анализа результатов новых технологических процессов. В этой статье рассматривается анализ пленок оксида алюминия с целью внедрения в технологический процесс изготовления МИС СВЧ.

Атомно-слоевое осаждение (Atomic Layer Deposition, ALD) — тонкопленочная технология, которая получила широкое распространение в микроэлектронике благодаря ряду преимуществ: конформности, однородности, точному контролю толщины покрытия, хорошо воспроизводимому процессу, в т. ч. при низких температурах.

Тонкие пленки оксида алюминия, полученные методом ALD, широко распространены в технологическом процессе изготовления МИС СВЧ — это подзатворные диэлектрики, изолирующие слои, защита МИС от коррозии. Оценка пассивации изготовленного кристалла в частотном диапазоне до 64 ГГц с помощью математического моделирования показывает, что пленка Al_2O_3 толщиной 40 нм не оказывает влияния на рабочие характеристики.

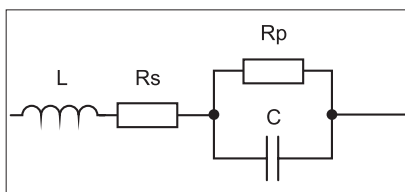
В конструкциях СВЧ МИС наиболее распространены МДМ-конденсаторы. На текущий момент для формирования МДМ-конденсаторов широкое применение получили диэлектрики с высокой (более 4) диэлектрической проницаемостью, в частности Al_2O_3 , полученный методом ALD.

Для изготовления конденсатора расчетной емкости согласно формуле (1) изменяют два параметра — площадь обкладки или толщину диэлектрика:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 S/d, (1)$$

где ϵ_r — диэлектрическая проницаемость материала; ϵ_0 — электрическая постоянная; S — площадь электродов; d — толщина диэлектрика.

Из эквивалентной схемы конденсатора (рис. 1) видно, что увеличение площади обкладок возможно до определенного предела для каждого диапазона частот. Это связано с ростом индуктивности реального элемента. Следовательно, изготовление конденса-



▲ **Рис. 1.** Эквивалентная схема конденсатора: составляющая L учитывает индуктивность выводов; параллельное сопротивление R_p позволяет учесть ток утечки через диэлектрик и поверхностные токи утечки; R_s — эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) характеризует активные потери в цепи переменного тока

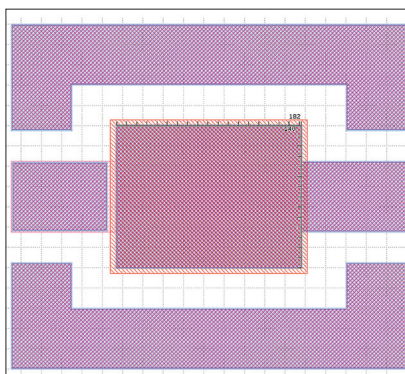
торов с высокой удельной емкостью позволяет повысить емкость конденсатора. С этой целью уменьшается толщина диэлектрика или применяются диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью. При уменьшении толщины диэлектрика снижается значение пробойного напряжения; при этом рабочее напряжение может сильно отличаться от пробойного. Это связано с тем, что при подаче напряжения на конденсатор вблизи пробойного значения происходит образование и развитие канала тока утечки, который вызывает нагрев окружающего диэлектрика, что может привести к пробую.

В рамках анализа результатов осаждения пленки Al_2O_3 в ИСВЧПЭ РАН был

изготовлен классический планарный пленочный конденсатор с рабочим размером обкладок 140×182 мкм (рис. 2).

Для изготовления конденсаторов использовалась кремниевая пластина с ориентацией (100) p -типа. Для снижения токов утечки через кремниевую пластину перед началом изготовления конденсаторов был нанесен слой нитрида кремния при температуре $250^\circ C$ толщиной 230 нм методом ICPCVD. Далее была сформирована нижняя обкладка конденсатора методом «взрывной» фотолитографии из металлов Cr–300А, Au–3000А, напыленных путем электронно-лучевого испарения. Затем методом ALD был осажден Al_2O_3 на пластине 1 при температуре $300^\circ C$ толщиной 300 А, на пластине 2 при $75^\circ C$ — толщиной 50 А, далее при $150^\circ C$ толщиной 250 А («ламинированный» диэлектрик). Для формирования рисунка на пленке оксида алюминия использовался метод обтравы по маске фоторезиста S1813 в буферном травителе, и методом взрывной фотолитографии была сформирована вторая обкладка конденсатора из металлов Ti–300А, Au–3000А, напыленных путем электронно-лучевого испарения.

Емкости изготовленных конденсаторов измерялись на LCR-метре HP 4284 А и составили 69 ± 1 пФ.

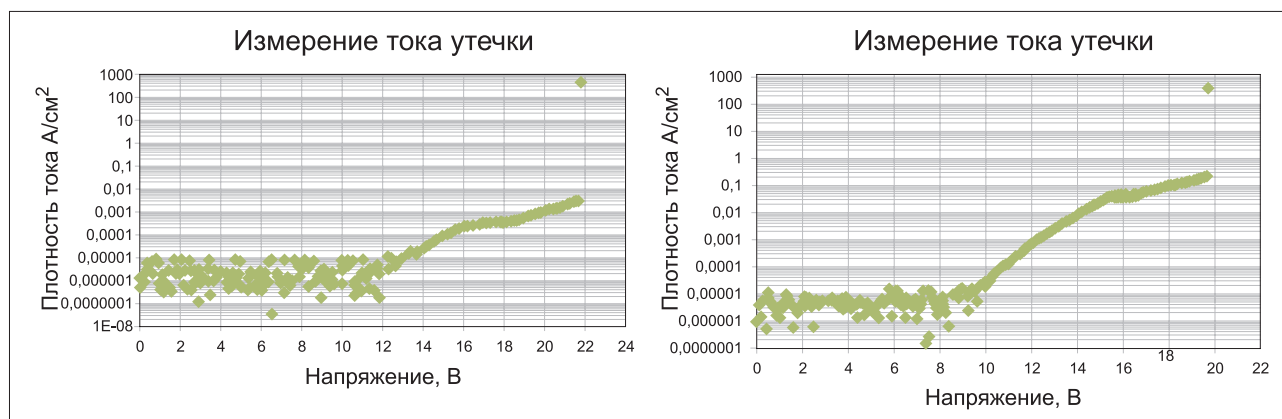


▲ **Рис. 2.** Конструкция конденсатора

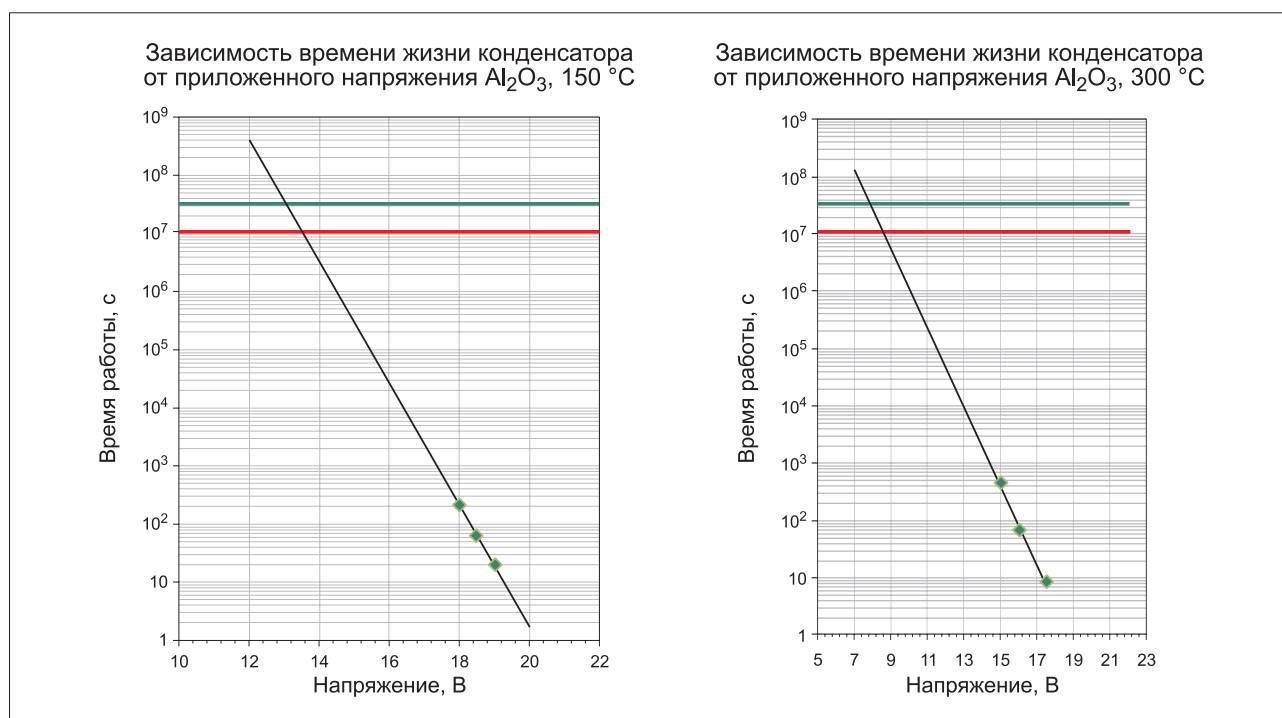
Площадь обкладки: 25480 мкм²
Размер обкладки: 140×182 мкм

Диэлектрик: Al_2O_3
Пластина 1: $300^\circ C$, 300 А
Пластина 2: $75^\circ C$, 50 А + $150^\circ C$, 250 А

Нижняя обкладка: Cr 400 Е, Pd 250 Е, Au 3000 Е
Верхняя обкладка: Ti 300 Е, Pd 500 Е, Au 4000 Е



▲ Рис. 3. Зависимость токов утечки от напряжения: а) пластина с «ламинированным» диэлектриком Al_2O_3 , 150 °С, 300 А; б) пластина с диэлектриком Al_2O_3 , 300 °С, 300 А



▲ Рис. 4. Зависимость время жизни конденсаторов от приложенного напряжения при 22 °С

Полученные зависимости токов утечки от напряжения представлены на рис. 3 с использованием анализатора полупроводниковых приборов Keysight B1500A.

Из рисунка 3 видно, что напряжение пробоя для пластины с «ламинированным» диэлектриком Al_2O_3 , 150 °С, 300 А, составило 21,8 В, а для пластины с диэлектриком Al_2O_3 , 300 °С, 300 А — 19,8 В.

На этом, как правило, изучение свойств пленки диэлектрика завершается, однако этого не достаточно для оценки применения ее в технологическом цикле изготовления СВЧ МИС, т. к. большое значение имеет рабочее напряжение конденсатора.

Исходя из линейной модели, описанной в [1–2], можно определить время жизни конденсаторов в зависимости от приложенного напряжения согласно формуле (2):

$$t(V) \sim \exp(-\gamma V), \quad (2)$$

где: $t(V)$ — время жизни в зависимости от напряжения; γ — коэффициент напряженности поля; V — напряжение.

На представленных на рис. 4 зависимостях, полученных при комнатной температуре, видно, что рабочее напряжение конденсатора с «ламинированным» диэлектриком Al_2O_3 при наработке 3000 ч составляет 13,5 В, при 9000 ч — 13 В; пробойное напряжение этих конденсаторов равно 21,8 В. У конденсаторов с диэлектриком Al_2O_3 , 300 °С, 300 А рабочее напряжение при наработке 3000 ч равно 8,6 В, при 9000 ч — 7,8 В; пробойное напряжение — 19,8 В (табл.).

Таблица. Сводные параметры, полученные в эксперименте

	Пробойное напряжение, В	Рабочее напряжение при наработке 3000 ч, В	Рабочее напряжение при наработке 9000 ч, В
«ламинированный» Al_2O_3 — 150 °С, 300 А	21,8	13,5	13
Al_2O_3 — 300 °С, 300 А	19,8	8,6	7,8

Примечание. Измерения проводились при температуре 22 °С.

Рабочее напряжение конденсатора и его пробойное напряжение связаны между собой, но по пробойному напряжению невозможно определить рабочее.

Рабочее напряжение конденсатора уменьшается при увеличении времени наработки, что связано с температурной деградацией диэлектрика. При комнатной температуре у «ламинированного» диэлектрика Al_2O_3 , 150 °С, 300 А результаты оказались выше.

Однако для применения в технологическом процессе изготовления МИС СВЧ с требованиями обеспечить работоспо-

способность при повышенных температурах планируется в ИСВЧПЭ РАН провести исследования температурной деградации конденсаторов при 85 и 150 °С.

Кроме того, планируется провести исследования по получению низкотемпературных ($T = 75$ °С) пленок Al_2O_3 . Отработаны процессы нанесения пленок

оксида гафния, оксида титана. Имеется возможность наносить тонкие пленки оксида иридия, нитрида алюминия, нитрида титана.

Особую благодарность выражаем Енюшкиной Е. Н. за процессы фотолитографии и химобработку пластины, Слаповскому Д. и Клековкину А. за про-

цессы напыления металлов, Зуеву А. В. за проведение измерений. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Berman, 1981 *Int. Reliab. Phys. Symp.*, p. 204 (1981).
2. B. Yeates, *IEEE Trans. Electron Dev.* 45, p. 939 (1998).