

Э. Г. КОСЦОВ, И. П. МИХАЙЛОВСКИЙ
(Новосибирск)

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЕ

Детально рассматриваются основные характеристики тонкопленочных конденсаторов и существующие технологические методы их производства. Обсуждается возможность применения оксидных тонкопленочных конденсаторов для построения измерительной аппаратуры с использованием тонкопленочных элементов.

Непрерывное развитие измерительной техники, создание автоматических измерительных систем, отличающихся сложностью, вследствие большого количества выполняемых функций, сопровождаются ростом требований, предъявляемых к электронному измерительному оборудованию. Очень часто требуется обеспечить надежную работу измерительной аппаратуры и приборов в тяжелых климатических условиях, при высоких и низких температурах (за пределами $\pm 100^\circ\text{C}$), в условиях радиоактивных излучений и т. п. Вместе с тем одновременно ставятся требования по сокращению габаритов и веса измерительной аппаратуры, повышению чувствительности и точности, экономичности и улучшению ряда других качественных параметров.

Возможности радикального решения указанных проблем заложены в новом направлении в электронике, получившем общее название «Микроэлектроника». Очевидные успехи, достигнутые за последнее время в области тонкопленочной техники, позволяют уже сегодня успешно решать ряд вопросов, связанных с проблемами микроминиатюризации и надежности измерительной аппаратуры.

Существующие методы получения тонкопленочных конденсаторов

Тонкопленочные конденсаторы (ТПК) широко используются при конструировании тонкопленочных схем с навесными активными элементами. Типичная конструкция ТПК приведена на рис. 1. Конденсатор состоит из подложки 1, которая является общей и для других тонкопленочных элементов схемы. На подложку последовательно одна за другой наносятся три тонкие пленки: нижняя пленка металла 2, выполняющая роль одной обкладки конденсатора, диэлектрическая пленка 3 и верхняя пленка металла 4, выполняющая роль второй обкладки конденсатора. Толщина каждой пленки может быть от 100 до 5 000—10 000 Å.

Емкость ТПК определяется по известной формуле плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon S \cdot 10^{12}}{4\pi d 9 \cdot 10^{11}},$$

где C — емкость ТПК в $n\phi$;

ϵ — диэлектрическая проницаемость пленки;

S — площадь одного электрода в $см^2$;

d — толщина диэлектрической пленки в $см$.

В качестве подложки могут быть использованы различные материалы: стекло, керамика и др. Материал для подложки выбирается с учетом того, что ТПК должен иметь прочную связь с подложкой, не ухудшающуюся со временем или под действием электрического поля. Адгезия, или сила сцепления между нижним электродом ТПК и подложкой, различна у разных подложек и зависит от свойств материала электродов.

Адгезия определяется переходным слоем, образующимся между нижней пленкой конденсатора и подложкой. Хорошо сформированный переходный слой обычно обеспечивает прочную связь. Загрязнение на стеклянной подложке, имеющее толщину всего лишь в несколько атомных слоев, может воспрепятствовать образованию плотного окисного слоя и тем самым уменьшить адгезию. Чистота подложки обеспечивается химической очисткой с последующим отжигом в вакууме, а также благодаря использованию ионной бомбардировки [1].

Нижний электрод наносится в вакууме на подогретую подложку, причем выбор температуры подложки и скорость напыления существенно влияют на структуру металлической пленки, а следовательно, и на электрические характеристики конденсатора.

Диэлектрические слои получают в основном тремя различными технологическими способами: вакуумным осаждением, нанесением материала из газовой фазы и анодным оксидированием. Процесс вакуумного осаждения наиболее универсален [2]. К недостаткам его следует отнести наличие трудноконтролируемых технологических факторов (распределение температуры по поверхности подложки, степень загрязненности последней парами масла в вакуумной камере и т. п.), что дает недостаточную воспроизводимость параметров получаемых элементов.

Наиболее распространенными методами нанесения материала из газовой фазы являются восстановление водородом и термическое разложение. Эти методы позволяют получать достаточно высококачественные отдельные образцы пленок. К недостаткам их следует отнести сложность получения однородных по свойствам пленок и трудности, встречающиеся при использовании масок.

Метод анодного оксидирования имеет один существенный недостаток: для получения диэлектрической пленки необходимо переносить подложку с напыленными нижними обкладками конденсаторов в химическую ванну. После образования необходимой толщины оксидной пленки подложка вновь помещается под вакуумный колпак для нанесения верхних электродов. Указанный недостаток в значительной мере окупается возможностью точно контролировать технологический режим (напряжение оксидирования и плотность тока, температуру раствора), а также простотой технологического оборудования. Это позволяет по-

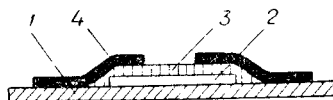


Рис. 1. Конструкция ТПК (поперечное сечение):

1 — подложка; 2 — металлическая пленка (нижний электрод); 3 — диэлектрическая пленка; 4 — металлическая пленка (верхний электрод).

лучать высокую по сравнению с другими технологическими методами воспроизводимость параметров ТПК, что особенно важно для использования ТПК в практических целях.

Наиболее важная зависимость обратной величины удельной емкости ($\frac{1}{C}$) как функции напряжения оксидирования для алюминия, тантала и титана приведена на рис. 2 [3]. Такого рода зависимость может быть использована для определения напряжения оксидирования, чтобы получить заданную емкость ТПК.

При изготовлении ТПК рассмотренными способами наиболее широко используются такие диэлектрические материалы, как монооксид кремния, двуокись кремния, пятиокись тантала, двуокись титана, двуокись циркония, окись алюминия. В таблице [3] приведены некоторые

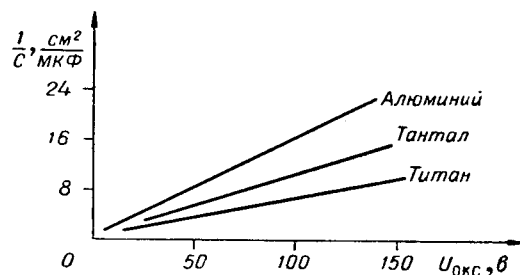


Рис. 2. Зависимость величины $\frac{1}{C}$ от напряжения оксидирования для различных металлов.

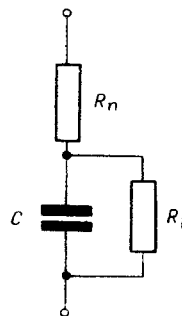


Рис. 3. Эквивалентная схема ТПК.

характеристики ТПК и материалов, используемых при их создании. Данные относятся к трем основным технологическим способам производства ТПК.

Анализируя приведенные в таблице данные, можно отметить, что существенным недостатком, ограничивающим использование танталовых конденсаторов, является ухудшение характеристик на частотах свыше 10 кГц. В значительной степени это обусловлено быстрым ростом коэффициента потерь из-за высокого эквивалентного последовательного сопротивления, которое определяется поверхностным сопротивлением обкладок ТПК.

На рис. 3 приведена эквивалентная схема ТПК. Потери в ТПК в основном проявляются в форме последовательного сопротивления R_n , которое может иметь значительную величину в связи с тем, что верхний и нижний электроды образуются из тонкопленочного материала. Последовательное сопротивление может колебаться от долей ома до нескольких сот ом в конденсаторах небольшой емкости. Параллельно подключаемое сопротивление R_d имеет обычно большую величину (более 10^7 ом [5]) и определяется свойствами диэлектрика и подложки. Таким образом, видно, что наиболее существенное расхождение между тонкопленочными и обычными конденсаторами проявляется в коэффициенте потерь ТПК, для которых последний определяется, по существу, только поверхностным сопротивлением материала электродов.

Расширение частотного диапазона может быть достигнуто благодаря применению в качестве электродов конденсатора хорошо проводящего материала, например алюминия. Естественно, что в случае ис-

Характеристики материалов, используемых для создания ТПК

Материал (диэлектрик)	Емкость, мкф/см ²	Коэффициент потерь на частоте 1 кгц, %	Рабочее напряжение	Пробное напряжение	ТКЕ, 10 ⁻⁶ /град	Диэлектрическая проницаемость	Материал обкладок конденсаторов	Частотный предел, кгц	Диапазон номиналов емкостей, мкф	Пределная температура, °С	Метод изготовления
Моноксид кремния	0,014	0,1	35	50	110	6	Алюминий или медь	2)	10 ⁻¹ —10 ⁻⁶	125	Вакуумное осаждение
Двуокись кремния	0,0046	0,1	35	50	1)	4	Алюминий или медь	2)	10 ⁻¹ —10 ⁻⁶	3)	Вакуумное осаждение
Пятиокись тантала	0,15	1,0	20	25	300	25	Тантал и алюминий	10	1—10 ⁻⁶	3)	Оксидирование
Оксид титана	0,15	1,0	35	45	1)	100	Титан и алюминий	1000	1—10 ⁻⁶	125	Оксидирование
Оксид алюминия	0,085	1,5	10	15	1)	10	Алюминий	2)	10 ⁻¹ —10 ⁻⁶	3	Оксидирование
Силикат алюминия	0,01	0,3	100	150	300	6—7	Алюминий	500	10 ⁻¹ —10 ⁻⁶	150	Нанесение из газовой фазы

Примечание. 1) Точное значение не установлено. 2) Точные пределы не установлены. Теоретически этот материал можно использовать в схеме, работающей на частотах в тысячах мегагерц. 3) Температурный предел пока не установлен; вероятно, он немного превышает 125°С.

пользования алюминия для изготовления оксидных конденсаторов размеры ТПК несколько увеличиваются вследствие того, что диэлектрическая проницаемость ϵ пленки окиси алюминия равна 8 [6], а окиси тантала и титана соответственно — 26 и 40 [7, 8] (диэлектрическая проницаемость пленок, как правило, отличается от диэлектрической проницаемости массивных образцов материала).

Среди других материалов, применяемых при изготовлении тонкопленочных конденсаторов, следует отметить силикат алюминия, различные виды халькогенидных стекол, Sb_2S_3 , MgF_2 , CaF_2 и некоторые органические полимерные материалы. Однако эти материалы не нашли широкого распространения.

* * *

В настоящее время при конструировании измерительной аппаратуры на тонкопленочных элементах представляется целесообразным использование оксидной технологии с применением нерастворяющегося электролита. Этот способ технологии выгодно отличается от других рядом преимуществ. В первую очередь это относится к возможности точного контроля толщины оксидной пленки. На каждый вольт напряжения оксидирования толщина оксидной пленки алюминия увеличивается на 13 Å [9]. Кроме того, оксидная пленка отличается высокой электрической прочностью (до 10^7 в/см), что позволяет получать ТПК с повышенной надежностью.

Из материалов, применяемых для изготовления обкладок ТПК, целесообразнее всего использовать алюминий, отличающийся высокой электропроводимостью. Кроме того, следует отметить сравнительную простоту напыления пленок алюминия достаточных толщин и их хорошую воспроизводимость. Температура подложки при напылении алюминия должна быть сравнительно низкой ($150-250^\circ\text{C}$), что позволяет достаточно точно контролировать температуру и использовать в качестве подложек широкий класс материалов.

Алюминий отличается слабой способностью к окислению в сравнении, например, с титаном. Это способствует стабильности характеристик пленок алюминия во времени. Система $Al - Al_2O_3$ отличается также термодинамической устойчивостью во времени. Это резко снижает требования к защитным покрытиям тонкопленочных элементов.

Экспериментальные данные

Были проведены исследования основных электрических свойств оксидных ТПК, использующих алюминий в качестве электродов. Хорошая воспроизводимость ТПК позволила исследовать большое количество образцов (несколько сотен ТПК на каждый исследуемый параметр). Проведенная статистическая обработка экспериментальных данных обеспечила достоверность полученных результатов.

Технологическая воспроизводимость была оценена разбросом параметров ТПК, одновременно полученных на одной подложке, и разбросом параметров ТПК, полученных на разных подложках. В первом случае разброс по величине емкости не превышал $\pm 3\%$, во втором — $\pm 10\%$. Между площадью электродов ТПК и его емкостью существует линейная зависимость, которая позволяет просто определять емкость ТПК по геометрическим размерам электродов. Существует также линейная зависимость между напряжением оксидирования и емкостью. Вели-

чина удельной емкости составляет около 600 пф/мм^2 для алюминиевых ТПК. Эти данные, в частности, согласуются с результатами работы [3].

Была исследована зависимость удельной емкости от температуры подложки (рис. 4). Температура подложки изменялась от 100 до 300°C ; при этом остальные технологические параметры оставались постоянными. Минимальное значение удельной емкости соответствовало температуре 200°C и составляло примерно 30% значения удельной емкости на крайних точках температурного диапазона.

Толщина оксидной пленки непосредственно связана с напряжением оксидирования и определяет электрическую прочность ТПК. График

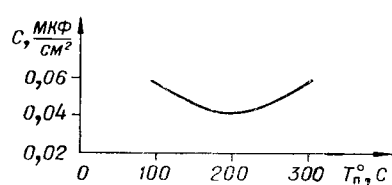


Рис. 4. Зависимость удельной емкости ТПК от температуры подложки.

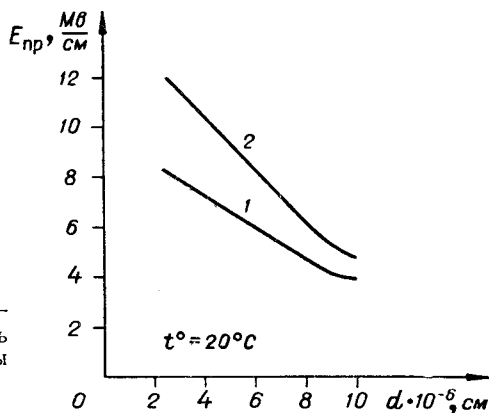


Рис. 5. Электрическая прочность ТПК в зависимости от толщины диэлектрической пленки:
1 — прямой ток; 2 — обратный ток.

зависимости электрической прочности ТПК от толщины оксидной пленки для прямого и обратного напряжения, прикладываемого к ТПК при комнатной температуре, приведен на рис. 5. Установлено, что пробойное напряжение составляет около 90% значения напряжения оксидирования.

Линейная зависимость между толщиной диэлектрической пленки и напряжением оксидирования, известная связь толщины пленки с ее электрической прочностью позволяют разработчику тонкопленочной схемы при выборе ТПК определять размеры электродов и технологический режим оксидирования.

В результате исследования свойств ТПК на постоянном токе была установлена зависимость плотности тока утечки от напряжения. График этой зависимости для конденсаторов, полученных при напряжении оксидирования 100 в , приведен на рис. 6.

Тонкопленочные конденсаторы от обычных отличаются малым абсолютным значением тока утечки. Как видно из графика, полярные свойства начинают заметно проявляться при напряжениях $30\text{—}40 \text{ в}$ и выше.

Частотный диапазон работы алюминиевых ТПК значительно шире, чем у танталовых и титановых конденсаторов. Заметное уменьшение емкости алюминиевых ТПК начинается с $10\text{—}20 \text{ Мгц}$. Измеренный с помощью высокочастотного куметра коэффициент потерь на частоте 50 Мгц составляет около 5% . Наиболее существенное влияние на коэффициент потерь оказывает толщина верхнего и нижнего электродов вследствие того, что поверхностное сопротивление зависит от толщины пленки.

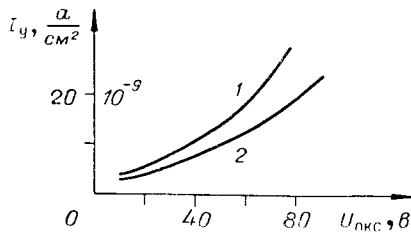


Рис. 6. Зависимость плотности ТПК от приложенного напряжения:
1 — прямой ток; 2 — обратный ток.

Температурные исследования емкости ТПК показали, что рабочий температурный диапазон ТПК значительно шире, чем у обычных конденсаторов. В диапазоне от -180 до $+240^\circ\text{C}$ температурный коэффициент емкости (ТКЕ) равен $-200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Физические процессы в ТПК

Чтобы эффективнее использовать ТПК, необходимо выяснить физические процессы, лежащие в основе их работы. Электрофизические свойства тонких пленок существенно отличаются от свойств массивных образцов материала, поэтому исследования в этой области непрерывно расширяются.

Проведенные исследования ТПК в области отрицательных и положительных температур показывают, что при различных температурах проявляется два механизма, определяющих прохождение тока через структуру $\text{Al} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}$. При низкой температуре возможна или внутренняя электронная эмиссия, или внутренняя холодная эмиссия из дефектов. При высокой температуре возможны или эффект Френкеля, или термоэлектронная эмиссия, облегченная электрическим полем (эффект Шоттки). Тот факт, что в пленках, полученных в разных технологических режимах, наблюдается одна и та же энергия активации процессов, позволяет говорить о приэлектродных процессах как определяющих прохождение тока через диэлектрическую пленку. Исследование зависимости тока через ТПК от приложенного напряжения подтверждает существование эффекта Шоттки.

Полученные в нерастворяющем электролите пленки Al_2O_3 имеют аморфную структуру. Различного рода неоднородности размеров и конфигурации кристаллитов нижней пленки, статистически распределенные по площади пленки, определяются во многом температурой подложки, устанавливаемой при напылении нижнего электрода. Поэтому очевидно, что плотность прилегания верхнего электрода к оксидной пленке будет различной при разных температурах подложки. В частности, именно этим обстоятельством можно объяснить зависимость удельной емкости ТПК от температуры подложки.

Учитывая наличие неоднородной структуры диэлектрической и металлической пленок, их статистическое распределение по площади ТПК и анализируя экспериментальные данные по току утечки, можно полагать, что в описываемых структурах прохождение тока определяется лишь небольшим участком пленки. Этот работающий участок может иметь площадь $10^{-6} - 10^{-8} \text{ см}^2$, т. е. быть фактически одним микрокристалликом.

Выводы

Оксидные алюминиевые ТПК отличаются высоким значением пробивных напряжений, широким частотным и температурным диапазонами работы и высокой воспроизводимостью по сравнению с другими ТПК. Универсальность и преимущества методов оксидной технологии, очевидно, уже в ближайшее время позволят создавать тонкопленочные схемы с активными и пассивными элементами, полученными в едином технологическом процессе.

Рассмотренные основные характеристики ТПК дают возможность сделать вывод о целесообразности их использования в тонкопленочных схемах, применяемых для разработки измерительной аппаратуры на тон-

копленочных элементах. Использование тонкопленочных элементов позволяет радикально сократить габариты и вес измерительной аппаратуры, повысить ее экономичность и обеспечить надежную работу измерительной аппаратуры в наиболее тяжелых условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Holland. The cleaning of glass in a glow discharge.— British Journal of Applied Physics, 1958, v. 9, N 10, p. 410—415.
2. L. Holland. Vacuum deposition of thin-films London, Chapman and Hall Ltd., 1956.
3. F. Huber. Thin-film of titanium and titanium oxide for microminiaturization.— IEEE Trans., 1964, v. CP—11, N 2, p. 38—47.
4. F. W. Schenk el. The film capacitance elements: Which one is best for your purpose? — Electronics, 1965, v. 38, N 2, p. 67.
5. C. D. Simmons. The design of thin-film circuits.— Semicond. Prod. and Solid State Techn., March 1964, p. 21—27.
6. W. Ch. van Geel and B. I. I. Schlen. Some properties of oxide layers produced on aluminium by electrolytic oxidation.— Philips Research Reports, 1957, v. 12, N 3, p. 240.
7. D. A. Vermilyea. The kinetics of formation of anodic Ta_2O_5 — further studies.— Journal of the Electrochemical Society, 1955, v. 102, N 11, p. 655.
8. F. Huber and J. Bloxsom. Titanium printed capacitors for microminiaturization.— IRE Trans. on Component Parts, 1961, v. CP—8, N 2, p. 83.
9. G. Hass. On the preparation of hard oxide films with precisely controlled thickness on evaporated aluminium mirrors.— Journal of the Optical Society of America, 1949, v. 39, N. 7, p. 532.

*Поступила в редакцию
7 августа 1965 г.*