

О МЕТОДЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЁНОК

Л.Н. Морев, А.Д. Рубанова, Е.И. Трофимов
(Ленинград)

В работе рассматривается метод измерения толщины и скорости напыления тонких плёнок.

Тонкие плёнки, напыленные в вакууме для целей микроэлектроники, должны обладать заданными электрическими и физическими свойствами.

Плёнки, предназначенные для использования в качестве резисторов и контактных площадок, должны иметь заданный номинал сопротивления на квадрат и температурный коэффициент сопротивления, а в качестве диэлектрика конденсаторов заданную удельную ёмкость, $\text{tg } \delta$ и температурный коэффициент ёмкости.

Для уменьшения среднеквадратичного отклонения от заданного номинала напыляемых элементов необходимо измерение свойств тонких плёнок в процессе напыления.

Измерение сопротивления на квадрат резистивных плёнок легко осуществляется с помощью свидетеля, положенного рядом с напыляемой подложкой. При измерении удельной ёмкости диэлектрика процесс измерения усложняется, так как ёмкость конденсатора можно измерить только после напыления верхнего электрода. Возможно измерение удельной ёмкости методом свидетеля, но для этого необходимо на подложке свидетеля напылять электроды

специальной формы.

Непосредственное измерение в процессе напыления температурного коэффициента сопротивлений, тангенса угла потерь диэлектрика и температурного коэффициента емкости практически невозможно.

Обычно для получения пленок с заданными параметрами используется метод измерения тех параметров тонких пленок, которые поддаются измерению и по их значению судят о величинах интересующих параметров, при условии, что известны функциональные зависимости между измеряемыми и интересующими параметрами. Параметры тонких пленок являются функциями многих переменных процесса напыления. Поэтому для измерения параметров тонких пленок необходимо использовать приборы, измеряющие условия роста тонких пленок и их толщину.

Например, две резистивные пленки из одного и того же материала, имеющие одинаковое сопротивление на квадрат, могут иметь различные температурные коэффициенты сопротивления потому, что в процессе напыления они поглотили различное количество газов или их структура будет различной, так как они формировались при различных температурах подложек.

Аналогичное замечание можно сделать о диэлектрических пленках, которые при одинаковой толщине могут иметь различные значения тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости. В данной работе рассматривается метод кварцевого генератора, резонансная частота которого изменяется с изменением массы кварцевого кристалла. Преимуществом этого метода является возможность одновременного контроля двух важнейших параметров процесса напыления: толщины и скорости напыления.

Соотношение между изменением резонансной частоты колебаний, физическими параметрами кристалла и напыляемой массой определяется из формулы:

$$\Delta f = - \frac{f^2}{N\rho} \cdot \frac{\Delta m}{S} = - C_f \frac{\Delta m}{A}, \quad (I)$$

где f — резонансная частота кварцевого кристалла;

N — частотная постоянная (для среза АТ, равная 1670 кгц/мм);

ρ — плотность кварцевого кристалла (для среза АТ, равная 2,65 гсм⁻³);

Δm — масса напыляемой пленки;

S — активная площадь кварцевого кристалла;

C_f — постоянная кварцевого кристалла (чувствительность к изменению массы).

Основные параметры кварцевых кристаллов со срезом АТ сведены в таблицу I.

Практически наблюдаются отклонения от вычисленных параметров, которые накладывают граничные условия на применимость метода и вносят погрешность в измерения.

Резонансная частота изменяется нелинейно с изменением напыленной массы. Величины изменения частоты, при которых нелинейность достигает 1%, приведены в 4 столбце. Влияние упругих свойств пленки на линейность изменения резонансной частоты начинает сказываться при толщине пленки, составляющей 1% от толщины кварцевого кристалла.

Чувствительность к изменению массы, приведенная в таблице, относится к случаю, когда напыляемая пленка покрывает всю активную часть кварцевого кристалла, т.е. большую часть поверхности, покрытой электродом. Чувствительность уменьшается при напылении вещества на площадь большую, чем площадь электрода. При изменении размеров отверстия экрана кварцедержателя необходима переградуировка прибора.

Погрешность измерения, вызываемая неидентичной установкой подложки, кварцедержателя и испарителя определяется из следующих соображений. При молекулярном режиме течения испаряемого вещества и несоосном и не перпендикулярном расположении поверхностей испарителя и подложки толщина тонкой пленки определяется из уравнения:

$$d = \frac{\mu}{\pi\rho} \cdot \frac{\cos\varphi \cdot \cos\theta}{r^2} \quad (2)$$

где ρ — плотность пленки;

r — расстояние между испарителем и поверхностью кварцевого кристалла;

φ и θ — углы между прямой, соединяющей оси источника и подложки и соответствующими нормальными к их поверхностям.

В случае соосного и перпендикулярного расположения поверхностей испарителя и подложки на расстоянии h толщина тонкой пленки определяется из уравнения:

$$d_0 = \frac{\mu}{\pi\rho} \cdot \frac{1}{h^2} \quad (3)$$

Таблица I

f МГц	$\sigma_{f_0} = \frac{f^2}{f_0}$ гц · г ⁻¹ · см ²	$\frac{dm}{S} = \frac{-df}{\sigma_{f_0}}$ г · см ²	$\frac{df}{f} = 5 \cdot 10^{-3} f_0$ гц	Толщина квар- цевого крис- талла t (мм)	Толщина тонкой пленки $\Delta t = 0,01$
Резонанс- ная частота.	Чувствитель- ность к изме- нению массы при f	Чувствитель- ность к изме- нению массы на ед. поверх- ности для $\Delta f = 1$	Сдвиг частоты, вызванный от- клонением от ли- нейности на 1%.		
I	$2,26 \cdot 10^6$	$4,42 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^3$	1,67	$1,67 \cdot 10^5$
3	$2,03 \cdot 10^7$	$4,91 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^4$	0,56	$5,6 \cdot 10^4$
5	$5,6 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^4$	0,5	$5 \cdot 10^4$
10	$2,26 \cdot 10^8$	$4,42 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^4$	0,167	$1,67 \cdot 10^4$
15	$0,1 \cdot 10^8$	$1,96 \cdot 10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^4$	0,11	$1,1 \cdot 10^4$

Толщина пленки на микросхеме относится к измеряемой толщине как

$$\frac{a_0}{d} = \frac{x^2}{h^2} \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta . \quad (4)$$

Это соотношение сохраняется при измерении скорости напыления.

Наибольшую погрешность в измерении толщины и скорости напыления вызывает уход частоты от изменения окружающей температуры.

Незащищенный кварцевый кристалл давал уход частоты 600 гц за 5 мин. При маломощных испарителях существует два пути уменьшения ухода разностной частоты: первый - экранирование кварцевого кристалла; второй - введение температурной компенсации. На рис. 1 показан кварцедержатель измерительного и эталонного генераторов. Расположение кварцевых кристаллов в одинаковых температурных условиях позволяет уменьшить уход частоты до 30 гц за 5 мин.

Применение диффузионных испарителей с мощностью больше 0,3 квт, обладающих мощным направленным тепловым излучением в сторону подложки и кварцедержателя, вызывает необходимость применения водяного охлаждения кварцедержателя. Уход разностной частоты составляет 22 гц/мин без охлаждения и 20 гц с охлаждением, при мощности испарителя 350 вт. Для уменьшения вероятности сбоя частоты измерительного генератора, вызываемой наводками в длинных проводах, соединяющих кварцевый кристалл с генератором, последний помещается рядом с кварцевым кристаллом внутри охлажденного объема (рис.2).

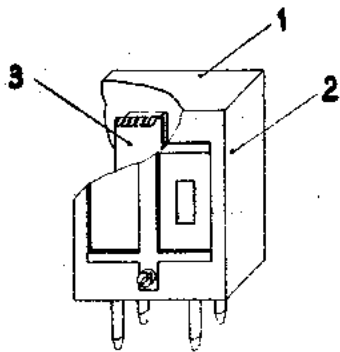


Рис. 1.

Конструкция кварцедержателя.

1 - экран, 2 - кварцевый кристалл эталонного генератора; 3 - кварцевый кристалл измерительного генератора.

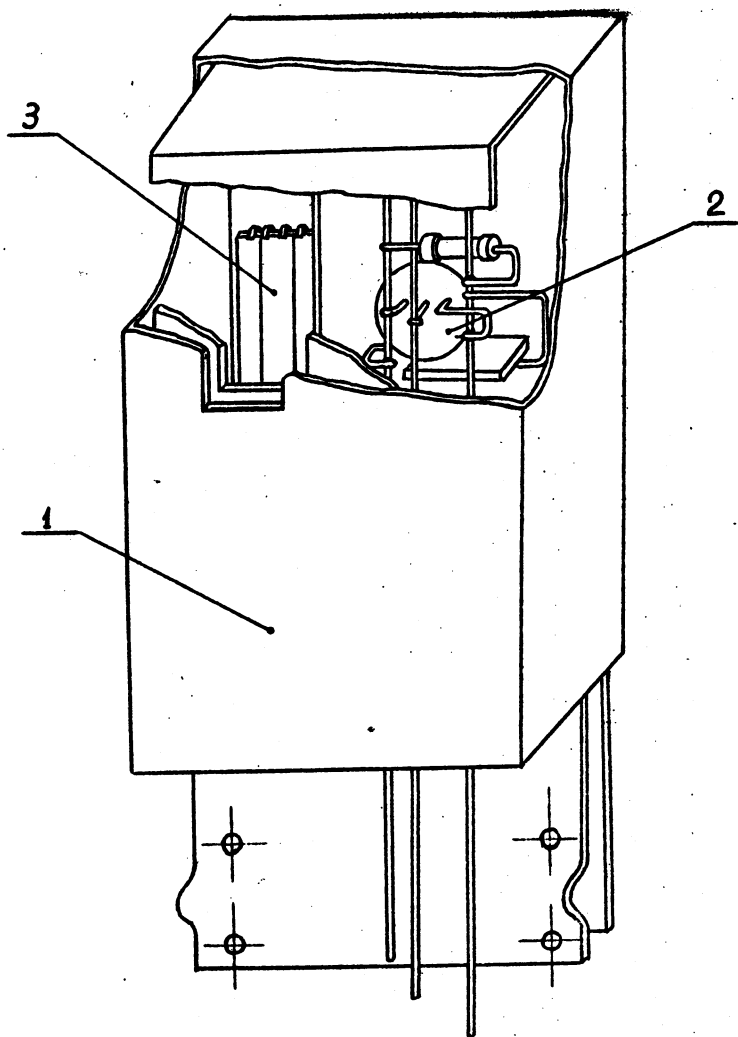


Рис. 2. Конструкция охлаждаемого кварцедержателя.
1 - экран, 2 - генератор, 3 - кварцевый
генератор

Следующим фактором, влияющим на точность измерения толщины пленки является стабильность частоты эталонного генератора. В качестве эталонного генератора необходимо применять линзовый кварц с температурным коэффициентом частоты, равным 10^{-7} град $^{-1}$.

Кроме погрешностей, вносимых самим кварцевым кристаллом, существует еще много факторов, влияющих на свойства тонких пленок и их сочетаний и присущих самому процессу испарения. Для увеличения повторяемости свойств тонких пленок необходимо контролировать возможно большее количество факторов. Необходимость контроля скорости напыления диэлектрических пленок вызвана дрейфами температуры диффузионного испарителя и изменением диэлектрической проницаемости пленки в зависимости от скорости испарения.

Блок-схема прибора для измерения толщины и скорости напыления показана на рис. 3. Измерительный (I) и эталонный (2) генераторы собраны по трехточечной схеме с емкостными связями. Применение схемы такого типа позволяет избежать возникновения паразитных колебаний. В смесителе (3) выделяются синхронизационные колебания разностной частоты, которые подаются на формирователь (4), где происходит их усиление и формирование остроконечных пусковых импульсов, предназначенных для запуска первого кipp реле (5). На выходе первого кipp реле получают остроконечные импульсы с уменьшенной длительностью, которые после усиления поступают на второе кipp реле (7). На выходе второго кipp реле получают П-образные импульсы, амплитуда и длительность которых не зависят от частоты и амплитуды разностной частоты. На емкости интегрирующей цепочки (8) выделяется напряжение, пропорциональное разностной частоте. Полученное напряжение (9) подается на управляющую сетку измерительного моста, в диагональ которого включен индикатор толщины или самописец. При использовании линейных участков характеристик ламп получается линейная зависимость между измеряемым напряжением и разностной частотой в диапазоне 300 + 100000 гц.

Для измерения скорости напыления используется дифференцирующая цепочка (II), на которую подается напряжение с конденсаторо-интегрирующей цепочки. Напряжение, пропорциональное скорости напыления, снимается с сопротивления дифференцирующей цепочки и подается на измерительную мостовую схему (12).

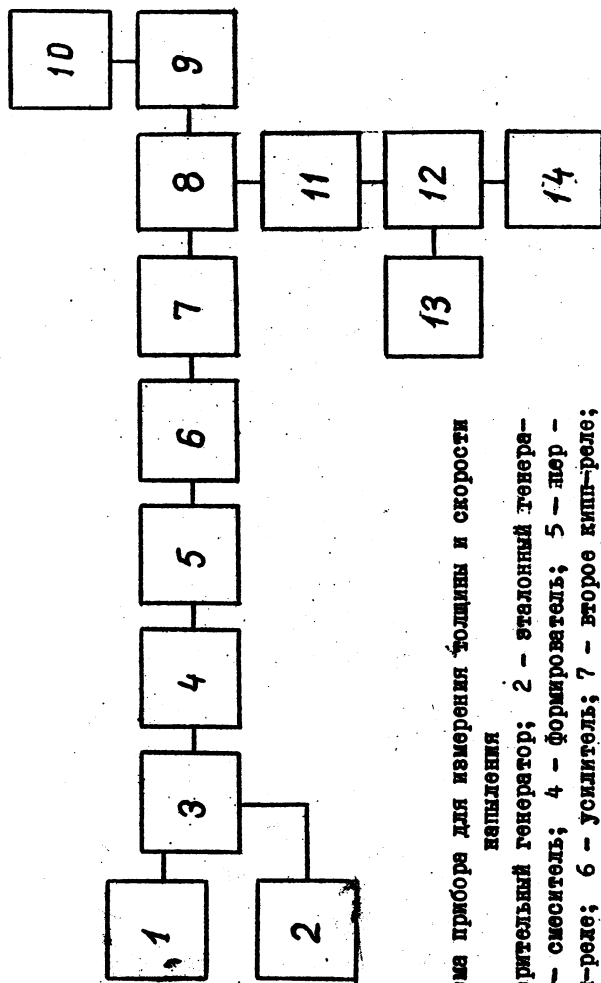


Рис. 3. Блок-схема прибора для измерения толщины и скорости напыления

1 - измерительный генератор; 2 - эталонный генератор; 3 - смеситель; 4 - формирова-
тель; 5 - пер-
вое кип-реле; 6 - усилитель; 7 - второе кип-реле;
8 - интегрирующая цепочка; 9 - измерительный мост;
10 - индикатор измеряемой толщины; 11 - дифферен-
цирующая цепочка; 12 - измерительный мост; 13-ин-
дикатор измеряемой скорости напыления; 14 - магнит-
ный усилитель

Т а б л и ц а 2

\bar{x}	6282					6549					4387				
σ	1007,52					807,9					476,8				
Допуск %	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15
P(x)	0,42	0,55	0,7	0,81	0,40	0,69	0,81	0,84	0,48	0,74	0,875	0,98	0,48	0,74	0,875

В диагональ моста включены индикатор скорости напыления и обмотка управления магнитного усилителя.

При измерении тока в диагонали моста выходной ток магнитного усилителя изменяется обратно пропорционально, поддерживая заданную скорость напыления.

Измерение толщины диэлектрических пленок показало, что несмотря на наличие прибора, наблюдается разброс толщины в некотором диапазоне. Для обобщения полученных результатов были применены методы математической статистики. Были обследованы 150 образцов, напыление которых прекращалось после достижения заданной частоты и подсчитывались среднеарифметические значения толщины и среднеквадратичные отклонения. На основании полученных результатов была вычислена вероятность напыления диэлектрических пленок с 5; 10; 15; 20% допускам по толщине. Полученные данные сведены в таблицу 2.

ВЫВОДЫ

Контроль двух параметров (толщины и скорости напыления) процесса напыления позволяет более точно контролировать электрические и физические свойства диэлектрических пленок и увеличивает воспроизводимость их параметров.