

сты проводилось с помощью цифрового частотомера, однако с учетом ряда факторов погрешность измерения средней скорости по нашим оценкам 3—5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. W. Foreman, R. D. Lewis, J. R. Thornton and H. J. Watson. Laser Doppler Velocimeter for Measurement of Localized Flow Velocities in Liquids.—Proc. IEEE, 1966, QE-2, v. 54.
2. M. J. Rudd. A Laser Doppler Velocimeter Employing the Laser as a Mixer-oscillator.—Jr. of Scientific Instruments, 1968, Ser. 2, v. 1, № 7.
3. E. R. Pike, D. A. Jackson, P. J. Bourke and D. J. Page. Measurement of Turbulent Velocities From the Doppler Shift in Scattered Laser Light.—Jr. of Scientific Instruments, 1968, Ser. 2, v. 1, № 7.
4. R. J. Goldstein and W. F. Hagen. Turbulent Flow Measurements Utilizing the Doppler Shift of Scattered Laser Radiation.—The Physics of Fluids, 1967, v. 10, № 6.
5. D. T. Davis. Analysis of a Laser Doppler Velocimeter.—ISA Transactions, 1968, v. 7, № 1.
6. Y. Yeh, H. Z. Cummins. Localized Fluid Flow Measurements with an He—Ne Laser Spectrometer.—Appl. Phys. Letters, 1964, v. 4, № 10.

Поступило в редакцию
12 июня 1969 г.

УДК 681.2.088

М. М. ГОРБОВ, Э. В. КУЗЬМИН

(Барнаул)

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЕМКОСТНОГО ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Емкостные первичные преобразователи находят все более широкое применение для измерения различного рода неэлектрических величин [1], в том числе для измерения геометрических размеров диэлектрических пленок. Известен ряд работ, касающихся применения емкостных первичных преобразователей, выполненных в виде плоских конденсаторов [2—8], однако в них недостаточно полно освещены вопросы расчета погрешностей и рекомендации по их уменьшению.

В данной статье произведен расчет некоторых относительных погрешностей емкостного первичного преобразователя при измерении ширины и толщины диэлектрических пленок.

Выведем аналитическую зависимость емкости первичного преобразователя от его параметров и параметров диэлектрической пленки. Преобразователь, выполненный в виде плоского конденсатора, между пластинами которого помещена диэлектрическая пленка с прямоугольной формой поперечного сечения, изображен на рис. 1. Пленка расположена между пластинами первичного преобразователя таким образом, что ее ребра, перпендикулярные сечению пленки, параллельны краям пластин по их длине, а большие стороны сечения параллельны пластинам первичного преобразователя. Приближенная эквивалентная схема первичного преобразователя без учета паразитных емкостей, индуктивностей, потерь, краевого эффекта и искажения поля на краях пленки, а также при выполнении условия квазистационарности изображена на рис. 2. Емкости $C_1—C_5$ рассчитываются как емкости плоских конденсаторов [9]. Конденсаторы C_1, C_5 имеют площади обкладок b_1L, b_2L и расстояние между обкладками H ; конденсаторы $C_2—C_4$ имеют площадь обкладок bL и расстояние между обкладками h_1, h_2 соответственно. Суммируя емкости плоских конденсаторов $C_1—C_5$ по правилам электротехники и сделав соответствующие преобразования, получим

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2 B L}{H} + \frac{\epsilon_0 b L}{H} \left[\frac{1}{\frac{h}{H} \left(\frac{1}{\epsilon_1} - \frac{1}{\epsilon_2} \right) + \frac{1}{\epsilon_2}} - \epsilon_2 \right], \quad (1)$$

где C — емкость первичного преобразователя; L, B, H — длина, ширина и расстояние между пластинами первичного преобразователя; b, h — ширина и толщина пленки; ϵ_1, ϵ_2 — относительные диэлектрические проницаемости пленки и среды; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная.

Рассмотрим относительные погрешности первичного преобразователя при измерении ширины и толщины пленки. Из выражения (1) видно, что емкость первичного преобразователя зависит от измеряемых и неизменяемых параметров. В общем виде эта зависимость выражается уравнением [10]

$$y = \varphi(x, z_1, z_2, \dots, z_n), \quad (2)$$

где y — выходная величина; x — измеряемый параметр; z_1, z_2, \dots, z_n — неизменяемые параметры, действующие одновременно с x .

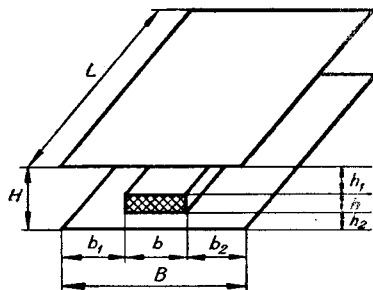


Рис. 1.

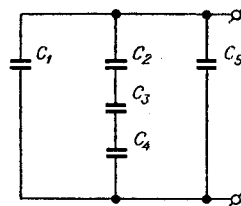


Рис. 2.

Для уменьшения погрешности измерения наиболее важным условием является выбор таких параметров первичного преобразователя, при которых отношение чувствительностей измеряемого параметра к неизменяемому было бы максимально возможным [11], так как абсолютная погрешность измерения Δx при изменении неизменяемого параметра z_i на величину Δz_i при условии, что Δz_i мала, определяется формулой [7]

$$\Delta x = \frac{\frac{\partial y}{\partial z_i} \Delta z_i}{\frac{\partial y}{\partial x}} \quad (3)$$

где $\frac{\partial y}{\partial z_i}$, $\frac{\partial y}{\partial x}$ — абсолютные чувствительности первичного преобразователя к неизменяемому и измеряемому параметрам. Заменяя в выражении (3) абсолютные значения величин на относительные и сделав ряд преобразований, получим

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{S_{z_i}}{S_x} \frac{\Delta z_i}{z_i}, \quad (4)$$

где $\frac{\Delta x}{x}$ — относительная погрешность измерения; $S_{z_i} = \frac{\partial y}{\partial z_i} \frac{z_i}{y}$; $S_x = \frac{\partial y}{\partial x} \frac{x}{y}$ — относительные чувствительности первичного преобразователя к неизменяемому и измеряемому параметрам; $\frac{\Delta z_i}{z_i}$ — относительное изменение неизменяемого параметра.

При выполнении преобразователя из высокостабильных материалов его геометрические размеры B, L, H будут иметь намного меньшие изменения, чем изменения параметров пленки, и их изменением можно пренебречь. Изменением относительной диэлектрической проницаемости ϵ_2 можно тоже пренебречь, так как при большом отношении $\frac{h}{H}$ ее влияние мало, а при малом отношении $\frac{h}{H}$ влияние относительной диэлектрической проницаемости ϵ_2 можно исключить, например с помощью аналогичного компенсирующего преобразователя. С учетом этих допущений в дальнейших расчетах будем полагать, что изменение емкости датчика вызывается только шириной, толщиной и диэлектрической проницаемостью пленки.

Определив относительные чувствительности первичного преобразователя по ширине, толщине и диэлектрической проницаемости пленки и подставив их соответствующим образом в формулу (4), получим

ющим образом в выражение (4), получим следующие выражения для расчета относительных погрешностей первичного преобразователя при измерении ширины и толщины пленки:

$$\frac{\Delta l_h}{b} = \frac{1}{\frac{h}{H} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1} \frac{\Delta h}{h}; \quad (5)$$

$$\frac{\Delta b_{\epsilon_1}}{b} = \frac{1}{\left[\frac{h}{H} \left(\frac{1}{\epsilon_1} - \frac{1}{\epsilon_2} \right) + \frac{1}{\epsilon_2} \right] (\epsilon_1 - \epsilon_2)} \frac{\Delta \epsilon_1}{\epsilon_1}; \quad (6)$$

$$\frac{\Delta h_b}{h} = \left[\frac{h}{H} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1 \right] \frac{\Delta b}{b}; \quad (7)$$

$$\frac{\Delta h_{\epsilon_1}}{h} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \frac{\Delta \epsilon_1}{\epsilon_1}. \quad (8)$$

Из выражений (5)—(8) видно, что относительные погрешности измерения ширины и толщины пленки не зависят от ширины и длины первичного преобразователя и пленки. Из выражения (8) следует, что относительная погрешность измерения толщины, вызванная относительным изменением диэлектрической проницаемости пленки, не зависит от размеров первичного преобразователя и пленки.

При выборе того или иного метода для измерения неэлектрических величин очень важно знать наименьшие погрешности, которые могут быть получены с помощью того или иного преобразователя. С этой целью определим наименьшие погрешности первичного преобразователя при измерении толщины и ширины пленки. При измерении ширины и толщины пленок в воздушной среде можно принять $\epsilon_2=1$, а $\epsilon_1 > \epsilon_2$. При этих условиях исследование формул (5)—(8) показывает, что наименьшие относительные погрешности измерения ширины пленки получаются при отношении $\frac{h}{H} = 0$, а толщи-

ны — при отношении $\frac{h}{H} = 1$. При этом выражения (5)—(8) примут следующий вид:

$$\frac{\Delta b_h}{b} = \frac{\Delta h}{h}; \quad (9)$$

$$\frac{\Delta b_{\epsilon_1}}{b} = \frac{1}{\epsilon_1 - 1} \frac{\Delta \epsilon_1}{\epsilon_1}; \quad (10)$$

$$\frac{\Delta h_b}{h} = \frac{1}{\epsilon_1} \frac{\Delta b}{b}; \quad (11)$$

$$\frac{\Delta h_{\epsilon_1}}{h} = \frac{1}{\epsilon_1 - 1} \frac{\Delta \epsilon_1}{\epsilon_1}. \quad (12)$$

Из выражений (9)—(12) видно, что наименьшие относительные погрешности измерений ширины и толщины пленки не зависят от размеров первичного преобразователя и пленки.

ВЫВОДЫ

Расчет погрешностей емкостного первичного преобразователя показал, что без учета паразитных емкостей, индуктивностей, потерь, краевого эффекта и искажения поля на краях пленки, а также при выполнении условия квазистационарности относительные погрешности измерений толщины и ширины пленки не зависят от длины и ширины первичного преобразователя и пленки. Относительная погрешность измерения толщины, вызванная относительным изменением диэлектрической проницаемости пленки, не зависит от размеров первичного преобразователя и пленки. Наименьшая относительная погрешность первичного преобразователя при измерении ширины пленки в воздушной среде может быть получена, если отношение толщины пленки к расстоянию между пластинами первичного преобразователя $\frac{h}{H}$ близко к нулю. При этом относительное изменение толщины вызывает такую же погрешность измерения, а относительное изменение диэлектрической проницаемости вызывает в $(\epsilon_1 - 1)$ раз мень-

шую относительную погрешность измерения ширины пленки; при измерении толщины отношение $\frac{h}{H}$ должно быть выбрано близким к единице, при этом относительное изменение ширины вызывает в ϵ_1 раз, а относительное изменение диэлектрической проницаемости в $(\epsilon_1 - 1)$ раз меньшие относительные погрешности измерения толщины пленки.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Л. Грохольский, В. И. Никулин. О перспективах применения емкостных датчиков.—Автометрия, 1967, № 1.
2. А. Т. Белоус, В. П. Петин. О возможности бесконтактного измерения толщины стекла.—Изв. АН ТуркмССР, серия физ.-техн., хим. и геол. наук, 1963, № 3.
3. И. Форейт. Емкостные датчики неэлектрических величин. М.—Л., «Энергия», 1966.
4. Б. З. Михлин. Высокочастотные емкостные и индуктивные датчики. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
5. R. Kautsch. Grundsätzliches zum Kapazitiven Vereisungsmessung.—Messen, Steuern, Regeln, 1962, v. 5, № 10.
6. Н. Н. Каримов, С. Ф. Корндорф. Комплексный метод бесконтактного контроля толщины жидких диэлектрических покрытий.—ИВУЗ, Приборостроение, 1967, № 4.
7. М. А. Берлинер. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. М.—Л., «Энергия», 1965.
8. K. Angermann. Verfahren zur Messung dünner Lackschichten sowie metallischer oder nichtmetallischer Folien.—Technik, 1961, 16, № 4.
9. К. Мейнке, Ф. Гундлах. Радиотехнический справочник, т. I. М., Госэнергоиздат, 1960.
10. К. Б. Карандеев, Б. В. Карпюк и др. Электрические методы автоматического контроля. М.—Л., «Энергия», 1965.
11. К. Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.

*Поступило в редакцию
24 июня 1968 г.,
окончательный вариант —
22 мая 1969 г.*