

and Manufacturing Technology.— 1980.—Vol. CHMT-3, N 4.— P. 541—550.

4. Шпотюк О. И., Гадзаман И. В., Охримович Р. В. и др. Использование керамики на основе твердых растворов (Ni, Co, Mn, Cu)<sub>3</sub>O<sub>4</sub> для толсто пленочных терморезисторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2002.— № 4—5.— С. 55—57.

5. Brunets I., Mrooz O., Shpotyuk O., Altenburg H. Thick-film NTC thermistors based on spinel-type semiconducting electroceramics // Proc. 24th Intern. Conf. on Microelectronics (MIEL 2004).— Nis, Serbia and Montenegro.— 2004.— Vol. 2.— P. 503—506.

6. Гадзаман И. В., Мруз О. Я., Шпотюк О. И., Брунец И. М. Зависимость свойств толсто пленочных терморезисторов от со-

ста базовой шпинели // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 5.— С. 62—64.

7. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment // Official Journal of the European Union.— L 37.— 13.02.2003.— P. 19—23.

8. ГОСТ 21342.7—76. Терморезисторы. Метод измерения сопротивления.

9. ГОСТ 21342.8—76. Терморезисторы. Метод измерения температурного коэффициента сопротивления.

10. White N. M., Turner J. D. Thick-film sensors: past, present and future // Meas. Sci. Technol.— 1997.— Vol. 8.— P. 1—20.

11. Dziedzic A., Golonka L. J., Kozlowski J. et al. Thick-film resistive temperature sensors // Ibid.— 1997.— Vol. 8.— P. 78—85.

Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ, к. т. н. И. А. БУЧКОВСКИЙ,  
к. т. н. И. С. РОМАНЮК

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества;  
ЧНУ им. Юрия Федьковича; ОАО «Кварц»  
E-mail: om@inst.cv.ua

Дата поступления в редакцию  
05.03.2007 г.

Оппонент А. Ф. КЕРЕНЦЕВ  
(Завод "Транзистор", г. Минск)

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

*Рассмотрены пути модификации известных методов и предложено устройство для измерения электропроводности полупроводниковых материалов. Описано функционирование отдельных блоков и устройства в целом.*

Известно множество различных способов и устройств для измерения электропроводности полупроводниковых материалов [1]. Традиционными являются зондовые методы, использующие паяные или прижимные контакты, через которые пропускают постоянный или переменный измерительный ток. Однако их применение сопряжено с рядом трудностей, в том числе с повреждением поверхности исследуемого материала в местах формирования контактов. Кроме того, возникающие контактные явления (инжекция носителей заряда и возникновение в зоне контакта потенциальных барьеров) создают побочные эффекты, искажающие результаты измерений. Всего этого можно избежать используя бесконтактные методы измерения электропроводности.

В основе бесконтактных методов измерения электропроводности вещества лежит эффект взаимодействия с ним электромагнитного поля высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний [2]. При этом СВЧ-поля применяют для исследования электропроводности тонких образцов или материалов с низкой электропроводностью. ВЧ-поля дают возможность исследовать более толстые образцы и с более высокой электропроводностью, что обусловлено поглощением электромагнитной энергии всем объемом образца, а не только его поверхностным слоем (за счет скин-эффекта). На выбор часто-

ты ВЧ-сигнала влияет произведение толщины образца и его электропроводности — чем выше это произведение, тем ниже частота используемых электромагнитных колебаний. В качестве таких полей в измерительных устройствах используют внутреннее поле датчика — конденсатора или катушки индуктивности, в котором располагают исследуемый образец.

В случае емкостного датчика его параметры определяются не только электропроводностью исследуемого образца, но и диэлектрической постоянной, что существенно для полупроводниковых материалов. Поэтому предпочтение отдают индуктивным датчикам. В качестве информационного параметра выбрана его добротность, т. е. величина потерь, вносимых в электромагнитное поле катушки за счет поглощения энергии свободными носителями заряда исследуемого материала. Известно [3], что при этом образец поглощает мощность

$$P_s = (E_T^2 / 8\pi n^2) \sigma t, \quad (1)$$

где  $E_T$  — эффективное значение напряжения на обмотке индуктивного датчика, содержащей  $n$  витков;  
 $\sigma$  — электропроводность материала образца;  
 $t$  — его толщина.

При помещении образца в поле датчика добротность катушки  $Q_k$  понижается до значения  $Q_\Sigma$ . Отсюда добротность катушки  $Q$ , обусловленная только потерями за счет поглощения энергии исследуемым образцом [1, 4], равна

$$Q = \frac{Q_k Q_\Sigma}{Q_k - Q_\Sigma}. \quad (2)$$

Как известно, величина этой добротности обратно пропорциональна мощности  $P_s$ , а соответственно, и

электропроводности  $\sigma$  контролируемого образца. Однако процедура определения этой добротности через величины  $Q_k$  и  $Q_\Sigma$  из-за нелинейной зависимости между ними усложняется, особенно при градуировке шкалы прибора в единицах электропроводности.

В [3] такая задача решается путем измерения изменений ВЧ-тока через катушку  $L$  индуктивного датчика, включенного в колебательный  $LC$ -контур, питаемый источником ВЧ-колебаний (рис. 1, а). Изменение этого тока соответствует разнице ВЧ-токов через индуктивный датчик при размещении контролируемого образца в зазоре датчика и без образца при условии, что величина  $E_T$  в процессе измерений оставалась неизменной.

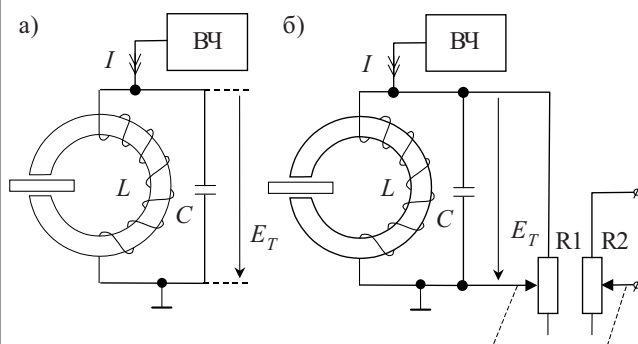


Рис. 1. Схема включения индуктивного датчика

Для реализации такого решения используется специальный автогенератор, содержащий колебательный контур с индуктивным датчиком. При выборе соответствующих транзисторов и режимов их работы измеряемый постоянный ток через индуктивный датчик равен ВЧ-току и содержит информацию об электропроводности исследуемого образца. В процессе измерений величина напряжения на контуре стабилизируется под действием цепи отрицательной обратной связи. Однако такое устройство требует сложной схемы автогенератора и не предусматривает измерений относительно эталонного образца, что желательно при входном контроле электропроводности полупроводниковых материалов, используемых для изготовления различных приборов (например термоэлектрических).

Для определения как величины электропроводности полупроводниковых пластин, так и ее отклонений от значения электропроводности эталонного образца, в настоящей работе предложены пути усовершенствования известных методов и устройств бесконтактного измерения электропроводности.

В отличие от схемы включения индуктивного датчика (рис. 1, а) нами предложена схема (рис. 1, б), где параллельно катушке датчика подключен резистор R2, один из двух одинаковых и идентично управляемых резисторов R1 и R2. Потери энергии, вносимые резистором R2, эквивалентны потерям, возникающим при взаимодействии электромагнитного поля катушки датчика с материалом исследуемого образца. В дальнейшем R2 регулируется так, чтобы добротность катушки, входящей в  $LC$ -контур, а соответственно и величина напряжения  $E_T$ , оставались неизменными при внесении исследуемого образца в за-

зор датчика и при его удалении. Для измерения изменения величины сопротивления этого резистора, а тем самым и электропроводности исследуемого образца, используется второй, идентичный, резистор R1. Такое схемное решение обеспечивает высокую линейность шкалы выходного индикатора.

Был разработан и реализован прибор для экспресс-измерений электропроводности полупроводниковых пластин и контроля ее отклонения от электропроводности эталонного образца. В приборе был использован дифференциальный метод измерений [5, с. 239—240] в сочетании с одноканальной схемой обработки информационного сигнала. Структурная схема такого устройства изображена на рис. 2.

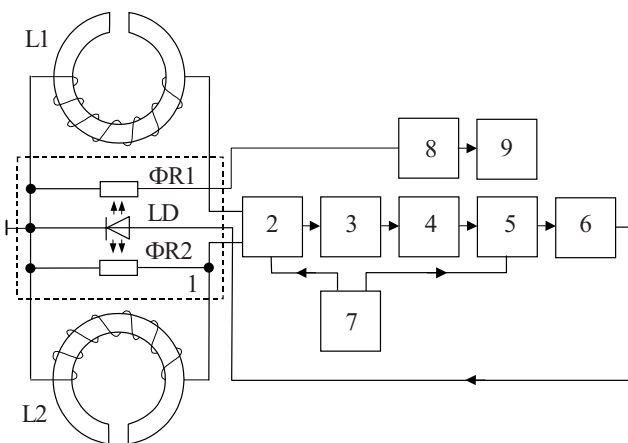


Рис. 2. Структурная схема устройства для бесконтактного измерения электропроводности полупроводниковых пластин

Устройство содержит два идентичных индуктивных датчика L1 и L2, состоящих из катушек индуктивности, намотанных на кольцевые магнитопроводы с прорезями, куда помещают исследуемый и эталонный образцы. Через коммутатор 2 они поочередно подключаются в частотоподающую цепь автогенератора 3, выполненного по схеме емкостной трехточки. Ток, потребляемый генератором, зависит от добротности катушек L1 и L2. Если значения добротности одинаковы, то потребляемый ток будет постоянным. Если значения добротности разные, то потребляемый ток имеет вид периодической последовательности прямоугольных импульсов, синхронных работе коммутатора. Усиленные блоком 4, эти импульсы поступают на вход синхронного детектора 5.

Работой синхронного детектора и коммутатора управляет периодическая последовательность импульсов с частотой 12,5 Гц, вырабатываемых узлом 7. Через усилитель постоянного тока 6 выходной сигнал синхронного детектора поступает на светодиод LD, световой поток которого изменяет величины сопротивлений идентичных фоторезисторов ФР1 и ФР2. Светодиод и фоторезисторы образуют оптопару 1. Сигнал через светодиод изменяется так, чтобы изменением сопротивления фоторезистора ФР2 уравнивать добротности катушек L1 и L2. Следовательно, помещение полупроводниковой пластины в прорезь одного из датчиков нарушает баланс добротностей и приводит к изменению сопротивлений фоторезисто-

ров. Изменение сопротивления фоторезистора ФР1 обрабатывается в блоке 8, выходной сигнал которого поступает на индикаторное устройство 9. Если исследуемый и эталонный образцы поместить в прорези разных датчиков, то индикатор покажет соответствующее отклонение электропроводности.

При изготовлении устройства использовались дискретные полупроводниковые приборы, микросхемы серий 155 и 140, а также герконовые реле. Конструктивно прибор содержит две части. Одна из них — это блок сменяемых датчиков, а вторая содержит все остальные блоки и блок питания от сети переменного тока 220 В. Смена индуктивных датчиков позволяет исследовать различные полупроводниковые пластины, перекрывая при этом широкий диапазон значений электропроводности. Использование дифференциальной схемы датчика и одноканальной схемы обработки информационного сигнала обеспечили хорошую температурную стабильность и помехозащищенность прибора. Высокая помехозащищенность от промышленных наводок (наводки с частотой 50 Гц) достигнута за счет синхронного детектирования на частоте 12,5 Гц.

Особенностью данного устройства является линейность шкалы индикатора электропроводности. Это существенно упрощает градуировку прибора (достаточно одного образца с известной электропроводностью и заданной толщиной).

Длительная эксплуатация устройства в производственных и лабораторных условиях показала его пригодность для экспресс-контроля полупроводниковых кристаллов из  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{CdSb}$ ,  $\text{CdTe}$ ,  $\text{CdHgTe}$ ,  $\text{Si}$ , электропроводность которых находилась в пределах от  $10^{-3} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$  до  $10^3 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ . Для экспресс-контроля полупроводниковых кристаллов с электропроводностью  $10^{-3} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$  (например кремниевых пластин) использовался дифференциальный индуктивный датчик с рабочей частотой 10 МГц.

На рис. 3 изображен внешний вид прибора, укомплектованного дифференциальным индуктивным датчиком с рабочей частотой 100 кГц для экспресс-контроля заготовок из кристаллов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  в виде шайб

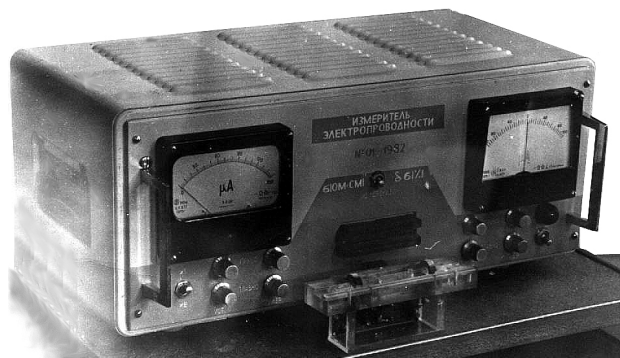


Рис. 3. Внешний вид прибора

толщиной 2 мм и диаметром 8 мм. Конец шкалы прибора соответствует  $\sigma=1500 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ . При этом  $(\Delta\sigma/\sigma)/\Delta T=5\cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$ , где  $\Delta\sigma$  — изменение нулевых показаний прибора при изменении внешней температуры на  $\Delta T \text{ }^\circ\text{C}$ . Общая погрешность измерений не более 5%.

\*\*\*

Таким образом, предложенный прибор обеспечивает бесконтактный экспресс-контроль электропроводности различных полупроводниковых материалов и может быть использован как в лабораторных, так и в производственных условиях.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Охотин А. С., Пушкарский А. С., Боровикова Р. П. и др. Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей. — М.: Наука, 1974.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Кн. 1 / Под ред. В. В. Ключева. — М.: Машиностроение, 1988.
3. Miller G. L., Robinson D. A. H., Wiley J. D. Contactless measurement of semiconductor conductivity by radio frequency free — carrier power absorption // Rev. Sci. Instrum. — 1976. — Vol. 47, N 7. — С. 799—806.
4. Популях К. С. Резонансные методы измерений. — М.: Энергия, 1980.
5. Алексеев Н. Г., Прохоров В. А., Чмутов К. В. Современные электронные приборы и схемы в физико-химических исследованиях. — М.: Химия, 1971.

#### НОВЫЕ КНИГИ

##### НОВЫЕ КНИГИ

#### Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. — М.: Техносфера, 2006. — 592 с.

Изложены физические принципы, методы разработки и варианты практического использования широкого спектра датчиков в самых разнообразных областях применений. На английском языке книга издана уже третий раз, и это не случайно, поскольку любая современная система измерений не обходится без применения датчиков, которые являются «переводчиками» окружающей аналоговой природы на язык цифровой техники.

Издание дополнено описанием датчиков, реализованных по самым современным технологиям — электромеханических микродатчиков (MEMS) и электрооптомеханических микросистем (MEOMS), без которых был бы невозможен прогресс в областях беспроводных систем телекоммуникации и отдельных областях медицины и техники.

Книга является справочным пособием для студентов, исследователей, проектировщиков датчиков и специалистов, разрабатывающих измерительные системы.

