

УДК 621.3.049.77:621.793

Совершенствование зондового метода контроля электросопротивления пленочных материалов

В. Н. Вигдорович

Институт химических проблем микроэлектроники (ИХПМ), Москва, Россия

М. А. Каримбеков

Московский энергетический институт (Технический университет), Россия

Э. С. Садыков

Ошский технологический университет, Республика-Кыргызстан

Моделированием и экспериментами обоснован переход к увеличению числа зондов и прямоугольной конфигурации их расположения при контроле электросопротивления пленочных материалов. Рекомендации реализованы при исследовании пленок различных материалов и для управления технологическим процессом в ходе формирования пленок термическим испарением и конденсацией в вакууме.

Концепция электрических зондов

Применение электрических зондов для исследования жидкостей, газов (газовой плазмы) и вакуума достаточно освещено в физико-химической литературе, в том числе в энциклопедической литературе [1]. В последующих изданиях [2, 3] такие зонды не рассматриваются. Что касается применения электрических зондов для исследования твердых тел, в том числе в пленочном состоянии (в этом случае они именуется более разнообразно: зонды, электроды, контакты, коллекторы), то это направление энциклопедиями явно

недооценивается [4]. Предположительно это обусловлено проблемой учета эффектов на границе зонд/поверхность твердого тела. Однако зондирование, ограниченное для твердого тела поверхностью, достаточно информативно и как средство диагностики, и как средство метрики.

Метод зондирования выбирается из соображений требуемой информации, природы исследуемого материала, возможности и особенностей контактов, геометрической формы образца и допустимости модельных представлений об измерении.

Многочисленные оригинальные методические разработки отражены в отраслевых (например, в [5—7] и образовательных [8] изданиях). Известно об аналогии геоэлектрической разведки и метрики полупроводников, об условиях исключения погрешностей измерения (из-за эффектов при контакте зонд/поверхность) или, наоборот, об условиях прямого измерения этих эффектов (примером может служить однозондовый метод — метод микроТЭДС [10—13]), о влиянии на результаты измерения, или об измерении неоднородности и анизотропии в компактных (массивных) образцах материалов, а также в пленочных и слоистых структурах.

Исторически поверхность зондирование твердых тел шло от применения двух зондов (при токовых омических контактах) к применению четырех линейно расположенных эквидистантных зондов, двух- или трехзондовой схеме измерения “сопротивления растекания” (используются контакты малой и большой площадей) и периферийно расположенных зондов с коммутацией их токовой и потенциальной функций (метод Ван-дер-Пау) [8]. Пятизондовый метод позволяет одновременно измерять удельное электросопротивление и толщину слоя материала [9].

Варианты расположения токовых и потенциальных зондов относительно друг друга порождают “вертикальное”, “горизонтальное” или “круговое” электрическое профилирование [5].

В концепции зондирования тонких пленок сопряжены задачи не только измерения и контроля, но и управления технологическим процессом их получения. Глэнг, Холмвуд и Куртц [4] преодолевали ошибки из-за сопротивления коммутации (присущие контролю “по свидетелю” с использованием мостовых схем измерения) и из-за “краевого” расположения контактов. В работах [15, 16] сообщалось о значительности краевого эффекта при расположении зондов в вершинах квадрата. Тем не менее современные конструкторско-технологические разработки используют именно эти технические варианты пленочных преобразователей.

Цель данного сообщения — анализ и совершенствование зондовых измерений электрического сопротивления пленочных материалов, в том числе оценка их применения для контроля и управления в тонкопленочной технологии.

Совершенствование состоит в использовании измерительных преобразователей с параллельным расположением токовых и потенциально пленочных зондов с фиксированными рациональными (в вершинах прямоугольника) геометрическими параметрами. Кроме того, анализируется применение измерительных пленочных преобразователей для обращения сигналов от преобразователя поверхностного электросопротивления (удельного электросопротивления, отнесенного к толщине пленки) в сигналы управления технологическими параметрами, в частности, при вакуумно-термическом испарении материалов с их последующей конденсацией на подложке.

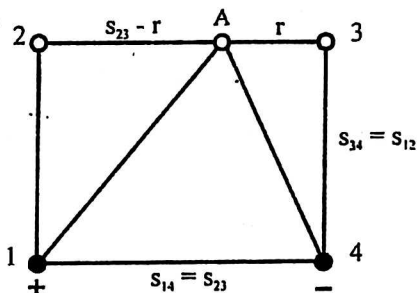
Вывод общей и частных формул

Рассмотрим расположение зондов 1, 2, 3 и 4 в вершинах прямоугольника на поверхности пленочного образца *неограниченного размера* (рис. 1). Токовые зонды — 1 и 4 (сила тока — I). Потенциальные зонды — 2 и 3 (разность потенциалов — U). Определим плотность тока j точки А, расположенной на прямой между потенциальными зондами 2 и 3

$$j = \frac{I}{2\pi d \sqrt{s_{12}^2 + (s_{23} - r)^2}} \quad (1)$$

Рис. 1. Схема относительного плоскостного расположения (план) измерительных пленочных зондов для образцов неограниченных размеров:

1 и 4 — токовые; 2 и 3 — потенциальные; модельная точка А расположена на линии потенциальных зондов



Напряженность поля от токовых зондов 1 и 4 будет равна

$$E_1 = \frac{I\rho}{2\pi d} \frac{1}{\sqrt{s_{12}^2 + (s_{23} - r)^2}}; \quad (2)$$

$$E_4 = \frac{I\rho}{2\pi d} \frac{1}{\sqrt{r^2 + s_{34}^2}} \quad (3)$$

Их составляющую в точке А между потенциальными зондами 2 и 3 определим как скалярное произведение двух векторов

$$E(r) = \left(\frac{I\rho}{2\pi d} \right) \left(\frac{s_{23} - r}{r^2 - 2s_{23}r + s_{12}^2 + s_{23}^2} + \frac{r}{s_{34}^2 + r^2} \right) \quad (4)$$

Найдем разность потенциалов

$$\begin{aligned} U &= \int_0^{s_{23}} E(r) dr = \frac{I\rho}{2\pi d} \left[\frac{1}{2} \ln(s_{12}^2 + s_{23}^2) + \frac{1}{2} \ln(s_{34}^2 + s_{23}^2) - \frac{1}{2} \ln s_{12}^2 - \frac{1}{2} \ln s_{34}^2 \right] = \\ &= \frac{I\rho}{2\pi d} \ln \sqrt{\frac{(s_{12}^2 + s_{23}^2)(s_{34}^2 + s_{23}^2)}{s_{12}^2 s_{34}^2}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где ρ — удельное электросопротивление и d — толщина пленки.

ρ легко вычисляется по значениям U , I и геометрии (s_{ij}) зондового преобразователя при известном значении d , равно как легко вычисляется значение d при известных величинах U , I и s_{ij} при известном значении ρ .

В варианте “квадратного” расположения зондов $s_{12} = s_{23} = s_{34} = s_{14} = s$, где s — расстояние между зондами, имеем

$$\rho = \frac{2\pi}{\ln 2} \frac{U}{I} d; \quad (6)$$

$$\rho_S = \frac{\rho}{d} = \frac{2\pi U}{\ln 2 I}, \quad (7)$$

где ρ_S — удельное поверхностное электросопротивление пленки, практически важный конструкторско-технологический параметр.

В варианте $s_{23} = s_{14} = s$ и $s_{12} = s_{34} = ns_{23} = ns$ имеем

$$\rho_S = \frac{2\pi U}{\ln \frac{1+n^2}{n^2} I} \quad (8)$$

и в варианте $s_{23} = s_{14} = s$ и $s_{23} = s_{14} = ns_{23} = ns$ —

$$\rho_S = \frac{2\pi U}{\ln(1+n^2) I}, \quad (9)$$

где n — число, показывающее соотношение расстояний между зондами при “прямоугольном” расположении зондов.

Можно видеть, что чувствительность (падение напряжения между потенциальными зондами) больше, когда пары токов и потенциальных зондов располагаются на больших расстояниях (на длинных сторонах прямоугольника) по сравнению с расстояниями между парами, причем тем больше, чем больше n .

Заметим, что если величину тока приравнять к величине функции поправки, то удельное поверхностное электросопротивление численно совпадает с величиной напряжения на потенциальных зондах.

Рассмотрим расположение зондов на поверхности пленочного образца ограниченного размера (рис. 2). Расположение зондов — вблизи края пленочного образца (меньше десяти межзондовых расстояний); потенциальные зонды — 2 и 3; токовые зонды — 1 и 4—12. Модельная точка А расположена на линии потенциальных зондов со смещением r .

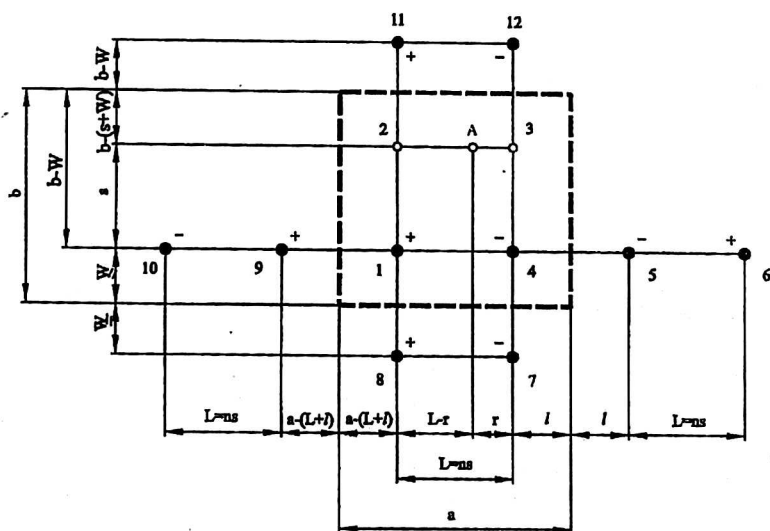


Рис. 2. Схема относительного расположения (план) измерительных пленочных зондов для образцов ограниченных размеров

Определим функцию поправки F для определения удельного поверхностного электросопротивления пленочного образца с помощью двух потенциальных и десяти токовых зондов, расположенных вблизи края [аналогично (6) и (7), (8) или (9)]

$$\rho = F \frac{U}{I}, \quad (10)$$

где

$$F = \frac{2\pi}{\ln \frac{(n^2 + 1) \left[\left(n + 2 \frac{l}{s} \right)^2 + 1 \right] \left[n^2 + \left(2 \frac{W}{s} + 1 \right)^2 \right] \sqrt{\left[n - 2 \left(\frac{a-l}{s} \right) \right]^2 + 1}}{\sqrt{4 \left(\frac{l}{s} \right)^2 + 1} \sqrt{\left[\left(2n + 2 \frac{l}{s} \right)^2 + 1 \right] \left(2 \frac{W}{s} + 1 \right)^2 \sqrt{\left[2 \frac{a}{s} - 2 \left(n + \frac{l}{s} \right) \right]^2 + 1}}}} \times \frac{1}{\sqrt{\left[2 \frac{a}{s} - \left(n + 2 \frac{l}{s} \right) \right]^2 + 1} \left\{ \left[2 \frac{b}{s} - \left(1 + 2 \frac{W}{s} \right) \right]^2 + n^2 \right\}} \cdot \sqrt{4 \left(\frac{l}{s} \right)^2 + 1} \left[2 \frac{b}{s} - \left(1 + 2 \frac{W}{s} \right) \right]^2} \quad (11)$$

Здесь a и b — длина и ширина измеряемого образца, соответственно;

l — удаление токовых зондов 1 и 4 от перпендикулярного края образца;

W — удаление зондов 1 и 4 от параллельного края образца;

s и $L = ns$ — шаг расположения зондов по длине и ширине измерительного пленочного преобразователя.

В варианте $l = 0$ и $w = 0$, $a = L = ns$ и $b = s$, $a/b = n$ и $a/s = n$ формулы (10) и (11) упрощается до вида

$$\rho_s = \frac{2\pi U}{\ln \frac{(n^2 + 1)^5}{4n^2 + 1}} I \quad (12)$$

Реализация измерительного пленочного преобразователя

Реализация измерительного пленочного зондового устройства была подтверждена при вакуумно-термическом получении пленок на ситалле (ТС 32-1 и др.) для проводящих металлов и сплавов — медь, алюминий, бронза (Бр. НМТ 5-2-0,1); резистивных керметов; полуметаллов — висмут, сурьма и полупроводников — теллурид свинца (вакуумное нанесение свинца с термообработкой в парах теллура).

Форма осаждаемой пленки (прямоугольная, не квадратная) задается маской с окном посередине. Предварительно с использованием фотолитографии формировались тонкопленочные зонды с контактными площадками. При этом вершины зондов делались выступающими (не более чем на 0,2 мм) в окне из под маски.

Автоматическое управление технологическим процессом термического испарения и конденсации в вакууме от измерительного зондового устройства достигалось обратной связью информационных каналов электрических цепей измерения и электрических цепей исполнительных механизмов. Экспериментальная калибровочная функция $\rho_S = F(d)$ имела гиперболический вид (рис. 3) и описывала по мере роста пленки переход от больших значений удельного поверхностного электросопротивления для островковой структуры пленки к меньшим и стабилизирующимся, соответствующим $\rho_S = \rho_V / d$, где ρ_V — удельное электросопротивление в компактном состоянии.

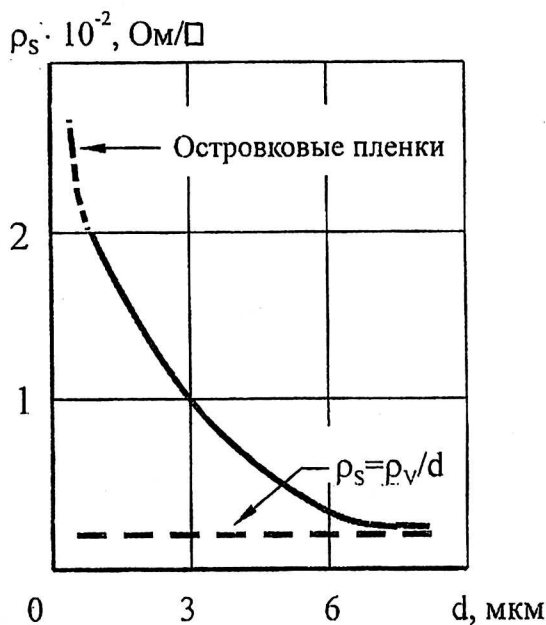


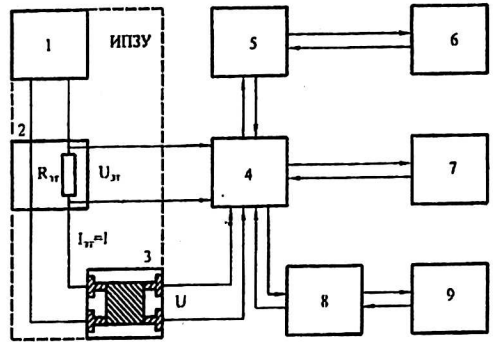
Рис. 3. Обобщенная экспериментальная зависимость удельного поверхностного электросопротивления ρ_S от толщины пленки d для проводящих и резистивных металлов и сплавов

Программирование заключалось в отключении разогрева испарителя и перекрытия заслонки при достижении заданного номинала удельного поверхностного электросопротивления. Естественно, что измерительное зондовое устройство наряду с контролем толщины пленки позволяло контролировать скорость роста пленки (через фиксацию времени).

Из блок-схемы (рис. 4) видно, что в процессе измерения от стабилизированного источника электропитания 1 через эталонный блок 2 и токовые зонды в измерительном преобразователе 3 сигнал как напряжение потенциальных зондов передается в блок интерфейсных плат 4, который сопрягает эталонирование, визуальное (дисплей) и документальное (печать) регистрирование 5 и 6 (от микропроцессорной системы автоматизированного управления 7), сопровождаемое управлением исполнительными механизмами (нагревателя и заслонки) 9 через локальное устройство связи с объектом 8.

Рис. 4. Блок-схема включения измерительного пленочного зондового устройства (ИПЗУ) в систему автоматизированного контроля и управления вакуумно-термическим осаждением проводящих и резистивных, полуметаллических и полупроводниковых пленок на диэлектрические подложки:

- 1 — стабилизированный источник электропитания; 2 — эталонный блок;
 3 — измерительный преобразователь;
 4 — блок интерфейсных плат (БИП);
 5 — вывод информации на дисплей;
 6 — вывод информации на печать;
 7 — микропроцессорная система автоматизированного управления (МПСАУ);
 8 — локальное устройство связи с объектом (ЛУСО); 9 — исполнительные механизмы



Литература

1. Физический энциклопедический словарь/Гл. ред. *Б. А. Введенский*, *Б. М. Вул*. В 5 т. Т. 2. — М.: Сов. Энциклопедия, 1962. С. 83—84.
2. Физическая энциклопедия/Гл. ред. *А. М. Прохоров*. В 4 т. — М.: Сов. Энциклопедия, 1992—1998 [репринтное издание 1983 г.].
3. Физика: Большой энциклопедический словарь/Гл. ред. *А. М. Прохоров*. — 4-е изд. — М.: Большая Российская Энциклопедия, 1999. — 994 с. [репринтное издание 1983 г.].
4. Электроника: Энциклопедический словарь/Гл. ред. *В. Г. Колесников*. — М.: Сов. Энциклопедия, 1991. — 668 с.
5. *Фистуль В. И., Мейер А. А.* Зондовые методы исследования удельного сопротивления полупроводников. — М.: Гиредмет, 1968. — 88 с.
6. Германий монокристаллический. ГОСТ 16 153—80 (Приложение 4, с. 13—17); Германий зонноочищенный. ГОСТ 16 154—80 (Приложения 1 и 2, с. 6—17); Кремний монокристаллический. ГОСТ 19 658—81 (Приложение 3, с. 17—22).
7. F 43-93: Standart Test Methods for Resistivity of Semiconductor Materials//Annual Book of ASTM Standarts. 1993. V. 10. № 5. P. 37—42.
8. *Павлов Л. П.* Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. — М.: Высш. шк., 1987. — 239 с.
9. *Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В.* Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. — М.: Радио и связь, 1985. — 264 с.
10. *Акимов Г. В.*//ДАН. 1946. Т. 51. № 3. С. 205—207.
11. *Новогрудский В. Н., Факидов И. Г.*//ФММ. 1959. Т. 7. Вып. 6. С. 903—905.
12. *Струг Е. М., Панченко Е. В.*//Металлургия. 1959. Т. 82. № 2. С. 252—255.
13. *Глазов В. М., Крестовников А. Н.*//Заводская лаборатория. 1961. Т. 27. № 4. С. 415—419.
14. Технология тонких пленок: Справочник/Под ред. *Л. Майссела, Р. Глэнга*. — Нью-Йорк, 1970.: Пер. с англ./Под ред. *М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко*. В 2 т. Т. 1. С. 175—351. — М.: Сов. радио. 1977. Т. 1. С. 664; Т. 2. С. 768.
15. *Perloff D. S.*//Solid-State Electronics. 1977. V. 20. № 8. P. 681—687.
16. *Арешкин А. А., Афанасьев А. А., Вигдорович В. Н., Гогохия В. Г.*//Электронная техника. Сер. 6: Материалы. 1991. Вып. 2 (256). С. 61—66.

Perfect probe electrical resistance test method of film materials

V. N. Vigdorovich

Institute of Chemical Problems for Microelectronics, Moscow, Russia

M. A. Karimbekov

Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Russia

E. S. Sadykov

Osh Technological University, Kirgizia Republic

The transition to the probe number increase and rectangular configuration of their disposition at electrical resistance tests of film materials have been based by modulating and experimentally. The recommendation are realized at the investigation of different film materials and for technical process control in the course of film formation by thermal vaporization and condensation in vacuum.