

Автоматизированная аппаратура для измерения сопротивления полупроводниковых слоёв и металлических плёнок

Анфимов И. М.

Приведено описание автоматизированной интегрированной с ЭВМ установки для измерения удельного электросопротивления (УЭС) полупроводниковых материалов и структур четырёхзондовым методом с линейным расположением зондов. Установка позволяет измерять УЭС объёмных материалов в интервале 10^{-3} - $6 \cdot 10^5$ Ом·см. В установке в автоматическом режиме выбирается величина тока в соответствии с требованиями отечественных и международных стандартов, проводятся измерения при двух направлениях тока. Программа установки позволяет проводить расчёт ρ пластин и слитков без ограничения толщины образца, поверхностного сопротивления структур и толщины металлических плёнок в микронном и нанометровом диапазонах. Автоматизированный манипулятор позволяет измерять карты распределения параметров в 9, 25, 49 или в 121 точках на поверхности пластин диаметром от 25 до 300 мм. При расчёте характеристик учитываются поправки на толщину, диаметр и положение зондовой головки на измеряемой пластине. Введены температурные поправки, позволяющие получать значение УЭС монокристаллического кремния при 23 °С для определения марки материала. На основе калибровочных измерений ГСО УЭС монокристаллического кремния определены погрешности измерений, которые при использовании зондовой головки С2080 (межзондовое расстояние 1,3 мм) лежат в интервале 1-5 % в зависимости от диапазона измерений.

Введение

УЭС является параметром, определяющим марку полупроводникового материала. Разброс УЭС по пластине важен для производителей монокристаллов, пластин и эпитаксиальных структур. Это параметр выходного контроля годности продукции. Для производителей полупроводниковых приборов и микросхем это технологический параметр, который необходимо контролировать в процессе изготовления структур. Наиболее точно этот параметр можно измерить зондовыми методами – двухзондовым, четырёхзондовым и методом сопротивления растекания (условно можно назвать этот метод однозондовым) [1-3]. Двухзондовый метод трудоёмок, требует изготовления образцов в виде стержней или параллелепипедов и нанесения торцевых омических контактов. Результаты измерения сопротивления растекания зависят от качества токозадающего зонда, силы прижима его к поверхности измеряемого образца и, по-существу, требуют калибровочных измерений, так как рекомендуемые формулы для пересчёта измерений в величину УЭС зависят от формы контактного острия зонда и его геометрических размеров. Наиболее распространённым методом измерения УЭС пластин в полупроводниковой отрасли в настоящее время является четырёхзондовый метод с линейным расположением зондов [1-3]. Четырёхзондовые измерения можно использовать для измерения поверхностного электросопротивления полупроводниковых структур, сопротивления металлических слоёв и при известном УЭС металла рассчитывать толщину слоя металлизации. Метод подкреплён методическими расчётами, которые позволяют снизить систематическую погрешность измерения УЭС до единиц процентов. В системе стандартов США ASTM (American Society for Testing and Materials), взятых за основу международной организацией производителей и потребителей полупроводниковой продукции SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International), издано 5 стандартов по четырёхзондовой методике, которые включают методические рекомендации по измерению УЭС слитков и пластин, поверхностного сопротивления полупроводниковых структур.

Поэтому в силу их полноты при разработке измерительного оборудования и программы расчёта сопротивления для различных структур были использованы рекомендации стандартов ASTM-SEMI. В [4] приведены основные положения международных стандартов в области четырёхзондовых измерений. Для сравнения можно отметить, что в России в настоящее время действуют только 2 стандарта, в которых в сильно урезанном варианте излагаются требования для измерения параметров слитков четырёхзондовым методом, – ГОСТ 24392-80 и ГОСТ 19658.

Наиболее известными зарубежными изготовителями аппаратуры являются фирмы SIGNATON [5] и JANDEL ENGINEERING LTD [6]. Разработчик и производитель зондовых станций компания SIGNATON формирует измерительные комплексы на базе аппаратуры фирмы Keithley, что позволяет изготавливать установки с предельными величинами измеряемых сопротивлений до ГОм. Комплекуются установки как ручными, так и автоматизированными зондовыми станциями. JANDEL ENGINEERING LTD изготавливают аппаратуру с ручным манипулятором для измерения поверхностного сопротивления в интервале 10^{-3} - $5 \cdot 10^8$ Ом /кв. В РФ имеются данные о двух производителях аппаратуры для четырёхзондовых измерений. Автоматизированный измерительный комплекс для измерения УЭС пластин (ИБК) разработан в Красноярском научном центре СО РАН и имеет пределы измерений от 0,0008 до 6000 Ом·см [7]. Представленная в данной работе аппаратура (ВИК-УЭС) может быть изготовлена как с ручным, так и с автоматизированным манипулятором и имеет пределы измерений УЭС от 0,001 до $6 \cdot 10^5$ Ом·см и поверхностного сопротивления от 0,001 до $2,7 \cdot 10^6$ Ом/кв. В статье изложены принципы работы и основные характеристики установки ВИК-УЭС.

Состав аппаратуры

Аппаратура состоит из трёх блоков: электронного измерительного блока; манипулятора с зондовой головкой; ПК для управления, обработки и хранения данных.

Одним из важных требований к электронной части установок измерения электросопротивления являются допускаемые величины измерительных токов, поскольку их высокие значения могут привести к разогреву образца, инжекции носителей через контакт, появлению термо-ЭДС и других нежелательных эффектов. При разработке установки в данной работе ориентировались на рекомендации стандарта ASTM F-84 “Test Methods for Measuring Resistivity of Silicon Wafers with an In-Line Four-Point Probe”, согласующиеся с требованиями ГОСТ 24392-80 и ГОСТ 19658. Выбор величины измерительного тока и изменение его полярности осуществляются автоматически.

Манипулятор может быть как ручным, так и автоматизированным. На рис. 1 представлена структурная схема наиболее полного комплекта с автоматизированным манипулятором. Принцип перемещения измерительной головки: предметный стол с измеряемой пластиной вращается, измерительная головка с линией зондов перпендикулярной радиусу пластины, расположенная сверху, перемещается от центра по радиусу. Вращение предметного стола и линейное перемещение головки осуществляются с помощью шаговых двигателей ДШИ-200. Прецизионное опускание головки на пластину осуществляется с помощью сервомотора. Минимальный шаг составляет 1,25 мкм, минимальный угол поворота – 0,9°. Автоматизированный манипулятор позволяет измерять карты распределения параметров в 9, 25, 49 или в 121 точках на поверхности пластин диаметром от 25 до 300 мм.

В аппаратуре используется рекомендованная ГОСТ 19658 измерительная головка С2080 с межзондовым расстоянием $s = 1,3$ мм.

Функциональная схема аналоговой части электронного блока представлена на

рис. 2.

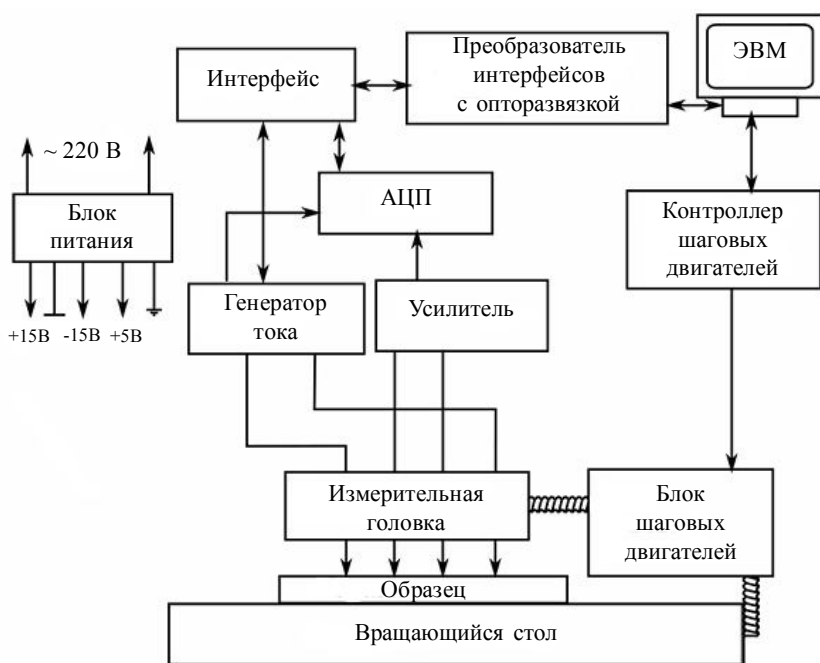


Рис. 1
Структурная схема установки

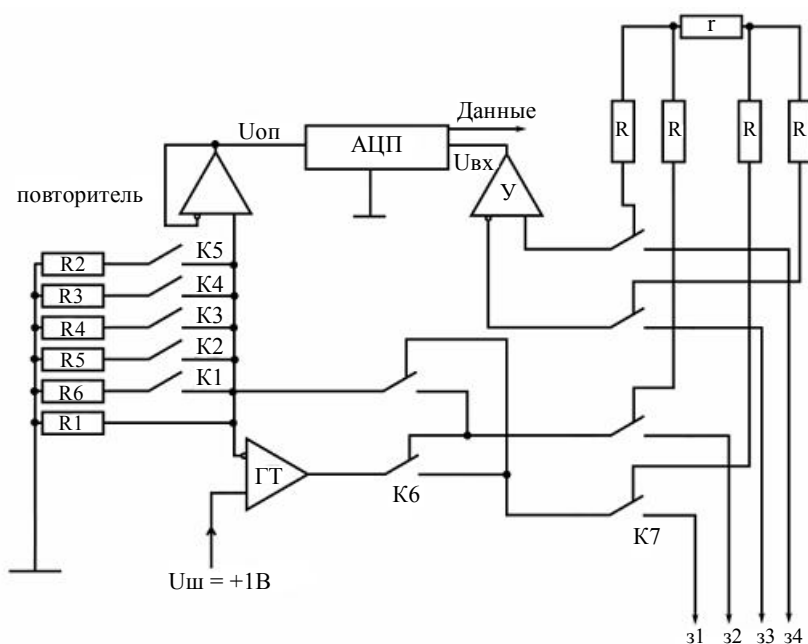


Рис. 2
Функциональная схема аналоговой части электронного блока:
31-34 – зонды измерительной головки

Генератор тока ГТ создаёт в цепи (крайние зонды – полупроводниковый материал) программно задаваемый постоянный ток двух направлений. Дифференциальный усилитель У усиливает напряжение U , создаваемое проходящим током между средними потенциальными зондами до значений, которые могут обрабатываться аналогово-цифровым преобразователем. Преобразованное в цифровой код напряжение U через блок интерфейса передаётся в ЭВМ. Узел преобразователя интерфейсов предназначен для преобразования параллельного потока сигналов в последовательный стандарта RS232C. ЭВМ работает в режиме управления измерительной частью прибора. Через блок интерфейса и преобразователя интерфейсов от ЭВМ передаются сигналы, управляющие функционированием основных узлов ГТ и АЦП.

Для создания безопасных условий работы аналоговых узлов и снижения степени влияния

индустриальных помех интерфейс обеспечивает гальваническую развязку электронного блока установки от корпуса ЭВМ и другой аппаратуры.

Величина тока изменяется от 10^{-7} А до 0,1 А, обеспечивая измерение в 7 диапазонах сопротивления. Максимальная величина измеряемого сопротивления R (отношение напряжения на потенциальных зондах к току через токовые зонды) может

быть доведена до $6 \cdot 10^5$ Ом, что позволяет измерять объёмные материалы с УЭС до $5 \cdot 10^5$ Ом·см и поверхностное сопротивление R до 2,5 МОм.

Основные формулы для расчёта удельного и поверхностного электросопротивления

Расчёт проводится согласно рекомендациям ASTM F-84 по обобщённой формуле:

$$\rho = F(D/s) * F(d/s) * F(t) * R, \quad (1)$$

где $F(D/s)$ – поправочный коэффициент на диаметр образца D, $F(d/s)$ – коэффициент, зависящий от толщины образца d, $F(t)$ – поправочный коэффициент на температуру образца t.

Для $d/S > 2,5$ $F(D/S) = 1$. В остальных случаях для центра образца

$$F(D/s) = \ln 2 / \{ \ln 2 + \ln [((D/s)^2 + 3) / ((D/s)^2 - 3)] \}. \quad (2)$$

$F(D/s)$ зависит от толщины образца:

$$\text{при } d/s < 0,1 \quad F(d/s) = \pi d / \ln 2; \quad (3)$$

$$\text{при } 0,1 < d/s \leq 4 \quad F(d/s) = 2 \pi s / F_{kl}(d/s); \quad (4)$$

$$\text{при } d/s > 4 \quad F(d/s) = 2 \pi s. \quad (5)$$

Поправочный множитель $F_{kl}(d/s)$ рассчитывается по формуле:

$$F_{kl}(d/s) = 1 + 2 \sum \{ [1/4 + (nd/s)^2]^{-1/2} - [1 + (nd/s)^2]^{-1/2} \} + \sum [3/4(s/nd)^3 - 45/64(s/nd)^5 + 315/512(s/nd)^7], \quad (6)$$

первое суммирование ведётся по n от 1 до M, где M – целая часть $(2s/d) + 1$, второе суммирование – от M + 1 до N, где N – наименьшее значение n, для которого второе слагаемое меньше 10^{-5} .

Поправочный коэффициент на температуру образца

$$F(t) = 1 - C_t (t - 23), \quad (7)$$

где t – температура образца в градусах по шкале Цельсия, C_t – поправка, рассчитывается по данным ASTM F-1527 “Guide for Application of Silicon Standard Reference Materials and Reference Wafers for Calibration and Control of Instruments for Measuring Resistivity of Silicon”:

$$C_t = \sum A_n (\ln p)^n \quad (n = 0, k). \quad (8)$$

A_n – коэффициенты, представленные в табл. 1; k = 17 для МК, легированного фосфором, k = 13 для МК, легированного бором.

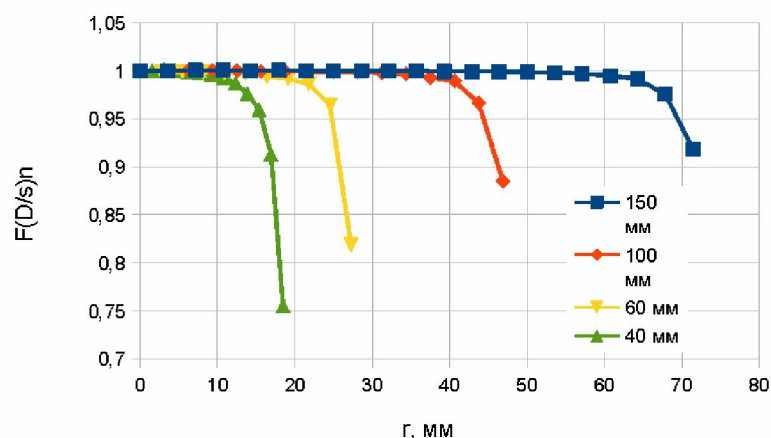


Рис. 3

Зависимость относительной поправки на диаметр $F(D/s)n = F(D/s)(r) / F(D/s)(0)$ от расстояния r от центра пластины

диаметре пластины 150 мм в точках на краю пластины (5-6 мм от края) отсутствие такой поправки даст 5% систематической ошибки.

При измерении сопротивления металлических плёнок микронных и субмикронных

В [4] проведено сравнение температурной поправки C_t стандартов ASTM и ГОСТ. Последние грубо округлены. Различие величин, установленных в ГОСТ и ASTM, достигает 30%.

При измерении распределения сопротивления по пластине учитывается зависимость $F(D/s)$ от положения зонда (расстояния от центра пластины). Важность такой поправки при оценке разброса сопротивления иллюстрирует рис. 3. Даже при

толщин работает условие (3). Поскольку УЭС металла можно считать известным, по (1) можно рассчитать толщину слоя металлического покрытия.

Результаты измерений

Пример карты УЭС в пластине МК, выращенного методом Чохральского, и распределения поверхностного сопротивления слоя Al приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

Проведённые калибровочные измерения комплекта ГСО УЭС МК показали, что случайная погрешность измерения лежит в пределах 0,5-2%, систематическая погрешность не превышает 3% в интервале значений УЭС ГСО.

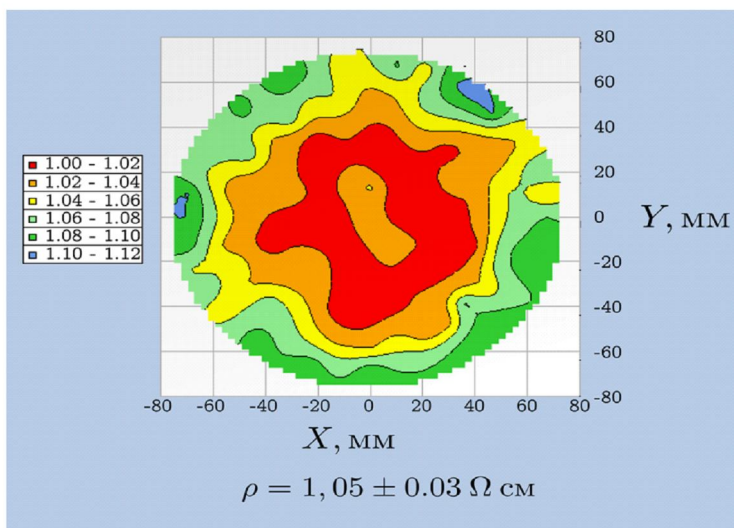


Рис. 4
Пример карты распределения УЭС МК.
Диаметр пластины 150 мм

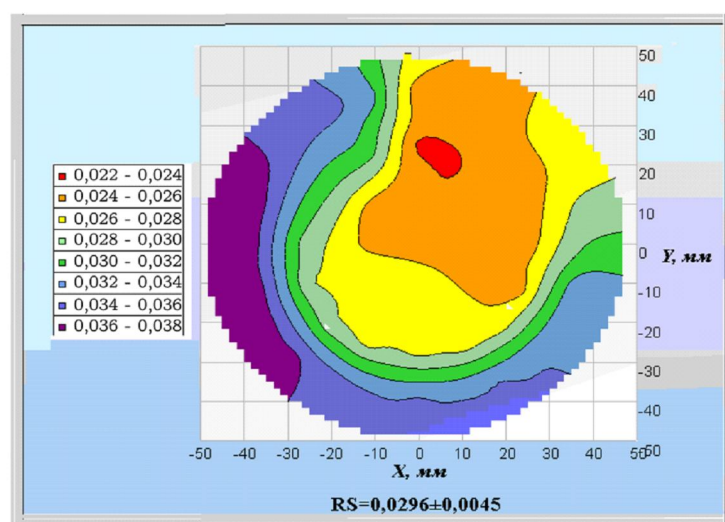


Рис. 5
Пример карты распределения поверхностного сопротивления
слоя Al на окисленной пластине кремния (Ом/кв).
Диаметр пластины 100 мм

Выводы

Разработана автоматизированная аппаратура для измерения удельного и поверхностного электросопротивления полупроводниковых слитков, пластин, диффузионных и эпитаксиальных слоёв полупроводниковых материалов. Пределы измерения УЭС объёмных материалов составляют 10^{-3} - $6 \cdot 10^5$ Ом·см. В программном обеспечении учтены все требования международных стандартов в части учёта поправок на температуру, толщину и диаметр пластины, расположение измеряемой точки на пластине, что обеспечивает низкие значения систематической погрешности (не выше 2-5 % в зависимости от интервала измерений).

Работа выполнена на оборудовании центра коллективного пользования "Материаловедение" НИТУ "МИСиС".

Литература

1. Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. Исследование параметров полупроводниковых материалов и структур. – М.: Радио и связь. – 1985. – 264 с., ил.
2. Dieter K. Schroder: Semiconductor material device characterization. JOHN WILEY @ SONS, INC. – 1998.

3. W. R. Runyan, T. J. Shaffner: Semiconductor Measurements & Instrumentations. McGraw-Hill Companies, Inc. – 1998.

4. Кобелева С. П. Методы измерения электрофизических параметров монокристаллического кремния. – Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73. – № 1. – С. 60-67.

5. Интернет сайт фирмы Signaton: www.signatone.com

6. Интернет сайт фирмы Bridge Tecnology: www.four-probes.com

7. В. Ф. Шабанов, А. Л. Асеев, В. В. Калинин, С. П. Кобелева, Н. А. Терехин, П. Л. Подгурский, В. П. Иванов, Э. Ф. Гринин, В. М. Владимиров, П. И. Панов, В. П. Ермаков, Б. А. Шагаров. Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) для определения удельного электрического сопротивления (УЭС) в пластинах кремния четырёхзондовым методом. Тезисы: Совещание Кремний-2004 Иркутск. – 5-9 июля 2004 г. – С. 225.

ФГУП "НПП "ПУЛЬСАР"



ИМС для управления и защиты силовых транзисторных ключей (СТК) серии 1474

Драйвер для управления СТК на основе МДП и БТИЗ

Тип ИС	$U_{OH}, В$	$U_{OL}, В$	$I_{CC}, МА$	$t_r(t_f), НС$ (один источник питания)	$t_r(t_f), НС$ (два источника питания)	$t_{DHL}(t_{DLH}), НС$ (один источник питания)	$t_{DHL}(t_{DLH}), НС$ (два источника питания)	Ближайшие аналоги
1474АП1Т	8... U_{CC1}	max 1	max 15	max 130	max 170	max 50	max 50	-

ИМС защиты СТК и формирования времятоковых характеристик

Тип ИС	$U_{OH1}, В$	$U_{OL1}, В$	$I_{OL1}, МА$	$I_{OH2}, МА$	$I_{OL2}, МА$	$I_{OH3}, МА$	$I_{OL3}, МА$	$t_{PHL}(t_{PLH}), НС$	$t_{PHL}(t_{PLH}), НС$ (рег.)	$t_P, НС$	Ближайшие аналоги
1474ХХ1Т	min 2,5	max 0,5	min 1	max 1	7...12	max 1	7...12	max 125	max 250	max 400	-

Согласующий преобразователь для двухсторонней оптической связи с ИМС защиты и управления СТК

Тип ИС	$U_{OLf}, В$	$I_{IL}, МА$	$I_{IH}, МКА$	$I_{CC}, МА$	$t_{PHL1}, НС$	$t_{PLH2}, НС$	$t_{PHL3}(t_{PLH3}), НС$	$t_{PHL4}(t_{PLH4}), НС$	Ближайшие аналоги
1474ХХ2Р	max 0,5	max -0,5	max 5,0	max 25	max 60	max 60	max 60 (80)	max 60 (80)	-

Микросхема управления и защиты СТК

Тип ИС	$U_{OH}, В$	$U_{OL}, В$	$U_{UVLO+}, В$	$U_{UVLO-}, В$	$U_{DESAT}, В$	$I_{CC}, МА$	$I_{O(PEAK)}, А$	$t_{TLH}(t_{THL}), НС$	t_{PHL} DESAT, МКС	Ближайшие аналоги
1474ХХ3Т	min 15	max -5,0	11,6...13,5	min 11,0	4,0...7,5	max 18	min 2,5	max 170 (170)	1...10	-

ФГУП «НПП «ПУЛЬСАР» 105187 г. Москва, Окружной пр., 27, тел.(495)3665101, факс (495)3665583, www.pulsarnpp.ru