

изводительной и качественной резки металлов вне рамок регламентных ограничений, снижающих эффективность их применения.

Список литературы

1. *Кайдалов, А. А.* Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов / А. А. Кайдалов. – Киев: Экотехнология, 2007. – 456 с.
2. *Анахов, С. В.* Об изменении регламентных норм при производстве сварных соединений с применением плазменной прецизионной «финишной» резки металлов / С. В. Анахов, И. Ю. Матушкина, А. В. Матушкин // Техническое регулирование в едином экономическом пространстве: сборник статей X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Екатеринбург, 18 мая 2023 г.; ФГАОУ ВО «РГППУ». – Екатеринбург, 2023. – С. 77–86.
3. *Аверьянова, И. О.* Технология машиностроения. Высокоэнергетические и комбинированные методы обработки: учебное пособие / И. О. Аверьянова, В. В. Клепиков. – Москва: ФОРУМ, 2022. – 304 с. – ISBN 978-5-91134-268-5.
4. *Солоненко, О. П.* Высокоэнергетические процессы обработки материалов / О. П. Солоненко, А. П. Алхимов, В. В. Марусин [и др.]; отв. ред. акад. РАН М. Ф. Жуков, чл.-корр. РАН В. М. Фомин. – Новосибирск: Наука, 2000. – 425 с. – ISBN 5-02-031528-1.
5. *Патент № 2754817* Российская Федерация, МПК В23К 10/00 (2006.01), Н05Н 1/26 (2006.01), F23D 14/42 (2006.01). Плазмотрон: № 2021107721: заявл. 24.03.2021: опубл. 07.09.2021 / Пыкин Ю. А., Анахов С. В., Матушкин А. В.; заявитель ООО НПО «Полигон».
6. *Anakhov, S. V.* Development of Equipment and Technology for Precision Air-Plasma Cutting of Plate Steel / S. V. Anakhov, B. N. Guzanov, A. V. Matushkin. – DOI: 10.3103/S096709122201003X // Steel in Translation. – 2022. – Vol. 52. – № 1. P. 19–26.
7. *Евтихеев, Н. Н.* Лазерные технологии: учебное пособие / Н. Н. Евтихеев, О. Ф. Очин, И. А. Бегунов. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2020. – 240 с.

УДК 621.315.5-419.4

Е. И. Докучаев, Г. Н. Мигачева

E. I. Dokuchaev, G. N. Migacheva

ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Екатеринбург

Russian State Vocational Pedagogical University, Ekaterinburg

dokuchaiev20@mail.ru; galnic42@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХ ЗОНДОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОВОДИМОСТИ МАТЕРИАЛОВ USING A FOUR PROBE SETUP TO ANALYZE THE CONDUCTIVITY OF MATERIALS

Аннотация. Учитывая уникальные свойства данных материалов и их широкое применение в различных отраслях, оценка теплофизических характеристик является критически важной для разработки новых технологий и материалов. В статье рассмот-

рены методы и виды установок, отображена спроектированная модель установки 43МИС, описан её принцип работы и указаны основные элементы.

Abstract. *Considering the unique properties of these materials and their wide application in various industries, the evaluation of thermophysical characteristics is critical for the development of new technologies and materials. In the article methods and types of installations are considered, the designed model of installation 43MIS its principle of operation and main elements are shown in the article.*

Ключевые слова: *четырёх-зондовый метод; установка; двумерное удельное сопротивление; коэффициента Холла.*

Keywords: *four-probe method; setup; two-dimensional resistivity; Hall coefficient.*

Редкоземельные металлы и их сплавы находят всё большее применение в различных отраслях науки, техники и народном хозяйстве. Свойства редкоземельных металлов во многом необычны и мало изучены. В данной работе проведено исследование температуропроводности некоторых сплавов систем лантан-празеодим (La-Pr) и лантан-неодим (La-Nd) в твёрдом состоянии при высоких температурах. Предварительные сведения о фазовых диаграммах этих сплавов взяты из справочника. Исследование свойств сплавов выполнено с использованием метода температурных волн, позволяющего проводить измерения с высокой точностью на образцах малых размеров [1].

Сплавы редкоземельных металлов привлекают повышенное внимание научного сообщества и промышленных предприятий благодаря их уникальным физическим и химическим свойствам, которые находят применение в широком спектре отраслей, включая электронику, металлургию и медицину. Таким образом, понимание теплофизических характеристик данных материалов имеет критическое значение для разработки новых технологий и материалов.

Изучение зондового метода важно, потому что он является эффективным инструментом для проведения точных измерений и получения информации о свойствах материалов. Понимание его преимуществ и навыки работы с этим методом могут значительно повысить качество и эффективность научных исследований, инженерных разработок, а также применения в практических областях.

При исследовании электрических свойств полупроводников и производстве полупроводниковых материалов, структур и приборов возникает необходимость измерения удельного электрического сопротивления полупроводниковых материалов. Измерение удельного сопротивления осуществляется не только для установления его значения, но также и для определения других важных параметров полупроводникового материала на основе теоретических расчетов или дополнительных экспериментальных данных. В идеальном случае измерение удельного сопротивления полупроводниковых материалов

не должно приводить к разрушению образца и не должно требовать его специальной обработки [4].

Выбор метода исследования

Электрическое сопротивление – основная электрическая характеристика проводника, величина, характеризующая противодействие электрической цепи или ее участка электрическому току. Также сопротивлением могут называть деталь (её чаще называют резистором), оказывающую электрическое сопротивление току.

Сопротивление (часто обозначается буквой R) считается, в определённых пределах, постоянной величиной для данного проводника и её можно определить, как:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (1)$$

где R – сопротивление;

U – разность электрических потенциалов на концах проводника, измеряется в вольтах;

I – сила тока между концами проводника под действием разности потенциалов, измеряется в амперах.

Электрическое сопротивление однородного образца определяется следующим образом:

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{\rho l}{wd}, \quad (2)$$

где R – электрическое сопротивление [Ом];

S – площадь поперечного сечения;

d – толщина материала;

w – ширина;

l – длина.

Если мы возьмем квадрат поверхности материала, то есть $l = w$, то из выражения (2) получим соотношения для поверхностного сопротивления:

$$R_{\square} = \frac{\rho}{d}, \quad (3)$$

где R_{\square} – поверхностное сопротивление [Ом/□] (Ом на квадрат).

Другими словами, поверхностное сопротивление представляет собой сопротивление квадратного участка поверхности материала толщиной d. Причем оно не зависит от величины сторон этого квадрата. Понятие поверхностного сопротивления также применимо и для неоднородно легированных слоев.

С помощью данного параметра можно определить исходное качество материала, выявить проблемы технологического процесса при проведении межоперационного контроля отдельных слоев, а также осуществить выходной контроль качества материала.

Для измерения сопротивлений используются различные методы, которые выбираются в зависимости от условий измерения, характера объектов, требуемой точности и скорости проведения измерений. Наиболее распространенные следующие:

Метод амперметра вольтметра – простой способ измерения сопротивления при постоянном токе, который основан на законе Ома. Омметр подключается к измеряемому объекту, и измеряется напряжение и ток для определения значения сопротивления.

Мостовой метод – используется для измерения больших и очень малых сопротивлений. Этот метод основан на принципе балансировки двух сопротивлений с помощью переменных условий.

Метод четырехзондового измерения – обеспечивает точные измерения сопротивлений, исключая влияние сопротивления соединительных проводов.

Метод периодического сигнала – используется для измерения сопротивлений при переменном токе. Этот метод основан на измерении фазового сдвига между входным и выходным сигналами.

Зондовый метод обеспечивает точные измерения сопротивления материалов благодаря прямому контакту с поверхностью или образцом. Небольшое воздействие на объекты. Обычно требует незначительного воздействия на изучаемый объект, что делает его более мягким по сравнению с другими методами, такими как разрушающие испытания. Зондовый метод позволяет получить информацию о внутренних характеристиках материала, таких как электрическое, тепловое или механическое состояние.

Метод применяется к плоскому образцу произвольной формы; толщина образца должна быть намного меньше расстояния между омическими контактами, которые помещены по периметру образца. Если известна толщина проводящего слоя, то можно определить трёхмерное (обычное) удельное сопротивление, умножив двумерное удельное сопротивление на толщину проводящего слоя. Проведённые исследования позволяют в итоге определить следующие наиболее интересные свойства материала:

- Тип легирования (то есть, является ли этот материал полупроводником р-типа или n-типа);
- Двумерную концентрацию основных носителей заряда (если известна толщина проводящего слоя – трёхмерную, разделив двумерную концентрацию на толщину проводящего слоя);

- Холловскую подвижность основных носителей заряда (отличается от дрейфовой подвижности).

Этот метод позволяет проводить экспресс-измерения образцов любой формы, включая ограниченные по размеру и тонкие пленки, при условии наличия плоской поверхности. Он применим как для пластин, так и для объемных слитков (измерения проводятся по торцу).

Для измерений применяются зонды из вольфрамовой проволоки диаметром 0,1–0,15 мм, заостренные электролитически. Радиус острия составляет около 10 мкм, а расстояние между зондами – 0,5 мм. Зонды опускаются до соприкосновения с пленкой, нанесенной на подложку. Крайние зонды используются для подачи тока, а два средних – для измерения разности потенциалов высокоомным электронным вольтметром [2].

Наличие непосредственного контакта с образцом: иглы измерительной головы могут оставлять царапины или проколы измеряемого слоя;

Нагрев образца вследствие протекания измерительного тока;

Изменение расстояния между иглами измерительной головы вследствие её износа;

Термо-ЭДС из-за не идеальности контактов и неоднородности образца.

Для тонкого образца формула для расчета поверхностного сопротивления в общем случае выглядит следующим образом [5]:

$$R_{\square} = \frac{\pi V_{23}}{\ln 2 I_{14}}, \quad (4)$$

где V_{23} – напряжение между иглами 2 и 3;

I_{14} – измерительный ток.

В данной формуле нет параметра, отвечающего за расстояние между иглами, – он сокращается, если этот параметр одинаков для всех игл. Поэтому если в ходе эксплуатации измерительной головы расстояние между иглами со временем изменяется, то это значительно влияет на результат измерения.

Виды установок и их аналоги.

Качество материалов имеет огромное значение при производстве изделий микроэлектроники. Одним из способов оценки этого качества является измерение удельного и поверхностного сопротивления с помощью четырехзондового метода. Эти электрофизические параметры помогают контролировать материалы, обнаруживать ошибки в технологическом процессе и предсказывать возможные отклонения характеристик конечных продуктов [5].

Измерительные комплексы

В советское время наиболее популярным был прибор ИУС-3 (рис. 1). Данный прибор включает в себя четырехзондовую голову, способную плавно

опускаться за счет своей тяжести. Встроенный источник-измеритель проводит измерение поверхностного сопротивления, которое может быть использовано для расчета удельного сопротивления в случае однородного образца. Основным недостатком такой системы является измерительная голова, которая в силу отсутствия на тот момент технологии подпружиненных пробников была реализована на плоских пружинах (рис. 2). Из-за этого головы быстро приходили в негодность, и на данный момент такие системы требуют замены в связи с отсутствием производства расходных элементов [5].



Рис. 1. Прибор ИУС-3 [5]

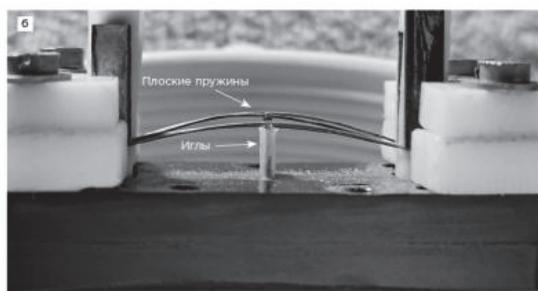


Рис. 2. Прибор ИУС-3 измерительная зона [5]

Однако современные технологии позволили создать более конкурентное решение, способное выполнять порядка миллиона контактирований с воспроизводимостью 20 мкм. На сегодняшний день компания «Остек-Электро» освоила производство измерительных голов для измерения поверхностного и удельного сопротивления четырехзондовым методом (рис. 3).



Рис. 3. Измерительные головы производства ООО «Остек-Электро» [5]

Благодаря собственному производству такие параметры головы, как усилие прижатия, расстояние между иглами и радиус закругления игл могут быть подобраны под конкретные исследуемые материалы. В качестве игл используются надежные подпружиненные пробники от немецкой компании Ingun. Технология монтажа пробников предусматривает их установку в посадочную гильзу, исключая люфт и латеральное перемещение иглы во время контакта. Такие измерительные головы также успешно применяются в автоматических установках [5].

В качестве преемника установки ИУС-3 ООО «Остек-Электро» успешно поставляет собственную разработку ИУС-7а (рис. 4).



Рис. 4. Установка ИУС-7а ООО «Остек-Электро» [5]

Установка содержит высокоточный источник-измеритель Keithley серии 2400 с базовой погрешностью 0,012 % (внесен в Госреестр СИ), ручное контактирующее устройство с возможностью плавной регулировки усилия прижатия и быстрой замены измерительной головы, персональный компьютер с программным обеспечением «Кристалл».

Экспериментальная установка

Установка 4ЗМИС использует метод ван дер Пау для измерения двумерного удельного сопротивления и коэффициента Холла. Этот метод применяется к плоскому образцу произвольной формы, где толщина образца меньше расстояния между физическими контактами. При известной толщине проводящего слоя можно определить трёхмерное удельное сопротивление, умножив двумерное удельное сопротивление на толщину слоя.

Установка оснащена лезвиями, лезвия имеют возможность раскачиваться и нивелировать погрешность соприкосновения, так же отсутствует деформация пробника (заготовки), из-за датчика соприкосновения, что позволяет направить сигнал шаговым двигателям.

Крепление заготовки состоит из тисков, крепление механическое.

Индикатор оснащён иглой по которой проходит электрический ток, что позволяет при касании не отогнуть лезвия (зонды), подаётся сигнал на шаговый двигатель и останавливает при касании, и проводится линейное измерение.

Так же установка оснащена шаговым механизмом что позволяет более точное перемещение каретки.

Данная установка работает по принципу рычагов:

1 этап

На прижимное устройство устанавливается заготовка Ш1×Г1×Д20 мм. При этом цифровой индикатор (6) должен быть отведен для установления заготовки, рычаг (3) при помощи шагового двигателя кладется на заготовку и фиксируется.

2 этап

Производится калибровка индикатора (6) по длине, используя машинные нули это означает, что координаты станка в программе переводятся в абсолютные значения. Это означает, что станок перемещается к указанным координатам относительно абсолютной начальной позиции, определенной в программе. Игла, которая находится на кончике Индикатора касается лезвия рычага (3), обнуляется линейные размеры, при этом рычаг (5) должен быть поднят. Индикатор (6) оттягивается при помощи двигателя индикатора фиксируется.

3 этап

Опустить рычаг (5) на определенную длину заготовки в дальнейшем фиксируется, индикатор (6) опускается на лезвия рычага и касается иглой, производится линейные измерения, через эти контакты вдоль образца пропускают электрический ток. Производится измерения разности потенциалов (7).

Разработанная экспериментальная установка приведена на рис. 6.

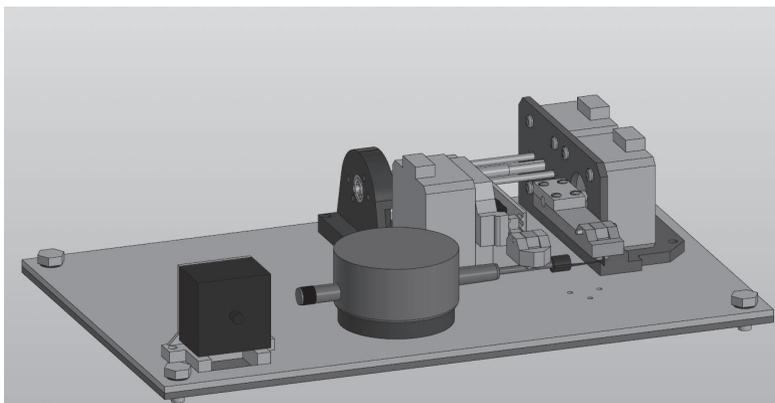


Рис. 5. Экспериментальная установка

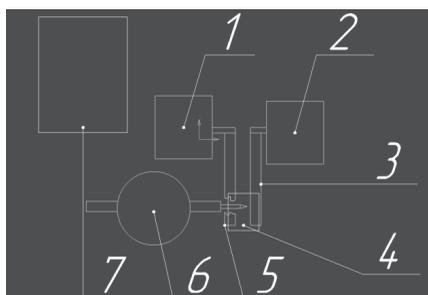


Рис. 6. Структурно-функциональная схема работы установки 43МИС:

- 1-2 – шаговый двигатель Nema 17, JK42NM48-1684 (0.9°), 3-5 – зонд,
 4 – прижимное приспособление, 6 – индикатор электронно-цифровой ИЦЦ 0-10 (0,01мм),
 7 – измерительное устройство

Предложенная установка позволяет привести дальнейшие исследования теплофизических характеристик редкоземельных сплавов с целью более глубокому пониманию поведения и оптимизации сплавов для дальнейшего их использования и позволит производить исследование образцов, сопротивление которых превышает $50 \cdot 10^6$ Ом.

Список литературы

1. Гой, С. А. Исследование температуропроводности сплавов легких редкоземельных материалов при высоких температурах / С. А. Гой, В. В. Мешков // Инструменты развития образовательных технологий в области энергосбережения: материалы 4-й региональной научно-практической конференции, Екатеринбург, 27 апреля 2009 г. / Рос. гос. проф.-пед. ун-т. – Екатеринбург, 2009. – С. 30–32.
2. Величко, А. А. Методы исследования микроэлектронных и нано электронных материалов и структур: учебное пособие / А. А. Величко, Н. И. Филимонова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. II. – 227 с. – ISBN 978-5-7782-2534-3.

3. *Соснин, А. С.* Программно-аппаратный комплекс для измерения электрического сопротивления твердофазных металлов и сплавов в широком диапазоне температур / А. С. Соснин, М. Ю. Черноскутов // Новые информационные технологии в образовании и науке (НИТО-2017): материалы X Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 27 февраля – 3 марта 2017 г. / Рос. гос. проф.-пед. ун-т [и др.]. – Екатеринбург: РГППУ, 2017. – С. 425–433.

4. *Радьков, А. В.* Методы измерения удельного сопротивления полупроводниковых материалов / А. В. Радьков, А. А. Малаханов // Актуальные вопросы технических наук : материалы V Международной научной конференции, Санкт-Петербург, февраль 2019 г. – Санкт-Петербург: Свое издательство, 2019. – С. 18–24.

5. *Васильев, И.* Особенности измерения удельного и поверхностного сопротивлений четырехзондовым методом / И. Васильев // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2020. – № 6 (197). – С. 52–59.