

УДК 621.382

А.С. Сальников, А.Ю. Ющенко

Обзор тестовых структур для измерения электрофизических параметров материалов при изготовлении СВЧ монолитных интегральных схем

Проводится обзор различных тестовых структур и методов, позволяющих определять электрофизические параметры материалов при параметрическом контроле и отработке технологических процессов изготовления СВЧ монолитных интегральных схем. Обосновывается необходимость параметрического тестирования, предлагаются тестовые структуры для определения поверхностного сопротивления, приведенного контактного сопротивления, концентрации и подвижности носителей.

Ключевые слова: микроэлектроника, СВЧ, монолитные интегральные схемы, электрофизические параметры, тестовые структуры, измерение, параметрический контроль, контроль технологии.

Введение. В России постепенно начинается переход к новой элементной базе в СВЧ-микроэлектронике. Этой базой станут СВЧ монолитные интегральные схемы (МИС). Соответственно, возрастает потребность в измерении электрофизических параметров материалов с целью отладки и контроля технологических операций изготовления СВЧ МИС.

При создании МИС широко применяется параметрический контроль, т.е. измерение отдельных тестовых кристаллов (ТК) на рабочей пластине. Такие кристаллы (англ. РСМ – Process Control Monitor) содержат тестовые элементы (ТЭ), повторяющие отдельные компоненты или группы компонентов проектируемой схемы, а также специально разработанные тестовые структуры (ТС), позволяющие измерить электрофизические параметры технологических материалов и их межсоединений. Обычно несколько ТК равномерно распределяют по подложке. Тестовые структуры в микроэлектронике могут использоваться для широкого круга задач, включая разработку и тестирование технологического процесса, контроль дефектов, тесты на надёжность, экстракцию параметров транзисторов и др. [1].

В настоящей статье проводится обзор тестовых структур и методов, используемых при проведении измерений электрофизических параметров материалов в технологии изготовления СВЧ МИС.

Измерение поверхностного сопротивления полупроводниковых материалов. При измерениях поверхностного сопротивления полупроводников ρ_S широкое распространение получил метод Ван дер Пау, предложенный ещё в 1958 г. В оригинальной статье [2] был предложен метод измерения ρ_S образца произвольной формы, а в статье [3] была предложена наиболее удачная форма образца – крестообразная, которая имеет малые размеры, достаточно удобна для изготовления и автоматизированного измерения.

На рис. 1 приведены две возможные структуры для метода Ван дер Пау. В этом методе изготавливаются четыре площадки, обеспечивающие контакт с полупроводниковым материалом. В процессе измерения две из них подключаются к источнику тока, а две других – к вольтметру. Для повышения точности используют два подключения: сначала к источнику тока подключаются контактные площадки, обозначенные *A* и *B* на рис. 1, а затем площадки *A* и *D*. В каждом из подключений также можно провести измерения при разной полярности приложенного напряжения.

Сопротивление R_1 , определяемое из соотношения измеренных напряжения и тока, связано с ρ_S следующим соотношением:

$$\rho_S = \pi R_1 / \ln 2. \quad (1)$$

Также может использоваться более сложная структура (рис. 2), называемая «крестом». Эта структура является составной: содержит структуру для метода Ван дер Пау и отрезок полупроводникового материала (линию) длиной L и шириной W , при этом должно выполняться условие $L \gg W$. Дополнительно к измерению ρ_S с помощью данной структуры можно, измерив сопротивление линии, вычислить ее действительную ширину W и оценить изменение этого параметра по сравнению с фотошаблоном.

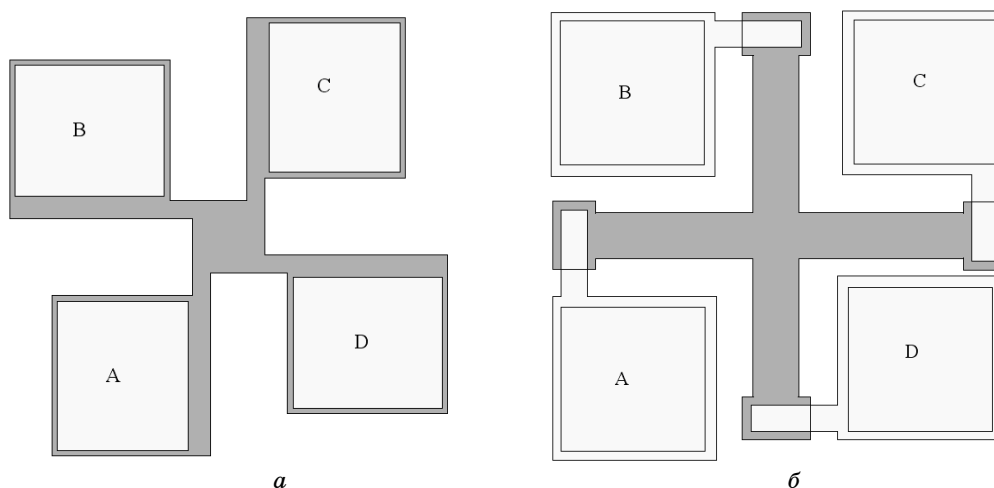


Рис. 1. Крестообразные тестовые структуры

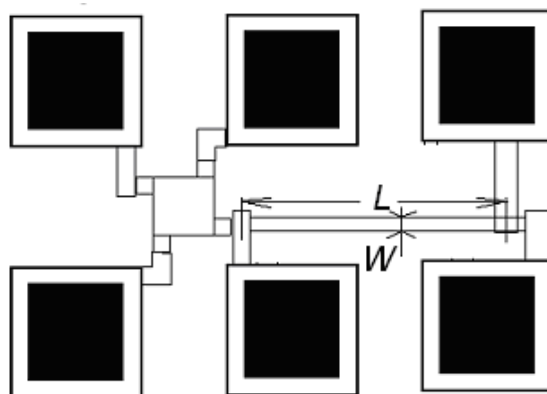


Рис. 2. Тестовая структура типа крест-мост

Измерение поверхностного сопротивления металлов. Удельное поверхностное сопротивление металлов является параметром оценки качества слоёв металлизации, используемых в технологическом процессе. Данный параметр непосредственно влияет на величину потерь в проводящих линиях. В простейшем случае для измерения поверхностного сопротивления можно использовать плёночный резистор в интересующем нас слое металлизации. Однако крестообразные структуры, подобные приведенным на рис. 1, но изготовленные не из полупроводника, а из металла, более компактны и не уступают по точности.

Измерение приведенного контактного сопротивления. Данный параметр является определяющим при оценке качества омических контактов. В связи с тем, что данное сопротивление требуется получить как можно меньшим, для его измерения требуются специальные методы [1].

Одним из методов является изготовление цепочки из большого количества последовательно соединённых омических контактов. Такая структура позволяет получить усредненное значение контактного сопротивления, однако занимает на пластине большую площадь.

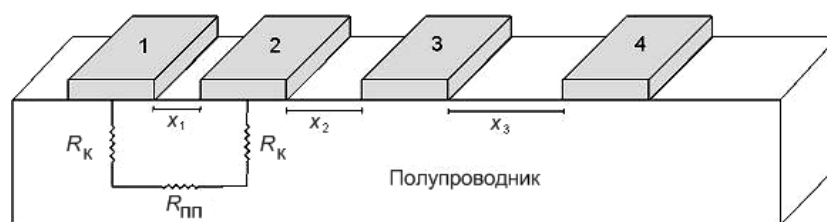


Рис. 3. Структура для метода TLM

В методе TLM используется ТС, состоящая из трёх омических контактов, расположенных на разном расстоянии друг от друга, схематичное изображение структуры пред-

ставлено на рис. 3. Эта структура занимает меньше пространства, чем цепочка из контактов. Основная идея метода заключается в том, что измеряется сопротивление между каждой парой ближайших контактов, а затем строится график зависимости сопротивления от расстояния между контактами, из которого и определяется контактное сопротивление.

Для измерения контактного сопротивления также может применяться метод Кельвина. Этот метод является четырехзондовым и требует для измерения специальную структуру, приведённую на рис. 4. Для проведения измерения источник тока подключается к контактным площадкам, обозначенным «1» и «2» на рис. 4, а вольтметр – к площадкам «3» и «4». Результирующее сопротивление находится как соотношение измеренного напряжения и силы тока.

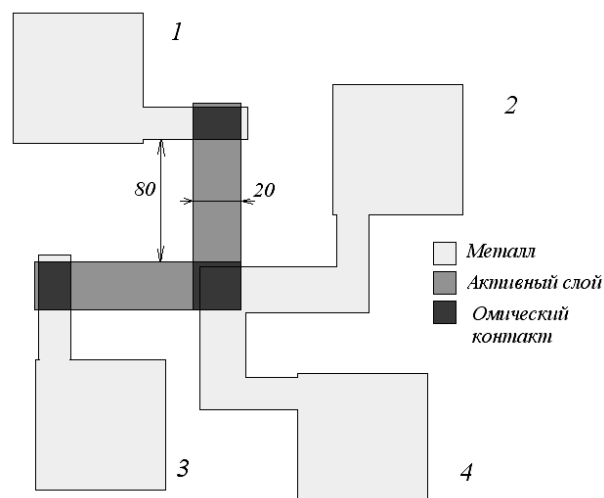


Рис. 4. Структура для измерения контактного сопротивления

Измерение параметров диэлектриков. Для оценки качества разделительного диэлектрика можно использовать традиционную конденсаторную структуру металл – диэлектрик – металл (МДМ). Как правило, измеряют относительную диэлектрическую проницаемость и тангенс диэлектрических потерь, используя специальное измерительное оборудование. Другой метод оценки качества – изготовление двух меандровых резисторов, разделённых слоем диэлектрика, и измерение тока утечки между этими резисторами.

Измерение концентрации и подвижности носителей. На этапе отработки технологии важно измерение таких параметров, как подвижность и поверхностная концентрация носителей. Метод Холла [4] заключается в том, что исследуемый образец помещают в постоянное магнитное поле и измеряют разность потенциалов между противоположными сторонами образца, возникающую из-за действия на носители тока силы Лоренца. Определение указанных выше параметров основано на соотношении для постоянной Холла, которая характеризует величину отклика в направлении, перпендикулярном как току, так и полю. В предположении близости холл-фактора к единице [4] постоянная Холла равна

$$R_H = \mu_H / \sigma, \quad (2)$$

где μ_H – подвижность носителей; σ – электропроводность материала.

Экспериментально определив электропроводность и постоянную Холла, из (2) можно определить величину μ_H , называемую холловской подвижностью [4]. Как правило, это значение близко к подвижности носителей μ . Концентрацию носителей заряда n можно найти, используя известное соотношение для электропроводности материала:

$$\sigma = e\mu n, \quad (3)$$

где e – заряд носителя тока.

Заключение. В статье проведен обзор ТС и методов, позволяющих определять электрофизические параметры материалов при параметрическом контроле и отработке технологических процессов изготовления СВЧ МИС. В дальнейшем планируются изготовление ТС и отработка на практике методик измерения параметров материалов.

Работа выполнялась в рамках проектов 08-07-99034-р_офи, 09-07-99020-р_офи при поддержке РФФИ и в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по направлениям «Нанотехнологии и наноматериалы» (государственный контракт П1418), «Создание электронной компонентной базы» (П1492, П2188), «Микроэлектроника» (П669, П499, 16.740.11.0092) и «Проведение исследований коллективами НОЦ по направлению «Микроэлектроника» (14.740.11.0135).

Литература

1. Walton A.J. Microelectronic Test Structures // Proc. IEEE Int. Conf. on Microelectronic Test Structures. – Monterey, 1997. – P. 151–155.

2. Van der Pauw L. J. A Method of Measuring the Resistivity and Hall Coefficient on Lamellae of Arbitrary Shape // Phillips Technical Review. – 1958. – Vol. 20, №8. – P. 220–224.

3. Buehler M. An Experimental Study of Various Cross Sheet Resistor Test Structures / M. Buehler, W.R. Thurber // J. Electrochem. Soc.: Solid-State Science and Technology. – 1978. – Vol. 125, № 4. – P. 645–650.

4. Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices. – 2nd Ed. – Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 1985. – 351 p.

Сальников Андрей Сергеевич

Мл. науч. сотрудник каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа

Тел.: +7-913-866-44-65

Эл. почта: ansalnikov@gmail.com

Ющенко Алексей Юрьевич

Аспирант каф. физической электроники ТУСУРа

Эл. почта: davinagaz@rambler.ru

Salnikov A.S., Yushenko A.Y.

Review of test structures intended for measurement of electrophysical parameters of materials in MMIC technology

The paper reviews the different test structures and techniques, which allow to determine electrophysical parameters of materials used in MMIC process control and development. The necessity of parametric testing is substantiated. Test structures for measurement of the sheet resistance, contact resistance, concentration and mobility of charge carriers are given.

Keywords: microelectronics, microwaves, MMIC, electrophysical parameters, test structure, measurement, parametric test, technology test.
