

Б. Г. БОРОДИН, канд. техн. наук, АБУ АНЗЕХ ИЯД, В. В. АНАНЬИН

ТЕХНИКА МИКРОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Измерения и испытания представляют собой важнейшую часть большинства современных технологических и исследовательских процессов в промышленности, науке и технике. Соответствующее контрольно-измерительное оборудование получает широкое распространение для диагностики, контроля и измерения различных параметров материалов и сред [1-8]. В состав этого оборудования обязательно входит измерительный преобразователь (ИП), чувствительный к контролируемой характеристике, первичная схема преобразования его реакции в электрический сигнал; блок обработки этого сигнала, позволяющий выделить полезную информацию об исследуемом объекте; система обработки выделенной информации и управления оборудованием.

В настоящей работе рассматриваются вопросы универсализации и миниатюризации диагностических средств, применяющихся в технологии микроэлектроники для входного, выходного и межоперационного контроля различных полупроводниковых материалов и структур.

Соответствие параметров полупроводниковых слитков, пластин, многослойных структур заданным во многом определяет качество интегральных схем и дискретных приборов на их основе. Контролю подлежат как механические свойства, так и разнообразные электрофизические характеристики полупроводников. Значительное распространение получила микроволновая диагностика полупроводников [2, 3]. С помощью техники СВЧ можно измерять такие параметры полупроводников, как удельная электропроводность материала σ [2-3], фотопроводимость $\Delta\sigma_{\phi}$ и ее спектральное распределение $\Delta\sigma_{\phi}(\lambda)$ [3], толщина эпитаксиальных и диффузионных слоев $h_{сл}$ [3], профиль распределения легирующей примеси $N(x)$ [4], подвижность μ [5], время жизни τ и скорость поверхностной рекомбинации S носителей заряда [6] и другие. При разработке соответствующих технических средств предпочтение отдается тем из них, которые обеспечивают наиболее высокие чувствительность, точность, экспрессность и производительность контроля, не требуют разрушения образца в процессе проведения измерений, могут применяться без приготовления специальных электрических контактов. Кроме того такие средства должны быть простыми в эксплуатации, иметь небольшие габариты, вес. В немалой степени обеспечению таких условий способствует широкое использование микропроцессорной и микроконтроллерной техники при обработке сигналов измерительной информации и управлении процессами контроля [7-8].

Измерительный преобразователь может быть волноводным или резонаторным [9] (в последнем случае достигаются наилучшие значения метрологических показателей), на основе прямоугольных, цилиндрических, коаксиальных или полосковых волноводов. В миллиметровом диапазоне обычно используются объемные резонаторы на основе цилиндрических и прямоугольных волноводов, в трехсантиметровом и дециметровом диапазонах – резонаторы на основе коаксиальных линий передачи. Размеры ИП определяются типом волновода, требованиями обеспечения максимальной эффективности и длиной волны. Как уже отмечалось, серьезной задачей, наряду с обеспечением высокой чувствительности ИП к контролируемому параметру, является его миниатюризация. Одним из направлений ее решения является разработка ИП на основе СВЧ-микрорезонаторных линий передачи (МПЛ). Создание высокоэффективных микрорезонаторных измерительных преобразователей для контроля параметров полупроводниковых материалов – весьма важная и сложная проблема. Одновременно такой ИП должен быть обеспечен соответствующей миниатюрной первичной схемой преобразования его реакции в электрический сигнал.

Ниже приводятся результаты разработки СВЧ-схем, предназначенных для контроля различных параметров полупроводниковых материалов и структур, в которых уменьшение размеров достигнуто за счет замены объёмных элементов СВЧ на их микронные аналоги: волновод заменяется микрополосковой линией, объёмные вентили, циркуляторы, фазовращатели – их микронными аналогами. Для практической реализации применен специализированный программный пакет Microwave Office. Его использование позволяет создать электрическую принципиальную схему разрабатываемого устройства, разработать топологию, определить основные электрические параметры разработанной схемы (ток, напряжение, мощность, S-, H-, Z-параметры и другие). Пакет позволяет использовать библиотеки реальных элементов известных фирм (Motorola, Siemens, Sony, Alpha и др.). В целом Microwave Office позволяет разрабатывать, проектировать и испытывать различные СВЧ-устройства в микронном исполнении вплоть до создания реального прибора.

На рис. 1 приведена широко распространенная отражательная схема регистрации фотопроводимости полупроводников. Исследования фоточувствительности полупроводниковых материалов важны как при разбраковке исходных структур в процессе производства фотоэлектрических приборов, так и в плане развития так называемого фотомодуляционного метода контроля [5].

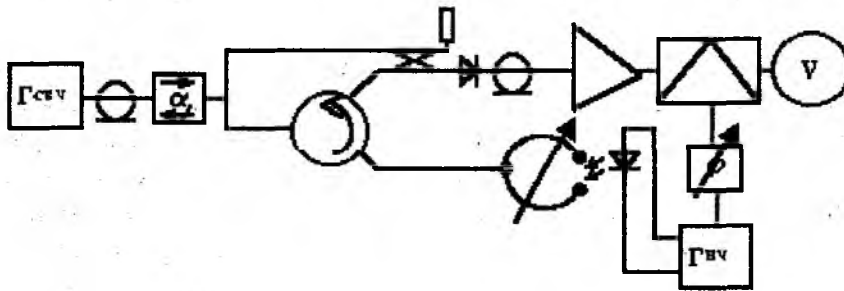


Рис. 1

В приведенной схеме сигнал фотопроводимости с выхода ИП регистрируется на частоте модуляции оптического излучения, селективно усиливается и синхронно детектируется.

Принципиальная электрическая схема СВЧ-части такой установки и разработанная с помощью Microwave Office топология представлены соответственно на рис. 2 и 3.

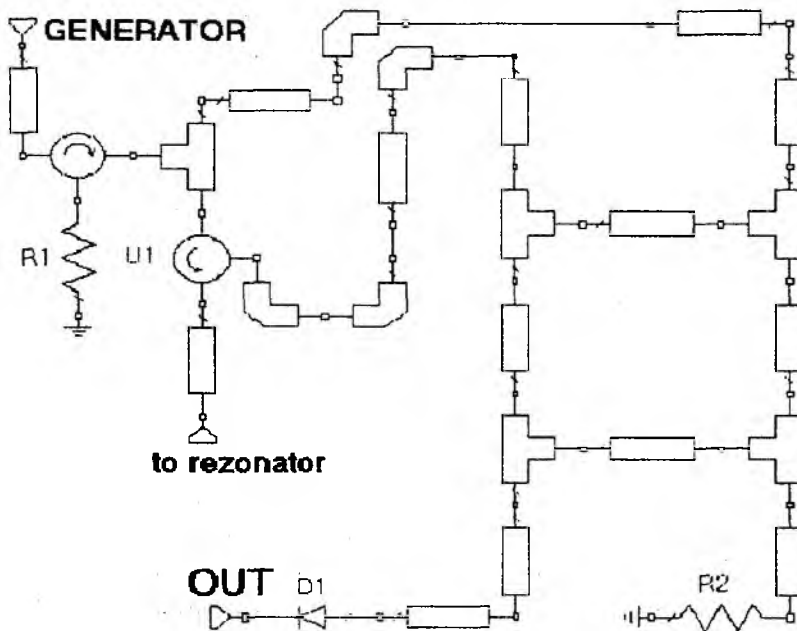


Рис. 2

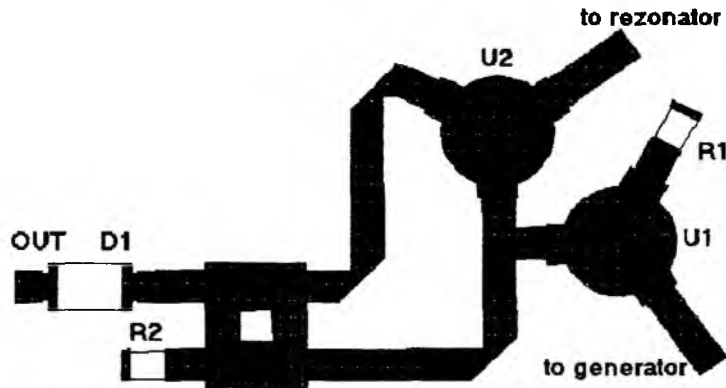


Рис. 3

Параметры полосковых элементов рассчитывались для частоты 10 ГГц: ширина полоскового волновода составила при использовании поликорковой подложки толщиной 0,5 мм величину 1,6 мм, а длина четвертьволновых отрезков линий - 7,5 мм. Резисторы R_1 и R_2 выполняют функции согласованных нагрузок, и их сопротивления определяются волновым сопротивлением линий, к которым они подключены: для циркулятора U_1 - 50 Ом (R_1) и для направленного ответвителя - 23 Ом (R_2).

Применение описанных в работе [6] методик исследования фазы сигнала фотопроводимости на частоте гармонической модуляции и при различных длинах волн освещающего образец излучения позволяет определять при помощи описанной установки также и такие важные параметры полупроводников, как время жизни и скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда.

На рис. 4 приведена функциональная схема установки для измерения подвижности носителей заряда в полупроводниковых материалах.

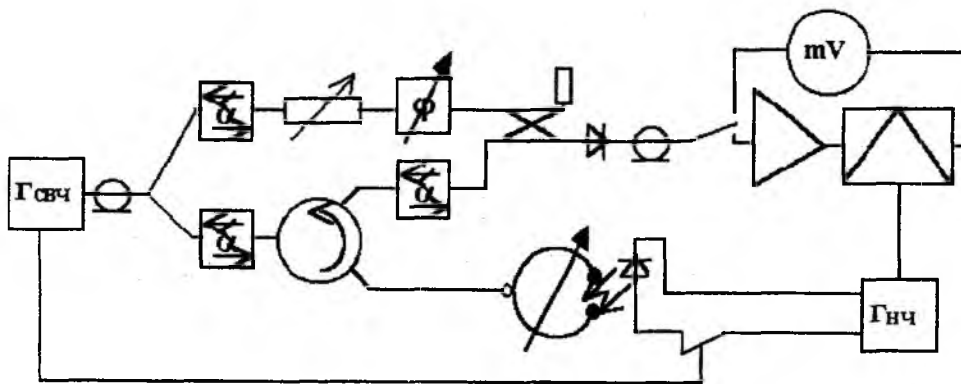


Рис. 4

Определение подвижности основано на СВЧ-синхронном детектировании сигнала, отражённого от резонатора. Анализ комплексного коэффициента отражения СВЧ-резонатора свидетельствует о наличии в амплитудно-модулированном по гармоническому закону сигнале отраженной от резонатора СВЧ-мощности двух составляющих: синфазной с мощностью, падающей на резонатор (сигнал фотопроводимости) и сдвинутой относительно этой мощности по фазе на 90° (сигнал расстройки резонатора вследствие фотодизэлектрического эффекта) [5]. Выделение этих сигналов удобно производить, используя принципы синхронного детектирования на СВЧ. При этом, как показано на рис. 4, опорным сигналом для СВЧ-синхронного детектора служит мощность в плече, шунтирующем включенный по отражательной схеме резонатор. Этот же сигнал одновременно обеспечивает работу СВЧ-детектора

в линейном режиме. При отсутствии фазового сдвига между опорным и падающим на резонатор СВЧ-сигналами выделяется сигнал фотопроводимости ($U_{\text{синф.}}$), если эти сигналы сдвинуты по фазе – сигнал фотодиэлектрического эффекта ($U_{\text{смещ.}}$). В итоге получается несложное расчётное соотношение для определения подвижности носителей заряда в однодолинном полупроводнике:

$$\mu = \frac{q}{2m^*} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \frac{U_{\text{смещ.}}}{U_{\text{синф.}}},$$

здесь: q и m^* – соответственно заряд и эффективная масса электрона в полупроводнике; ω – рабочая частота.

Достоинством такого способа определения μ является обеспечение практически полной идентичности условий выделения и измерения сигналов фотопроводимости и фотодиэлектрического эффекта. Относительность измерений позволяет избавиться от необходимости в точных сведениях об абсолютном значении фотопроводимости и от тщательной калибровки измерительной аппаратуры. Однако при практической реализации такого устройства на основе коаксиальных или полых волноводов оно получается весьма громоздким, особенно вследствие применения большого количества развязывающих элементов, аттенуатора и фазовращателя. Использование микрополосковой элементной базы позволяет существенно миниатюризировать микроволновый тракт (рис. 5).

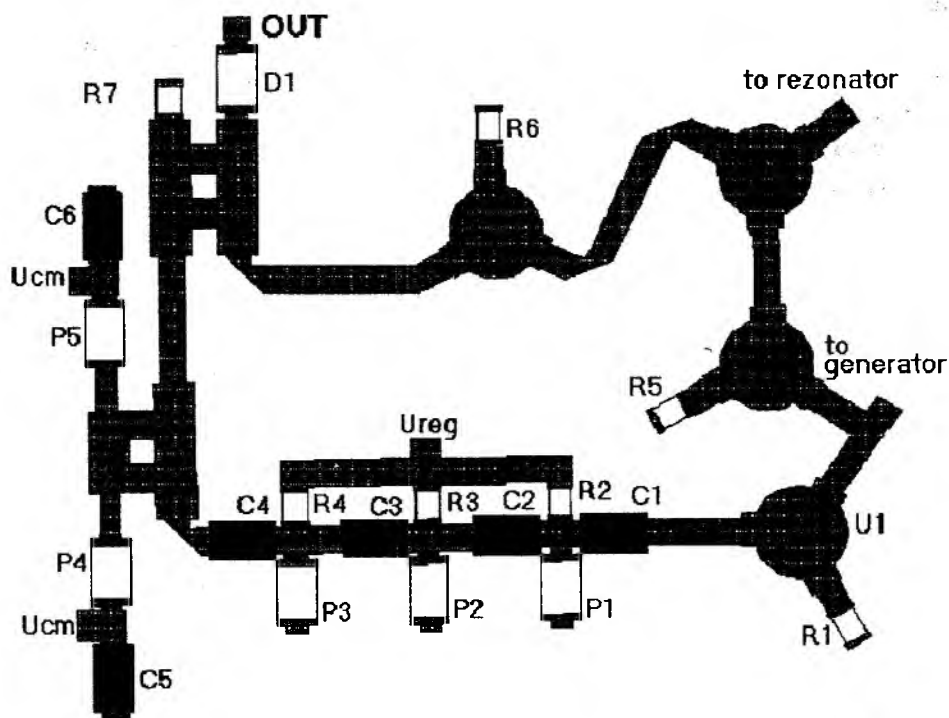


Рис. 5

Для измерения толщины и электропроводности полупроводниковых пластин и пленок в структурах с высокоомными подложками может быть применена установка, функциональная схема которой приведена на рис. 6 [2].

Определение σ и h осуществляется с помощью анализа результатов измерения уровня включения образца в поле резонатора и резонансной частоты этого резонатора в момент обращения сигнала фотопроводимости в нуль при смене знака этого сигнала [2]. Для измерения резонансной частоты резонатора используется система АПЧ и опорный СВЧ-генератор, позволяющие производить измерения не на СВЧ, а на разностной частоте основного и опорного генераторов.

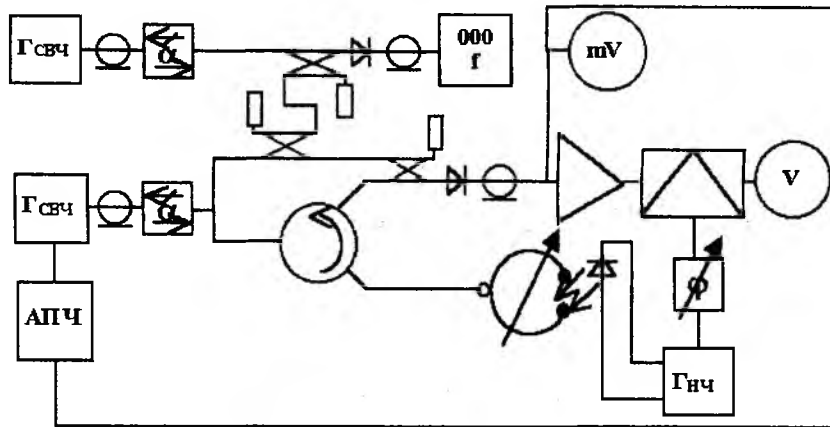


Рис. 6

В микрополосковом исполнении СВЧ-часть приведенной установки реализуется в виде компактного устройства, которое может быть использовано в комплекте с составным объемным цилиндрическим или коаксиальным резонатором (рис. 7).

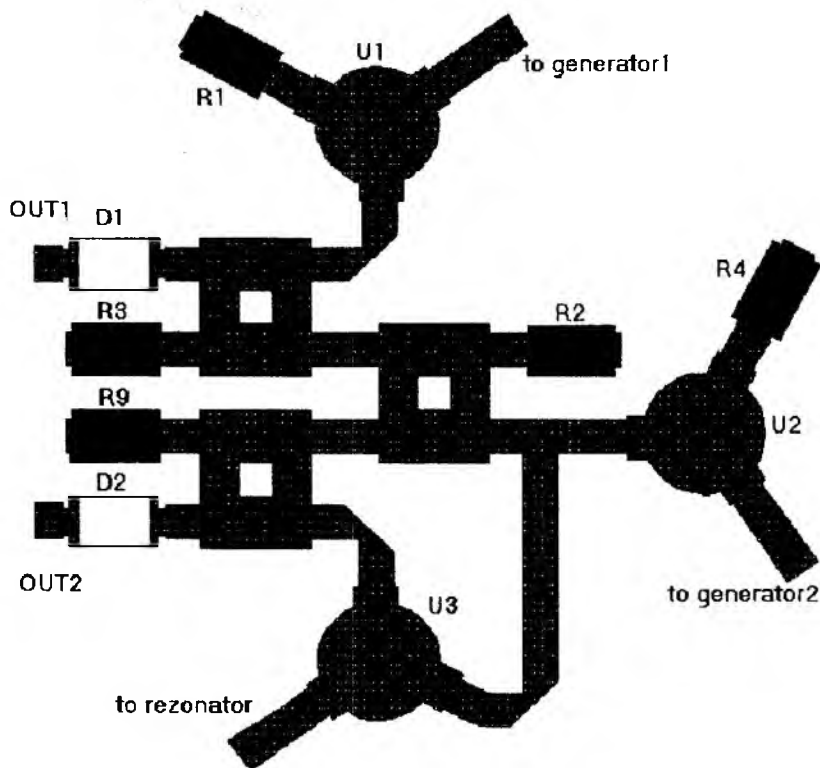


Рис. 7

Во всех описанных установках целесообразно использование микрополоскового генератора на полевом транзисторе с частотой генерации 10 ГГц и электронной перестройкой, выполняемого по стандартной схеме [10] с применением фильтрующих емкостей и антипаразитных цепочек. Топология такого генератора, выполненного на транзисторе фирмы Philips типа 2N4092, приведена на рис. 8. Для обеспечения минимальных размеров схемы здесь также используются навесные конденсаторы C_1-C_5 , C_8 и навесные катушки индуктивности L_1-L_4 , ёмкости C_6 и C_7 образованы зазором в линии передачи.

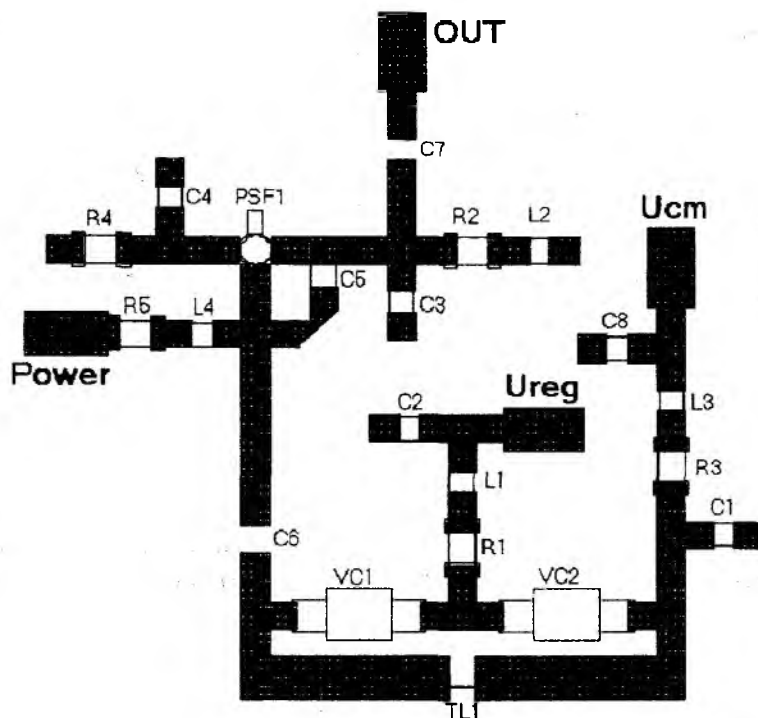


Рис. 8

В результате объединения описанных схем в одну универсальную установку для многопараметрового контроля полупроводниковых материалов может быть создано компактное устройство с весьма высокими метрологическими показателями. Однако на практике, в зависимости от конкретных условий, не всегда представляется целесообразным реализовывать диагностическое устройство универсальным для контроля многочисленных параметров полупроводниковой структуры. Поэтому возможны и описанные модификации для контроля какого-либо одного (или нескольких) параметров полупроводника. Реальное устройство может содержать один или несколько сменных измерительных преобразователей и несколько сменных схем обработки реакции ИП на контролируемую характеристику.

Список литературы: 1. Блад П., Ортон Дж. В. Методы измерения электрических параметров полупроводников // Зарубежная электроника. 1991. Вып. 2. С. 3 – 49. 2. Гордиенко Ю.Е., Бородин Б.Г., Рябухин А.А. Фотомодуляционная СВЧ диагностика полупроводниковых структур // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 1999. Вып. 111. С. 7 – 13. 3. Бесконтактные радиоволновые методы измерения электрофизических параметров полупроводниковых материалов / Детинко М.В., Лисюк Ю.В., Медведев Ю.В., Скрябин А.А // Физика. 1992. Вып. 9. С. 45 – 63. (Изв. высш. учеб. заведений). 4. Гордиенко Ю.Е., Бородин Б.Г., Свидерская Л.И. Исследование взаимодействия СВЧ резонаторов с неоднородно-легированными по толщине полупроводниковыми слоями // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 1991. Вып. 83. С. 31 – 37. 5. Гордиенко Ю.Е., Бородин Б.Г. Бесконтактное измерение подвижности носителей заряда в полупроводниках // ПТЭ. 1984, № 1. С. 189 – 191. 6. Gordiyenko Yu.Ye., Borodin B.G., Smuglii V. I. Microwave Photomodulation Method for Study of Recombination Processes in Semiconductors // Telecommunication and Radio Engineering. 1998. V. 52, №2. P. 47 – 52. 7. Бородин Б.Г., Гордиенко Ю.Е., Фурдыло А.Ф. Микропроцессорное обеспечение диагностических средств в полупроводниковом материаловедении // Радиоэлектроника и информатика. 2000, № 3 (12). С. 26 – 29. 8. Saitoh Toshiya, Hasegawa Hideki. A Computer Simulation of the Recombination Process at Semiconductor Surfaces // Solid State Devices and Mater.: Extended Abstr. 22nd Int. Conf. Sendai, Aug. 22 – 24, 155 (1990). 9. Гордиенко Ю. Е. Резонаторные измерительные преобразователи в диагностике микрослоистых структур // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 1996. Вып. 100. С. 253 – 266. 10. Шитиков Г. Т. Стабильные автогенераторы метровых и дециметровых волн. М.: Радио и связь, 1983. 256 с.