

УДК 621.382.2

В. П. ТИМОФЕЕВ, канд. физ.-мат. наук, *С. С. ХВОСТОВ*,
Е. В. КРАВЕЦ, *Б. И. ГОНЧАРОВ*, канд. техн. наук

**ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СВЧ-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТРЕХСАНТИМЕТРОВОГО
ДИАПАЗОНА**

Активное применение микропроцессорной техники в измерительных системах различного назначения позволяет реализовать многофункциональные адаптивные устройства, которые обладают высокими метрологическими характеристиками и существенно повышают производительность труда, например, в службах входного и выходного конт-

роля. Значительные усилия разработчиков направлены на создание современных автоматизированных измерительных систем (АИС) для регистрации важнейших параметров СВЧ-двухполюсников, четырехполюсников и СВЧ-полупроводниковых элементов. Самостоятельный интерес представляет автоматизированное измерение электрических параметров СВЧ-полупроводниковых диодов различных классификационных групп.

Задачи автоматизированного измерения с удовлетворительной точностью полных входных сопротивлений исследуемых СВЧ-диодов, помещенных в измерительную диодную камеру, а также таких электрических параметров, как постоянная времени параметрических диодов, определили необходимость усложнить схему разрабатываемой системы. Классическая схема рефлектометра, позволяющая измерять только модуль коэффициента отражения, была дополнена системой автоматической регистрации фазы коэффициента отражения, выполненной на основе сосредоточенных СВЧ-зондовых датчиков [1]. Выбор указанной схемы построения АИС дает возможность измерить двумя независимыми способами модуль коэффициента отражения и на этой основе калибровать показания, полученные по выходным напряжениям зондовых датчиков, т. е. измерить с необходимой точностью фазу коэффициента отражения. При этом можно избежать неоднозначности отсчета возникающих фазовых сдвигов [2]. Сравнения с другими известными методами измерения модуля и фазы коэффициента отражения [1; 2] показывают преимущество многозондового метода, поскольку в нем отсутствуют механически подвижные элементы конструкции АИС, имеется возможность непосредственной цифровой обработки выходных сигналов датчиков.

Современная тенденция к миниатюризации измерительной радиоэлектронной аппаратуры заставила авторов статьи попытаться достигнуть решения поставленных задач путем конструктивного выполнения СВЧ-тракта АИС на основе полосковых несимметричных линий передачи. Была разработана топология, выбраны необходимые навесные элементы, изготовлены элементы фиксации, крепления и стыковки со стандартной СВЧ-измерительной аппаратурой. Однако проведенные исследования показали, что возникающие в несимметричных линиях паразитные высокочастотные поверхностные типы волн, излучения и отражения в местах стыка подложек и местах крепления навесных элементов не позволяют получить требуемые метрологические характеристики АИС. С аналогичными проблемами столкнулись авторы работы [3].

Среди линий передач сантиметрового диапазона закрытого типа наиболее приемлемым по совокупности характеристик является стандартный прямоугольный волновод [1]. Основное внимание было сосредоточено на разработке зондовых СВЧ-датчиков. Основываясь на рекомендациях [1, 4], рассмотрена схема, при которой измерение модуля и фазы коэффициента отражения и вытекающих из них СВЧ-параметров исследуемых двухполюсников производится путем регистрации картины распределения электромагнитной волны в измерительном тракте [2].

Принцип работы датчика основан на возбуждении электромагнитного поля в запердельном круглом волноводе, который через свой торец связан с основным измерительным трактом посредством круглого отверстия в середине широкой стенки прямоугольного волновода. Амплитуда возбуждаемого поля пропорциональна амплитуде стоячей волны основного тракта в месте расположения СВЧ-датчика. Датчики разнесены вдоль оси волновода на расстояние, кратное нечетному числу $\Lambda/8$, где Λ — длина рабочей волны в измерительном тракте.

Необходимый диаметр отверстия связи оценивался из желаемого переходного ослабления (15÷20 дБ) и окончательно определялся экспериментально. Требования к геометрии отверстия связи, запердельного волновода и остальным элементам предъявлялись следующие: отсутствие паразитных резонансов на рабочей частоте, минимальные собственные коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) и затухание, вносимые датчиком как неоднородностью, в основной измерительный тракт, обеспечение необходимого уровня связи и ее достаточная «сосредоточенность» для оптимальной работы детекторного датчика.

Проведенные эксперименты по выбору активного полупроводникового элемента в схеме датчика, способов его крепления, обеспечивающего необходимую связь с полем в запердельном волноводе и его смену при настройке и регулировке, показали, что наиболее полно удовлетворить перечисленным требованиям позволяет конструкция зонда с использованием СВЧ-смесительных диодов типа КА120А или АА112А с металlostеклянным корпусом. Осевая и продольная фиксация СВЧ-диода осуществляется с помощью полой втулки из фторопласта, которая служит диэлектрическим заполнением запердельного волновода и обеспечивает формирование петли связи с электромагнитным полем.

Сложной задачей настройки разрабатываемой системы является обеспечение выравнивания амплитудно-частотных характеристик зондовых датчиков, поскольку они определяют индивидуальную чувствительность каждого зонда и, в конечном счете, определяют метрологические характеристики всей АИС. Исследования показали, что при рабочих уровнях СВЧ-мощности в измерительном тракте $P = 1 \div 3$ мВт датчики, выполненные на основе полупроводниковых диодов КА120А, обеспечивают выходной сигнал $U \geq 150$ мВ при нулевом токе смещения $I_{см}$. В режиме работы тракта на согласованную нагрузку при различных P индивидуальное выравнивание чувствительности зондовых датчиков осуществлялось регулировкой в наибольших пределах сопротивления нагрузочного резистора. Однако для этого производилась предварительная подборка экземпляров СВЧ-диодов по максимальной идентичности вольт-амперных характеристик на рабочем участке. При использовании смесительных диодов Шоттки типа АА112А, работающих при $I_{см} \neq 0$, имелась дополнительная возможность настройки идентичности зондовых датчиков за счет индивидуального подбора тока смещения.

На рис. 1 приведена типичная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) чувствительности исследуемого зондового датчика,

снятая с помощью свип-генератора прибора Р2-61 по его индикатору, для выбранного отверстия связи диаметром 4 мм (кривая 1). Сигнал датчика подавался в канал отраженной волны Р2-61 при работе его в режиме измерения затухания. Многозондовый СВЧ-датчик должен вносить минимально возможные возмущения в основной измерительный тракт, гарантируя при этом необходимую чувствительность в диапазоне измеряемых КСВН от 1,06 до 3,5. Рис. 2 иллюстрирует частотную характеристику вносимого в измерительный волноводный тракт суммарного затухания разработанного узла СВЧ зондовых датчиков. Для сравнения здесь же приведена АЧХ четырехзондового датчика в микрополосковом исполнении (кривая 2).

Исходными величинами для расчета важнейших СВЧ параметров двухполюсников или полупроводниковых диодов являются величины

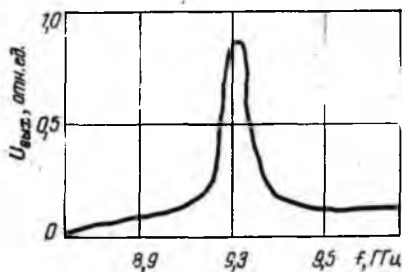


Рис. 1

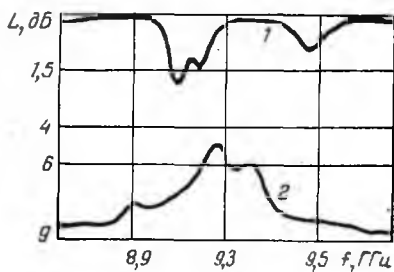


Рис. 2

модуля $|\Gamma|$ и фазы φ комплексного коэффициента отражения Γ . Используя методики [2,4], эти величины можно определить по измеренным выходным сигналам многозондных СВЧ-датчиков. Для случая квадратичного детектирования выходные сигналы датчиков, разнесенные на расстояние $\Lambda/8$ вдоль оси тракта, оконечная нагрузка которого имеет коэффициент отражения $\tilde{\Gamma} = |\tilde{\Gamma}| e^{j2\alpha}$:

$$U_k = 1 + |\tilde{\Gamma}|^2 + 2|\tilde{\Gamma}| \cos \left[\varphi - \frac{\pi}{2} (k-1) \right], \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Отсюда, воспользовавшись приемами [2, 4], с помощью несложных преобразований получим выражения для $|\tilde{\Gamma}|$ и φ в случае трехзондового узла СВЧ-датчиков: $|\tilde{\Gamma}| = \sqrt{A - 1} - \sqrt{A}$, где

$$A = (m_{13} + 1)^2 (m_{32} + m_{12})^2 [(m_{13} - 1)^2 (m_{32} + m_{12})^2 + (m_{13} + 1)^2 (m_{12} + m_{32} - 2)^2]^{-1};$$

$$m_{13} = U_1/U_3; \quad m_{12} = U_1/U_2; \quad m_{32} = U_3/U_2;$$

$$\varphi = \frac{1 + |\tilde{\Gamma}|^2}{2|\tilde{\Gamma}|} \left(\frac{m_{13} - 1}{m_{13} + 1} \right) \sin 2\beta x_1 - \frac{1 + |\tilde{\Gamma}|^2}{2|\tilde{\Gamma}|} \left(\frac{m_{13} + m_{32} - 2}{m_{32} + m_{12}} \right) \cos 2\beta x_1.$$

Здесь $\beta = 2\pi/\Lambda$ — фазовая постоянная в линии; x_1 — расстояние от условного конца линии до первого зонда. Исследования показали, что

для данного метода существует некая оптимальная величина x_1 , позволяющая снизить погрешность регистрации $|\dot{\Gamma}|$ и φ . В работе принято $x_1 = 3\lambda/4$. Необходимые калибровки показаний датчиков выполнены при работе на согласованную нагрузку ($|\Gamma| = 0$) и при использовании короткозамыкателя в плоскости включения нагрузки ($|\Gamma| = 1$).

В таблице приведены результаты контрольных измерений, позволяющие судить о полученных метрологических характеристиках АИС, в которой использован трехзондовый узел СВЧ-датчиков. В качестве образцового прибора при измерении $|\Gamma|$, φ и КСВН = $(1 + |\Gamma| / 1 - |\Gamma|)$ применялась волноводная измерительная линия типа P1-28 совместно с измерителем отношений напряжений типа В8-7. Согласно техническим данным собственная относительная погрешность измерений с использованием указанной аппаратуры в качестве образцовой не превышает для КСВН 3,9 %.

Таким образом, показана перспективность и преимущества перед другими методами применения многозондовых СВЧ сосредоточенных датчиков для построения современных АИС на базе использования микроЭВМ. Приведены результаты исследований, позволяющие обосновать выбор оптимальной конструкции СВЧ-датчика, выполненного на волноводных элементах закрытого типа и полупроводниковом смесительном диоде в металлостеклянном корпусе. Получены в аналитической форме выражения для модуля и фазы коэффициента отражений через выходные напряжения зондовых датчиков, которые для вычисления искомых величин и вывода на протоколирование требуют минимальной затраты аппаратных средств.

Приведенные оценки метрологических характеристик разработанной АИС с использованием узла СВЧ-зондовых датчиков при измерении параметров полупроводниковых СВЧ-диодов показали, что погрешность проведения автоматизированных измерений не выходит за пределы, оговоренные в соответствующих разделах ГОСТов 19656.0—19656.15.

Список литературы: 1. Бондаренко И. К., Дейнега Г. А., Маграчев З. В. Автоматизация измерений параметров СВЧ-трактов. М., 1969. 304 с. 2. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах. Справочное руководство: Пер. с нем. М., 1963. 368 с. 3. Нефедов Е. И., Фиалковский А. Т. Полосковые линии передачи. М., 1980. 312 с. 4. Схема для автоматизированных измерений коэффициентов отражения на сантиметровых волнах / Боцман В. И., Тимофеев В. П., Гончаров Б. И. и др. // Радиотехника. 1984. Вып. 70. С. 112—115.

| Регистрируемый параметр | Пределы измерений | Средняя относительная погрешность, % |
|--|-------------------|--------------------------------------|
| Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) | более 1,2 | $\pm 1,8$ |
| | до 1,7 | $\pm 1,2$ |
| | » 2,3 | $\pm 2,6$ |
| | » 3,5 | $\pm 7,8$ |
| Фаза коэффициента отражения | » 30° | ± 10 |
| | » 180° | $\pm 2,6$ |

Поступила в редколлегию 02.08.88