

только первичная и обратная по отношению к ней волны, фазовые характеристики которых совпадают с соответствующими характеристиками первичной волны. Показано, что величина амплитуды обратной волны для типичных диэлектрических сред может превосходить амплитуду первичной волны.

Литература: 1. Гинзбург В.Л. Переходное излучение и рассеяние. М.: Наука, 1984. 484 с. 2. Болотовский Б.М., Давыдов В.А., Рок В.Е. Об излучении электромагнитных волн при мгновенном изменении состояния излучающей системы // УФН. 1978. Т.126. С. 311-321. 3. Болотовский Б.М., Плис А.И., Столяров С.Н. Распространение импульсного излучения в нестационарных средах // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т. 19, №4. С. 567-573. 4. Борисов В.В. Трансформация электромагнитного поля при изменении проводимости среды во времени // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т.29, №5. С. 730-737. 5. Афанасьев С.В. Излучение модели сверхсветового источника в нестационарной среде // Изв. вузов Радиофизика. 1991. Т. 34, №5. С. 605-607. 6. Rybin O., Nerukh A. Transient Electromagnetic Field in a Dissipative Medium With Rectangular Pulse Modulated Parameters / Proc. International Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. Kharkov (Ukraine). 1998. P. 336-338. 7. Рыбин О.Н., Сахненко Н.К. Преобразование электромагнитного импульса временным возбуждением среды в полупространстве // Радиоэлектроника и информатика. 1998. №1. С. 31-34. 8. Нерух А.Г., Рыбин

О.Н., Щербатко И.В. Преобразование плоской волны повторяющимися импульсными изменениями параметров безграничной среды // Радиоэлектроника и информатика. 1998. №1. С. 28-31. 9. Нерух А.Г., Рыбин О.Н., Щербатко И.В. Воздействие импульсного возбуждения ограниченной среды на плоскую электромагнитную волну // ЖТФ. 1999. Т.69, №8. С. 84-92. 10. Нерух А.Г., Хижняк Н.А. Современные проблемы нестационарной макроскопической электродинамики. Х.: НПО Тест-Радио, 1991. 280с.

Поступила в редколлегию 12.07.2000

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Асеев Г.Г.

Слипченко Николай Иванович, канд. техн. наук, доцент, проректор по научной работе ХТУРЭ. Научные интересы: радиофизика и электроника. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 40-90-20.

Шульга Лариса Николаевна, аспирант кафедры микроэлектроники, полупроводниковых приборов и устройств ХТУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование в радиофизике. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 40-93-62.

Рыбин Олег Николаевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник кафедры микроэлектроники, полупроводниковых приборов и устройств ХТУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование в радиофизике. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 40-93-62.

УДК 543.082/.084: 681.325.5

МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

БОРОДИН Б.Г., ГОРДИЕНКО Ю.Е., ФУРДЫЛЛО А.Ф.

Рассматриваются вопросы микропроцессорного обеспечения средств СВЧ диагностики полупроводниковых материалов. Предлагается вариант конструкции установок для автоматического многопараметрового фотомодуляционного контроля плоских полупроводниковых структур.

В современных научных экспериментальных исследованиях и в практике технологического контроля вместо отдельных измерений параметров объектов и процессов всё шире используются комплексные измерения для более обстоятельной оценки их качества [1]. В связи с этим уместно говорить о диагностике материалов, устройств, процессов, которая не может быть всеобъемлющей, а является специализированной по определенным качествам.

В полупроводниковом материаловедении и технологии твердотельной электроники одним из вариантов диагностики представляется оценка функционально-значимых электрофизических свойств исходного материала и последующих технологических структур.

К таким свойствам можно отнести: удельное или поверхностное сопротивление; фоточувствительность; скорость рекомбинационных процессов; подвижность носителей; распределение электрически активной примеси; глубину залегания энергетических барьеров и т.п.

Диагностические оценки наиболее полезны, когда они выполняются в условиях эксплуатации и не возмущают объект и его свойства. Применительно к полупроводниковому материаловедению существующие зондовые (контактные) методы и средства контроля электрофизических параметров [2] нельзя считать оптимальными в рассматриваемом диагностическом смысле, а комплексность диагностики может обеспечиваться в основном простыми аддитивными приёмами.

Альтернативой такому подходу является СВЧ диагностика полупроводников [3,4]. В особенности перспективным для функционального диагностирования представляется фотомодуляционный вариант этого метода [5].

Суть его в общих чертах сводится к модуляции электропроводности общего или локального объёма полупроводника излучением из области его фоточувствительности, и безэлектродное (СВЧ) выделение сигнала при различных вариантах включения образца в СВЧ поле и в поле излучения. Вариацией включения можно набрать необходимое количество линейно-независимых выходных сигналов измерительной информации для обеспечения требуемой многопараметровости контроля.

Например, для оценки поверхностного сопротивления и толщины эпитаксиальной плёнки на высокоомной или полуизолирующей подложке достаточно выделять только сигналы фотомодуляции, добротности и фоторасстройки резонаторного датчика с образцом в его поле.

Для оценки распределения примеси в структуре такого типа необходимо снять зависимости указанных сигналов от степени включения образца в СВЧ поле датчика и подогнать параметры соответствующей математической модели до совпадения теоретической и экспериментальной зависимости.

Процедура формирования и выделения таких сигналов может быть проиллюстрирована на примере установки, функциональная схема которой представлена на рис. 1. В качестве резонаторного измерительного преобразователя в этой установке применен состоящий из двух соосных частей цилиндрический H_{012} -резонатор с двумя настроечными поршнями, подробно описанный в [6].

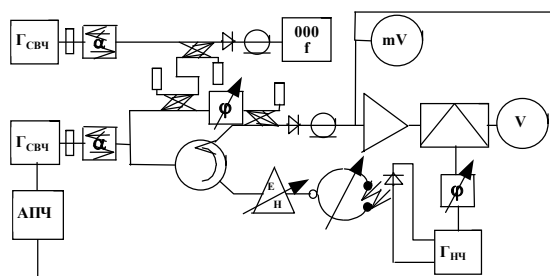


Рис. 1. Функциональная схема установки для многопараметрового фотомодуляционного контроля плоских полупроводниковых структур

Применение разных методик измерения позволяет контролировать при помощи такой установки удельное сопротивление (ρ), фотопроводимость ($\Delta\sigma_{\phi}$), подвижность (μ), время жизни носителей заряда (τ), профиль легирования ($N(x)$), толщину слоёв (h). Методики измерения разных параметров могут существенно отличаться друг от друга.

Например, одновременное определение ρ и h полупроводниковых пластин предполагает последовательное проведение следующих операций. Необходимо включить СВЧ генераторы, выставив их частоты равными одному и тому же значению. Частотомер должен при этом регистрировать нулевые показания. Разместить пластину между соосными частями резонатора. Выставить верхний настроечный поршень в положение, обеспечивающее соприкосновение его торца с пластиной, а нижним - настроить резонатор в резонанс по показаниям милливольтметра. При помощи волноводного трансформатора произвести настройку связи резонатора с подводящим волноводом на уровень критической (милливольтметр при этом должен зарегистрировать "0"). Включить систему АПЧ. От низкочастотного генератора подать на инжекционный светодиод гармонический сигнал. Зарегистрировать на выходе усилителя (в данном случае селективного, настроенного на частоту гармонического сигнала)

сигнал фотопроводимости и начать перестройку степени включения образца в поле резонатора [5] посредством плавного перемещения верхнего настроечного поршня вверх. Когда по показаниям синхронного детектора сигнал фотопроводимости обратится в "0", зафиксировать поршень и осуществить измерение расстояния, на которое переместился верхний поршень, и разностной частоты СВЧ генераторов по показаниям частотомера. Затем по измеренным значениям при помощи градуировочных кривых определить величину ρ и h пластины.

Более проста процедура измерения эффективного времени жизни носителей заряда. В этом случае второй СВЧ генератор не требуется. Подстройкой поршнями необходимо добиться возможно большего значения сигнала фотопроводимости по показаниям вольтметра на выходе синхронного детектора и измерить фазовый сдвиг (ϕ) этого сигнала относительно сигнала низкочастотного генератора [5]. Затем с помощью простого соотношения $\text{tg}\phi = \omega\tau$, где ω - угловая частота модуляции, определить τ .

Методики определения μ , $N(x)$, измерения в многослойных структурах при помощи такой установки также имеют существенные отличия. В то же время надо часто проводить исследования, требующие многократных измерений на одном образце в целях оценки погрешности.

С помощью описанной установки также можно осуществлять исследования, не требующие фотомодуляции, например, измерять толщину полупроводниковых пленок на сильнолегированных подложках [7]. Таким образом, установка представляет собой пример чрезвычайно мощного инструмента для проведения разносторонней диагностики полупроводниковых материалов, причем без разрушения контролируемых образцов и изготовления к ним специальных контактов. Ее возможности могут быть расширены за счет применения других типов измерительных преобразователей и СВЧ генераторов на других частотах [4].

Задача обеспечения такой установки средствами автоматизации может быть решена двумя вариантами.

Первый вариант предусматривает разработку схемы управления, основанной на использовании микроконтроллера с соответствующей схемой управления. В ПЗУ микроконтроллера заносится программа для управления всеми функциональными частями измерительной установки, а также программа для расчёта необходимых параметров по измеренным значениям. Преимущество данного варианта состоит в том, что установка может быть сделана в виде отдельного полнофункционального устройства, не требующего дополнительного оборудования. Таким образом, установка может быть использована в условиях массового производства, когда требуется контроль нескольких определённых параметров полупроводниковой структуры в течение длительного промежутка времени.

Второй вариант представляет собой устройство управления установкой, которое через схему сопря-

жения подключается к ПЭВМ. ПЭВМ при этом берёт на себя функции управления и расчёта необходимых параметров. В таком варианте программа для управления установкой и для вычисления параметров может быть написана на языке высокого уровня (например, Pascal, C++, Basic), что значительно легче и удобнее, чем на машинном языке. Кроме того, программное обеспечение при таком решении легко заменить или внести в него изменения. Устройством отображения информации в ПЭВМ является монитор, позволяющий представлять информацию не только в числовом, но и в любом другом, удобном для каждого конкретного случая, виде (например, в виде таблиц или графиков).

Рассмотрим подробнее второй, более интересный вариант установки.

В настоящее время к числу наиболее распространённых способов связи ПЭВМ с разного рода периферийными устройствами относятся связи через последовательный или параллельный порты, и через системную шину.

Использование последовательного порта ввиду его большой гибкости (двухсторонняя связь, большой диапазон скоростей передачи, возможность как программного управления, так и управления по прерываниям) весьма удобно, но при этом необходимо обеспечить в составе объекта управления либо аналогичный порт, либо жёсткое логическое устройство, эмулирующее протокол обмена порта, что резко усложняет сам объект управления. Поэтому применение последовательного порта оправдано только в случае значительного удаления объекта управления от микропроцессорной системы управления ввиду простоты линии связи, её помехоустойчивости и наличия в составе оборудования экспериментальной установки встроенной микропроцессорной системы управления, выполненной на базе микропроцессорного комплекта, который не имеет собственных ресурсов для общения с оператором.

Параллельный порт ПЭВМ (интерфейс Centronics) не требует какой-либо специальной аппаратной поддержки и имеет хорошее быстродействие. Основным достоинством интерфейса Centronics является его стандартность — он имеется в каждом компьютере и работает одинаково (различие может быть только в скорости передачи данных). Также немаловажное преимущество интерфейса Centronics — простота его программирования на любом уровне, поскольку с этой точки зрения он представляет собой три программно-доступных регистра. Все сигналы интерфейса программно-доступны, что позволяет реализовать произвольные протоколы информационного обмена в рамках имеющегося набора и быстродействия компьютера. Однако его применение для организации связи с ПЭВМ ограничивает тот факт, что порт предназначен для односторонней связи и сработает только на вывод информации из ПЭВМ, что в ряде случаев (в

частности в рассматриваемом) делает его использование неприемлемым.

Третьим вариантом может быть связь через системную шину ПЭВМ. Это полностью универсальный канал ввода-вывода, имеющий доступ ко всем ресурсам ПЭВМ и обладающий максимальным быстродействием. При использовании системной шины имеется возможность двухстороннего параллельного обмена информацией с периферийным устройством. Поэтому в описанной установке для её связи с ПЭВМ была выбрана связь через системную шину. В настоящее время на IBM-PC-совместимых компьютерах наиболее распространёнными являются шины PCI и ISA. Применение шины ISA более предпочтительно вследствие её большей распространённости.

На рис. 2 приведена функциональная схема устройства сопряжения.

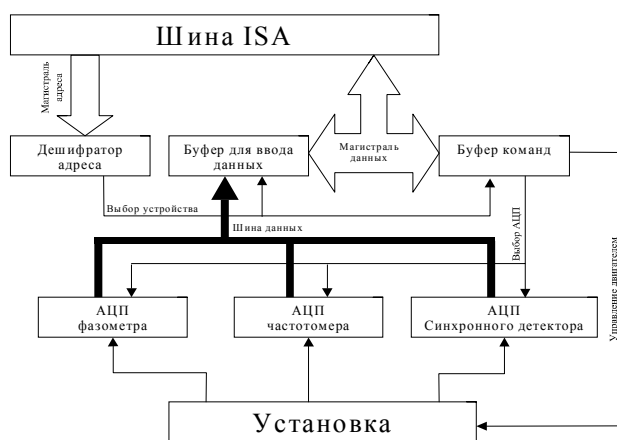


Рис. 2. Функциональная схема устройства сопряжения с ПЭВМ

Эта часть установки условно делится на схему подключения к компьютеру и на устройство ввода — вывода информации и команд. Аппаратно это устройство представляет собой четыре порта — два из них работают на ввод данных в ПЭВМ, а другие два — на вывод команд с ПЭВМ на установку. Адреса этих портов дешифрируются с помощью дешифраторов адреса. При выборе одного из портов разрешающий сигнал через шину выбора устройства поступает на один из буферов (в зависимости от требуемого направления передачи данных). Адреса этих портов следующие: старший на чтение — 770; младший на чтение — 768; старший на запись — 771; младший на запись — 769.

Буфер команд представляет собой регистр, каждый бит которого отвечает за исполнение определённой команды: 0 — подключает к буферу для ввода данных АЦП фазометра; 1 — подключает к буферу для ввода данных АЦП синхронного детектора; 2 — подключает к буферу для ввода данных АЦП частотомера; 3 — посылает на шаговый двигатель установки сигнал 'шаг вперёд'; 4 — посылает на шаговый двигатель установки сигнал 'шаг назад'. Остальные разряды могут быть использованы для переключения пределов измерения частотомера.

Для записи в нулевой разряд единицы необходимо записать в порт 771 числа 128, в первый — 64, во второй — 32, в третий — 16, в четвертый — 8.

Данные с измерительной установки оцифровываются при помощи 10-разрядного АЦП (типа КР1108ПВ1) [8, 9]. Все данные с АЦП поступают на буфер для ввода данных в ПЭВМ. Буфера данных и дешифратор адреса подключаются непосредственно к шине.

Данные с измерительной установки через схему сопряжения попадают на ПЭВМ, где они обрабатываются и отображаются на экране.

При программировании нужно учитывать некоторые особенности устройства. Устройство управления двигателем построено на одном из разрядов буфера, поэтому для формирования импульса необходимо сначала записать число в соответствующий бит буфера, затем, через некоторое время, для формирования длительности импульса управления двигателем вновь записать туда 0. Также следует предусмотреть задержки между управляющими импульсами двигателя, чтобы эти импульсы успевали обрабатываться. Величины задержек можно регулировать, меняя конечное число в 'пустых' циклах (если программа написана для работы в MS-DOS).

Для определения расстояния, на которое переместился поршень, число перемещений умножается на расстояние, которое проходит двигатель за один шаг.

В целях практической реализации предложенной микропроцессорной системы был собран макет экспериментальной установки, функциональная схема которой представлена на рис. 1. Установка функционировала на частоте 37.5 ГГц. Были использованы методики измерения t , r , h . Измерения проводились на стандартных образцах кремниевых и арсенидогаллиевых пластин.

УДК 621.396.96

СИСТЕМНАЯ ТЕОРИЯ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНЫХ АДАПТИВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

МАТЮХИН Н.И.

На базе теории дифференциальных игр строится теория адаптивных радиолокационных систем. В ее состав входят известные статистические методы оценки параметров внешней среды, методы составления уравнений динамики системы и ее подсистем и методы оптимизации параметров самой системы.

При системном проектировании сложных радиолокационных систем нового перспективного класса возникает необходимость в проведении исследований по замкнутой схеме: определение технического облика новой системы; разработка научных и методических основ системного проектирования

Литература: 1. *Каниев Р.Э.* Измерительно-вычислительные комплексы. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 176 с. 2. *Павлов Л.Н.* Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. М: Высш. школа, 1975. 206 с. 3. *Неразрушающие бесконтактные СВЧ-резонаторные методы локального контроля полупроводниковых материалов: Обзор* // Ахманаев В.Б., Детинко В.М., Медведев Ю.В. и др. // Дефектоскопия. 1986. Вып. 1. С. 23-35. 4. *Гордиенко Ю.Е.* Резонаторные измерительные преобразователи в диагностике микросложных структур // Радиотехника. 1996. Вып. 100. С. 253-266. 5. *Гордиенко Ю.Е., Бородин Б.Г., Рябухин А.А.* Фотомодуляционная СВЧ диагностика полупроводниковых структур // Радиотехника. 1999. Вып. 111. С. 7-13. 6. *Гордиенко Ю.Е., Бородин Б.Г., Криворучко В.И.* Возмущение H_{01n} -мод цилиндрического резонатора аксиально расположенным полупроводниковым диском // Радиотехника. 1991. Вып. 97. С. 82-91. 7. *Гордиенко Ю.Е., Овчаренко В.А.* Автодинный измеритель толщины полупроводниковых плёнок // Зав. лаб., 1984. Вып. 17. С. 36-33. 8. *Бакалай В.Г.* и др. Интегральные схемы АЦП и ЦАП. М.: Энергия, 1978. 256 с. 9. *Гутников В.С.* Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. 304 с.

Поступила в редколлегию 14.12.2000

Рецензент:

Бородин Борис Григорьевич, канд. техн. наук, доцент каф. микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХТУРЭ. Научные интересы: контроль параметров полупроводниковых материалов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 40-93-62.

Гордиенко Юрий Емельянович, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХТУРЭ. Научные интересы: микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 40-93-62, 32-12-76.

Фурдыло Александр Фёдорович, стажер-исследователь кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХТУРЭ. Научные интересы: неразрушающий контроль материалов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 40-93-62.

для оптимизации состояния и поведения системы и уточнения технического облика; развитие теории радиолокации на системном уровне. Радиолокационная система тесно связана с внешней средой, действующей по её входу (поток целей, источников активных и пассивных помех, ионизированных образований), и внешней средой, предъявляющей требования к её выходной информации (активными средствами).

Для простой внешней среды (одиночные цели, слабые помехи) теория радиолокации на системном уровне сформировалась к началу 60-х годов на основе применения теории статистических решений. При этом предполагается, что параметры локаторов в процессе выполнения операций остаются неизменными. Поэтому такие локаторы следуют называть статическими.

Для несложной внешней среды (небольшие потоки целей, умеренные помехи) теория радиолокации остается прежней, но появляется необходимость