

Э. Г. КОСЦОВ, И. С. ЛИСКЕР
(Ленинград — Новосибирск)

**КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ***

Описывается метод определения характеристик полупроводниковых диодов при непрерывном изменении факторов внешнего воздействия в процессе одного физического эксперимента. Результаты эксперимента (первичные сигналы информации) фиксируются одновременно самопишущим прибором и преобразователем аналог-цифра, а затем по заданному алгоритму обрабатываются на электронной вычислительной машине.

Полупроводниковые диоды на основе германия и кремния нашли широкое применение в различных областях науки и техники. В настоящее время ведутся интенсивные поиски новых полупроводниковых материалов, позволяющих повысить надежность работы диодов, расширить температурный диапазон их устойчивой работы, увеличить коэффициент выпрямления, улучшить частотные характеристики и т. п. Широко исследуется и новый класс устройств — тонкопленочные приборы с диодной характеристикой. Успешное решение этой задачи в значительной степени зависит от производительности и эффективности методов исследования физических параметров диодов, точности их определения и сопоставимости результатов, полученных на разных образцах не только в процессе их изготовления, но и в различных экспериментальных условиях. С этой точки зрения, существующие методы [1] измерения вольтамперных характеристик диодов как в статическом (на постоянном токе), так и в динамическом (на переменном токе) режимах не удовлетворяют поставленным требованиям. Использование этих методов приводит к значительной затрате времени на выполнение измерений и в ряде случаев — к увеличению погрешности результатов испытаний. Укажем, например, на трудности учета нестабильности величины обратного тока во времени при подаче на диод напряжения заданной величины (как известно, нестабильность величины обратного тока вызывается тепловыми потерями, возникающими в $p-n$ переходе при прохождении обратного тока). При снятии вольтамперных характеристик на переменном токе большим неудобством является необходимость применения униполярных измерительных приборов (вольтметров и амперметров). К недостаткам измерений в статическом и динамическом режимах следует отнести требование одновременной регистрации показаний на нескольких измерительных приборах

* Материал доложен на VI Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1964 г. в Новосибирске.

(от двух до четырех). Много времени занимает и измерение температурного хода параметров диодов, осуществляемое ступенчатым изменением фиксированных значений температуры образца.

В связи с этим представляет интерес осуществить автоматизированное исследование физических свойств диодов на одной установке и в процессе одного эксперимента при непрерывном изменении факторов внешнего воздействия. Ранее была разработана модель системы [2, 3], в которой процесс измерения электропроводности и коэффициента термо-э. д. с. полупроводниковых материалов и их исследование в широком температурном интервале были автоматизированы и осуществлялись по единой жесткой программе, т. е. без автоматической обработки результатов измерения и управления экспериментом. Блок-схема такой системы (рис. 1)

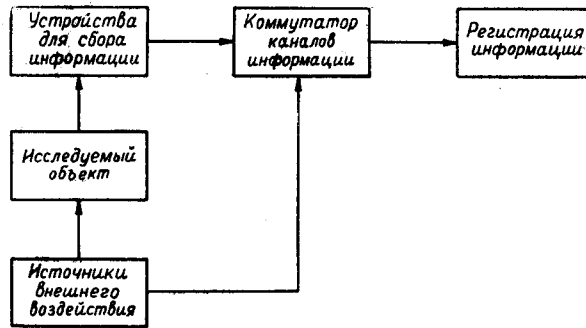


Рис. 1.

состоит из источников внешнего воздействия (нагреватель, криостат, источник электрического тока), исследуемого объекта, устройств для сбора информации, коммутатора каналов информации и устройства регистрации информации. Экспериментальная установка оказалась весьма эффективной и позволила определять величину электропроводности и коэффициента термо-э.д.с. в широком интервале температур в течение 1—1,5 час без непосредственного участия оператора. Естественно, что подобная система не избавляет исследователя от необходимости самому осуществлять обработку информации и выполнять все вычисления, а также не позволяет автоматически изменять программу измерения и управлять факторами внешнего воздействия на объект исследования во время эксперимента.

В [4] показана возможность получения и обработки информации в процессе непрерывного контроля качества отбраковки различной продукции с помощью информационных измерительных систем, автоматизирующих процессы измерения, первичную обработку данных и т. п. В связи с разработкой вычислительных систем поставлен вопрос о построении систем автоматизации научных экспериментов, с помощью которых можно было бы разрабатывать, изготавливать и исследовать элементы вычислительной среды [5].

В данной работе описывается система автоматизированного исследования физических свойств диодов. Блок-схема такой системы приведена на рис. 2. Первичные сигналы информации (СИП) от объекта исследования (в нашем случае — от диода), а также от источника

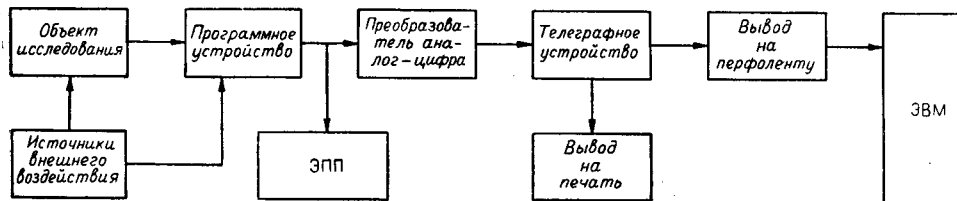


Рис. 2.

внешнего воздействия поступают в программное устройство, являющееся одновременно и блоком коммутации каналов информации. Первичные сигналы информации фиксируются на диаграммной ленте самопишущего прибора и поступают в виде электрических дискретных сигналов на вход преобразователя аналог-цифра, работающего по компенсационному принципу. С преобразователя аналог-цифра информация передается в виде телеграфного кода на перфоленту и затем — в электронную вычислительную машину (ЭВМ). Для контроля параллельно с регистрацией на перфоленте информация выводится на печатающее устройство. Таким образом, эта система, в отличие от рассмотренной (см. рис. 1), производит регистрацию и обработку поступающей информации с последующим вычислением первичных и вторичных параметров исследуемого объекта.

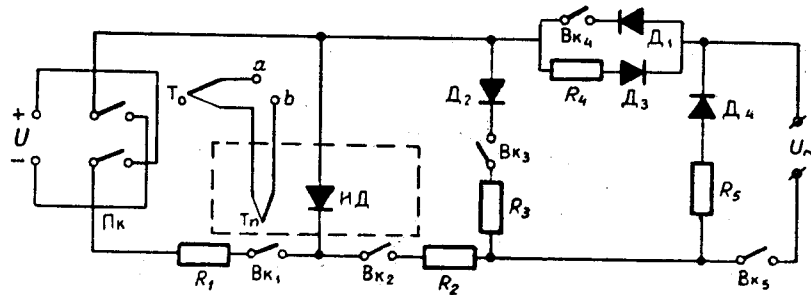


Рис. 3.

Принципиальная электрическая схема измерения параметров диода представлена на рис. 3. Цепь для исследования вольтамперных характеристик диодов на постоянном токе состоит из источника питания U , выключателя ($Вк_1$) и образцового сопротивления R_1 . Цепь для исследования вольтамперных характеристик диодов на переменном токе состоит из источника синусоидального напряжения U_{\sim} , образцовых диодов ($Д_1, Д_2, Д_3, Д_4$), образцовых сопротивлений (R_2, R_3, R_4, R_5) и выключателей ($Вк_2, Вк_3, Вк_4, Вк_5$). Как известно [1], при измерениях на переменном токе вольтамперные характеристики строятся по средним выпрямленным значениям обратного и прямого тока, прямого и обратного напряжения. При этом средние значения обратных напряжений переводятся в амплитудные. Своеобразие приведенной схемы заключается в том, что в ней все измеряемые величины ($V_I^n, V_u^n, V_I^{ob}, V_u^{ob}$) = $f(U, T)$, где V_I^n и V_I^{ob} — соответственно падения напряжений характеризующие прямой и обратный токи; V_u^n и V_u^{ob} — соответственно величины, пропорциональные падению напряжения на диоде в прямом и обратном направлениях) определяются с помощью одного регистрирующего компенсационного прибора, с выхода которого СИП поступают в преобразователь аналог-цифра. В процессе измерения исследуемый диод ИД включается в цепь постоянного или переменного тока. Температура диода определяется с помощью дифференциальной термомпары T_p .

При исследовании вольтамперных характеристик диодов на постоянном токе факторами внешнего воздействия являются непрерывно изменяющиеся напряжение источника питания и температура окружающей среды, а при измерениях на переменном токе — дополнительно к этому и частота источника питания.

Для повышения точности измерений прямой и обратной ветвей вольтамперных характеристик диодов на постоянном токе система автоматизированного исследования непрерывно фиксирует четыре СИП: $(V_u, V_f, V_T, V_s) = f(U, T)$. Два из них (V_u и V_f) пропорциональны омическому падению напряжения на диоде и току через него как в прямом, так и в обратном направлениях; V_T — э.д.с. термопары, пропорциональная температуре исследуемого диода. Дополнительная регистрация V_s обусловлена необходимостью учета паразитных эффектов, возникающих на выпрямляющем переходе в отсутствие тока через диод. Последние могут быть обусловлены неизотермичностью образца, его нагревом за счет проходящего через него тока и т. п.

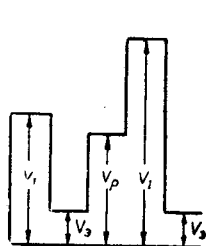


Рис. 4.

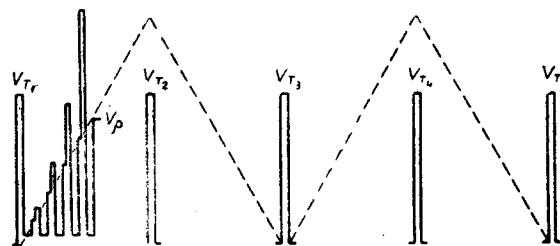


Рис. 5.

Эпюры регистрируемых падений напряжения и э.д.с., поступающих по заданному алгоритму исследования в ЭВМ (и для контроля фиксируемых на ЭПП и печатной ленте телеграфного устройства), представлены на рис. 4. Графическое изображение полного алгоритма исследования вольтамперных характеристик диодов в прямом и в обратном направлениях при непрерывном изменении питающего напряжения и температуры окружающей среды дано на рис. 5. Напряжение U линейно растет до предельного значения, затем падает до нуля соответственно в прямом и обратном направлениях; при этом оно разбивается на ряд фиксированных дискретных значений величин падения напряжения на исследуемом диоде.

Температура образца в процессе эксперимента фиксируется между нулевыми и максимальными значениями прикладываемого напряжения. При этом скорость нарастания температуры программируется таким образом, чтобы разность температур между началом (V_{T1}) и концом (V_{T5}) вольтамперной характеристики не превышала $2-3^\circ$.

Полный алгоритм исследования свойств диодов на постоянном и переменном токах при различных факторах внешнего воздействия (величина и частота напряжения источника питания и температура окружающей среды) приведен в таблице. Длительность регистрации измеряемых СИП одинакова и составляет 3 сек. Она определяется тепловой инерционностью образца и быстродействием регистрирующих устройств. Полный цикл измерения включает в себя регистрацию СИП, необходимых для вычисления и соответствующего построения вольтамперных характеристик диодов в прямом и обратном направлениях (на постоянном и переменном токах). Каждая из 5 операций цикла соответствует какому-либо одному первичному параметру, например, температуре, сопротивлению и т. п. При этом количество СИП, необходимое для вычисления первичного параметра, изменяется от одного до трех (соответственно температура, сопротивления на переменном токе, сопротивления на постоянном токе).

Наименование измеряемых параметров	Факторы внешнего воздействия	СИП	№ операции в измерительном цикле	Длительность регистрации СИП, сек	Коммутация СИП и сопутствующие команды			Количество операций в измерительном цикле
					точки съема	включения	источник питания	
Температура T	Тепловое поле	V_T	1	3	$a-v$			Пять (регистрируется через каждые восемь последовательных операций)
Сопротивление $R_{пр}$	Внутреннее электрическое поле (постоянное)	$V_э$	2	3	ИД		Пк (левое положение)	Шестнадцать
		$V_u^п$		3	ИД	$V_{к1}$		
$V_I^п$		3		R_1	$V_{к1}$			
Сопротивление $R_{обр}$		$V_э$	3	3	ИД		Пк (правое положение)	
		$V_u^{об}$		3	ИД	$V_{к1}$		
		$V_I^{об}$		3	R_1	$V_{к1}$		
Сопротивление $R_{пр}$	Внутреннее электрическое поле (переменное) фиксированной частоты	$V_I^п$	4	3	R_2	$V_{к2}$ $V_{к3}$ $V_{к4}$ $V_{к5}$	Переменный ток фиксированной частоты	Шестнадцать
		$V_u^п$		3	R_3	$V_{к2}$ $V_{к3}$ $V_{к4}$ $V_{к5}$		
$R_{обр}$		$V_I^{об}$	5	3	R_4	$V_{к2}$ $V_{к5}$		
		$V_u^{об}$		3	R_5	$V_{к2}$ $V_{к5}$		

В течение полного цикла измерения одновременно с регистрацией СИП и вычислением на ЭВМ первичных параметров вычисляются и вторичные параметры (энергия ионизации примесей, работа выхода, диэлектрическая постоянная и т. п.), обуславливающие физический механизм прохождения тока через диод. Так, при исследовании свойств тонкопленочных диодов в алгоритм вычисления были введены формулы [6, 7, 8], характеризующие различную функциональную зависимость тока I от напряжения U и температуры T . Например:

$$I \sim A_1 \left[\exp \frac{\beta_1 e U}{k T} - 1 \right];$$

$$I \sim A_2 \left[\exp \frac{\beta_2 \sqrt{|U|} - \Delta E}{k T} \right]; \quad I \sim A_3 T^2 \left[\exp \frac{\beta_3 \sqrt{|U|} - \varphi}{k T} \right].$$

Эти выражения получены в предположении, что асимметричный вид вольтамперных характеристик обусловлен разными физическими процессами, протекающими в диодах. Поэтому после вычисления констант (A_i , β_i , φ и ΔE) можно сделать некоторые выводы о физической модели протекания тока через исследуемый диод непосредственно в процессе эксперимента. Последовательность регистрации измеряемых СИП и сопутствующие им исполнительные команды осуществляются с помощью программного устройства. На рис. 6 приведены эксперименталь-

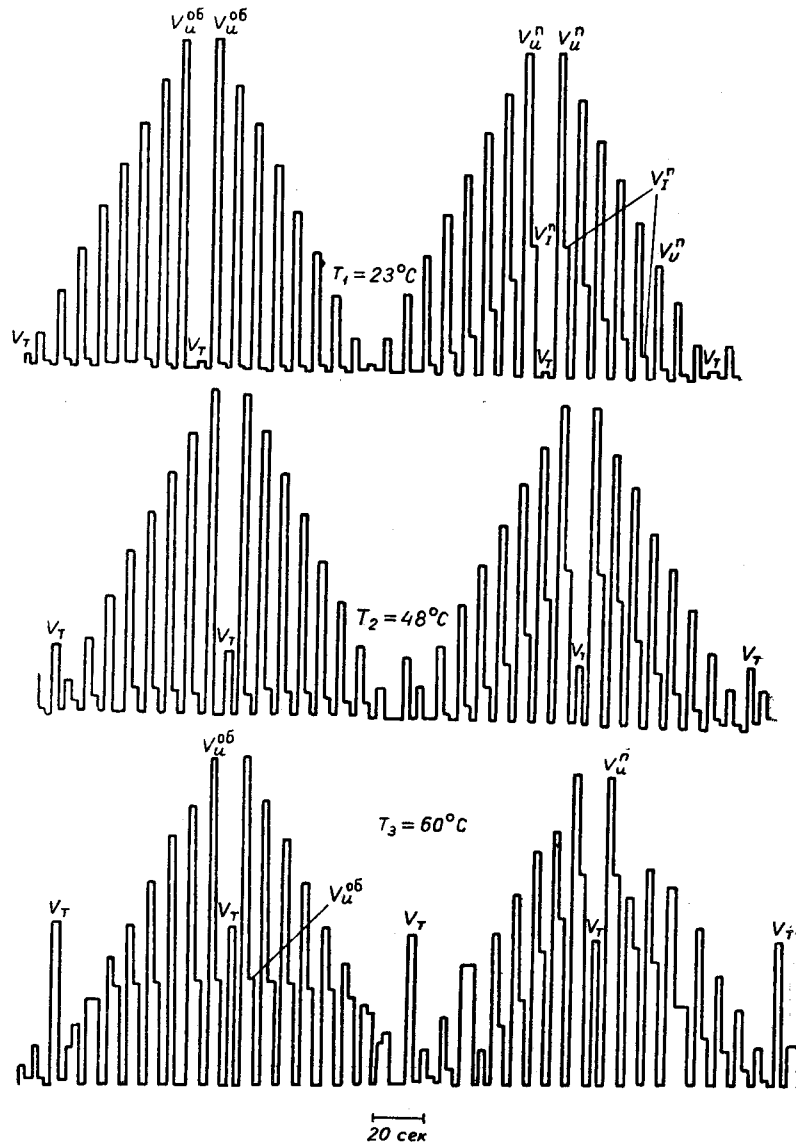


Рис. 6.

ные кривые, полученные при исследовании вольтамперных характеристик диодов типа Д2Е при различной температуре окружающей среды.

Предложенный метод и построенная на его основе система исследования свойств диодов сокращают время проведения эксперимента, повышают точность измерения регистрируемых параметров и окажутся весьма полезными при разработке технологии изготовления, разбраковке и контроле массовых партий приборов в производственных условиях.

Отметим, что подобным образом могут быть исследованы не только свойства полупроводниковых диодов, но и физические процессы, связанные с контактными явлениями в полупроводниках и диэлектриках.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Брук, В. В. Гаршенин, А. И. Курносов. Производство полупроводниковых приборов. М., Профтехиздат, 1963.
2. И. С. Лискер. Динамический метод определения температурного хода электропроводности полупроводников.— В сб. «Термоэлектрические свойства полупроводников». М., Изд-во АН СССР, 1963.
3. И. С. Лискер. Использование электронной вычислительной машины для комплексного исследования характеристик полупроводниковых материалов и управления физическим экспериментом.— В сб.: «Вычислительные системы», вып. 8. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
4. К. Б. Карандеев. Измерительные информационные системы и автоматика.— Вестник АН СССР, 1964, № 10.
5. Э. В. Евреинов, Ю. Г. Косырев. О системах автоматизации научных экспериментов для разработки вычислительной среды.— В сб.: «Вычислительные системы», вып. 8. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
6. А. И. Губанов. Теория выпрямляющего действия. М., Гостехиздат, 1956.
7. C. H. Sah, R. N. Noyce, W. Shockley. Carrier Generation and Recombination in $p-n$ junctions.— Proc. IRE, 1957, v. 45, p. 1228.
8. А. И. Ансельм. Введение в теорию полупроводников. М.—Л., Физматгиз, 1962.

*Поступила в редакцию 24 ноября 1964 г.,
после переработки — 16 декабря 1964 г.*