

К ВОПРОСУ АППРОКСИМАЦИИ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Полупроводниковые диоды — наиболее широко используемые элементы измерительной техники. Достоинствами их являются широкий диапазон частот, малая потребляемая мощность, малые габариты, высокая стабильность, большой срок службы.

Наряду с широким распространением в качестве выпрямителей и преобразователей, они нередко используются как функциональные нелинейные элементы во многих устройствах вычислительной аналоговой техники.

Такое применение диодов приводит к необходимости использования во многих случаях практики аналитического выражения вольтамперной характеристики.

В настоящее время известны несколько аналитических зависимостей вольтамперной характеристики монокристаллических диодов, которые в той или иной степени приближаются к характеристикам, найденным экспериментально. Универсального выражения для всех участков вольтамперной характеристики не существует.

Для начального участка характеристики (до 0,3 в) используется обычно уравнение вида [1], [2]:

$$i = A \cdot e^{-\frac{e \cdot E}{2kT}} \left(e^{\frac{e \cdot U}{kT}} - 1 \right), \quad (1)$$

где A — постоянная для данного вентиля;

E — ширина зоны;

k — постоянная Больцмана;

e — элементарный заряд;

T — абсолютная температура;

U — напряжение, приложенное к диоду.

Уравнение (1) справедливо, если сопротивлением базы в прямом направлении можно пренебречь.

В работе [3] введена поправка в уравнение (1), позволяющая учесть сопротивление базы диода:

$$i = A \cdot e^{-\frac{e \cdot E}{2kT}} \left(e^{\frac{e \cdot U}{kT}} - i \cdot r_0 - 1 \right), \quad (2)$$

где r_0 — сопротивление базы.

При достаточно большом токе в некоторых случаях экспоненциальная характеристика диода может считаться линейной.

Выражение (2), несмотря на проведенное уточнение, как показывает эксперимент, не удовлетворяет всей реальной вольтамперной характеристике. Поэтому в реальных расчетах оно обычно не используется, а применяется лишь [3] в некоторых случаях приближенных обобщений.

В ряде работ [3], [4] производились попытки создать аналитические выражения для определенных типов диодов. Например, в работе [4] показано, что с учетом возможных изменений температуры и электрофизических свойств кремния прямая ветвь вольтамперной характеристики диодов типа Д219А-Д220Б описывается уравнением

$$i_{np} = 1,8 \cdot 10^4 \cdot \exp \left[-\frac{0,8}{kT} + \frac{U_{np}}{T} \cdot 7,1 \cdot 10^3 \cdot (1 + 0,003 \cdot t) \right], \quad (3)$$

где k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура;

t — температура в °С;

i_{np} и U_{np} — прямой ток и напряжение соответственно.

Эта формула справедлива в диапазоне значений токов $3 \div 10$ для диодов типа Д219А и $0,5 \div 2$ мА для диодов Д220-Д220Б. Более точно вольтамперная характеристика в любом необходимом диапазоне может быть представлена степенным рядом

$$i = a_0 + a_1 \cdot U + a_2 \cdot U^2 + a_3 \cdot U^3 + a_4 \cdot U^4 + \dots \quad (4)$$

Использование степенного ряда очень неудобно в целом ряде случаев обобщения, так как количество членов и значение коэффициентов ряда зависят от температуры и технологического разброса, а их вычисление связано с громоздкими и трудоемкими операциями.

В связи с указанными недостатками существующих аппроксимаций вольтамперных характеристик полупроводниковых диодов автором в предлагаемом исследовании были предложены более целесообразные и универсальные выражения на основании экспериментального исследования большого количества полупроводниковых диодов различных типов при существующем технологическом разбросе в диапазоне температур $t \div 90^\circ\text{C}$.

$$i = (a + b \cdot e^{aT}) \cdot [U + c \cdot (t - 20) - i \cdot r_0]^n \quad (4) - I,$$

$$i = v + d \cdot (t - 20) \cdot \left[e^{\left[\frac{U + c' \cdot (t - 20) - i \cdot r_0'}{kT} \right]^m} - 1 \right] \quad (5) - II,$$

где $a, b, v, d, c, c', n, m, \alpha$ — коэффициенты, не зависящие от тока и температуры;

r_0, r_0' — коэффициент, пропорциональный сопротивлению базы;

U, i — соответственно напряжение и ток в прямом направлении;

t — температура в °С;

T — абсолютная температура.

Для нахождения коэффициентов используются известные методы, изложенные, например, в работе [5].

На рис. 1 представлен существующий технологический разброс полупроводниковых диодов для прямой ветви. Причем по оси абсцисс отложено напряжение

$$U' = [U + c \cdot (t - 20) - i \cdot r_0]. \quad (6)$$

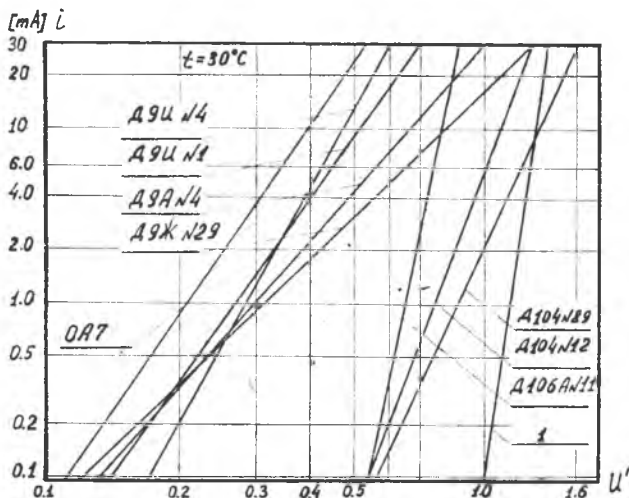


Рис. 1. Технологический разброс точечных германиевых и кремниевых диодов

Анализ показывает, что современные полупроводниковые диоды имеют широкий функциональный диапазон, начиная от золотопроводочных диодов типа OA7, кончая диффузионным диодом на арсениде галлия-1.

Следует заметить, что этот диапазон будет увеличиваться с разработкой новых диодов.

Предложенные зависимости (4) и (5) удовлетворяют всему указанному диапазону.

На рис. 2 в качестве иллюстрации представлены результаты расчета и эксперимента. Погрешность как по I, так и II виду аппроксимации не превышала 2%.

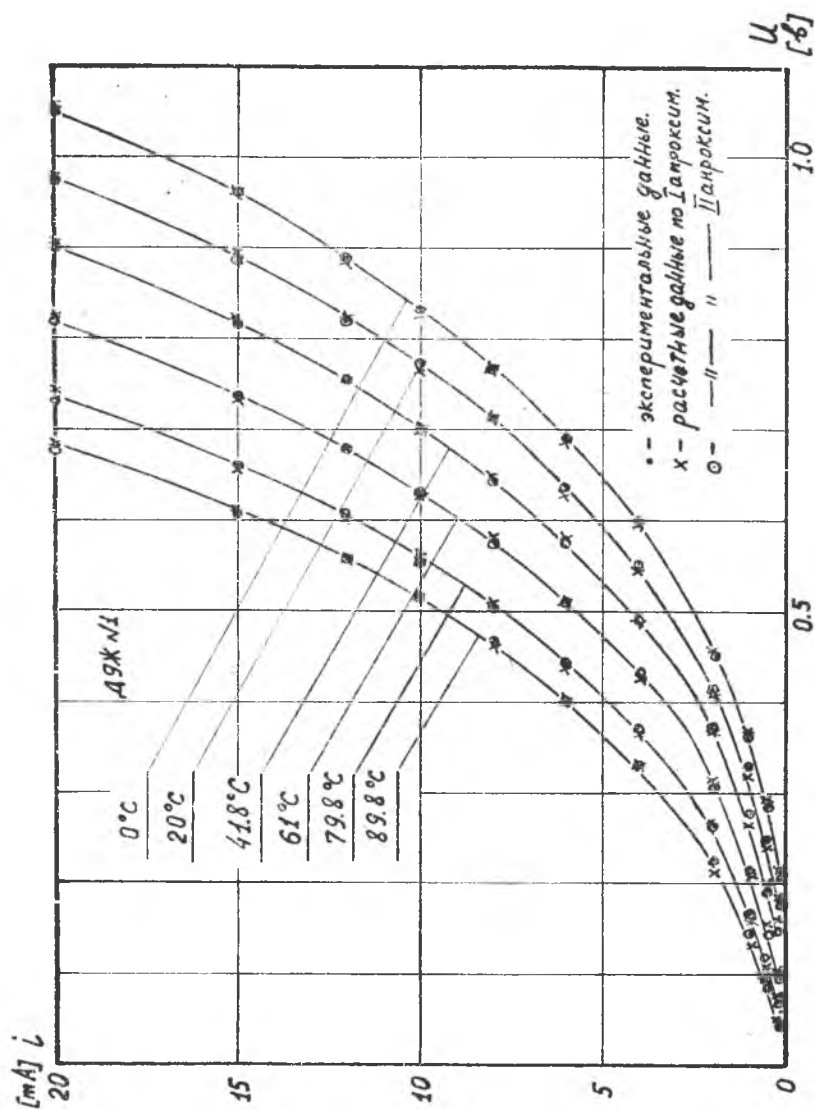


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

Реальные выражения для диода Д9Ж № 1 имеют вид

$$i = (17 + 2,23 \cdot 10^{-3} \cdot e^{0,025 \cdot T}) \cdot [U + 1,56 \cdot 10^{-3} \cdot (t-20)]^{2,63} \cdot 10^{-3};$$

$$i = [13,9 + 0,1875 \cdot (t-20)] \cdot (e^{[U+1,43 \cdot 10^{-3} \cdot (t-20) - i \cdot 0,8]^{2,3}} - 1) \cdot 10^{-3};$$

Необходимо иметь в виду, что уравнение (4) целесообразно применять для токов выше $50 \cdot 10^{-6}$ а, но оно значительно проще как при обработке экспериментальных данных, так и при использовании.

Уравнение (5) хотя и несколько сложнее, но имеет большую универсальность и позволяет исследовать вольтамперные характеристики диодов, начиная с нескольких микроампер как в прямом, так и в обратном направлении. В этом случае выражение (5) принимает следующий вид:

$$i = [v + d \cdot (t-20)] \cdot \{e^{[U+c' \cdot (t-20) - i \cdot r_0']^m} - e^{[c' \cdot (t-20)]^m}\}. \quad (8)$$

Таблица 1

	I							II					
	Ge			Si				Ge			Si		
<i>n</i>	242	268	514	526	66	102	<i>m</i>	2.3	3.5	5	2	3	6
$\alpha \cdot 10^{-3}$	11	17	320	2.35	6.1	87.7	<i>v</i>	13.9	95.5	408	2.86	5.0	600
$\beta \cdot 10^{-5}$	2.23	2.23	-	-	-	-	<i>d</i>	187.5	384	1440	660	1000	2430
α	0.025	0.025	0	0	0	0	β	-	-	-	17.1	17.1	17.1
$c \cdot 10^{-3}$	1.565	1.56	2.05	1.715	1.71	1.68	<i>c'</i>	1.43	1.41	1.395	1.2	1.24	1.37
r_0	0.1	0.1	0.05	70	18	3.6	r_0'	0.8	0.2	0.1	40	30.5	4.3
U_0'	-	-	-	-	-	-	U_0'	-	-	-	0.29	0.29	0.29
№ диодов	Д9Ж №29	Д9Ж №1	Д9Ж №4	Д104 №89	Д104 №12	Д106А №11	№ диодов	Д9Ж №1	Д9Ж №1	Д9Ж №4	Д104 №29	Д104 №5	Д106А №11

Уравнения (4) и (5) можно использовать для исследования отдельных участков вольтамперных характеристик различных нелинейных элементов, а также и кремниевых стабилитронов.

В табл. 1 представлены расчетные коэффициенты для I и II аппроксимаций по технологическому разбросу.

Сопоставляя расчетные и экспериментальные данные, можно прийти к следующим выводам. Температурные перемещения вольтамперной характеристики для германиевых диодов в зависимости от r_0 и $\alpha \neq 0$ имеют сложный характер. На рис. 2 (Д9Ж № 1) можно проследить, что характеристика $i=f(U)$ при увеличении температуры смещается вдоль оси абсцисс к началу координат и одновременно веерообразно разворачивается к оси ординат. При $r_0 \cong 0$ и $\alpha = 0$ для диода Д9У № 4, рис. 3, происходит только смещение вдоль оси абсцисс. На том же рис. 3 для крем-

ниевго диода Д106А № 11 имеем $r_0 \neq 0$, $\alpha = 0$ и, вследствие этого наблюдается сужение семейства характеристик с ростом тока, ввиду увеличения падения напряжения на r_0 . Это в основном становится заметным при токе выше 15 мА.

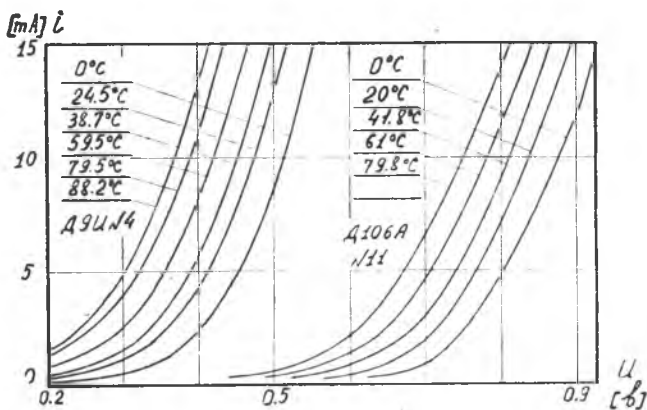


Рис. 3. Вольтамперные характеристики германиевого и кремниевого диода

Проведенное исследование позволяет сделать заключение, что предложенные аналитические выражения для вольтамперных характеристик полупроводниковых диодов являются наиболее целесообразными и могут с успехом быть использованы как для случая обобщения, так и для практических расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Heywang W., Henker H., Physik und Technologie von Richtleitern und Transistoren, Z. Elektrochem., 58, 1954, Н. 5, S. 283—321.
- 2 Seddon B., Application of Theory to Germanium and Silicon Rectifiers, Kap. 10: Stuart P. Jackson: Selection and Application of Metallic Rectifiers. Mc Graw—Hillbook Comp Inc., New York, Toronto, London, 1957.
- 3 Н. Г. Алферьева. О коэффициенте выпрямления точечных высоковольтных германиевых выпрямителей. Автоматический контроль и электрические измерения, вып. 1, 1960 г. АН СССР СО. Институт автоматике и электрометрии.
- 4 Ю. Р. Носов, Л. В. Губырин. Полупроводниковые диоды. Полупроводниковые приборы и их применение. Сб. статей под ред. Федотова Я. А., вып. 12, 1964.
- 5 Л. С. Блох. Основные графические методы обработки опытных данных, 1951.