

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ БАЗЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА ИЗ ИЗМЕРЕНИЙ ИМПЕДАНСА ДИОДА ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ УРОВНЯХ ИНЖЕКЦИИ

А. Г. АЛЕКСАНИЯН, Н. С. АРАМЯН, Р. К. КАЗАРЯН

Институт радиопизики и электроники АН АрмССР

(Поступила в редакцию 28 января 1989)

Показывается, что на основе измерений импеданса полупроводникового диода с p - n -переходом при учёте импеданса базы диода наряду с импедансом p - n -перехода можно определить, кроме времени жизни дырок в базе τ_p , также отношение длины базы к диффузионной длине $\frac{W}{L_p}$, W ,

L_p , концентрацию основных равновесных носителей в базе диода n_n , эффективную площадь p - n -перехода A .

Измерение импеданса полупроводникового диода с p - n -переходом, смещённого в пропускном направлении, обычно используется для определения времени жизни неосновных носителей в базе диода (фазовый метод измерения времени жизни) [1]. В этом методе предполагается, что модуль импеданса базы диода пренебрежимо мал по сравнению с импедансом собственно p - n -перехода, что вынуждает ограничиться низкими уровнями инжекции. Поэтому фазовый метод не позволяет проследить зависимость времени жизни от уровня инжекции. Кроме того, этот метод не даёт сведений об отношении $\frac{W}{L_p}$ (W — длина базы, L_p — диффузионная длина), знание которого необходимо для правильной интерпретации опытных данных.

Исследование импеданса полупроводникового диода с учетом импеданса базы проводилось в ряде работ, например, в [2, 3]. В них показано, что при высоких уровнях инжекции происходит смена знака мнимой части импеданса диода, после которой реактивность диода носит индуктивный характер. Индуктивность диода при высоких уровнях инжекции рассматривалась главным образом в связи с возможностью их использования в качестве полупроводниковых индуктивностей с высокой добротностью [4÷8].

В данной работе показано, что рассмотрение особенностей импеданса диода с учетом вклада импеданса базы позволяет значительно расширить возможности фазового метода и определять на основе измерений импеданса диода зависимость времени жизни от уровня инжекции, отношение $\frac{W}{L_p}$, длину базы W , равновесную концентрацию основных носителей в базе n_n и эффективную площадь p - n -перехода A .

Содержание метода

В работе [2] (в приближении одномерности движения носителей тока с коэффициентом инжекции, равным единице, и скоростью поверхностной рекомбинации S на омическом контакте, равной $S = \infty$) получено наиболее общее выражение для импеданса полупроводникового диода с p - n -переходом. Однако использование этого выражения для определения параметров полупроводника затруднено из-за громоздкости полученных формул. В то же время, если предположить, что диод, к которому приложено напряжение $U = U_0 + U_1 e^{i\omega t}$ с $U_1 \ll \frac{kT}{q}$ имеет длину базы,

удовлетворяющую условию $\frac{W}{L_p} \gg 1$, и $\left(m e^{\frac{W}{L_p}} \right)^2 \gg 1$ (где ρ_{p-n} , $\rho_{базы}$ —

удельные сопротивления p - n -перехода и базы соответственно, L_{p-n} — область объемного заряда), то в приближении низких частот $\omega \tau_p \ll 1$, выражения для импеданса существенно упрощаются и принимают вид:

$$\operatorname{Re}(\dot{Z}_D) = \operatorname{Re}(\dot{Z}_{p-n}) \frac{b-1}{(b+1)(1+m)}, \quad (1)$$

$$\operatorname{Im}(\dot{Z}_D) = \operatorname{Im}(\dot{Z}_{p-n}) \frac{b-1}{(b+1)(1+m)}, \quad (2)$$

$$\operatorname{Re}(\dot{Z}_T) = \operatorname{Re}(\dot{Z}_{p-n}) \left[\frac{\frac{W}{L_p} + l_n \left(\frac{b m}{1 + b m} \right)}{(b+1)m} - \frac{1}{(b+1)m(1+m)} \right], \quad (3)$$

$$\operatorname{Im}(\dot{Z}_T) = -\operatorname{Im}(\dot{Z}_{p-n}) \left[\frac{1 + \frac{W}{L_p}(1+m)}{(b+1)m(1+m)} + \frac{1}{(b+1)m} l_n \left(\frac{1+m}{1 + m e^{\frac{W}{L_p}}} \right) \right], \quad (4)$$

$$\text{где} \quad \operatorname{Re}(\dot{Z}_{p-n}) = \frac{kT}{q I_0}, \quad (5a)$$

$$\operatorname{Im}(\dot{Z}_{p-n}) = -\frac{kT}{q I_0} \frac{\omega \tau_p}{2}, \quad (56)$$

$m = \frac{b}{b+1} \frac{I_0}{I_0}$, I_0 — постоянная составляющая тока через диод,

$$I_0 = \frac{k I}{q} \frac{\sigma_b A}{b L_p} \quad (6)$$

ток, при котором наступает равенство концентраций инжектированных неосновных и основных равновесных носителей [9], σ_b — удельная проводимость материала базы, q — заряд электрона, $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$, τ_p — время жизни дырок в базе, A — площадь p - n -перехода. В вышеприведенных

формулах $\dot{Z}_D$ — Демберовское полное сопротивление, Z_T — токовое полное сопротивление, $\dot{Z}_{p-n}$ — полное сопротивление р-п-перехода. Из (2) и (4) видно, что кроме τ_p в выражения для $\text{Im}(\dot{Z}_D)$ и $\text{Im}(\dot{Z}_T)$ входят еще два неизвестных параметра $\frac{W}{L_p}$ и m , для нахождения которых необходимо иметь два независимых уравнения. Выше указывалось, что при некотором значении тока $I_0^{(1)}$ выполняется условие

$$\text{Im}(\dot{Z}_D) + \text{Im}(\dot{Z}_T) + \text{Im}(\dot{Z}_{p-n}) = 0. \quad (7)$$

Рассмотрим также значение тока $I_0^{(2)}$, при котором выполняется следующее равенство

$$\text{Re}(\dot{Z}_D) + \text{Re}(\dot{Z}_T) = \text{Re}(\dot{Z}_{p-n}). \quad (8)$$

Решение уравнения (7), при условии $m e^{\frac{W}{L_p}} \gg 1$, позволяет определить величину тока I_0 , решение уравнения (8) — значение $\frac{W}{L_p}$. Исходя из (2), (4) и (5б), легко получить выражение для времени жизни дырок:

$$\tau_p = \frac{q I_0}{k T} \frac{2}{\omega} \times \left[\frac{\text{Im}(\dot{Z}_{\text{диода}})}{1 + \frac{W}{L_p} (1+m)} + \frac{1}{(b+1)m} \ln \left(\frac{1+m}{1 + m e^{\frac{W}{L_p}}} \right) - \frac{b-1}{(b+1)(1+m)} - 1 \right] \quad (9)$$

Нетрудно видеть, что знание тока I_0 позволяет определить концентрацию равновесных основных носителей в базе диода:

$$n_n = n_i e^{\frac{q[U_0 - I_0 R_0(I_0)]}{2KT}}, \quad (10)$$

где U_0 — напряжение на диоде при токе I_0 , $R_0(I_0)$ — сопротивление базы постоянному току при $I_0 = I_0$.

Эффективная площадь р-п-перехода может быть найдена из формулы (6).

Экспериментальные результаты

Схема, с помощью которой измерялись активная и реактивная составляющие импеданса диода, показана на рис. 1. На диод, смещенный в прямом направлении, как и в фазовом методе, через калиброванное сопротивление R подается переменный сигнал малой амплитуды (0,5 мВ в нашем случае), который поступает на вход схемы сравне-

ния. На второй вход этой схемы через фазосдвигающую цепь подается компенсирующий сигнал, противоположный по фазе напряжению U . Скомпенсировав активную составляющую сигнала на диоде, можно измерить реактивную составляющую на выходе усилителя. Перед измерением вместо диода подключается активное сопротивление и настраивается фаза компенсирующего сигнала с помощью фазосдвигающей цепи.

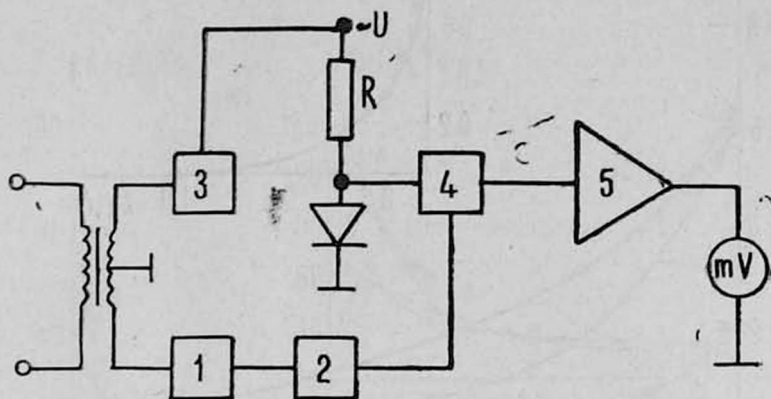


Рис. 1. Схема измерения составляющих импеданса

- 1—фазосдвигающая цепь;
- 2 и 3—эмиттерные повторители;
- 4—сравнивающий каскад;
- 5—усилитель.

Схожая методика измерения применена в работе [10] для измерения импеданса высокоомных образцов в диапазоне частот $100 \text{ Гц} \div 10 \text{ кГц}$. В данной работе наличие фазосдвигающей цепи позволяет скомпенсировать паразитные фазовые сдвиги и повысить частоту измерения (до 1 МГц в нашем случае). Нетрудно показать, что при измерении напряжений прибором класса 1,0, погрешности установки частоты $\sim 2\%$ и погрешности сопротивления $R \sim 5\%$, погрешность измерения составляющих импеданса не превышает 10% .

Измерения проводились с промышленными диодами марок Д106А, Д219А, Д220А и Д223Б. По результатам измерений $\text{Im}(\dot{Z}_{\text{дио́да}})$ графически определялся ток $I_0^{(1)}$, при котором $\text{Im}(\dot{Z}_{\text{дио́да}}) = 0$. Затем из данных измерения $\text{Re}(\dot{Z}_{\text{дио́да}})$ определялось активное сопротивление базы: $\text{Re}(\dot{Z}_0) = \text{Re}(\dot{Z}_{\text{дио́да}}) - \text{Re}(\dot{Z}_{p-n})$, где $\text{Re}(\dot{Z}_{p-n})$ дается формулой (5а). Величина тока $I_0^{(2)}$ определялась из условия (8) также графически. Уравнение (7) относительно I_b решалось по программе на микрокалькуляторе, затем из уравнения (8) при известном значении I_b определялась величина $\frac{W}{L_p}$. Зная величины $\frac{W}{L_p}$ и I_p , по формуле (9) вычислялось время жизни. На рис. 2. показаны графики зависимости времени жизни от тока через диод. Ход этих кривых не противоречит известным из литературы экспериментальным данным [11]. Пос-

кольку τ_p зависит от уровня инжекции, то ясно, что здесь измеряется среднее по длине базы время жизни. Численные значения параметров исследованных диодов, вычисленные на основе измерений по вышеприведенным формулам, приведены в таблице.

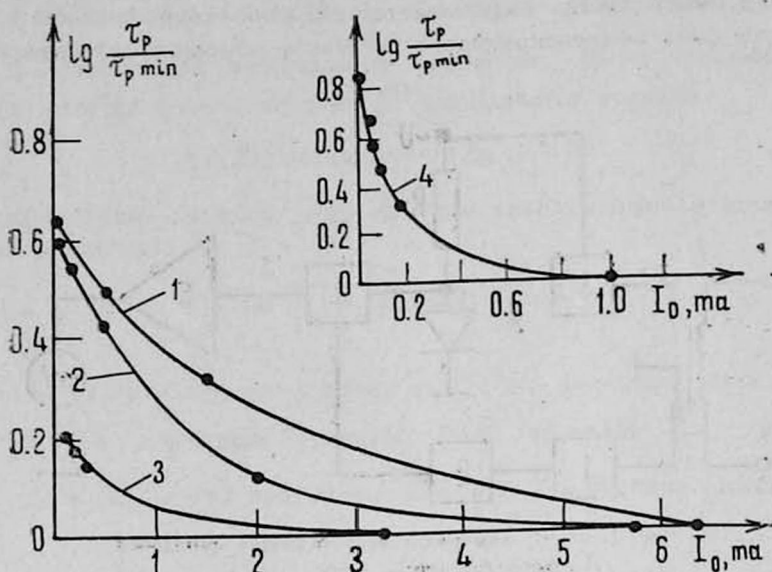


Рис. 2. Графики зависимостей времени жизни от тока через диод:

- | | | |
|----------|--|----------------|
| 1—Д223Б, | $\tau_{pmin} = 4,5 \cdot 10^{-7}$ сек, | $f = 50$ кГц; |
| 2—Д219А, | $\tau_{pmin} = 5,3 \cdot 10^{-8}$ сек, | $f = 200$ кГц; |
| 3—Д220А, | $\tau_{pmin} = 1,1 \cdot 10^{-7}$ сек, | $f = 300$ кГц; |
| 4—Д106А, | $\tau_{pmin} = 1,3 \cdot 10^{-7}$ сек, | $f = 50$ кГц. |

Параметр	$\frac{W}{L_p}$	L_p мкм	W мкм	I_0 мА	n_A см ⁻³	A мм ²	$A_{барьерн}$ мм ²
Тип диода							
Д219А	2,5	18	45	0,53	$5,2 \cdot 10^{14}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	$19,4 \cdot 10^{-2}$
Д220А	3,4	17,4	59,7	0,80	$5,2 \cdot 10^{14}$	$11,8 \cdot 10^{-2}$	$24,3 \cdot 10^{-2}$
Д223Б	2,3	54,4	124	1,06	$2,0 \cdot 10^{15}$	$12,9 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$
Д106А	2,3	37,6	85,4	0,16	$2,0 \cdot 10^{15}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$0,73 \cdot 10^{-2}$

L_p определялось по формуле $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$, значение τ_p бралось для наименьшего из значений тока через диод, при которых проводились измерения. В последнем столбце таблицы приведены значения площади p - n -перехода, вычисленные из данных измерения барьерной емкости перехода при его обратном смещении с использованием значения концентрации носителей, полученного из измерений импеданса диода при его прямом смещении. Различия между A и $A_{барьерн}$ следовало ожидать, т. к.

барьерная емкость формируется по всей площади собственно p - n -перехода, тогда как при прямом смещении p - n -перехода в зависимости от конфигурации перехода и тылового контакта эффективная площадь, пропускающая ток, может быть как больше, так и меньше площади собственной p - n -перехода.

На рис. 3. показаны зависимости от тока через диод измеренно величины $Re(\dot{Z}_g)$, а также графики зависимости $Re(\dot{Z}_g)$ от I_0 , рас-

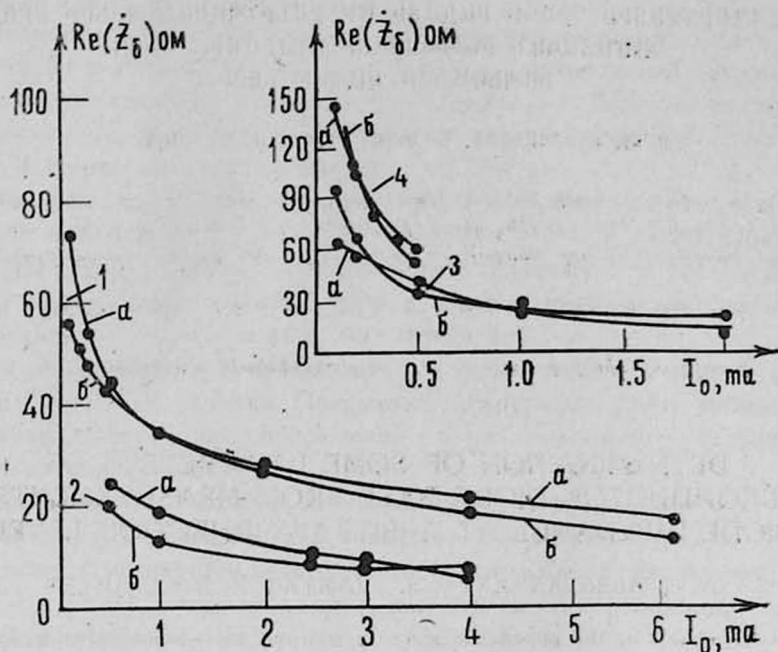


Рис. 3. Графики зависимости $Re(Z_g)$ от I_0 : 1—Д220А; 2—Д223Б; 3—Д219А; 4—Д106А; а—эксперимент, б—расчет.

считанные с использованием значений $\frac{W}{L_p}$ и I_0 на основе формул (1) и (3). Хорошее совпадение экспериментальных и рассчитанных зависимостей свидетельствует в пользу применимости данного метода для определения параметров базы полупроводникового диода.

Авторы выражают благодарность Сарибекян Г. В. за помощь в проведении расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адирович Э. И., Губкин А. И., Копыловский Б. Д. ФТТ, 4, 1853 (1962).
2. Синица С. П. Радиотехника и электроника, 7, 1427 (1962).
3. Авакянц Г. М. и др. Радиотехника и электроника, 8, 1594 (1963).
4. Галаванов В. В., Наследов Д. Н., Рзаев М. А. Радиотехника и электроника, 9, 556 (1964).
5. Прима Н. А., Тхорик Ю. А. ФТП, 1, 535 (1967).
6. Аронов Д. А., Котов Я. П. ФТП, 2, 404 (1968).

7. Аронов Д. А., Котов Я. П., Котов Е. П. Радиотехника и электроника, 16, 1518 (1971).
8. Климов Б. Н. и др. Радиотехника и электроника, 18, 1082 (1973).
9. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем, М., 1977, 670 с.
10. Бродовой В. А., Дерикот Н. Э., Корень Г. А. Полупроводниковая техника и микроэлектроника, вып. 19, 75 (1975).
11. Баранов Л. И., Селищев Г. В. Радиотехника и электроника, 16, 404 (1971).

ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴԱՅԻՆ ԴԻՈԴԻ ԲԱԶԱՅԻ ՄԻ ՔԱՆԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ԿԱՄԱՅԱԿԱՆ ԻՆԺԵԿՑԻԱՅԻ ՌԵԺԻՄՈՒՄ ԴԻՈԴԻ ԻՄՊԵԴԱՆՍԻ ՉԱՓՈՒՄՆԵՐԻՑ

Ա. Գ. ԱԼԵՔՍԱՆՅԱՆ, Ն. Ս. ԱՐԱՄՅԱՆ, Ռ. Դ. ԶԱԶԱՐՅԱՆ

Յույց է տրված, որ հաշվի առնելով կիսահաղորդչային դիոդի բազայի իմպեդանսը $p-n$ անցման իմպեդանսի հետ միասին, դիոդի իմպեդանսի չափումներից կարելի է որոշել, բացի բազայում խոռոչների կյանքի տևողության ժամանակից, նաև բազայի երկարության հարաբերությունը դիֆուզիոն երկարության հետ W/L_p , W , L_p հիմնական հավասարակշռված լիցքակիրների n_p խտությունը դիոդի բազայում, $p-n$ անցման էֆեկտիվ մակերեսը:

DETERMINATION OF SOME PARAMETERS OF SEMICONDUCTOR DIODE BASE FROM MEASUREMENTS OF DIODE IMPEDANCE AT ARBITRARY INJECTION LEVELS

A. G. ALEKSANYAN, N. S. ARAMYAN, R. K. KAZARYAN

Measurements of the impedance were carried out for a semiconductor diode with $p-n$ transition at high injection levels. The diode base impedance has been taken into account along with the $p-n$ transition impedance. This allows one to determine the hole lifetime, the ratio of base length to the diffusion length, the concentration of majority carriers as well as the efficient $p-n$ transition area.

Изв. АН Армянской ССР, Физика, т. 25, вып. 1, 42—47 (1990)

УДК 669.15'24:539.186.3

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА СВЕРХСТРУКТУРУ Ni_3Fe В ВЫСОКОНИКЕЛЕВЫХ ПЕРМАЛЛОЯХ

А. Д. ГЕЗАЛЯН, В. И. ГОМАНЬКОВ, В. Г. ФЕДОТОВ

Институт прецизионных сплавов Центрального научно-исследовательского института черной металлургии им. И. П. Бардина

(Поступила в редакцию 15 марта 1989 г.)

С помощью нейтронографического метода исследовано влияние легирующих добавок на атомное упорядочение Ni_3Fe . Получены зависимости степени дальнего порядка от содержания галлия, иттрия, гафния и рения.