

Высоковольтные тиристорные модули различной структуры и конфигурации находят все более широкое применение в мощных вы-
сокочастотных преобразователях электрической энергии. В связи с
этим рассмотренный испытательный стенд в сочетании с разработа-
нным методом расчета, допускающим обоснованный выбор номиналов
и электрических параметров стенда при различных формах тока через
исследуемый модуль, позволяет сократить сроки и стоимость проек-
тирования и экспериментальной доработки готовых образцов преоб-
разователей различного назначения.

ЕрIII им. К. Маркса

29. I. 1986

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Минасян В. Л. Цифровое моделирование переходных процессов в подсистемах «ти-
ристор-защитная цепь» // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.—1980.—Т. XXXIII, № 1.—
С. 13—20.
2. Мустафа Г. М., Минасян В. Л., Рудыцкий Р. Ш. Моделирование тиристора и на-
сещающихся реакторов при анализе процессов переключения // Электротех-
ника—1982.—№ 10.—С. 40—43.
3. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: Ч. 1—М.: Энергия, 1970.—
592 с.

Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XLII, № 4, 1986

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

С. О. МКРТЧЯН, С. Ж. ЕСЯН, М. Г. АБГАРЯН

КИНЕТИКА ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В ДИФФУЗИОННОЙ ЗОНЕ СИСТЕМЫ НИКЕЛЬ-АЛЮМИНИЙ

Двухкомпонентные металлические системы широко применяются
в микроэлектронике, например, в качестве многослойной металлиза-
ции микросварных соединений и т. д.

Для исследования кинетики фазообразования в диффузионной зо-
не никель-алюминий были изготовлены биметаллические образцы пу-
тем последовательного напыления на подложку пленок никеля и алюми-
ния, толщина которых составляет около 7 мкм. Пленки были получе-
ны электронно-лучевым методом на установке марки УВН—82П-1. От-
жиг образцов проводился на воздухе, в печи, обеспечивающей диапа-
зон температур 50—900°C. На полученных биметаллических образцах
были выполнены шлифы поперек зоны контакта. Исследование шли-
фов с целью определения размера и состава выросших фаз в диффу-
зионной зоне проводилась на металлографическом микроскопе ММУ-
3 и рентгеновском микроанализаторе ЖХА-4. Результаты эксперимен-
тов приведены в таблице.

Отсутствие фазы NiAl₂, по-видимому, может быть обусловлено малой
областью гомогенности фазы на диаграмме состояний и низкой вели-

чиной коэффициента взаимной диффузии в данной фазе. Подобный выбор режимов отжига обеспечивает адекватность режимов изготовления, где $T_1=350^\circ\text{C}$ —температура микросварки, а $T_2=125^\circ\text{C}$ —температура испытания и эксплуатации реальных приборов.

Таблица

Температура отжига, $^\circ\text{C}$	Время отжига, ч	Фазы в диффузионной зоне	Толщина фазы, мм
350	60	Ni_2Al_3	1,3
		NiAl	1,5
		Ni_3Al	0,7
125	500	Ni_2Al_3	0,7
		NiAl	1
		Ni_3Al	0,6

Эффективный коэффициент диффузии в фазе, образующейся в диффузионной зоне, описывается формулой [1]

$$D_i = \frac{1}{2t} \frac{\Delta x_i}{\Delta C^{(i)}} \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} \Delta x_j \quad (1)$$

где ε_{ij} — коэффициент, определяющийся составом исходных образцов C , C^* , образующих диффузионную пару, граничными концентрациями фаз на равновесной диаграмме состояний ($C^{(1)}$, $C^{(2)}$, ..., $C^{(n)}$):

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{4} (C^{(i)}(1 - C^{(j)}) + C^{(j)}(1 - C^{(i)}) + 2C^{(j)}(1 - C^{(i)})) & \text{при } i = j, \\ C_{cp}^{(i)}(1 - C_{cp}^{(j)}) & i < j, \\ C_{cp}^{(j)}(1 - C_{cp}^{(i)}) & i > j; \end{cases}$$

Δx_i , Δx_j — увеличение ширины фаз i , j после изотермического отжига, см; t — время отжига, с; $\Delta C^{(i)} = \frac{C^{(i)} - C^{(i)}}{C^* - C}$ — приведенная концентрация.

В случае взаимодействия в исходном состоянии чистых металлов: $C^* = 0$; $C = 1$; $\Delta C^{(i)} = C^{(i)} - C^{(i)}$.

Когда в диффузионной зоне образуются три фазы, формула (1) может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} D_1 &= \frac{\Delta x_1}{2t} \frac{1}{\Delta C^{(1)}} (\Delta x_2 \varepsilon_{12} + \Delta x_3 \varepsilon_{13} + \Delta x_1 \varepsilon_{11}); \\ D_2 &= \frac{\Delta x_2}{2t} \frac{1}{\Delta C^{(2)}} (\Delta x_3 \varepsilon_{23} + \Delta x_2 \varepsilon_{22} + \Delta x_1 \varepsilon_{21}); \\ D_3 &= \frac{\Delta x_3}{2t} \frac{1}{\Delta C^{(3)}} (\Delta x_1 \varepsilon_{31} + \Delta x_2 \varepsilon_{32} + \Delta x_3 \varepsilon_{33}). \end{aligned} \quad (2)$$

Подставляя значения $\Delta C^{(2)} = 0,035$, $\Delta C^{(3)} = 0,15$, $\Delta C^{(4)} = 0,045$ [2], а также

$$\begin{aligned} \varepsilon_{22} &= 0,231, & \varepsilon_{23} &= 0,185, & \varepsilon_{24} &= 0,097 \\ \varepsilon_{32} &= 0,185, & \varepsilon_{33} &= 0,232, & \varepsilon_{34} &= 0,13, \\ \varepsilon_{42} &= 0,097, & \varepsilon_{43} &= 0,14, & \varepsilon_{44} &= 0,183, \end{aligned}$$

получаем: $D_2 = 8,3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$; $D_3 = 1,66 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$; $D_4 = 1,74 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$. Значения констант скоростей роста фаз определялись по формуле

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_{ij} K_i K_j = h_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (3)$$

где $h_i = 2D_i \Delta C^{(i)}$; $K_i = \Delta x_i / \sqrt{t}$; $K_j = \Delta x_j / \sqrt{t}$.

Задача решена методом итерации по Зейделя на ЭВМ ЕС-1022. Точность метода итерации задавалась следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n \text{mod} (K_i^{(p)} - K_i^{(p-1)}) < \varepsilon, \quad \varepsilon = 10^{-10}$$

В результате получены значения констант скоростей роста для фаз Ni_2Al_3 , NiAl , Ni_3Al соответственно:

$$K_2 = 0,443 \cdot 10^{-6} \text{ см} \cdot \text{с}^{-\frac{1}{2}}, \quad K_3 = 0,280 \cdot 10^{-6} \text{ см} \cdot \text{с}^{-\frac{1}{2}},$$

$$K_4 = 0,148 \cdot 10^{-6} \text{ см} \cdot \text{с}^{-\frac{1}{2}}.$$

Временная зависимость толщины фаз, показывающая параболический закон роста, при $T = 350^\circ\text{C}$ представлена на рис. 1.

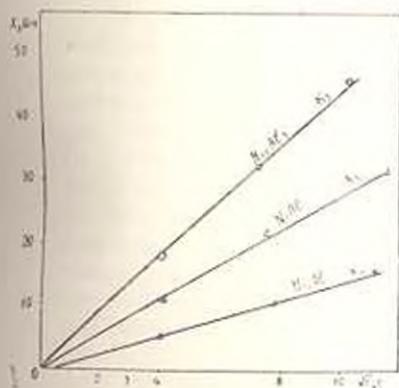


Рис. 1. Параболический закон роста интерметаллических фаз Ni_2Al_3 , NiAl , Ni_3Al при $T = 350^\circ\text{C}$.

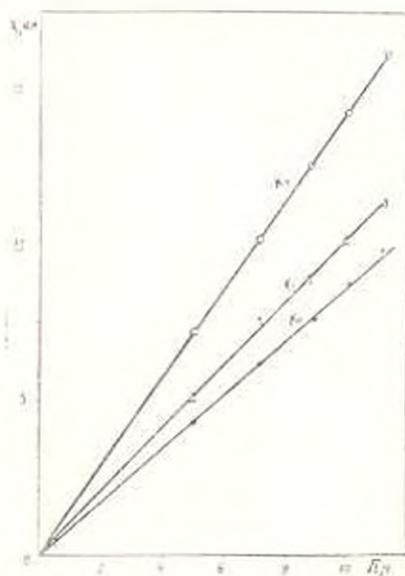


Рис. 2. Параболический закон роста интерметаллических фаз NiAl , NiAl , Ni_3Al при $T = 125^\circ\text{C}$.

Аналогичным образом были рассчитаны эффективные значения коэффициентов взаимной диффузии

$$D_1 = 2,2 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad D_2 = 7,9 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad D_3 = 1,13 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$$

и константы скоростей роста фаз

$$K_1 = 0,51 \cdot 10^{-7} \text{ см} \cdot \text{с}^{-\frac{3}{2}}, \quad K_2 = 0,72 \cdot 10^{-7} \text{ см} \cdot \text{с}^{-\frac{1}{2}},$$

$$K_3 = 0,445 \cdot 10^{-7} \text{ см} \cdot \text{с}^{-\frac{1}{2}} \text{ при } T = 125 \text{ C.}$$

Временные зависимости толщины фаз приведены на рис. 2.

ЕрПИ им К Маркса

22. IX. 1986

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гуров К. П., Карташкин Б. А., Югаста Ю. Э. Взаимная диффузия в многофазных металлических системах — М.: Наука, 1981. — 350 с.
2. Хансен М., Андеренко К. Структура двойных сплавов. — М.: Металлургия, 1962. — 508 с.