

# ФРАКТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА КМП AL-TiCu/N-Si

И.М. ЭФЕНДИЕВА

БГУ, НИИ Проблем Физики

Баку / АЗЕРБАЙДЖАН

*I\_afandiyeva@mail.ru*

## РЕЗЮМЕ

Исследованы ВАХ диодов Шоттки Al-TiCu/n-Si с поликристаллической металлической пленкой в температурном диапазоне (298-458)К. Зависимости характеристик от температуры и напряжения объяснены с учетом поликристаллической структуры металлической пленки. Определена электрически активная площадь диодов, вычислена фрактальная размерность по аналогии с «ковром Серпинского».

**Ключевые слова:** диоды Шоттки, неоднородный барьер, фрактальная размерность.

## THE FRACTAL INVESTIGATIONS OF AL-TiCu/N-Si MSC INTERFACE

### ABSTRACT

I-V characteristics of Al-TiCu/n-Si Schottky diodes with polycrystalline metal film have been investigated in the temperature range (298-458)K. Dependence of the characteristics on the temperature and voltage are explained in the light of polycrystalline structure of metal film. The electrically active area of diodes and the fractal dimension have been calculated by analogy with the Sierpinski carpet.

**Key words:** Schottky diodes, inhomogeneous barrier, fractal dimension.

## Введение

Целью современной электроники является развитие новых научно-технологических направлений и их быстрее внедрение в промышленное производство [1]. При этом основная тенденция развития основывается на микроминиатюризации и многофункциональном использовании приборов. Достижения в области физики низкоразмерных систем, развитие технологии [1], интерес к тонким структурам создают предпосылки для разработки новых контактов с заведомо известными качествами, проявляющимися в узком диапазоне изменения действующих факторов. В этой связи представляет интерес исследование диодов Шоттки с поликристаллической

металлической пленкой, изготовление которых с технологической точки зрения значительно проще. Подчиняющаяся принципам самоорганизации островковая структура границы раздела представляет собой совокупность параллельно соединенных диодов [2]. Неоднородная толщина диэлектрического зазора, различные контактные площади элементарных диодов, а следовательно и различные их электрофизические параметры приводят к неоднородной зависимости тока от напряжения [1-3]. С целью объяснения этой зависимости нами была сделана попытка определения фрактальной размерности границы раздела КМП [4,5].

В исследуемых диодах сплав металлов  $Ti_{0,9}Cu_{0,1}$  был нанесен методом магнет-

ронного распыления на полупроводниковую подложку (Si(111),  $\rho = 0,7 \text{ Ом см}$ ). Диодная матрица содержала 14 диодов, площади которых изменялись в диапазоне  $(1-14) \times 10^{-6} \text{ см}^2$ . Были получены ВАХ в температурном диапазоне (298-458)К при прямом и обратном смещениях в интервале (0,1 - 0,5)В и (-0,1 ÷ - 15)В соответственно.

### Результаты и обсуждения

Согласно диодной теории при выполнении условия  $U \gg 3kT/q$  для диодов Шоттки с тесным контактом и однородной границей раздела зависимость тока от напряжения определяется выражением [3,6]:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) \right] \quad (1)$$

где  $q$  - заряд электрона,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура в Кельвинах,  $n$  - фактор идеальности,  $V$  - напряжение при прямом смещении,  $I_0$  - ток насыщения, описываемый выражением:

$$I_0 = SA^*T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_{bo}}{kT}\right) \quad (2)$$

где  $S$  - контактная площадь,  $A^*$  - эффективная постоянная Ричардсона, равная  $264 \text{ А см}^{-2} \text{ К}^{-2}$  для (111) ориентированного кремния n-типа [6],  $\Phi_{bo}$  - высота барьера при нулевом смещении. Однако, полученные в ходе измерений вольт-амперные характеристики несколько отличаются от идеальных характеристик диодов Шоттки. На рис.1 приведены ВАХ, полученные для диодов с геометрическими размерами  $6 \times 10^{-6} \text{ см}^2$ ,  $9 \times 10^{-6} \text{ см}^2$  и  $10 \times 10^{-6} \text{ см}^2$  в температурной области 298-458К. Ступенчатый характер ВАХ, температурная зависимость и некоторая закономерность изменения характеристик указывают на неоднородность контакта и вероятность наличия параллельно соединенных диодов [7, 8].

Согласно известному методу [6] вычисления высоты барьера (метод энергии активация):

$$\ln\left(\frac{I_0}{A^*T^2}\right) = \ln(S) - \frac{\Phi_{B0}}{kT} \quad (3)$$

из полученной экспериментальной зависимости корректно установить высоту барьера (ВБ) не удалось [9].

Из теории термоэлектронной эмиссии (ТЭЭ) известно, что при расчете эффективного значения постоянной Ричардсона не учитывается квант-механическое отражение и рассеяние на оптических фононах; в направлении (111) все минимумы зоны проводимости дают одинаковый вклад в ток. Поэтому для кремния с ориентацией (111) постоянная Ричардсона имеет максимальное значение  $264 \text{ А см}^{-2} \text{ К}^{-2}$  и не зависит от температуры. Отсюда можно сделать вывод, что на основе зависимости  $\ln(I_0 / A^*T^2)$  от  $1/kT$  из пересечения с ординатой можно вычислить значение электрически активной площади контакта. Электрически активная площадь диода [6] была определена методом отсечки ординаты из линейной части экспериментальной зависимости  $\ln(I_0 / A^*T^2)$  от  $1/kT$  для всех исследуемых диодов. Значения, полученные для диодов №3, №8, №13 представлены в табл.1. Как видно из полученных результатов значение электрически активной площади отличается от площади диода, что объясняется зернистой структурой поликристаллической пленки на поверхности полупроводника.

Таблица 1.

$\Delta T$ (К)	$S_3$ (см <sup>2</sup> )	$S_8$ (см <sup>2</sup> )	$S_{13}$ (см <sup>2</sup> )
298 - 343	$3,07 \times 10^{-9}$	$3,78 \times 10^{-10}$	$4,36 \times 10^{-10}$
343- 403	$1,42 \times 10^{-6}$	$4,71 \times 10^{-7}$	$7,32 \times 10^{-4}$
403 - 458	$7,11 \times 10^{-2}$	$2,86 \times 10^{-2}$	$6,27 \times 10^{-1}$

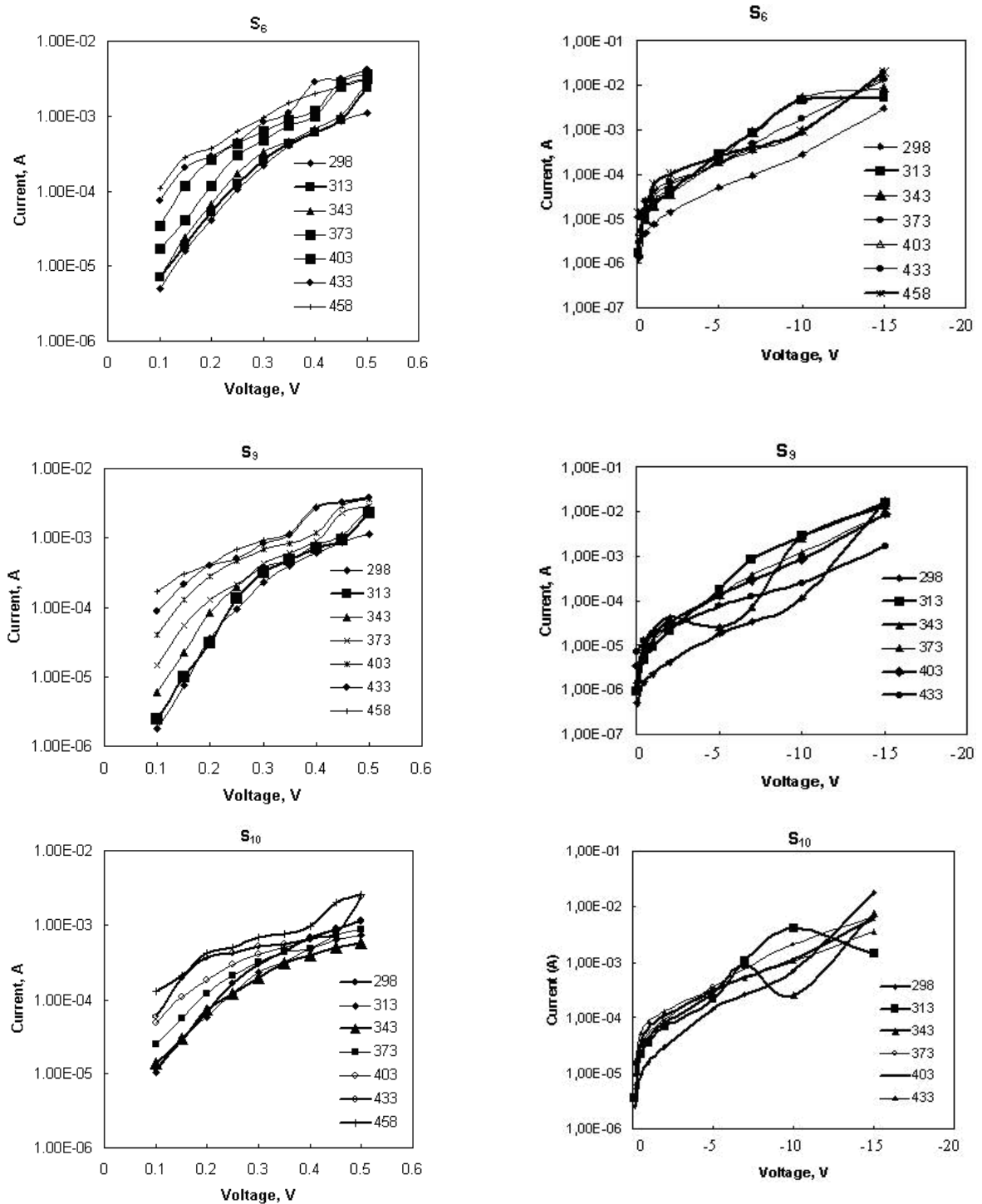


Рис. 1. ВАХ диодов Шоттки Al-TiCu/nSi с различными геометрическими размерами в интервале температур (298÷458)К при прямом и обратном смещениях.

В ранее проведенных исследованиях основной параметр диода, которым является высота потенциального барьера (ВБ), был вычислен с применением нескольких известных методик, в том числе и с применением метода Гаусса [9]. Как из-

вестно из литературы, предположение о подчинении значений ВБ распределению Гаусса приводит к следующему выражению [10, 11]:

$$\Phi_{bo} = \bar{\Phi}_{bo} - \frac{\sigma_o^2}{2kT} \quad (4)$$

где  $\bar{\Phi}_{bo}$  - средняя высота барьера при нулевом смещении,  $\sigma_o$  - стандартное отклонение при нулевом смещении. Основываясь на этом методе нами были вычислены ВБ и параметр отклонения  $\sigma_o$  [9]. Значения  $\bar{\Phi}_{bo}$  и  $\sigma_o$  равны соответственно 0,59эВ, 0,58эВ, 0,599эВ и 0,088В, 0,089В, 0,089В. Было выявлено, что значения высоты барьера, полученные методом Гаусса, превышают значения, полученные другими методами вычисления. Параметр отклонения  $\sigma_o$  свидетельствует о неоднородном барьере.

В представленной работе с учетом параметра отклонения (0,088В) построена модифицированная зависимость Ричардсона, описываемая следующим образом:

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \left(\frac{q^2\sigma_o^2}{2k^2T^2}\right) = \ln(SA^*) - \frac{q\bar{\Phi}_{bo}}{kT} \quad (5)$$

Из зависимости определено значение ВБ ( $\bar{\Phi}_{bo} = 0,6046$ эВ), из отсечки ординаты ( $\ln(SA^*)$ ) вычислена электрически активная площадь контакта  $S = 5,12 \times 10^{-7} \text{ см}^2$ . Полученное значение коррелирует с значением контактной площади.

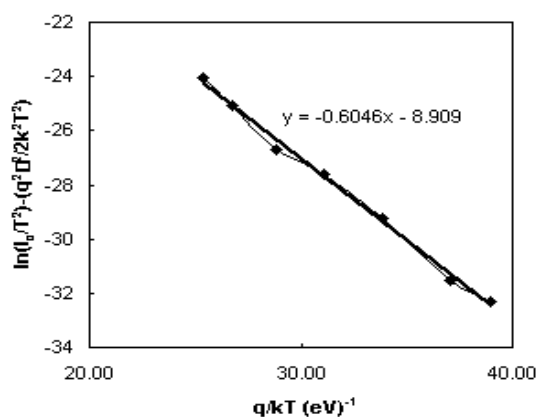


Рис.2. Модифицированная зависимость Ричардсона для Al-TiCu/n-Si структур с учетом распределения Гаусса.

Из литературы известно, что понижение температуры технологического процесса при формировании поликристалличес-

кой металлической пленки приводит к уменьшению размера зерен, а следовательно к огромной протяженности их границ, и росту концентрации дефектов [12]. Поликристаллические металлические пленки имеют структуру с размером зерен, изменяющимся примерно от 10нм (в материалах с высокой температурой плавления) до 500нм (в благородных металлах и материалах с более низкой температурой плавления). Влияние размера зерен сказывается не только на оптических и электрических свойствах пленок, но и в значительной мере и на взаимной диффузии атомов соседних слоев, поскольку в области границ зерен диффузионные процессы протекают наиболее интенсивно.

Во многих работах, посвященных фрактальным исследованиям, триада Кох приводится как стандартный пример. Этот пример [4,5] подтверждает, что линия может иметь фрактальную размерность  $D > 1$ . Согласно определению длина линии  $n$ -ого поколения определяется как:

$$L(\delta) = \delta^{1-D} \quad (6)$$

где  $\delta$  - длина звена,  $D$  - фрактальная размерность кривой.

Принимая, что формирование поликристаллической металлической структуры соответствует формированию самоподобной фрактальной структуры в зависимости от времени технологического процесса, а также учитывая тетраэдрическую структуру титана и кубическую структуру меди, форму огибающей поликристаллической металлической пленки  $\text{Ti}_{0,9}\text{Cu}_{0,1}$  в разрезе можно уподобить триадной кривой Коха с размерностью  $D \sim 1,2618$  [4,5]. С другой стороны, формирование поликристаллической металлической пленки можно рассматривать как появление некоторой затравки и дальнейшее развитие фрактальной структуры.

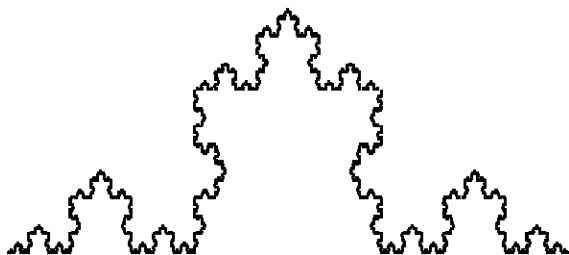


Рис. 3. Триада Коха

В этой связи нами было принято, что площадь диода ( $10^{-6}\text{см}^2$ ) аналогична площади «ковра Серпинского», элементарная затравка равна самой малой электрически активной площади ( $10^{-10}\text{см}^2$ ). Полученная величина соответствует известной из литературы. На основе этих предположений была рассчитана фрактальная размерность подобия периметра контактной плоскости

$$D = \ln N / \ln r(N) \quad (7)$$

где  $N$  - число фрагментов (квадратов с площадью равной малой электрически активной площади,  $r(N)$  – масштабный множитель.

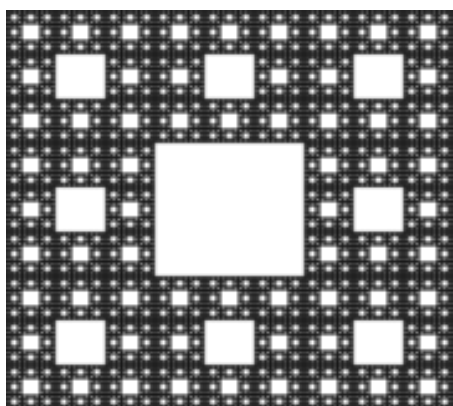


Рис. 3. Ковер Серпинского

В таком случае фрактальная размерность равна  $D = \ln(9999) / \ln(100) = 1,99$ . В следующем поколении каждый из темных квадратов делится согласно этой размерности на такие же квадратики. В результате площадь электрически неактивных частей контактной площади уменьшается, а полный периметр активных площадей стремится к бесконечности.

Если учесть поликристаллическую структуру металлической пленки, которая на самом деле объемна, то электрически активная площадь контакта также будет стремиться к бесконечности при определенном значении напряжения смещения.

## Выводы

Ступенчатый характер ВАХ диодов Шоттки Al-TiCu/n-Si с поликристаллической металлической пленкой в температурном диапазоне 298-458K, температурная зависимость и некоторая закономерность изменения характеристик указывают на неоднородность контакта и вероятность наличия параллельно соединенных диодов. Электрически активная площадь диода была определена методом модифицированной зависимости Ричардсона. Принимая, что формирование поликристаллической металлической структуры соответствует формированию самоподобной фрактальной структуры в зависимости от времени технологического процесса, а также учитывая тетраэдрическую структуру титана и кубическую структуру меди, форма огибающей поликристаллической металлической пленки TiCu в разрезе сравнена с триадной кривой Коха с размерностью  $D \sim 1,2618$ . По аналогии с ковром Серпинского определена фрактальная размерность подобия периметра контактной плоскости  $D = 1,99$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пашаев А.М., Касимов Ф.Д., Филинюк Н.А., Негоденко О.Н. Физико-технологические и схемотехнические основы негатроники. Элм, Баку, 2009, 433 с.
2. Zhu Sh., Van Meirhaeghe R.L., Detavernier C., Cardon F., Ru G.P., QuX.P., Li B.Z. // Sol.state electron, 2000, v. 44, p.663-671.
3. Стриха В.И. Теоретические основы контакта металл-полупроводник, Наукова Думка, Киев. 1974, 263 с.
4. Федер Е., Фракталы, Мир, Москва, 1991, 254 с.

5. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах, Постмаркет, Москва, 2000, 352 с.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов, Мир, Москва, 1984, 453 с.
7. Ru. G.P., Van Meirhaeghe R.L., Forment S., Jiang L.Qu X.R.,Zhu Sh. Li B.L. Solid State Electronics, 2005, 49, p.606-611.
8. Бузанева Е.В. Микроструктуры интегральной электроники, Радио и связь. Москва, 1990, 303 с.
9. Эфендиева И.М. Исследование высоты потенциального барьера диода Шоттки Al-TiCu/n-Si. // Fizika, 2009, XV, 4, с.85-88.
10. Karatas S., Altindal S., Turut A., Ozmen A. // Applied Surface Science, 2003, v.217 p. 250-260.
11. Dokme I., Semsettin Altindal S., Afandiyeva I.M. // Semiconductor Science and Technology, 2008, v.23, p.1-6.
12. Чопра К., Дас С. Тонкопленочные солнечные элементы. Мир, Москва, 1986, 440 с.