

ТЕМПЕРАТУРНО-ЗАВИСИМАЯ МОДЕЛЬ ИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ РЕЗИСТОРОВ СУБМИКРОННЫХ БИПОЛЯРНЫХ БИС

Докт. техн. наук, проф. БЕЛОУС А. И.¹⁾, докт. физ.-мат. наук, проф. ЗУЙКОВ И. Е.²⁾,
СЯКЕРСКИЙ В. С.¹⁾, канд. техн. наук, доц. РУСАКЕВИЧ Д. А.²⁾

¹⁾НТЦ «Белмикросистемы»,

²⁾Белорусский национальный технический университет

Одной из актуальных проблем конструирования современных субмикронных цифровых и аналоговых БИС является разработка конструкции интегральных резисторов (ИР), которые наряду с активными элементами определяют основные технические характеристики БИС – площадь кристалла, допустимую величину рассеиваемой мощности, быстродействие, диапазон рабочих температур и т. д.

В последнее время вместо диффузионных резисторов в конструкциях как КМОП, так и биполярных БИС широко используются ионно-легируемые ИР с широким диапазоном рабочих токов и температур. В зависимости от требований, предъявляемых к резисторам в составе конкретных электронных блоков БИС, и особенностей используемого при изготовлении технологического маршрута формирования активных структур разработчики кристалла выбирают обычно один из следующих конструктивных вариантов реализации ионно-легируемого ИР: на основе эпитаксиальной пленки p -типа; на «мелком» и (или) «глубоком» p^+ -слое, на n^+ -слое эмиттера, на скрытом n^+ -слое. Выбор того или иного варианта (или нескольких одновременно) определяется также топологическими особенностями проектируемого кристалла (наличие «свободной» площади между контактными площадками, в центре массива логических вентилях, под зоной металлизации межсоединений и т. д.).

Если методы расчета и проектирования диффузионных резисторов достаточно исследованы и широко применяются разработчиками БИС в повседневной деятельности, то особенности проектирования ИР для расширенного диапазона рабочих токов (10^{-6} – 10^{-2} А) и температур ((–70)–(+150) °С) требуют проведения

дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Целью данной работы является исследование характеристик основных типов ИР и их поведения в расширенном диапазоне токов и температур, а также выявление физических причин, обуславливающих наблюдаемые закономерности.

Экспериментальные результаты. Поперечный разрез типовой структуры исследованной библиотеки ИР приведен на рис. 1, а их конструктивно-технологические характеристики – в табл. 1. В работе представлены результаты исследований для выборки $N = 500$ ИР каждого типа.

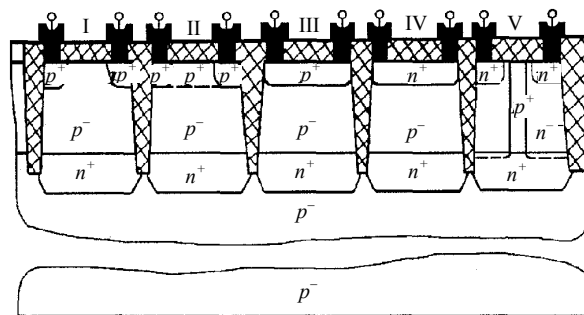


Рис. 1. Поперечный разрез типовых структур библиотеки ИР

Свойства резисторов оценивались по значениям поверхностного сопротивления R_s , температурного коэффициента сопротивления (ТКС) и максимального тока I_0 , при котором значение ИР от него не зависит.

Обобщенный вид токовых зависимостей сопротивления резисторов типов I–V (табл. 1) показан на рис. 2. Температурные зависимости нормализованных сопротивлений резисторов всех типов представлены на рис. 3.

Таблица 1

Конструктивно-технологические характеристики интегральных резисторов

Тип резистора на основе	Толщина слоя, мкм	R_s при 25 °С, Ом/кВ	Поверхностная концентрация, см ⁻³	Средний ТКС, $\times 10^{-3}$, град ⁻¹	I_0 при 25 °С, А
I – p -эпитаксиальной пленки	0,7	1200	$7 \cdot 10^{-7}$	2,5	$3 \cdot 10^{-4}$
II – «мелкого» p^+ -слоя	0,14	70–80	10^{20}	1,3	$8 \cdot 10^{-3}$
III – «глубокого» p^+ -слоя	0,25	45–50	$2 \cdot 10^{20}$	1,7	$2 \cdot 10^{-2}$
IV – n^+ -слоя (эмиттера)	0,3	80–90	$4 \cdot 10^{20}$	1,4	$5 \cdot 10^{-3}$
V – скрытого n^+ -слоя	3,8	40	10^{20}	1,3 ($T > 20$ °С) 1,5 ($T > 20$ °С)	$4 \cdot 10^{-2}$

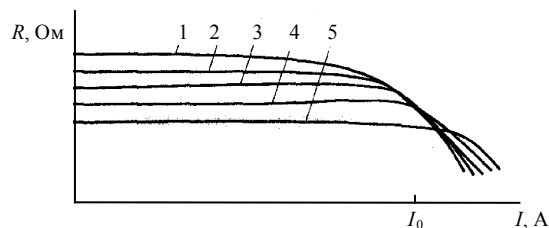


Рис. 2. Токовые зависимости сопротивлений резисторов при 150; 80; 25; –30; –70 °С (кривые 1–5)

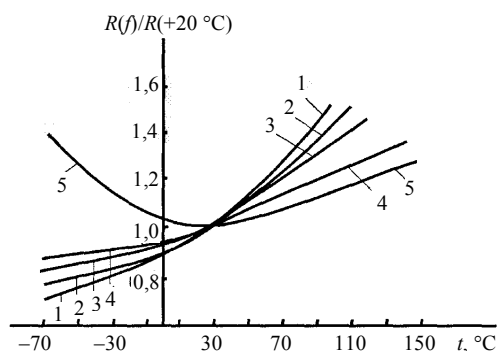


Рис. 3. Температурные зависимости нормализованных сопротивлений I–V типов резисторов (кривые 1–5)

Анализ экспериментальных исследований ИР показывает, что при выборе типа ИР для ИС необходимо учитывать конкретные схемотехнические требования к ним по ТКС, R_s и другим параметрам. Так, ИР на основе эпитаксиальной пленки p -типа характеризуются максимальным значением поверхностного сопротивления, однако их температурная стабильность невысока. Резисторы на основе «глубокого» скрытого n^+ -слоя отличаются наибольшим значением рабочего тока, при котором сопротивление еще линейно, высокой температурной стабильностью, однако их сопротивления невелики. Наименьшими значениями ТКС и средними значениями R_s характеризуются резисторы на основе «мелких» p^+ - и n^+ -слоев, однако максимальный рабочий ток для этих резисторов (особенно для резисторов типа IV) невелик.

Анализ токовых зависимостей сопротивлений (рис. 2) показывает, что для резисторов всех типов при малых и средних рабочих токах $I_p < I_0$ ($I_0 = 10\text{--}30 \mu\text{A}$) R_s и его ТКС почти не зависят от тока во всем исследуемом температурном диапазоне. При $I_p > I_0$ сопротивление значительно уменьшается. При этом ТКС снижается, и изменяется его знак. С ростом температуры диапазон рабочих токов, при котором сопротивление имеет линейную характеристику, уменьшается.

Анализ температурной зависимости нормализованного сопротивления (рис. 3) показывает, что резисторы типов I–V во всем диапазоне температур имеют положительный ТКС, который незначительно уменьшается с понижением температуры. Для резисторов типа V при понижении температуры наблюдается изменение знака ТКС.

Температурно-зависимая модель ионно-легированного ИР. Сопротивление ИР определяется по формуле

$$R(T) = \frac{l}{q} \int_0^{x-d_{\text{опз}}(T)} \mu(x, T) dx [x - d_{\text{опз}}(T)] b, \quad (1)$$

где l – длина резистора; q – заряд электрона; x – толщина резистора с учетом ширины области пространственного заряда перехода, ограничивающего резистивный слой; $d_{\text{опз}}$ – ширина области пространственного заряда; μ – подвижность носителей; b – ширина резистора.

Рассмотрим температурную зависимость значений, входящих в (1). Пренебрегая температурной зависимостью диэлектрической проницаемости кремния, выражение для ширины области пространственного заряда запишем следующим образом [1]:

$$d_{\text{опз}}(T) = C [\varphi(T) + U(T)]^{1/K}, \quad (2)$$

где C – коэффициент, зависящий от материала, концентрации и распределения примеси; $\varphi(T)$ – контактная разность потенциалов перехода, ограничивающего резистивный слой; $U(T)$ – напряжение, приложенное к резистору; $K = 2-3$ – безразмерный коэффициент.

Температурную зависимость контактной разности потенциалов определяем по формуле

$$\varphi(T) = \varphi(T) \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2(T)} \right), \quad (3)$$

где $\varphi(T)$ – температурный потенциал; N_a, N_d – эффективные концентрации акцепторной и донорной примесей; $n_i^2(T)$ – концентрация примеси в собственном полупроводнике, определяемая выражениями [2].

Расчет контактной разности потенциалов, выполненный на ЭВМ в соответствии с методикой [2] для диапазона концентраций $10^{17}-10^{21} \text{ см}^{-3}$ и температур $(-70)-(+150)^\circ\text{C}$, показал, что температурный коэффициент контактной разности потенциалов составляет $1,6-2,0 \text{ мВ}\cdot\text{град}^{-1}$. Если учесть, что температурный коэффициент напряжения, падающего на резисторе, близок к этому значению, то можно считать температурные изменения члена $[\varphi(T) + U(T)]$ в (2), а следовательно, и значения $d_{\text{опз}}(T)$ пренебрежимо малыми. В связи с тем, что ширина области пространственного заряда составляет незначительную часть резистивного слоя, температурные изменения $d_{\text{опз}}(T)$ незначительны и толщину резистивного слоя можно считать температурно-независимой. В рабочем диапазоне температур $(-70)-(+150)^\circ\text{C}$ примеси полностью ионизированы, поэтому температурной зависимостью $N(T)$ можно пренебречь.

Таким образом, температурная зависимость сопротивления слоев в широком диапазоне температур почти полностью определяется температурными изменениями подвижности носителей. На практике широко используют следующую формулу для расчета подвижности [3]:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-a}, \quad (4)$$

где μ_0 – подвижность носителей при 300 К,

$$\mu_0 = A + \left[\frac{B}{1} + \left(\frac{N}{C} \right)^m \right].$$

Температурно-независимые коэффициенты a, A, B, C, m имеют следующие значения:

- для электронов $a = 2,5$; $A = 65$; $B = 1265$; $C = 0,85 \cdot 10^{17}$; $m = 0,72$;
- для дырок $a = 2,7$; $A = 47,7$; $B = 447$; $C = 0,63 \cdot 10^{17}$; $m = 0,76$.

Однако сравнение экспериментальных данных с результатами расчета сопротивления ИР исследуемых типов показывает, что (3) и (4) не учитывают ослабления температурной зависимости сопротивления с увеличением эффективной концентрации примесей.

Для более точного описания поведения подвижности носителей в широком диапазоне рабочих токов и температур в (3) целесообразно ввести составляющие, различным образом зависящие от тока. При этом каждая составляющая определяется соответствующим механизмом рассеяния, которому носители подвергаются под действием термического возбуждения. Тогда результирующую подвижность носителей можно рассчитать следующим образом:

$$\mu(T) = \left[\frac{1}{\mu_1(T)} + \frac{1}{\mu_2(T)} + \frac{1}{\mu_3(T)} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где $\mu_1(T), \mu_2(T), \mu_3(T)$ – составляющие подвижности, определяемые соответственно рассеянием носителей на атомах кристаллической решетки кремния, атомах ионизированной примеси, а также взаимодействием носителей между собой.

Данные составляющие подвижности описываются следующими выражениями [4]:

$$\mu_1(T) = \mu_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-n}; \quad (6)$$

$$\mu_2(T) = A T^{3/2} / N \left[\ln \left(1 + B_1 T^2 / N \right) - B_1 T^2 / N + B_1 T^2 \right]; \quad (7)$$

$$\mu_3(T) = 2 \cdot 10^{17} T^{3/2} / \sqrt{pn} \times \left[\ln \left\{ 1 + 8,28 \cdot 10^8 T^2 (pn)^{-1/3} \right\} \right]^{-1}, \quad (8)$$

где μ_{10} – составляющая подвижности μ_1 при $T = 0$; p, n – концентрации свободных носителей.

Температурно-независимые значения μ_{10} , A_1 , B_1 , n имеют следующие значения:

- для электронов $\mu_{10} = 1430$; $A_1 = 4,61 \cdot 10^{17}$; $B_1 = 1,52 \cdot 10^{15}$; $n = 2,2$;
- для дырок $\mu_{10} = 495$; $A_1 = 10^{17}$; $B_1 = 6,25 \cdot 10^{14}$; $n = 2,2$.

Сопротивления ИР, рассчитанные на ЭВМ согласно (5)–(8), соответствуют экспериментальным результатам во всем диапазоне токов и температур с точностью до 20 % для резисторов всех типов.

Анализ (5)–(8) показывает, что в области малых и средних рабочих токов результирующая подвижность носителей определяется составляющими $\mu_1(T)$, $\mu_2(T)$, так как $\mu_3(T)$ при таких токах очень велика. При рабочих токах $I_p > I_0$ определяющим становится влияние составляющей $\mu_3(T)$. Температурное поведение составляющих подвижности также различно: если $\mu_1(T)$ с ростом температуры уменьшается, то составляющие $\mu_2(T)$ и $\mu_3(T)$ увеличиваются.

Положительный знак ТКС резисторов типов I–IV во всем диапазоне температур свидетельствует о преобладании в результирующей подвижности составляющей $\mu_1(T)$, определяемой рассеянием на атомах кристаллической решетки кремния.

Ослабление температурной зависимости сопротивления резисторов всех типов в области низких температур (рис. 3) объясняется возрастанием влияния составляющих $\mu_2(T)$, $\mu_3(T)$ на результирующую подвижность с понижением температуры.

Уменьшение значения и изменение знака ТКС при больших ($I_p \gg I_0$) рабочих токах для резисторов всех типов (рис. 2) является следствием роста составляющей $\mu_3(T)$, которая при больших токах уменьшается и начинает определять температурную зависимость сопротивления.

Изменение знака ТКС с положительного на отрицательный для резисторов на основе скрытого n^+ -слоя при температурах меньше 0 °C (рис. 3) объясняется тем, что составляющие подвижности $\mu_2(T)$, $\mu_3(T)$ при таких температурах становятся весьма малыми и начинают определять температурное поведение результирующей подвижности, а следовательно, и сопротивление резисторов данного типа.

Снижение сопротивления ионно-легированных ИР при токах $I_p \gg I_{\max}$ обусловлено увеличением концентрации носителей заряда вследствие пробоя перехода, ограничивающего резистивный слой. Плавное снижение сопротивления с ростом тока свидетельствует о преимущественном распространении среди механизмов, определяющих пробой, туннельного [5]. С повышением температуры наблюдается снижение напряжения пробоя при преобладании туннельного механизма, что приводит к снижению максимального рабочего тока $I_{\max}$, при котором ВАХ резистора еще линейна.

Температурный коэффициент напряжения пробоя может быть представлен в виде [6]:

$$\gamma_{U_v} = dU_0/dT \cdot 1/U_0 \approx \gamma_E \gamma_U;$$

$$\gamma_E = 1,03 \cdot 10^{-8} (1 + 2,96 \cdot 10^{-7} E_m - 4,94 \cdot 10^{-3} E_m / 1 + 2,36 \cdot 10^{-6} E_m);$$

$$\gamma_U = w_B (E_m/U^0),$$

где E_m , w_B – соответственно напряженность электрического поля и ширина области пространственного заряда перехода при напряжении пробоя.

Максимальный рабочий ток

$$I_{\max}(T_0) = I_{\max}(T_0) - (\gamma_{U_0}/R(T))(T - T_0),$$

где $I_{\max}(T_0)$ – значение максимального тока при T_0 .

Таким образом, результаты экспериментальных и теоретических исследований показывают, что для повышения температурной стабильности сопротивления необходимо стремиться к выравниванию составляющих подвижности $\mu_1(T)$, с одной стороны, $\mu_2(T)$ и $\mu_3(T)$ – с другой.

Анализ модели показывает, что значение $\mu_1(T)$ наименьшее из всех составляющих при номинальных токах и во всем диапазоне температур для большинства резисторов, следовательно, такое выравнивание может быть достигнуто повышением роли составляющих $\mu_2(T)$, $\mu_3(T)$. Это может быть осуществлено как подбором конструктивно-технологических параметров резистивных слоев, так и выбором электрического режима работы резистора при проектировании ИС.

Повышение эффективной концентрации примесей приводит к увеличению роли составляющей $\mu_2(T)$, что обеспечивает повышение температурной стабильности резисторов. При этом следует учитывать уменьшение поверхностного сопротивления слоя, затрудняющее получение высокоомных компактных резисторов. Для получения резисторов, сочетающих высокое удельное сопротивление и малый ТКС, можно рекомендовать слои с высокими поверхностными концентрациями и малыми толщинами, что подтверждается результатами исследования резисторов типа II.

Высокими температурной стабильностью и удельным сопротивлением отличаются также резистивные слои, полученные перекомпенсацией примесей (например, ИР типа IV), так как для них зависимость подвижности от температуры ослабляется за счет снижения подвижности $\mu_2(T)$, а удельное сопротивление сравнительно велико вследствие уменьшения эффективной концентрации свободных носителей.

Недостатком резисторов данного типа является сравнительно малый диапазон рабочих напряжений, в котором характеристики резисторов линейны вследствие возрастания градиента концентрации примесей в переходе, ограничивающем резистивный слой, что приводит к некоторому снижению пробивного напряжения.

ВЫВОД

Таким образом, сопротивление и ТКС библиотеки ИР исследуемых типов в области малых и средних токов при $(-70) - (+150)^\circ\text{C}$ не зависят от тока. В области больших токов наблюдаются повышение температурной стабиль-

ности, изменение знака ТКС и значительная зависимость от рабочего тока.

При понижении температуры имеют место незначительное уменьшение ТКС для резисторов типов I–IV и изменение знака ТКС для резисторов типа V, а также расширение диапазона рабочих токов, в котором сопротивление линейно.

Предложенная математическая модель резистора позволяет рассчитать с достаточной точностью его параметры в широком диапазоне токов и температур и экспериментально объяснить наблюдаемые зависимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Перельман, Б. Л.** Температурная зависимость коэффициента передачи тока кремниевых планарных транзисторов при малых уровнях инжекции / Б. Л. Перельман, В. Н. Придорогин // Полупроводниковые приборы и их применение; под. ред. В. А. Федотова. – М.: Сов. радио, 1970. – Вып. 24. – С. 13–26.
2. **Twirdds, V.** Accurate analysis of temperature effects I_c-U_{BF} characteristics with application to bandgap of reference sources / V. Twirdds // J. IEEE on Solid-State Circuits. – 1980. – Vol. 15, № 6. – P. 1076–1083.
3. **Малиновская, Е. В.** Расчет сопротивления пинч-резистора / Е. В. Малиновская, Ю. А. Малышев // Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника. – 1980. – Вып. 3. – С. 20–27.
4. **Shenk, S. Li.** The dopant density and temperature dependence of hole mobility and resistivity in boron doped silicon / S. Li. Shenk // Solid – State Electronics. – 1978. – Vol. 21, № 9. – P. 1109–1117.
5. **Тиходеев, Ю. С.** К вопросу о механизме пробоя p-n-переходов в полупроводниках / Ю. С. Тиходеев, А. Ф. Трутко // Электронная техника. Сер. 2: Полупроводниковые приборы. – 1968. – Вып. 1. – С. 112–138.
6. **Kajiya, K.** Temperature dependence of avalanche breakdown voltage in Si p-n-junctions / K. Kajiya // J. Appl. Phys. – 1976. – Vol. 47, № 6. – P. 2744–2745.

Поступила 09.06.2009