

## ПОСТРОЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ $p$ - $n$ ПЕРЕХОДА

### Введение

В последние годы все большее распространение при измерении температуры приобретают полупроводниковые измерительные преобразователи и, в частности, полупроводниковые приборы с  $p$ - $n$  переходом. Это связано с такими их преимуществами, как: высокая чувствительность, малая инерционность, стабильность, сравнительно небольшие габариты и вес, простота аппаратурной реализации.

Ведущие фирмы (например, Motorola, Analog Devices, Texas Instruments, National Semiconductor и др.) выпускают различные типы полупроводниковых датчиков температуры. В качестве датчиков температуры могут использоваться и серийно выпускаемые полупроводниковые приборы с  $p$ - $n$  переходом, например, диоды и транзисторы [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Основным недостатком температурных датчиков с  $p$ - $n$  переходом является достаточно большая погрешность –  $(1...2)^\circ\text{C}$ , что связано с одной стороны, со значительным разбросом характеристик от экземпляра к экземпляру, с другой – с нелинейностью характеристики.

Поэтому вопрос повышения точности измерения температуры полупроводниковыми датчиками является достаточно актуальным и связан, в первую очередь, с необходимостью построения и анализа температурной модели  $p$ - $n$  перехода.

### Постановка задачи

Использование  $p$ - $n$  перехода в качестве термочувствительного элемента основано на том, что значения почти всех параметров полупроводниковых приборов зависят от температуры. При этом возможны различные схемотехнические решения в зависимости от конкретных требований к термометру, а именно: высокая чувствительность, широкий диапазон, высокая линейность, взаимозаменяемость и др.

Рассмотрим основные термометрические параметры  $p$ - $n$  перехода.

Одним из первых являлся ток обратно смещенного  $p$ - $n$  перехода, позволяющий получить очень высокую чувствительность. Однако, для него характерна низкая воспроизводимость и точность, узкий диапазон измеряемых температур, неидентичность характеристик, нелинейность [1].

Коэффициент усиления по току, предельная частота усиления (для транзисторов) и емкость  $p-n$  перехода характеризуются значительным разбросом значений от экземпляра к экземпляру, довольно низкой чувствительностью, сложностью схемотехнической реализации. Поэтому они распространения не получили [1, 2, 4].

Использование тока коллектора или эмиттера (для транзисторов) позволяет получить высокую чувствительность, но отличается нелинейностью и очень критично к стабильности питающих напряжений.

Проведенный анализ показал, что при измерении температуры наиболее целесообразно использовать прямую ветвь вольт-амперной характеристики (ВАХ), позволяющую получить линейную температурную зависимость в достаточно широком диапазоне температур при высокой стабильности. Обычно используется температурная зависимость прямого напряжения на  $p-n$  переходе при постоянном токе, что связано с самим характером ВАХ, для которой более характерен режим заданного тока [1 - 8].

Таким образом, необходимо построить температурную модель  $p-n$  перехода на основе анализа ВАХ и определить возможность использования этой модели для повышения точности измерения температуры полупроводниковыми датчиками.

### **Анализ температурной зависимости ВАХ $p-n$ перехода**

Рассмотрим прямую ветвь ВАХ реального  $p-n$  перехода, для которой, в отличие от идеальной, характерно наличие омического падения напряжения в слое базы. Это падение напряжения мало в области малых токов, но растет линейно, т.е. быстрее падения напряжения на  $p-n$  переходе, с увеличением тока, приводя к вырождению экспоненциальной ВАХ идеального диода [2, 3]. Вырождение ВАХ может происходить при токах в единицы  $mA$ . Температурная зависимость для омического падения напряжения в слое базы имеет обратный знак по сравнению с падением напряжения на  $p-n$  переходе. Поэтому при анализе температурной зависимости ВАХ следует, в наиболее общем случае, учитывать омическое сопротивление слоя базы  $p-n$  перехода:

$$I = I_0 \left( \exp \frac{U - I \cdot r_o}{\Phi_T} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $I$  – ток через  $p-n$  переход;  
 $I_0$  – тепловой ток;  
 $U$  – напряжение на  $p-n$  переходе;

$\varphi_T$  – температурный потенциал;

$r_{\bar{o}}$  – сопротивление базы.

Температурный потенциал – одна из важнейших характеристик – описывается выражением:

$$\varphi_T = \frac{k \cdot T}{q}, \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ;

$T$  – абсолютная температура;

$q$  – заряд электрона,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

При  $T = 293 \text{ K}$  (комнатная температура,  $20^\circ \text{ C}$ )  $\varphi_T = 0,025 \text{ V}$ .

В выражении (1) термозависимыми величинами являются  $I_0$ ,  $\varphi_T$ ,  $r_{\bar{o}}$ . Рассмотрим их более подробно.

Ток  $I_0$  имеет тепловое происхождение и сильно зависит от температуры. В наиболее общем виде температурную зависимость  $I_0$  обычно представляют как [2, 3]:

$$I_0 = I_{00} \cdot \exp\left(-\frac{\varphi_3}{\varphi_T}\right), \quad (3)$$

где  $I_{00}$  – величина, не зависящая от температуры;

$\varphi_3$  – ширина запрещенной зоны полупроводника.

Ширина запрещенной зоны, в свою очередь, также зависит от температуры. Обычно для температурной зависимости  $\varphi_3$  используют линейную аппроксимацию [1, 2, 3]:

$$\varphi_3 = \varphi_{30} - \varepsilon_3 T, \quad (4)$$

где  $\varphi_{30}$  – ширина запрещенной зоны при нулевой абсолютной температуре;

$\varepsilon_3$  – температурная чувствительность,  $\text{V/K}$ .

Для кремния  $\varphi_{30} = 1,21 \text{ V}$  и  $\varepsilon_3 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ V/K}$  [2, 3]. Тогда для комнатной температуры:  $\varphi_3(293 \text{ K}) = 1,12 \text{ V}$ ;  $\varphi_3(300 \text{ K}) = 1,11 \text{ V}$ . В других источниках приведенные значения несколько отличаются, например в [9]:  $\varphi_{30} = 1,153 \text{ V}$  и  $\varphi_3(295 \text{ K}) = 1,107 \text{ V}$ .

Сопротивление базы  $p$ - $n$  перехода в диапазоне температур  $(-20...+80)^\circ \text{C}$  для германия и  $(-20...+150)^\circ \text{C}$  для кремния может быть описано выражением [10]:

$$r_{\bar{o}} = r_{\bar{o}300} \cdot (T/300)^{5/2}, \quad (5)$$

где  $r_{\bar{o}300}$  – омическое сопротивление базы  $p$ - $n$  перехода при  $300 \text{ K}$ .

С учетом формулы (3) для теплового тока выражение (1) для ВАХ принимает вид:

$$I = I_{00} \cdot \exp\left(-\frac{\Phi_3}{\Phi_T}\right) \cdot \left(\exp\left(\frac{U - I \cdot r_{\bar{\theta}}}{\Phi_T}\right) - 1\right). \quad (6)$$

Из последнего выражения получим:

$$U = \Phi_T \cdot \ln\left[\frac{I}{I_{00}} \cdot \exp\left(\frac{\Phi_3}{\Phi_T}\right) + 1\right] + I \cdot r_{\bar{\theta}}. \quad (7)$$

Поскольку тепловой ток  $I_0$  очень мал и обычно выполняется соотношение  $I \gg I_0$ , то единицей в формуле (7) можно пренебречь и тогда:

$$U = \Phi_T \cdot \ln \frac{I}{I_{00}} + \Phi_3 + I \cdot r_{\bar{\theta}}. \quad (8)$$

Подставив в (8) выражения для температурно зависимых величин из (2), (4), (5), получим:

$$U = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_{00}}\right) + \Phi_{30} - \varepsilon_3 T + I \cdot r_{\bar{\theta}300} \cdot (T/300)^{5/2}. \quad (9)$$

Последняя формула отражает зависимость падения напряжения на  $p$ - $n$  переходе от значений тока и температуры. Поскольку, как отмечалось выше, наиболее предпочтительно использование режима заданного тока, т.е.  $I = const$ , то выражение (9) связывает напряжение на  $p$ - $n$  переходе с его температурой.

### **Анализ связи температуры $p$ - $n$ перехода с температурой окружающей среды**

Температура  $p$ - $n$  перехода может заметно отличаться от температуры внешних электродов, корпуса полупроводникового прибора (диода, транзистора, датчика) и окружающей среды. Связь между температурой окружающей среды  $T_{окр}$  и температурой  $p$ - $n$  перехода  $T_{пер}$  дается простым выражением [2, 11, 12]:

$$T_{пер} - T_{окр} = R_t \cdot P, \quad (10)$$

где  $R_t$  – тепловое сопротивление;

$P$  – мощность, выделяемая в  $p$ - $n$  переходе,  $P = U \cdot I$ .

Тепловое сопротивление является сложной функцией ряда конструктивных и технологических параметров и обычно разбивается на две составляющих: тепловое сопротивление участка « $p$ - $n$  переход – корпус» и тепловое сопротивление участка «корпус – среда» [2, 12].

Расчет теплового сопротивления участка « $p$ - $n$  переход – корпус» с требуемой для инженерной практики точностью крайне затруднен.

Особенно это относится к собственно кристаллу полупроводника и близко прилегающим смежным областям (электродным элементам, припою и т.п.). Основная причина этого – необходимость оценки ряда неконтролируемых технологических факторов (изменение градиента концентрации примесей в зависимости от глубины их залегания в кристалле, неоднородность сплавов в местах пайки и т.п.), оказывающих заметное влияние на физические параметры (коэффициент теплопроводности, удельные теплоемкости) используемых материалов. При количественном расчете тепловых параметров элементов конструкции действие указанных выше факторов усугубляется целым рядом дополнительных обстоятельств: нарушением плоско-параллельности, наличием микронеровностей на соприкасающихся поверхностях и т.д. С учетом малых толщин внутренних элементов конструкции (доли миллиметра) практическая целесообразность подобного расчета полностью исключается. Поэтому на практике для количественной оценки установившихся значений тепловых сопротивлений полупроводниковых приборов используют лишь экспериментальные методы [13].

Тепловое сопротивление участка «корпус – среда» зависит от вида окружающей среды (характер среды, влажность, давление и др.) и в определенных пределах может изменяться с помощью радиаторов, обдува, охлаждения и т.д. [14].

Поскольку для измерения температуры окружающей среды необходимо выполнение равенства:

$$T_{пер} = T_{окр} ,$$

то, как следует из (10), требуется обеспечение условия  $R_t \cdot P = 0$  или, для практических случаев,  $- R_t \cdot P \rightarrow 0$ .

Тепловое сопротивление  $R_t$  определяется в первую очередь конструкцией полупроводникового прибора и не может быть изменено. Следовательно, необходимо обеспечение условия  $P \rightarrow 0$ , т.е. уменьшения рассеиваемой в  $p-n$  переходе мощности. Уменьшение мощности  $P$  путем уменьшения тока  $I$  через  $p-n$  переход ограничивается точностью измерения малых токов и напряжений и эффективно лишь до определенной степени. Существенно лучшие результаты дает метод импульсного измерения [11].

Очевидно, что наиболее эффективным является применение импульсного режима измерения с одновременным уменьшением тока через полупроводниковый прибор, т.е. использование преимуществ обоих вариантов снижения выделяемой в  $p-n$  переходе мощности. Тогда можно с достаточной степенью точности считать выполненными условия:  $P \rightarrow 0$  и  $T_{пер} \approx T_{окр}$ . В этом случае выражение (9) будет связывать напряжение  $U$  на полупроводниковом приборе с температурой окружающей среды  $T$  при заданном токе  $I$  через  $p-n$  переход.

## Определение параметров $p$ - $n$ перехода

Неизвестные величины  $I_{00}$ ,  $\varphi_{30}$  и  $r_{\delta 300}$  в формуле (9) имеют индивидуальные значения для каждого из  $p$ - $n$  переходов. Их значения могут быть определены опытным путем.

Для определения  $r_{\delta 300}$  необходимо произвести два измерения напряжений  $U_1$  и  $U_2$  на  $p$ - $n$  переходе полупроводникового прибора при двух заданных значениях тока  $I_1$  и  $I_2$  и известной температуре  $T_1$ . Получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} U_1 = \frac{k \cdot T_1}{q} \cdot \ln \frac{I_1}{I_{00}} + \varphi_{30} - \varepsilon_3 T_1 + I_1 \cdot r_{\delta 300} \cdot (T_1/300)^{5/2}; \\ U_2 = \frac{k \cdot T_1}{q} \cdot \ln \frac{I_2}{I_{00}} + \varphi_{30} - \varepsilon_3 T_1 + I_2 \cdot r_{\delta 300} \cdot (T_1/300)^{5/2}. \end{cases} \quad (11)$$

Решение системы уравнений (11) относительно  $r_{\delta 300}$  дает следующий результат:

$$r_{\delta 300} = \frac{U_1 - U_2 - \frac{k \cdot T_1}{q} \cdot \ln \frac{I_1}{I_2}}{(I_1 - I_2) \cdot (T_1/300)^{5/2}}. \quad (12)$$

Для дальнейшего определения  $I_{00}$  и  $\varphi_{30}$  необходимо дополнительно произвести измерение напряжения  $U_3$  при токе  $I_1$ , но при другом значении температуры –  $T_2$ . Полученные результаты могут быть представлены в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} I_1 = I_{00} \cdot \exp \left( \frac{U_1 - \varphi_{30} + \varepsilon_3 T_1 - r_{\delta 300} \cdot (T_1/300)^{5/2}}{k \cdot T_1 / q} \right); \\ I_1 = I_{00} \cdot \exp \left( \frac{U_3 - \varphi_{30} + \varepsilon_3 T_2 - r_{\delta 300} \cdot (T_2/300)^{5/2}}{k \cdot T_2 / q} \right). \end{cases} \quad (13)$$

В результате решения системы уравнений (13) с учетом известного значения  $r_{\delta 300}$  (см. (12)) получим:

$$F_{30} = \frac{U_3 \cdot T_1 - U_1 \cdot T_2 + I_1 \cdot r_{\delta 300} \cdot T_1 \cdot T_2 ((T_1/300)^{3/2} - (T_2/300)^{3/2})}{T_1 - T_2}. \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
I_{00} &= I_1 \cdot \exp \left( -\frac{U_1 - \varphi_{30} + \varepsilon_3 T_1 - r_{\bar{c}300} \cdot (T_1/300)^{5/2}}{k \cdot T_1 / q} \right) = \\
&= I_1 \cdot \exp \left( -\frac{U_2 - \varphi_{30} + \varepsilon_3 T_2 - r_{\bar{c}300} \cdot (T_2/300)^{5/2}}{k \cdot T_2 / q} \right).
\end{aligned} \tag{15}$$

Значения  $I_{00}$ , и  $\varphi_{30}$  и  $r_{\bar{c}300}$  должны определяться индивидуально для каждого полупроводникового прибора (диода, транзистора, датчика). Для этого необходимо произвести три измерения напряжения на  $p$ - $n$  переходе: два измерения при двух значениях тока  $I_1$  и  $I_2$  и фиксированной температуре  $T_1$ , и одно измерение при значении тока  $I_1$  и температуре  $T_2$ . Расчет значений  $I_{00}$ , и  $\varphi_{30}$  и  $r_{\bar{c}300}$  производится по результатам проведенных измерений в соответствии с полученными формулами (12), (13) и (15).

### **Использование температурной модели $p$ - $n$ перехода для измерения температуры**

Для нахождения значения температуры из выражения (9) представим его несколько в ином виде:

$$I \cdot r_{\bar{c}300} \cdot (T/300)^{5/2} + \left( \frac{k}{q} \cdot \ln \frac{I}{I_{00}} - \varepsilon_3 \right) \cdot T + \varphi_{30} - U = 0. \tag{16}$$

Уравнение (16) относительно температуры  $T$  выше 2-й степени ( $5/2=2,5$  – иррациональная степень) и не имеет формулы для нахождения корней. Решение уравнения возможно численными методами на ЭВМ. При этом нас интересует один единственный, действительный корень этого уравнения, являющийся искомой температурой среды.

В связи с этим решение уравнения (16) предлагается производить следующим образом. Поскольку для уменьшения мощности  $P$  мы работаем при малых значениях тока через полупроводниковый прибор (см. выше), то на первом этапе будем пренебрегать падением напряжения в области базы. Тогда уравнение (16) сводится к линейному уравнению:

$$\left( \frac{k}{q} \cdot \ln \frac{I}{I_{00}} - \varepsilon_3 \right) \cdot T + \varphi_{30} - U = 0, \tag{17}$$

решением которого будет:

$$T = \frac{U - \varphi_{30}}{\frac{k}{q} \cdot \ln \frac{I}{I_{00}} - \varepsilon_3}. \tag{18}$$

При этом для каждого полупроводникового прибора необходимо определить ширину запрещенной зоны  $\varphi_{30}$  при нулевой абсолютной температуре и температурно независимую составляющую  $I_{00}$  теплового тока по результатам двух измерений напряжений  $U_1$  и  $U_2$  на  $p$ - $n$  переходе при фиксированном значении прямого тока  $I$ , и при, соответственно, двух известных температурах  $T_1$  и  $T_2$  с помощью выражений:

$$\varphi_{30} = \frac{U_2 \cdot T_1 - U_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2}; \quad (19)$$

$$I_{00} = I \cdot \exp \left( - \frac{U_1 - \varphi_{30} + \varepsilon_3 T_1}{\frac{k}{q} \cdot T_1} \right). \quad (20)$$

В качестве температур  $T_1$  и  $T_2$  целесообразно использовать либо граничные значения диапазона измеряемых температур, либо стандартные градуировочные температурные точки, например 0 и 100 °C.

Затем с помощью ЭВМ производится нахождение корня уравнения (16) вблизи значения  $T$ , полученного из выражения (18).

Для проверки теоретических результатов были проведены исследования серийных полупроводниковых приборов – трех типов кремниевых диодов и одного кремниевого транзистора в диодном включении, а именно: 2Д103А и 2Д104А – диффузионные диоды в пластмассовом корпусе; 2Д109А – эпитаксиальный планарный диод в метало-стеклянном корпусе; КТ361И – эпитаксиальный планарный транзистор в пластмассовом корпусе.

Для каждого из диодов и транзистора были определены по формулам (19) и (20) значения  $\varphi_{30}$  и  $I_{00}$  по результатам двух измерений напряжений  $U_1$  и  $U_2$  при фиксированном значении прямого тока  $I=100 \mu A$  и при двух температурах  $T_1=23^\circ C$  и  $T_2=33^\circ C$ . Затем были проведены измерения температуры с расчетом ее значения по формуле (18), т.е. с использованием линейной модели, в диапазоне от 18 до 38 °C и определена абсолютная погрешность измерения температуры. Максимальное значение абсолютной погрешности составило: у диода 2Д103А – 0,31 °C; у диода 2Д104А – 0,3 °C; у диода 2Д509А – 0,58 °C; у транзистора КТ361И – 0,36 °C.

Расчет значения температуры в соответствии с выражением (16) производился с помощью ПЭВМ. При этом в диапазоне от 18 до 38 °C абсолютная погрешность измерения не превысила 0,1 °C.

## Выводы

Таким образом: была получена модель температурной зависимости параметров  $p$ - $n$  перехода; определены условия приближения температуры  $p$ - $n$  перехода и окружающей среды за счет уменьшения явления саморазогрева  $p$ - $n$  перехода протекающим током; получены выражения для определения характеризующих  $p$ - $n$  переход постоянных величин и уравнение для нахождения искомой температуры.

Предложенный алгоритм для нахождения корня уравнения (16) – температуры окружающей среды – позволяет сократить время и количество вычислений по сравнению с обычными численными методами.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили правильность предложенной модели для температурной зависимости напряжения на  $p$ - $n$  переходе и возможность получения абсолютной погрешности измерения не более  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  даже при использовании серийных полупроводниковых приборов.

### Список использованной литературы

1. *Фогельсон И. Б.* Транзисторные термодатчики. / И. Б. Фогельсон – М.: Сов. Радио, 1972. – 128 с.
2. *Степаненко И. П.* Основы теории транзисторов и транзисторных схем. / И. П. Степаненко – М.: Энергия, 1973. – 608 с.
3. *Степаненко И. П.* Основы микроэлектроники. / И. П. Степаненко – М.: Сов. Радио, 1980. – 424 с.
4. *Макнамара А. Г.* Полупроводниковые диоды и транзисторы как электрические термометры / А. Г. Макнамара // Приборы для научных исследований. – 1962. № 3. С. 66–70.
5. *Громов В. С.* Методы построения полупроводниковых датчиков температуры / В. С. Громов, С. М. Шестимеров, С. У. Увайсов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2011. Т. 2. С. 400–405.
6. *Громов В. С.* Высокоточный транзисторный датчик температуры / В. С. Громов, С. М. Шестимеров, С. У. Увайсов // Датчики и системы. – 2010. – № 11. – С. 19–23.
7. *Устюжанинов Н. Н.* Оптимизация структуры диодного сенсора в составе датчика температуры / Н. Н. Устюжанинов // Датчики и системы. – 2010. – № 1. – С. 37–39.
8. *Голуб В. С.* Микросхемные датчики температуры / В. С. Голуб // Датчики и системы. – 2007. – № 12. – С. 29–33.
9. *Гаврилов Р. А.* Технология производства полупроводниковых приборов. / Р. А. Гаврилов, А. М. Скворцов – Л.: Энергия, 1968. – 240 с.
10. *Громов В. С.* Зависимость температурного коэффициента прямого падения напряжения на  $p$ - $n$  переходе транзистора от величины прямого тока / В. С. Громов, Б. Л. Перельман // Полупроводниковые приборы и

их применение. Сборник статей. Вып. 18. – М.: Сов. радио, 1967. – С.71–79.

11. Измерение температуры с использованием полупроводникового диода // КИТ. – № 42. С. 10–17.
12. Диодный термометр // КИТ. – № 48. С. 30–35.
13. *Давидов П. Д.* Анализ и расчет тепловых режимов полупроводниковых приборов. / П. Д. Давидов – М.: Энергия, 1967. – 144 с.
14. Измерение тепловых сопротивлений полупроводниковых устройств // КИТ. – № 31. С. 20–30.