

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ДИОДНОГО СЕНСОРА В СОСТАВЕ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ

В.Н.Устюжанинов

Получены теоретические оценки влияния температуры, электрических режимов, топологических и электрофизических параметров полупроводниковых измерительных диодов – сенсоров на метрологические характеристики датчиков температуры.

Широкое применение датчиков температуры с полупроводниковыми (диодными) чувствительными элементами в различных условиях эксплуатации обуславливает необходимость учета влияния климатических факторов, топологических и электрофизических характеристик измерительного диода на метрологические характеристики датчика. Известно, что абсолютные значения и пределы изменения температуры среды влияют на показатели точности, стабильности и воспроизводимости результатов измерений [1]. Количественные оценки таких зависимостей можно получить в результате анализа упрощенного варианта структуры полупроводникового диода, представленного на рисунке.

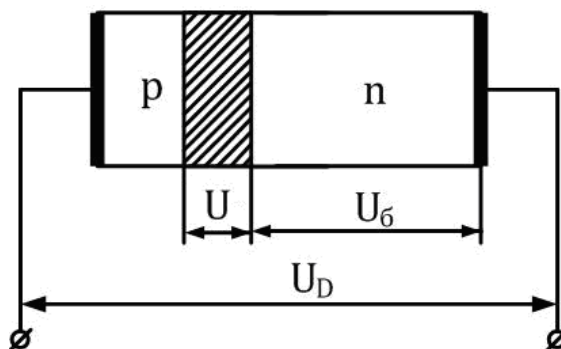


Рисунок. Обобщенная структурная схема измерительного диода: U - падение напряжения на $p - n$ переходе; $U_б$ - падение напряжения на базовой области диода, U_D – напряжение на диоде в режиме прямого включения.

С учетом распределенного сопротивления базовой области измерительного диода

$$R = \rho \frac{d}{S},$$

где $\rho = 1/\mu nq$, ρ - удельное объемное сопротивление, μ - подвижность основных носителей заряда, q - заряд электрона, n – концентрация носителей заряда, d - толщина, а S - площадь поперечного сечения базы, вольтамперная характеристика диода имеет вид

$$I = I_0 \left(e^{\frac{(U-IR)q}{mkT}} - 1 \right), \quad (1)$$

где I – прямой, а I_0 - обратный тепловой ток перехода, k – постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, m -корректирующий коэффициент, $m \cong 1,5$ [1].

При относительно низких температурах, менее температуры истощения примесных уровней полупроводника, концентрация носителей заряда в области базы определяется известным соотношением

$$n = \sqrt{N_c N} e^{-\frac{\Delta W'}{2kT}}, \quad (2)$$

где N_c - эффективная плотность состояний для полупроводника базовой области, N – концентрация примесей, $\Delta W'$ - энергия активации примесей. При температурах, превышающих температуру истощения примесных уровней, концентрация носителей заряда равна концентрации примесей, $n = N$.

С учетом (1),(2) и падением напряжения на базе, напряжение на измерительном элементе – диоде в режиме прямого включения определяется уравнением

$$U_D = \frac{mkT}{q} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) + Jd \frac{e^{\frac{\Delta W'}{2kT}}}{q\mu\sqrt{N_c N}}, \quad (3)$$

где $J = I/S$ - плотность прямого тока через p - n – переход. Уравнение (3) учитывает влияние режимных, температурных и топологических факторов, а также электрофизических характеристик базовой области диода. Из (3) следует, что особенности эксплуатационных режимов таких сенсоров должны учитываться при выборе структурно-топологических вариантов.

Режимная зависимость информативного параметра $U_D(T)$ отображается в (3) вторым слагаемым в виде, компенсирующего температурную зависимость напряжения на p - n – переходе, падения напряжения на сопротивлении базы при относительно больших значениях плотности прямого тока. Такой эффект ослабевает по мере увеличения температуры, а формальное условие его минимизации

$$\frac{mkT}{q} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \gg Jd \frac{e^{\frac{\Delta W'}{2kT}}}{q\mu\sqrt{N_c N}}. \quad (4)$$

Уравнение (3) и условие (4) позволяют определить требования к параметрам, определяющих метрологические характеристики неоднородных полупроводниковых сенсоров. Очевидно, что базовая область измерительного диода, при прочих равных

условиях, должна быть высоколегированной, с минимальной толщиной и максимальной площадью сечения, что приближает структуры таких диодов к структурам низковольтных силовых диодов. Уравнение (3) показывает, что стабильность измерительного параметра U и воспроизводимость результатов измерений определяется коэффициентом стабилизации протекающего через сенсор измерительного тока, задаваемого внешним источником в виде генератора тока.

С учетом значений физических констант условие эффективной реализации (4) для кремния принимает вид

$$T \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \gg 5 \cdot 10^{22} Jd \frac{e^{\frac{\Delta W'}{2kT}}}{\mu \sqrt{NN_C}}. \quad (5)$$

При температурах, близких к комнатным, для большинства полупроводников примеси полностью ионизированы, что соответствует условию $n = N$. В этом случае неравенство (5) преобразуется к виду

$$T \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \gg 5 \cdot 10^{22} \frac{Jd}{\mu N}. \quad (6)$$

Выполнение условия (6) позволяет представить измерительную характеристику сенсора в виде линейной зависимости

$$U(T) = 1,3 \cdot 10^{-4} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) T. \quad (7)$$

Реализация критерия (6), как условия линеаризации измерительной характеристики, позволяет определить точностные характеристики сенсора по уравнению (7). Методом конечных приращений из (7) находится относительная погрешность воспроизведения зависящего от температуры среды падения напряжения на измерительном диоде

$$\delta_U = \frac{\ln\left[\frac{(1 + \delta_I)}{(1 + \delta_{I_0})}\right]}{\ln(I/I_0)}, \quad (8)$$

где δ_I , δ_{I_0} - относительные погрешности воспроизведения номинальных значений прямого и обратного тока p - n - перехода соответственно.

Оценка (8) позволяет определить основные способы обеспечения заданной точности воспроизведения измерительного параметра - прямого падения напряжения для диодного чувствительного элемента в составе датчика температуры. Очевидным условием минимизации погрешности воспроизведения информационного параметра δ_U

является функционирование измерительного диода в режиме относительно больших прямых токов и, соответственно, максимального значения отношения (I/I_0), ограниченного неравенством (4).

Относительные изменения прямого и обратного тока диода могут быть обусловлены действием внешних (температура окружающей среды, радиационные воздействия, механические воздействия и др.) или внутренних (режимных) факторов. В общем случае возможны как согласованные (одинаковые по знаку), так и не согласованные изменения параметров δ_I и δ_{I_0} . Из (8) следует, что при идеальном согласовании, когда выполняется условие $\delta_I = \delta_{I_0}$, достигается глобальный минимум погрешности $\delta_U = 0$. Максимальная погрешность имеет место при разнонаправленном отклонении прямого и обратного тока измерительного диода и выполнении условия $\delta_I > \delta_{I_0}$. Выполнение обратного условия соответствует изменению знака погрешности контроля температуры.

Представленные результаты анализа упрощенной структурной модели измерительного диода распространяются на широкий круг прикладных задач, отличающихся требованиями к метрологическим характеристикам, условиям эксплуатации и электрическим режимам функционирования. Наиболее важные закономерности формирования измерительных характеристик в рамках такой модели при необходимости могут быть уточнены, например, с учетом воздействия внешних факторов.

Литература

1. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники: Учеб. Пособие для вузов / И. П. Степаненко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 488 с.: ил.

Устюжанинов Валерий Николаевич, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры Конструирования и технологии электронных средств Владимирского государственного университета. Тел. (4922) 479 – 871; тел. дом. (4922) 53 72 76. ustugh@vlsu.ru

Optimization Structure Of diode Sensors In Temperature Transducers Ustyijzaninov V. N.

The theoretical estimations of impact electrical regimes and temperatures, topological and electro physical features of semiconductors measuring diodes on metrological characteristics of the temperature transducers are described in this article.

Датчик температуры, измерительный диод; метрологические характеристики; влияние температуры, режимных и топологических факторов.

Датчики и системы, №1, 2010