

Изобретение относится к технике измерения температуры и может быть использовано для повышения точности и чувствительности измерения температуры с помощью полупроводниковых термодатчиков с р-п переходом.

Известен также способ измерения температуры, заключающийся в том, что полупроводниковый диод размещают в среде с контролируемой температурой, подают на диод питающее напряжение с полярностью, открывающей р-п переход диода и измеряют постоянное напряжение пропорциональное температуре контролируемой среды. Постоянное напряжение подают на диод через токоограничивающий резистор, а контролируемую температуру определяют из следующей функциональной зависимости:

$$U = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{np}}{I_{обр}} + 1 \right),$$

где U - падение напряжения на открытом диоде;

I_{np} , $I_{обр}$ - прямой и обратный токи р-п перехода соответственно.

Известно также устройство для измерения температуры, содержащее источник напряжения, полупроводниковый диод, размещенный в среде с контролируемой температурой, усилитель и выходной вольтметр. Полупроводниковый диод подключен к источнику питающего напряжения через токоограничивающий резистор.

Измерение напряжения на открытом переходе диоде обеспечивает теоретически линейную зависимость температуры от падения напряжения. Однако нелинейная зависимость обратного тока $I_{обр}$ диода от температуры делает указанную выше зависимость также нелинейной, особенно при изменении температуры в широком диапазоне значений. Обратный ток диода, мало зависящий от приложенного напряжения, значительно изменяется в процессе эксплуатации термометра из-за неизбежных физико-химических изменений в р-п переходе. Кроме того, схема диодного термометра весьма чувствительна к замене самого диода вследствие большого технологического разброса параметров полупроводниковых структур. Все это снижает точность измерения температуры с помощью полупроводниковых датчиков с р-п переходом.

В основу изобретения положена задача создать такой способ и устройство для измерения температуры, в которых путем усовершенствования способа задания тока через открытый р-п переход, а также алгоритма обработки полезного сигнала, обеспечивалась бы линейность градуировочной характеристики, высокая чувствительность и помехозащищенность.

Поставленная задача решается тем, что в способе измерения температуры, заключающемся в том, что полупроводниковый диод размещают в среде с контролируемой температурой, подают на диод питающее напряжение с полярностью, открывающей р-п переход диода, и измеряют постоянное напряжение пропорциональное температуре контролируемой среды, согласно изобретения, питающее напряжение с полярностью, открывающей р-п переход диода, подают через второй однотипный диод, находящийся в тепловом контакте с первым и включенный встречно по отношению к первому диоду, выделяют составляющую падения напряжения на первом открытом диоде, измеряют полярность питающего напряжения, выделяют составляющую падения напряжения противоположной полярности, при этом изменение полярности питающего напряжения производят периодически с низкой частотой, формируют переменное напряжение низкой частоты, состоящее из падений напряжений на открытых р-п переходах, усиливают низкочастотное напряжение прямоугольной формы, выпрямляют усиленное напряжение.

Поставленная задача решается также тем, что в устройство, содержащее источник питания, полупроводниковый диод, размещенный в среде с контролируемой температурой, усилитель и выходной вольтметр, согласно изобретения введены второй, третий и четвертый полупроводниковые диоды, выполненные с первым на общей подложке, делитель напряжения, синхронный детектор и фильтр нижних частот, при этом усилитель выполнен в виде дифференциального усилителя переменного напряжения, источник питания выполнен в виде генератора прямоугольного напряжения низкой частоты, выход которого соединен с опорным входом синхронного детектора и через первый диод со вторым диодом, включенным встречно по отношению к первому диоду, общая точка которых соединена с третьим диодом, также встречно включенным по отношению к первому диоду, второй вывод третьего диода соединен с четвертым диодом, включенным встречно по отношению к третьему диоду, общая точка которых подключена к одному входу дифференциального усилителя переменного напряжения, второй вход которого через делитель напряжения соединен с выходом генератора прямоугольного напряжения низкой частоты, выход дифференциального усилителя низкой частоты соединен с сигнальным входом синхронного детектора, выходом соединенного через фильтр нижних частот с входом выходного вольтметра.

Выбор в качестве токозадающего элемента второго однотипного диода, находящегося в тепловом контакте с первым и включенным встречно по отношению к нему, обеспечивает равенство прямого и обратного токов при любой температуре контролируемой среды. Это равенство исключает зависимость падений напряжений на открытых диодах от технологических и режимных параметров полупроводниковых приборов при периодических изменениях полярности питающего напряжения с низкой частотой. Формирование и усиление переменного напряжения низкой частоты, состоящего из падений напряжений на открытых р-п переходах диодов, обеспечивает высокую чувствительность выходного выпрямленного напряжения от температуры и хорошую помехозащищенность. Использование двух пар встречно-включенных диодов и дифференциального усилителя с регулируемым усилителем напряжения на одном из входов, обеспечивает линейность шкалы и отсчет в градусах Цельсия.

Способ измерения температуры осуществляют следующим образом.

Полупроводниковый диод размещают в среде с контролируемой температурой, подают питающее напряжение с полярностью, открывающей р-п переход диода, и измеряют постоянное напряжение пропорциональное температуре контролируемой среды. Прямая ветвь вольтамперной характеристики (ВАХ) диода при температуре T с учетом падения напряжения на базе диода описывается уравнением (см., например, В.Г.Гусев, Ю.М.Гусев. Электроника. - М.: Высшая школа, 1991..с. 78-81):

$$I_{np} = I_{обp} \left[e^{\frac{q}{kT} (U_+ - I_{np} \cdot r_b)} - 1 \right], \quad (1)$$

где U_+ - напряжение на диоде заданной полярности; r_b - сопротивление базы диода.

Если прологарифмировать выражение (1), то приложенное к диоду напряжение можно представить в виде

$$U_+ = \frac{kT}{q} \left(\ln \left(\frac{I_{np}}{I_{обp}} + 1 \right) + I_{np} \cdot r_b \right) \quad (2)$$

В качестве токозадающего элемента выбирают второй одностипный диод, находящийся в тепловом контакте с первым и включенный встречно по отношению к нему.

При указанной полярности питающего напряжения р-п переход второго диода оказывается закрытым и через него будет протекать обратный ток

$$I_{обp} = I_{обp}(T_0) e^{\alpha(T - T_0)} \quad (3)$$

где $I_{обp}(T_0)$ - обратный ток при температуре T ;

α - постоянный коэффициент (для германия $\alpha_{Ge} \approx 0,09 \text{ K}^{-1}$ при $T < 350 \text{ K}$, для кремния $\alpha_{Si} \approx 0,13 \text{ K}^{-1}$ при $T < 400 \text{ K}$).

Поскольку сопротивление закрытого диода многим больше сопротивления открытого диода, то через р-п переход открытого диода будет протекать обратный ток закрытого диода. В этом случае падение напряжения на р-п переходе первого открытого диода с учетом того, что $I_{np} = I_{обp}$ принимает значение:

$$U_+ = \frac{kT}{q} (\ln 2 + I_{обp} \cdot r_b) \quad (4)$$

При малых значениях тока через открытый диод $I_{обp}$ (порядка десятков единиц мкА (вторым членом (4) можно пренебречь. Тогда падение напряжения на открытом диоде

$$U_+ = \frac{kT}{q} \ln 2 \quad (5)$$

Выделяют положительную составляющую падения напряжения U_+ на первом открытом диоде. Затем изменяют полярность питающего напряжения, приложенного к встречно-включенным одностипным диодам, на противоположную. В этом случае р-п переход первого диода закрывается, а р-п переход второго диода открывается. Выделяют отрицательную составляющую падения напряжения на втором открытом диоде:

$$U_- = -\frac{kT}{q} \ln 2 \quad (6)$$

Изменяют полярность питающего напряжения периодически с низкой частотой (1-2 кГц), что вызывает периодические запертия и открывания диодов. Формируют переменное напряжение низкой частоты Ω , состоящее из падений напряжений на открытых р-п переходах:

$$U_{\sim} = \frac{kT}{q} \ln 2 \operatorname{sign} \sin \Omega t, \quad (7)$$

где $\operatorname{sign} \sin \Omega t$ - прямоугольное напряжение, изменяющееся с частотой Ω . Усиливают низкочастотное напряжение (7) прямоугольной формы и выпрямляют его. Измеряют полученное постоянное напряжение

$$U_0 = A \frac{kT}{q} \ln 2, \quad (8)$$

где A - коэффициент усиления.

Из выражения (8) видно, что температура T пропорциональна измеренному напряжению U_0 :

$$T = \frac{q}{AkT \ln 2} \cdot U_0, \quad (9)$$

которое не зависит от технологических и режимных параметров полупроводниковых диодов (обратного и прямого тока, значения питающего напряжения).

Чувствительность р-п перехода к температуре T определяется значением температурного коэффициента напряжения (ТКН) как функции тока и температуры

$$\text{ТКН} = \frac{dU}{dT} = -F + G \ln I_{np}, \quad (10)$$

где F - постоянная, равная для диодов 2 мВ/С и маломощных транзисторов в диодном включении 2,3 мВ/С;

G - коэффициент, имеющий теоретическое значение 0,198; 0,375; 0,396 для диффузного, рекомбинационного и для больших токов соответственно.

Значение ТКН для различных типов диодов и транзисторов в диодном включении составляет от -1 до -3,5 мВ/С и зависит главным образом от плотности тока в р-п переходе. Поэтому наибольшее значение ТКН имеет место при малых значениях прямого тока $I_{np} < 1 \text{ mA}$ (20 - 300 мкА). Поэтому выбор прямого тока через открытый р-п переход равным обратному ($I_{np} = I_{обp}$) позволяет существенно повысить чувствительность к температуре.

Возможность усиления полезного сигнала, пропорционального T на одной фиксированной низкой частоте существенно повышает помехозащищенность способа по сравнению со способами, основанными на

усилении постоянного тока или напряжения.

Таким образом, операции предложенного способа повышают точность измерения температуры за счет исключения нестабильных параметров полупроводниковых приборов на результат измерения, чувствительность за счет автоматического поддержания малых значений тока через открытые переходы и помехозащищенность за счет усиления на переменном напряжении.

На чертеже представлена схема устройства для измерения температуры с помощью полупроводникового датчика с р-п переходом.

Устройство содержит генератор 1 прямоугольного напряжения низкой частоты, полупроводниковые диоды 2,3,4 и 5, размещенные в среде с контролируемой температурой и. выполненные на общей подложке 6, усилитель 7, делитель напряжения 8, синхронный детектор 9, фильтр нижних частот 10 и выходной вольтметр 11. При этом усилитель 7 выполнен в виде дифференциального усилителя переменного напряжения. Выход генератора 1 соединен с опорным входом синхронного детектора 9 и через диод 2 с диодом 3, включенным встречно по отношению к диоду 2, общая точка которых соединена с диодом 4, также встречно включенным по отношению к диоду 2, второй вывод диода 4 соединен с диодом 5, включенным встречно по отношению к диоду 4, общая точка которых подключена к одному входу усилителя 7, второй вход которого через делитель напряжения 8 соединен с выходом генератора прямоугольного напряжения низкой частоты 1, выход дифференциального усилителя низкой частоты 7 соединен с сигнальным входом синхронного детектора 9, выходом соединенного через фильтр нижних частот 10 с входом выходного вольтметра 11.

Устройство для измерения температуры работает следующим образом.

Прямоугольное напряжение низкой частоты генератора 1 воздействует на встречно-включенные диоды 2,3,4 и 4, общая подложка 6 которых размещена в среде с контролируемой температурой. При положительной полярности выходного напряжения генератора 1 диоды 2 и 5 закрыты, а диоды 3 и 4 открыты. Обратный ток диода 2 протекает через открытый переход диода 3 и создает положительное по знаку падение напряжения на нем, пропорциональное температуре окружающей среды. Падение напряжения на диоде 3 через открытый диод 4 воздействует на первый вход дифференциального усилителя 7 переменного напряжения.

При изменении полярности прямоугольного напряжения генератора 1 на отрицательную диоды 2 и 5 открываются, а диоды 3 и 4 закрываются. Выходное напряжение генератора 1 через открытый диод 2 при закрытом диоде 3 воздействует на встречно-включенную пару диодов 4 и 5. Обратный ток диода 4 протекает через открытый диод 5, создавая на нем отрицательное по знаку падение напряжения. Так как все четыре диода расположены на общей подложке, то это падение напряжения также пропорционально температуре окружающей среды. Падение напряжения с диода 5 непосредственно воздействует на вход усилителя 7.

В результате периодического переключения диодов 2,3,4 и 5 напряжением генератора 1 на первый вход дифференциального усилителя 7 воздействует переменное напряжение, изменяющееся с частотой генератора 1 и пропорциональное температуре окружающей среды. На второй вход генератора 1 воздействует непосредственно выходное напряжение генератора 1, ослабленное делителем напряжения 8. Разностное переменное напряжение усиливается усилителем 7 и поступает на сигнальный вход синхронного детектора 9, который управляется непосредственно напряжением генератора 1. Выпрямленное синхронным детектором 9 напряжение сглаживается фильтром 10 нижних частот и измеряется вольтметром 11. При градуировке шкалы вольтметра делителем напряжения 8 устанавливается такое, напряжение на втором входе дифференциального усилителя 7, при котором показания вольтметра 11 обращаются в нуль при $T=T_0$, где T_0 - температура нуля по шкале Цельсия. Тогда шкала вольтметра 11 может градуироваться непосредственно в градусах Цельсия.

На вход усилителя 7 низкой частоты наряду с полезным сигналом, пропорциональным температуре, воздействуют также шумы р-п переходов и низкочастотные помехи. Однако благодаря синхронному детектированию полезного сигнала, изменяющегося с частотой генератора 1, на входе фильтра 10 низких частот выделяется постоянное напряжение, которое пропорционально только температуре контролируемой среды. При этом напряжение помех и шумов подавляется фильтром 10 нижних частот, который выбирают с достаточно большой постоянной времени.

В качестве пар идентичных полупроводниковых диодов целесообразно использовать серийно выпускаемые транзисторные сборки КТС 613А, КТС 98 НТЗ с четырьмя р-п переходами, транзисторы которых используются в диодном включении. Среднеквадратичное отклонение крутизны преобразования в каждой партии сборок не превышает 1 -2% от среднего значения, что позволяет измерять температуру в диапазоне +10 - +200 С с погрешностью не более 0,05 - 0,1 С при постоянной времени фильтра нижних частот до 1 с и частоте генератора 1,0-1,5 кГц.

