

УДК 621.315

В.А. Гусев, проф., д-р техн. наук,

С.Е. Шоферистов,

Е.Ю. Владыка

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИДЕНТИЧНОСТИ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ ТЕРМОДАТЧИКОВ

Рассмотрена конструкция кремниевого термодатчика на основе диодного включения транзистора с закороченными электродами коллектор-база. Изучены направления по повышению идентичности метрологических характеристик термодатчиков. Проведена оптимизация структуры термосенсора, в результате которой предложена конструкция прибора с двухслойной базой.

Достоверное измерение температуры в широком диапазоне является актуальной задачей в различных областях науки и техники. Основное требование для всех типов термодатчиков заключается в стабильности метрологической характеристики в условиях режимов эксплуатации. Устойчивость к дестабилизирующим факторам и подавление деградационных процессов старения предполагает использование фундаментальных физических свойств твердого тела и других агрегатных состояний вещества (жидкость, газ, плазма). По этой причине в качестве рабочих эффектов термодатчиков используют объемное тепловое расширение жидкостей и твердого тела, терморезистивные свойства металлов и полупроводников, определяемые дрейфовой электропроводностью, термоэлектрические эффекты и другие. В настоящее время широкое распространение получили термодатчики на основе кремниевых прямосмещенных р-п переходов, обеспечивающих высокую температурную чувствительность (1,5...2) мВ/К и широкий диапазон измеряемых температур (10...500) К [1]. Основу долговременной стабильности термометрической характеристики обеспечивает физика работы р⁺-п перехода с ограниченной базой и контактом со скоростью рекомбинации близкой к бесконечности и отработанная микроэлектронная технология изготовления термодатчиков. Кремний является высокотемпературным химически и физически стойким материалом, чему способствуют его защитные пленки SiO₂ и Si₃N₄. Легирующие (донорные и акцепторные) примеси стабильно сохраняют свой пространственный профиль вплоть до температур 500 °С из-за высокой энергии активации процессов диффузии. Контакт с бесконечной скоростью рекомбинации подавляет влияние процессов рекомбинации в объеме базы и на ее поверхности, которые могут изменяться во времени из-за отжига объемных и поверхностных рекомбинационных примесных или радиационных дефектов, генерации структур-

ных дефектов вследствие распада пересыщенных твердых растворов, термических градиентов, механических напряжений, эффектов усталости гетерослоев и др. Поэтому по долговременной стабильности кремниевый термодатчик не будет уступать резистивным термодатчикам из объемных металлов (проволока) или термопарам на основе платины. В связи с технологической сложностью реализации структуры p^+-n перехода с толщиной базы в (2...5) мкм и рекомбинационным омическим контактом (мембранная технология) широко используется диодное включение транзистора с закороченными электродами коллектор-база (рисунок 1). Вследствие больших значений паразитных сопротивлений базы и коллектора типичных усилительных транзисторов $p^+-p-n-p^+$ и $p^+-n-p-p^+$ (особенно в составе ИС) возможен вход коллекторного $p-n$ перехода в режим слабого насыщения (прямое смещение), что увеличивает вклад рекомбинационных процессов в протекание тока через структуру и временную нестабильность напряжения термодатчика.

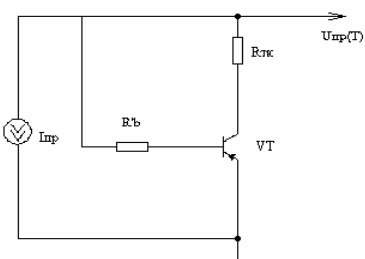


Рисунок 1 – Диодное включение транзисторной структуры в качестве термодатчика

Поэтому в качестве термодатчика используется структура p^+-n-p^+ транзистора с двухслойной базой, у которой $r_{TK} \ll r'_B$, и коэффициент передачи тока базы ограничен более высокой концентрацией первого слоя базы, что обеспечивает активный режим работы транзисторной структуры во всем температурном диапазоне.

В ряде сенсоров дифференциального типа требуется абсолютная

идентичность термометрических характеристик входных датчиков. В этой связи вопросы обеспечения одинаковых или весьма близких значений выходных характеристик датчиков приобретают особую актуальность.

Выходное напряжение термодатчика (рисунок 1) при смещении его генератором тока I_{np} имеет вид:

$$U_{np}(T) = U_j(T) + \Delta U_B(T), \quad (1)$$

где $U_j = \phi_T \ln \frac{I_{np}}{I_S}$ – прямое падение напряжения на эмиттерном $p-n$ переходе;

$$I_S = S_E \frac{qD_B(T)n_i^2(T)}{\int_0^{w_B} N_B(x)dx} - \text{начальный диффузионный ток эмиттера в прямом смещении [2];}$$

$\Delta U_B = \frac{I_{np}}{B(I_{np}, T) + 1} r'_B(T)$ – падение напряжения на омическом сопротивлении базы; $B(I_{np}, T)$ – коэффициент передачи тока базы; $\Phi_T = \frac{kT}{q}$ – тепловой потенциал транзистора.

Анализ I_S показывает, что для заданного включения транзистора прямое падение напряжения определяется фундаментальными характеристиками кремния (n_i^2 , $D_B = \mu_B \Phi_T$) и числом Гуммеля $G = \int_0^{W_B} N_B(x) dx$, которые не зависят от рекомбинационных свойств в объеме базы и на ее поверхности.

Преобразуем выражение (1) к виду

$$U_{np}(T) = \frac{\Delta E_{g0}}{q} - \frac{eT}{q} - \alpha(I, T)T + \Delta U_B(T), \quad (2)$$

где $\Delta E_{g0} = 1,21$ эВ – ширина запрещенной зоны кремния при $T=0$ К и линейной аппроксимацией $\Delta E_g(T)$; $e = 2,7 \cdot 10^{-4}$ эВ/К – температурный коэффициент

уменьшения ширины запрещенной зоны; $\alpha(I, T) = \frac{k}{q} \ln \frac{MT^{4-\alpha}}{GI_{np}}$ В/К – температурный коэффициент чувствительности прямо-смещенного р-п

перехода; α – показатель степени в температурной зависимости подвижности носителей заряда в кремнии; $\mu(N_B) = \mu_0(N_B) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\alpha}$; $\mu_0(N_B)$ –

подвижность носителей заряда в базе при $T_0=300$ К;

$$\alpha_n = 2,6 - 0,3 \ln \left[1 + \frac{N_B}{8,2 \cdot 10^{15}} \right] \text{ – для электронов;}$$

$$\alpha_p = 2,3 - 0,29 \ln \left[1 + \frac{N_B}{5,6 \cdot 10^{15}} \right] \text{ – для дырок. Значение коэффициента } M \text{ не}$$

зависит от температуры и тока,

$$M = S_E \mu_{B0}(N_B) N_{C0} N_{V0} k T_0^{\alpha-3},$$

где N_{C0}, N_{V0} – объемная плотность состояний в зоне проводимости и валентной зоне при $T=300$ К; k – постоянная Больцмана.

Несмотря на высокий уровень автоматизации эпитаксиально-планарного технологического процесса изготовления кремниевых термодатчиков на основе транзисторных структур имеющиеся флуктуации физических харак-

теристик полупроводника, глубин залегания металлургических p-n переходов, уровня легирования эмиттера, базы и коллектора и другие отклонения (“шум” технологического процесса) приводят к разбросу значений метрологической характеристики от прибора к прибору по площади пластины. При этом величина дисперсии $U_{np}(T)$ – напряжения термодатчика определяется выбранной структурой и совершенством технологии конкретного предприятия-изготовителя.

Направления по повышению идентичности метрологических характеристик термодатчиков, как и других микроэлектронных приборов и ИС, включают два основных этапа. Первый этап связан с оптимизацией структуры прибора и технологии изготовления. Второй – предусматривает разработку методов прямого и косвенного отбора приборов с одинаковыми характеристиками.

Транзисторные структуры термодатчиков p^+-n-p^+ типа изготавливались по планарно-эпитаксиальной технологии. На исходной пластине, легированной бором ($N_C = 2,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$), выращивалась эпитаксиальная пленка n-типа, легированная фосфором ($N_B = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) толщиной $(8 \dots 10) \cdot 10^{-4} \text{ см}$. После окисления методом фотолитографии и разделительной диффузией бора формировался планарный коллекторный переход с толщиной пассивной базы $(4,8 \dots 5,5) \text{ мкм}$. Затем методом диффузии фосфора (Поверхностное сопротивление $R_{SE} = 15 \text{ Ом на квадрат}$) формировался эмиттерный переход с глубиной залегания $X_{JE} (1,2 \dots 1,4) \text{ мкм}$. Далее проводилась операция подлегирования контактов базы с последующей стандартной металлизацией $Al + 2\% Cu$.

Зондовый контроль параметров по пластине показал, что распределение коэффициента усиления $H_{21Э}$ лежало в диапазоне $30 \dots 220$, со средним значением 87. Прямое падение напряжения имело существенно меньший разброс при $T = 22^\circ \text{C}$, $I_{np} = 10^{-4} \text{ А}$ ($668,1 \pm 21$) мВ. Так как оценочный разброс ΔU_B находится в диапазоне десятых долей милливольт ($0,7 \dots 0,05$) мВ, то основной причиной флуктуации $U_{np}(T)$ является флуктуация числа Гуммеля (1), определяемого концентрацией примеси в базе и толщиной базы. Кроме того свой вклад может вносить и нестабильность температуры во время зондовых измерений.

С целью уменьшения разброса прямого падения напряжения была предложена структура с двухслойной базой $p^{++}-n^+-p^+$, позволяющая стабилизировать суммарную концентрацию в базе и ограничить величину и флуктуацию ΔU_B за счет уменьшения r'_B и $B(I_{np})$.

Формирование первого высоколегированного слоя базы осуществлялось методом ионной имплантации фосфора в “окно” коллекторного p-n перехода дозой в 35 мкКл и энергией 60 кэВ с последующей разгонкой на 2,5 мкм. Высокая воспроизводимость процесса стабилизировала значение

интегральной концентрации примесей в базе и паразитное сопротивление r'_B , ответственное за флуктуацию ΔU_B .

Флуктуация толщины базы в данном технологическом процессе определялась процессом автолегирования при эпитаксиальном выращивании и не могла быть уменьшена. Поэтому операция подлегирования базы была совмещена с операцией “дозагонки” эмиттера для стабилизации значений толщины базы.

В результате оптимизации структуры термодатчика и технологии его изготовления разброс параметра $U_{пр}(T)$ был уменьшен ($668,1 \pm 6,7$) мВ.

Для обеспечения идентичности метрологической характеристики на уровне $\pm 0,1$ К необходимо производить замеры на пластине с постоянной температурой с точностью 0,05 К, что представляет собой сложную и дорогостоящую процедуру. В этой связи актуальной становится задача разработки способа подбора идентичных по температурным свойствам кристаллов с помощью косвенных методов не столь чувствительных к поддержанию постоянной температуры.

Из физики работы р-п перехода известно, что для несимметричных p^+-n и n^+-p переходов зарядная емкость и вольтфарадная характеристика определяются концентрационным профилем в слаболегированной базе:

$$C = \frac{dQ_V(U)}{dU}; Q_V = Sq \int_0^{\delta(U)} N(x) dx = SE_m \varepsilon \varepsilon_0, \quad (3)$$

где E_m – максимальное значение напряженности поля в р-п переходе; ε , ε_0 – относительная и абсолютная диэлектрические постоянные;

Из (3) и определения дифференциальной емкости следует:

$$C = SE \varepsilon_0 \frac{dE_m}{dU} \equiv S \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\delta(U)}; dE_m = \frac{dU}{\delta(U)}. \quad (4)$$

Из решения уравнения Пуассона для E_m и (4) можно получить:

$$\int_0^{\delta(U)} N(x) dx = \frac{1}{q \cdot S E} \int_0^U C_E(U) dU.$$

При напряжении, равном напряжению смыкания базы, $\delta(U) = W_B$, откуда следует:

$$G = \int_0^{W_B} N(x) dx = \frac{1}{q S E} \int_0^{U_{св}} C_E(U) dU.$$

Таким образом, число Гуммеля определяется интегралом от вольтфарадной характеристики p^+-n перехода.

Чувствительность зарядной емкости эмиттера к флуктуации $N_B(x)$ значительно выше, чем напряжения $U_{пр}(T) \sim 1/\ln G$. С другой стороны температурная

чувствительность зарядной емкости значительно ниже, чем у прямого падения напряжения. Поэтому возникает возможность осуществлять отбор идентичных термодатчиков по значениям вольтфарадной характеристики в цеховых условиях с дальнейшей калибровкой в метрологической лаборатории.

У отобранных по вольтфарадной характеристике приборов (пять точек в диапазоне от 0 до 5 В) измерялись метрологические зависимости $U_{np}(T)$ при $I_{np}=100$ мкА. Результаты измерений в диапазоне температур (273...373) К показали, что максимальные отклонения от средней кривой, рассчитанной по методу наименьших квадратов, не превышали 89 мкВ, что соответствовало температурному разбросу менее 0,05 К. Достигнутый уровень идентичности метрологической характеристики позволяет использовать такие датчики в дифференциальных сенсорах.

В процессе экспериментальных исследований было обнаружено, что в ряде случаев термодатчики с идентичной $C_E(U)$ имели начальный разброс в значениях $U_{np}(T)$ в диапазоне $\pm(0,5...2)$ мВ. Такое поведение объясняется тем фактом, что отбор датчиков практически осуществлялся только по идентичности профиля концентрации примеси в первом ионнолегированном слое базы ($U_{EB}=5$ В), так как напряжение пробоя эмиттерного перехода ограничивает допустимую величину обратного смещения. Поэтому в случае большого отклонения толщины эпитаксиальной части базы, как в сторону увеличения, так и уменьшения, от среднего значения, либо концентрации доноров в ней, приводит к значительной флуктуации числа Гуммеля.

Анализ температурной чувствительности (2) показывает, что отклонение от среднего значения числа Гуммеля приводит к отклонению $U_{np}(T)$ такой же величины что и при идентичном относительном отклонении I_{np} при постоянной температуре

$$dU_j(G) = Td\alpha_G = -\frac{k}{q}T\frac{1}{G}dG; \quad dU_j(I_{np}) = Td\alpha_I = -\frac{kT}{q}\frac{1}{I_{np}}dI_{np}.$$

Например, при $\frac{dG}{G} = 0,1$ и $T_0=300$ К отклонение $U_{np}(T_0, I_{np})$ составит

$$dU_j = -0,1\frac{k}{q}T_0 = -2,6 \text{ мВ. Это отклонение от среднего значения } \overline{U_{np}(T_0)}$$

может быть скорректировано уменьшением прямого тока на 10% (

$$\frac{dI}{I} = -0,1).$$

Так как прямой ток является внешним параметром и не зависит от температуры и концентрационного профиля структуры термодатчика, то выполнение условия

$$GI_{np} = \left[\int_0^W N_B(x) dx \right] I_{np} = const$$

– позволяет реализовать идентичные метрологические характеристики термодатчиков с одинаковыми вольтфарадными характеристиками. На практике калибровка термометрической характеристики в этом случае заключается в установлении нового значения прямого тока в режиме измерений, величина которого обеспечивает идентичное $\overline{U_{np}(T_0)}$ с необходимой точностью, например $\overline{U_{np}(T_0)} = 668,015$ мВ.

В качестве опорного значения $\overline{U_{np}(T_0)}$ целесообразно использовать среднее значение этого параметра в отобранной с помощью характеристики $C_E(U_E)$ группе датчиков. В этом случае величина $\Delta I_{np}/I_{np}$, необходимая для калибровки выходной характеристики датчика минимальна. Выбор температуры T_0 , на которой проводится калибровка датчиков, определяется рабочим интервалом температур ($T_{min} - T_{max}$). В связи с нелинейностью и ростом чувствительности при увеличении температуры (2) отклонение $dU_j(T)$ при T_{max} больше, чем при T_{min} .

$$\frac{d\alpha(I_{np}, T)}{dT} = \frac{k}{q} (4 - \alpha) \frac{1}{T};$$

После интегрирования по температурному диапазону получим

$$\Delta\alpha(I_{np}, T_{max}, T_{min}) = \frac{k}{q} (4 - \alpha) \ln \frac{T_{max}}{T_{min}}.$$

Температуру T_0 выбираем при значении $\Delta\alpha(I_{np}, T_0) = 0,5\Delta\alpha(I_{np}, T_{max})$. При этой температуре отклонения в коэффициенте термочувствительности на краях температурного диапазона T_{min}, T_{max} будут одинаковыми и равными $\pm 0,5\Delta\alpha(I_{np}, T_{max}, T_{min})$ соответственно, т.е.

$$0,5 \frac{k}{q} (4 - \alpha) \ln \frac{T_{max}}{T_{min}} = \frac{k}{q} (4 - \alpha) \ln \frac{T_{max}}{T_0}; \quad T_0 = \sqrt{T_{max} T_{min}}.$$

Следовательно, температура калибровки соответствует среднегеометрическому значению крайних температур рабочего диапазона.

В завершение необходимо отметить, что дальнейшее повышение идентичности метрологических характеристик кремниевых термодатчиков на основе прямосмещенного р-п перехода обеспечивается уменьшением паразитного сопротивления r'_B , что может быть реализовано повышением разрешающей способности на операциях фотолитографии и уменьшением ширины полосы эмиттера.

Таким образом, в результате проведенных анализа и экспериментальных исследований предложена методика повышения идентичности метрологических характеристик термодатчиков на основе транзисторных структур $p^{++}-n^{+}-p^{+}$ -типа. Отбраковка по вольтфарадной характеристике эмиттерного p - n перехода термодатчиков с последующей калибровкой в одной температурной точке с помощью измерительного тока позволяют обеспечить погрешность измерения температуры менее $\pm 5 \cdot 10^{-2}$ К в температурном диапазоне 273...373 К.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение линейности метрологической характеристики кремниевых термодатчиков и реализации малоинерционных дифференциальных сенсоров.

Библиографический список

1. Яганов П.А. Кремниевые микросенсоры температуры на основе p - n перехода / П.А. Яганов // Электроника и связь. — 2004. — №22. — С. 134 – 137.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов /С. Зи. – В 2-х кн., Кн.1. — М.: Мир,1984. — 456 с.

Поступила в редакцию 27.02.2006 г.