

ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ОПЕРАЦИИ ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКИ

Д.т.н. И.Ш. Невлюдов, к.т.н. В.В. Евсеев, В.О. Бортникова, Д.О. Гаркавенко, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

В статье проведен анализ методов автоматического контроля температурных режимов с учетом различных способов получения информации. Проведен анализ существующих приборов для измерения температурных режимов, выявлены их достоинства и недостатки, на основе результатов которого, предложена схема электрическая принципиальная прибора для контроля температурных режимов операции травления кремниевой подложки на основе принципа работы термоэлектрического метода.

У статті проведено аналіз методів автоматичного контролю температурних режимів з урахуванням різних способів отримання інформації. Проведено аналіз існуючих приладів для вимірювання температурних режимів, виявлено їх переваги та недоліки, на основі результатів якого, запропонована схема електрична принципова приладу для контролю температурних режимів операції травлення кремнієвої підкладки на основі принципу роботи термоелектричного методу.

The article analyzes the methods of automatic control of temperature modes to suit different ways of getting information. The analysis of existing instruments for measuring temperature modes, identified their strengths and weaknesses, based on which the results of proposed scheme electric basic device for temperature control operation of etching the silicon substrate based on the principle of thermoelectric method.

Ключевые слова: технологический процесс, измерения температуры, метод, термомпара

Введение

Высокотехнологическое производство современных МЭМС устройств, предъявляет высокие требования к точности выполнения условий технологических процессов (ТП), которое невозможно без применения систем автоматизаций и контроля всех параметров производства. Вследствие чего средства комплексной промышленной автоматизации технологических процессов, автоматизированных систем управления (АСУ) и оптимизации производственных процессов, АСУ ТП различной сложности являются необходимой составляющей производства МЭМС устройств.

АСУ ТП предназначена для управления ТП, оптимизации ТП, автоматизации ТП, поддержания оптимального режима работы технологических аппаратов и учета промежуточных данных, формирования и выдачи отчетной и архивной документации в SCADA системах, диагностики измерительного оборудования. АСУ ТП состоит из 4 уровней: нижнего, среднего, верхнего и оперативного [1].

Они все взаимосвязаны между собой и обеспечивают целостную работу АСУ ТП.

Самой сложной задачей является правильная реализация нижнего уровня АСУ ТП, он состоит из датчиков и исполнительных механизмов, устанавливаемых на технологических объектах. Их конструкция и исполнение позволяют им устойчиво и безопасно функционировать при самых экстремальных и неблагоприятных погодных условиях, а также во взрывоопасных зонах и агрессивных средах. Связь датчиков и исполнительных механизмов со средним уровнем осуществляется с помощью промышленной сети.

На сегодняшний день широко используются средства для измерения и регулирования температуры ТП производства МЭМС устройств. Одним из требований является необходимость непрерывного автоматического контроля температуры в исполнительных устройствах, которые нуждаются в поддержке постоянной температуры в заданном диапазоне с минимальными отклонениями во время операции травления кремниевой подложки. Устройства должны обеспечивать высокую точность измерения с допусками $\pm 0.03^\circ\text{C}$ [4]. Анализ показал, что на сегодняшний день не существует измерителей, которые способны обеспечить такую точность, поэтому задача разработки нового устройства, способного достичь такой точности, является актуальной.

Анализ методов измерения температуры

В зависимости от поставленных задач можно использовать как контактные (термоэлектрический, а так же терморезистивный, термомагнитный, термочастотный, термозумовой), так и бесконтактные (пирометрический, электромагнитный) методы и средства для определения температуры ТП, или окружающего пространства вокруг кремниевой подложки.

Контактные методы и средства измерения температуры применяются для измерения температур, начиная от значений близких к абсолютному нулю и до 1500°C . Из контактных наиболее широкое применение получили термоэлектрический и терморезистивный методы, к достоинствам которых относятся их простота, надёжность, низкая стоимость и возможность получения достаточно высокой точности измерений. Принцип действия терморезистивных термометров основан на измерении электрического сопротивления при варьировании температуры [5].

Термоэлектрический метод заключается в следующем: при закреплении концов двух различных проводников/полупроводников и нагревании места

закрепления до температуры t , отличной от температуры "холодных" концов, имеющих температуру $t_0 < t$, на "холодных" концах возникает термо-ЭДС, которую можно выразить [6]:

$$E_t = f(t) - f(t_0), \quad (1)$$

где $f(t)$ – функция температуры t ; $f(t_0)$ – функция температуры t_0 .

Термопары используют для измерения температуры изделий и сред в различных приборах и устройствах: амперметрах, вольтметрах и др. К достоинствам термопар относятся: широкий диапазон измерений температур, простота схем включения, удобство эксплуатации, высокая надёжность; к недостаткам: жёсткие требования к чистоте металлов, погрешность измерений, связанная с уходом температуры "холодных" концов.

В основе термомагнитного метода лежит обратно-пропорциональная зависимость магнитной восприимчивости парамагнитных веществ или ядерной магнитной восприимчивости от температуры [5-7]. Чувствительными элементами в термомагнитных преобразователях являются парамагнитные соли и металлы, такие как медь или платина. Термомагнитные преобразователи используются для измерения низких температур от 0,01 до 30 К с погрешностью от 1 до 5%. Достоинства термомагнитного метода состоят в отсутствии систематической погрешности и высокой чувствительности.

Измерение температуры термочастотным методом основано на использовании зависимости от температуры частоты собственных колебаний различного рода резонаторов, скорости распространения звуковых и ультразвуковых колебаний и параметров частотно-зависимых RC или RL-цепей с терморезистором [5-6]. Функция преобразования термометров с резонансными преобразователями на рабочем участке характеристики в виде полинома [6]:

$$f = f_0 [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \gamma(T - T_0)^3], \quad (2)$$

где α , β и γ – коэффициенты, которые выбираются в зависимости от вида и характеристик резонаторов.

Измерение температуры термозумовым методом базируется на уравнении Найквиста, устанавливающего зависимость напряжения тепловых шумов, возникающих на резисторе, от термодинамической температуры [5]:

$$U_m^2 = 4kTR\Delta f, \quad (3)$$

где U_m^2 – среднее квадратичное значение шумового напряжения; k – постоянная Больцмана, $k=1,38 \cdot 10^{23}$ Дж/К; Δf – полоса частот измерения.

Термозумовой метод используется для измерения температуры в диапазоне от 0,001 до 2500 К. В качестве измерительных преобразователей применяются резисторы из платины, манганина, константана, нихрома, вольфрама, графита, а также ёмкостные и индуктивные

преобразователи. Недостатки термозумового метода: низкий уровень полезного сигнала, составляющего доли микровольта.

Теория пирометрических методов основана на законах, устанавливающих связь между излучением абсолютно черного тела и его температурой. В зависимости от входной величины пирометры подразделяются на пирометры полного излучения (радиационные пирометры), частичного излучения (яркостные пирометры) и пирометры спектрального отношения (цветовые пирометры). Пирометры охватывают широкий диапазон температур от 173 до 6000 К. Промышленные устройства имеют точность определения мощности около $\pm 1\%$ верхнего значения диапазона измерений; прецизионные устройства – 124 около $\pm 0,2 \div \pm 0,3\%$.

Устройства для наблюдения и исследования объектов по их тепловому излучению – тепловизоры, термографы или телевизионные микроскопы. Тепловидение и термография используются при геологических и климатологических исследованиях земной поверхности, в медицинской диагностике, в строительстве для проверки теплоизоляции зданий, в энергетике для обнаружения мест перегрева в электрических цепях и энергетическом оборудовании, а также для измерения механических напряжений и деформаций методом термоупругости.

Основу вихретокового контроля составляет закон электромагнитной индукции, в соответствии с которым интенсивность и распределение возбуждаемых в объекте контроля вихревых токов зависят от его геометрических и электромагнитных параметров. Переменный ток, действующий в катушках вихретоковых преобразователей (ВТП), создаёт электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем объекте контроля. Преимущество ВТП в том, что в их выходных сигналах содержится многопараметровая информация об электрических, магнитных, геометрических и связанных с ними других физико-механических величинах. Однако, в настоящее время электромагнитные методы и устройства недостаточно широко используются (из-за довольно сложных зависимостей сигналов преобразователей от температуры) для измерения температуры изделий и сред. В основном эти методы и устройства применяются для оценки качества и определения оптимальных режимов термической обработки в ТП.

Анализ приборов используемых в системах автоматизации управления температурными режимами

Существует множество различных приборов, применяемых в АСУ ТП операции травления кремниевой подложки. Проведем анализ наиболее применимых приборов для контроля и измерения температуры ТП: Delta DT3 от фирмы Delta Electronics [11], измеритель-регулятор микропроцессорный одноканальный ТРМ1-Щ11 [12], измеритель температуры многоканальный прецизионный "Термоизмеритель ТМ-12" [13].

Delta DT3 (рис.1) предназначен для регулирования температуры путем управления процессами нагрева или охлаждения в технологическом оборудовании, для поддержания температуры на заданном уровне в печах, управление зонами нагрева в экструдерах и т.д. Он подходит для решения большинства типовых практических задач управления процессом нагрева или охлаждения.

Измеритель-регулятор микропроцессорный одноканальный ТРМ1-Щ11 (рис. 2) предназначен для измерения и регулирования температуры и других физических параметров. Устройство позволяет осуществлять следующие функции: измерение температуры или других физических величин (давления, влажности, расхода, уровня и т.п.) в одной точке с помощью стандартных датчиков, подключаемых к его универсальному входу; скоростные измерения (0,1 с) с использованием унифицированных датчиков тока или напряжения.



Рис. 1. Температурный контроллер Delta DT3



Рис. 2. Измеритель-регулятор микропроцессорный одноканальный ТРМ1-Щ11

Измеритель температуры многоканальный прецизионный "Термоизмеритель ТМ-12" (рис.3) предназначен для измерения температуры контактным способом с помощью первичных преобразователей — термометров сопротивления (ТС) с учетом индивидуальных статических характеристик (ИСХ) или номинальных статических характеристик (НСХ) преобразования. Устройство позволяет осуществить сбор

заданного количества результатов измерений через заданный интервал времени и сохранение этих результатов в памяти устройства. Устройство обеспечивает измерение температуры на объектах, удаленных от устройства на расстояния до 100 м.



Рис. 3. Измеритель температуры многоканальный прецизионный "Термоизмеритель ТМ-12"

В таблице 1 приведены сравнительный анализ достоинства и недостатки данных устройств.

Таблица 1
Достоинства и недостатки анализируемых приборов

Название устройств	Достоинства	Недостатки
Delta DT3	современный цветной ЖК-дисплей; низкое энергопотребление; низкая стоимость	не рассчитан на работу при отрицательных температурах
ТРМ1-Щ11	высокая помехоустойчивость к электромагнитным воздействиям; универсальный источник питания; увеличенный срок гарантии	невысокая точность измерений; высокая стоимость
Термоизмеритель ТМ-12	12 каналов измерения; разрешение, °С: 0,01	высокая стоимость

Описание схемы электрической принципиальной разрабатываемого устройства контроля и управления температурой для АСУ ТП

Учитывая проведенный анализ, предлагается разработать новое устройство контроля и управления температурой для АСУ ТП нижнего уровня на принципе работы термоэлектрического метода. На рисунке 4 приведена схема электрическая принципиальная разрабатываемого устройства.

