

ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛА СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА

Электронные датчики температуры широко применяются практически во всех системах автоматического контроля и регулирования и обычно состоят из чувствительного элемента, в качестве которого используются полупроводниковые приборы различного типа, и электрической схемы усиления, преобразования и нормирования выходного сигнала. Принцип их действия основан на зависимости концентрации носителей заряда от температуры.

Работоспособность традиционных полупроводниковых датчиков при высоких температурах ограничивается устойчивостью их кристаллической решетки. Для этих целей наиболее перспективны чрезвычайно химически устойчивые монокристаллы синтетического алмаза. В присутствии кислорода такой алмаз окисляется при температурах выше 600°C, а в вакууме его поверхностная графитизация происходит при 1700°C. Алмаз обладает также высокими радиационной стойкостью и механической прочностью.

Важные достоинства алмаза – рекордно высокая теплопроводность и низкая теплоемкость, что обеспечивает чувствительным элементам (ЧЭ) датчиков температуры возможность работать в импульсном режиме на частотах вплоть до десятков кГц, что связано с рекордно высокой температурой Дебая алмаза $T_D = 1860$ К.

Следует отметить, что при ширине запрещенной зоны 5,45 эВ удельное сопротивление беспримесного алмаза составляет 10^{13} – 10^{14} Ом·см. В связи с этим для применения подходят только легированные монокристаллы. Наиболее подробно изучены полупроводниковые алмазы с энергией активации 0,37 эВ, легированные бором и обладающие дырочной проводимостью, поскольку термодатчики на основе кристаллов данного типа могут быть использованы вплоть до 600°C.

Существуют датчики температуры, полученные в результате спонтанной кристаллизации при высоких температурах и давлении. К недостаткам метода относятся трудность уп-

равляемого легирования, низкая воспроизводимость результатов при синтезе, высокое содержание дефектов в образцах. Все это делает невозможным серийное производство датчиков с воспроизводимыми характеристиками. Качество ЧЭ-датчиков температуры можно существенно повысить, выращивая кристаллы методом управляемого температурного градиента.

В результате совместной работы НИИФИ и ТИСНУМ разработана опытная технология производства датчиков температуры с ЧЭ терморезистивного типа на основе синтетических легированных монокристаллов алмаза.

В качестве исходных материалов использовались легированные бором алмазы (рис.1а), выращенные в системе Fe–Al–C–B методом температурного градиента при 5,5 ГПа и 1650 К, где алюминий играет роль геттера свободного азота, предотвращающего спонтанное легирование выращиваемых кристаллов. Наилучшими характеристиками обладают монокристаллы алмаза с концентрацией бора не менее 10^{19} см⁻³, при которой удается обеспечить минимальную неоднородность его внедрения в кристаллическую решетку алмаза во всем объеме, что повышает воспроизводимость параметров ЧЭ, причем образцы с более высокой концентрацией бора демонстрируют лучшую временную стабильность характеристик при высокой температуре.

После синтеза кристаллы алмаза разрезались на пластины, каждая из которых являлась заготовкой серии из 50–100 ЧЭ (рис.1б). Был также отработан ряд операций по их групповой обработке в рамках одной пластины с последу-

¹ ОАО "НИИФИ" (Пенза).

² ФГУ ТИСНУМ (Троицк, Московская обл.).

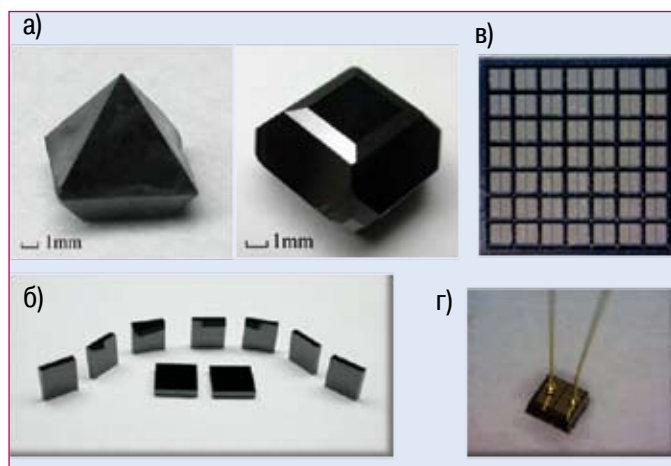


Рис.1 Этапы изготовления ЧЭ: а) – исходные монокристаллы синтетического алмаза, б) – пластины-заготовки, в) – пластина с металлизацией перед разделением, г) – конечный элемент с выводами

ющим ее разделением на отдельные изделия размером $0,5 \times 0,5 \times 0,2 \text{ мм}^3$.

Традиционные методы создания омических контактов к полупроводниковым материалам в случае алмаза малоэффективны. Тем не менее, существуют три основных способа формирования на нем контактных структур: металлизация, связанная с термической активацией поверхностных реакций, в результате которых на границе «металл–алмаз» образуются слои карбидов; уменьшение ширины потенциального барьера посредством сильного легирования поверхностного слоя алмаза при ионной имплантации бором с последующей металлизацией; предварительная графитизация поверхности алмаза с последующим использованием прижимных контактов или токопроводящих паст. Благодаря механической прочности и устойчивости к агрессивным средам практическую ценность представляет первая группа способов.

Формирование контактных площадок к ЧЭ осуществлялось магнетронным напылением трехслойной структуры Ti-Pt-Au с последующим ее отжигом в высоком вакууме (рис.1в).

После разделения пластин на отдельные ЧЭ к их контактным площадкам термокомпрессионной сваркой были присоединены по два электрических вывода из золотой проволоки диаметром 40 мкм (рис.1г).

Операция подгонки сопротивления до номинала осуществлялась по специально разработанной методике посредством увеличения зазора между контактными площадками алмазным резцом в автоматическом режиме при постоянной температуре ЧЭ, равной 25°C и с точностью не хуже $\pm 0,05^\circ\text{C}$. В результате сопротивления таких элементов в серии различались не более чем на 0,1 %, а между разными сериями – не более чем на 0,2 %.

Для определения номинальной статической характеристики (НСХ) преобразования ЧЭ были проведены измерения за-

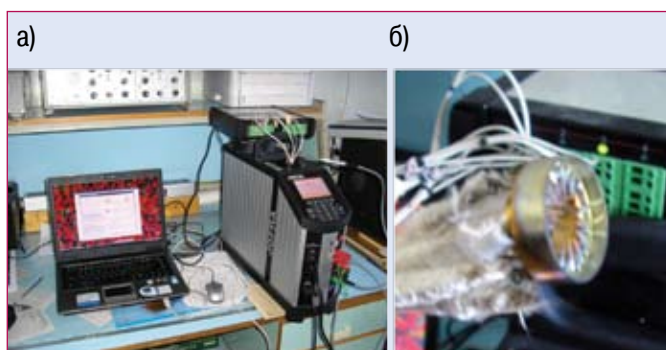


Рис.2 Стенд для температурных испытаний: а) – общий вид, б) – оправка для крепления ЧЭ

висимости их сопротивления от температуры. Миниатюрные размеры элементов потребовали особого подхода к проведению испытаний, поскольку, с одной стороны, требовалось обеспечить высокую точность задания и поддержания температуры, а с другой – механически не повредить конструкцию. В работе использовалось оборудование фирмы Ametek – прецизионные калибраторы АТС-650В и АТС-125В (рис.2а), позволяющие задавать температуру с точностью $\pm 0,3^\circ\text{C}$ со встроенным датчиком установки и $\pm 0,05^\circ\text{C}$ с внешним эталонным датчиком, что удовлетворяет требованиям большинства практических задач.

Для испытаний было изготовлено приспособление, на которое с одной стороны разваривались золотые проводники, а с другой, – подключались измерительные выводы (рис.2б). Это позволило одновременно испытывать в одинаковых условиях до пяти образцов и сократить сроки испытаний ЧЭ.

Недостаток конструкции – невозможность использовать стандартный теплопередающий вкладыш от калибратора до объекта испытаний. Поскольку теплопередающий элемент был заменен на воздушную среду, обязательным условием стало использование внешнего эталонного датчика для задания и контроля температуры, так как внутренний датчик калибратора показывает температуру стенок, а не камеры. Например, при температуре стенки 50°C разница температур от периметра до центра камеры составила более 2°C . При исследовании применялась 4-проводная схема подключения объектов к измерительному устройству.

Поскольку легированный алмаз обладает ярко выраженной активационной зависимостью сопротивления от температуры с отрицательным температурным коэффициентом, с понижением температуры сопротивление растет экспоненциально и, соответственно, увеличивается чувствительность, однако контролировать нелинейное изменение сопротивления на несколько порядков достаточно сложно. Эксперименты подтвердили, что выше 100°C сопротивление элемента уменьшается до десятков ом, однако чувствительность резко падает. В связи с этим изготовление универсального элемента на весь возможный температурный диапазон затруднено.

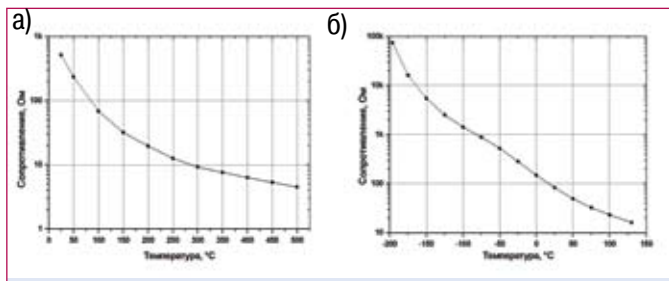


Рис.3 Номинальные статические характеристики преобразования для ЧЭ-датчиков температуры на основе синтетических монокристаллов алмаза: а) – низкотемпературные, б) – высокотемпературные

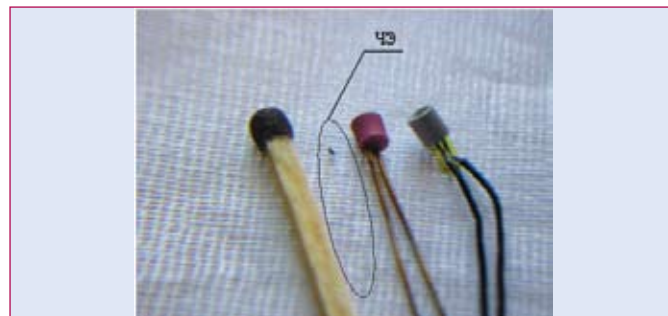


Рис.5 Внешний вид образцов датчиков температуры с ЧЭ на основе монокристаллов синтетических алмазов

По результатам испытаний в соответствии с диапазонами рабочих температур было решено изготавливать датчики двух типов: низкотемпературные (от -196°C до 130°C) и высокотемпературные (от 25 до 500°C). В первом случае номинальное сопротивление при комнатной температуре составляло $80\ \text{Ohm}$, и для уменьшения диапазона изменения сопротивления использовалась максимально возможная степень легирования кристаллов. Для второго случая уровень легирования примерно в два раза ниже, а номинальное сопротивление – $500\ \text{Ohm}$, что позволило поднять значения сопротивления и чувствительности датчиков при максимально высокой температуре.

Для оценки погрешности калибровки были проведены испытания на стабильность длительной работы датчиков при фиксированных температурах, соответствующих краям рабочего диапазона. Проверено также изменение характеристик преобразования при последовательных циклах нагревания и охлаждения ЧЭ. Установлена универсальная номинальная статическая характеристика преобразования датчиков температуры каждого типа, позволяющая определять температуру среды с погрешностью не более 1°C (рис.3). При индивидуальной калибровке ЧЭ такая погрешность может быть уменьшена до $0,1^{\circ}\text{C}$.

Главное преимущество алмазных ЧЭ – их высокое быстродействие, поскольку благодаря малым размерам и высокой теплопроводности за доли секунды ими достигается температура окружающей среды. Измерение быстродействия проводилось посредством быстрого перемещения ЧЭ в термостат с дистиллированной водой, нагретой до 80°C . За счет высокой теплоемкости воды внесение миниатюрного алмазного элемента не приводит к существенному искажению теплового поля и появлению внутри термостата тепловых пото-

ков. В результате изменение сопротивления ЧЭ происходит вследствие его нагрева, а скорость этого изменения характеризует быстродействие. Характерный вид фронта изменения сопротивления высокотемпературного ЧЭ при измерениях по описанной методике показан на рис.4. Среднее время выравнивания температуры ЧЭ и окружающей среды – $18\ \text{ms}$.

Для сохранения достаточно высокого быстродействия и увеличения надежности конструкции изготовлен корпус из композитного материала, обладающего высокой степенью теплопередачи. На стадии формирования такой корпус легко поддается обработке, что позволяет разместить в нем ЧЭ и зафиксировать его выводы. Испытания модернизированных образцов ЧЭ и готовых датчиков не выявили отличий в НСХ, что свидетельствует о эффективности разработанной конструкции и полной теплопередаче. Вместе с тем, наличие корпуса приводит к снижению быстродействия датчика до $\approx 0,5\ \text{s}$.

Разработанные образцы датчиков температуры (рис.5), в качестве информационного параметра которых выступает сопротивление, имеют нелинейную выходную характеристику экспоненциального типа, что не совсем удобно для некоторых приложений. В целях унификации и линеаризации таких характеристик этих датчиков в ТИСНУМ совместно с НИИФИ разработана специализированная схема преобразования на основе программируемого микроконтроллера с памятью. Такое решение на основе последовательного преобразования АЦП-ЦАП входного сигнала с ЧЭ и промежуточной обработки цифрового сигнала с использованием калибровочной кривой позволяет сформировать на выходе датчика аналоговый сигнал тока или напряжения с линейной зависимостью от температуры.

Как свидетельствуют предварительные испытания, изготовленные полупроводниковые датчики температуры на основе синтетических легированных монокристаллов алмазов могут эффективно применяться в различных областях техники.

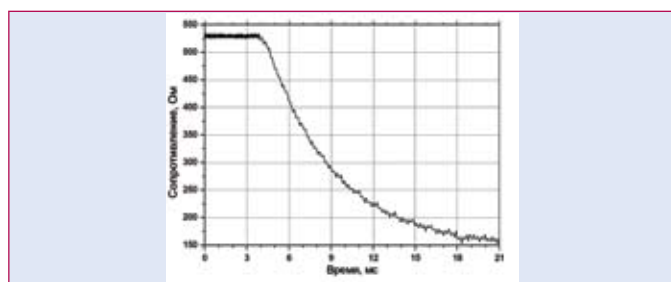


Рис.4 Оценка быстродействия алмазных ЧЭ

Авторы выражают искреннюю благодарность сотруднице НИИФИ И.Красновой и сотрудникам ТИСНУМ С.Терентьеву, С.Носухину, М.Кузнецову, В.Бормашову, С.Тарелкину за активное участие в подготовке материалов статьи и конструктивное обсуждение полученных результатов.

