

УДК 681.586

## **ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ «КНС» И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СТАНКОСТРОЕНИИ.**

Любовь Викторовна Кабакова

*Студентка 5 курса,  
кафедра «Металлорежущие станки»,  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Ю.В. Никулин,  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки»,  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Темой доклада является рассмотрение тензорезисторных преобразователей «КНС» (кремний на сапфире) и их применение в станкостроении. Перед нами стоял вопрос измерения малых перемещений и смещений в станках.

В настоящее время метод тензометрии получил широкое распространение и развитие в станкостроении. Тензорезисторный преобразователь-это проводник, изменяющий свое сопротивление при деформации сжатия-растяжения.

При создании новых приводов станков ни одна из фирм мира не обходится без экспериментов по определению нагрузок в элементах привода (ходовом винте, муфтах, динамометрических столах и т.д.), напряженного состояния в роторах и статорах электродвигателей, подшипниках в опорах и т.д.

Благодаря малогабаритности, высокой точности измерения и помехоустойчивости метод тензоизмерений имеет большое значение при экспериментальных исследованиях станков.

Открытие и исследования тензорезисторного принципа, возникающего в полупроводниковых материалах (Si, германий и т.д.), показало, что созданные на этой основе датчики могут применяться при создании современных металлорежущих станков.

Принципиально новые возможности в развитии тензорезисторной аппаратуры для исследования механизмов, открылись в связи с разработкой и изучением гетероэпитаксиальных полупроводниковых структур типа «кремний на сапфире» и применением их в датчиках усилий или перемещения. Распространено получение полупроводниковых материалов в виде монокристаллических пленок на разного рода монокристаллических подложках. Такие пленки называют эпитаксиальными, а процесс их получения-эпитаксиальным наращиванием. Если эпитаксиальная пленка наращивается на подложку того же вещества, то получаемые структуры называют гомоэпитаксиальными. Если подложка из другого материала, то - гетероэпитаксиальные. Однослойные пластины кремния p- и n-типов получают резкой слитков монокристаллического кремния диаметром 50...150 мм на пластины толщиной 0,25...0,4 мм. Промышленностью выпускаются слитки монокристаллического кремния, которые в зависимости от типа электропроводности и значения удельного сопротивления подразделяются на пять групп. Подготовка пластин, получаемых из слитков монокристаллического кремния, является одним из важнейших этапов производства и включает в себя следующие операции: ориентацию слитков по кристаллографическим осям, резку слитков на пластины, шлифование, полирование, травление и очистку поверхностей от загрязнений различных типов, приобретённых на предыдущих этапах обработки.

Обязательным условием получения бездефектных полупроводниковых и пленочных структур является отсутствие на поверхности пластин и подложек нарушенного слоя и каких-либо загрязнений. Как известно, нарушенный приповерхностный слой полупроводниковых пластин является следствием их механической обработки. Используемые при подготовке пластин методы шлифования, полирования и травления позволяют удалить нарушенный слой.

На тонкой монокристаллической пленке кремния, выращенной на монокристаллической сапфировой подложке с определенной кристаллографической ориентацией, расположена тензочувствительная схема, в которой тензорезисторы имеют вид мезаструктур, отделенных друг от друга промежутками чистого сапфира. Толщина кремниевой пленки варьируется от долей микрометра до 1...2 микрометров. Датчики на структуре КНС работают на нано-миллиметровом принципе, позволяющем давать высокий выходной потенциал при малых силовых возмущениях. Тензопреобразователи на основе структуры КНС обладают всеми достоинствами проволочных преобразователей.

Метрологические характеристики тензорезисторного датчика определяются главным образом параметрами его основной части - тензопреобразователя (ТП), осуществляющего преобразование измеряемой механической величины в выходной электрический сигнал. Недостатком полупроводниковых тензопреобразователей являются сильная и нелинейная температурная зависимость таких характеристик, как тензочувствительность и сопротивление тензорезисторов, и нелинейность функции преобразования деформации в относительное изменение сопротивления тензорезисторов. Для борьбы с этими недостатками разработано большое количество конструктивных и схемных методов компенсации погрешностей ТП, позволяющих изготавливать в настоящее время датчики, работающие в интервале температур от -50 до +125° С с основной погрешностью 0,5% и дополнительной температурной погрешностью 0,1...0,4% на каждые 10°С. Вместе с тем, трудоемкая индивидуальная настройка датчиков, необходимая для получения высоких метрологических характеристик, повышает их стоимость и ограничивает объем производства.

Также к недостаткам широко используемых в последние годы интегральных кремниевых систем следует отнести необходимость формирования в них р-п - переходов, изолирующих тензорезисторы друг от друга и от подложки. Наличие р-п - переходов ограничивает верхнее значение рабочей температуры величиной 130...150°С (для кремния), понижает стабильность характеристик датчиков, не позволяет обеспечить высокую радиационную стойкость. Указанные недостатки обусловили ограниченность применения полупроводниковых тензорезисторных датчиков в современных системах контроля и управления технологическими процессами, хотя объем производства таких датчиков за рубежом непрерывно растет, что связано, в первую очередь, с массовым потреблением не очень точных, но сравнительно недорогих тензорезисторных датчиков автомобильной промышленностью.

Детальные исследования особенностей электрофизических характеристик и тензоэффекта в структурах КНС показали, что на их основе можно создавать тензопреобразователи с малой температурной погрешностью и высокой линейностью преобразования.

Рассмотрим для наглядности более подробно конструктивное исполнение транзисторов, выполненных по технологии кремний на изоляторе.

Подложка, выполненная по технологии кремний на изоляторе, представляет собой трёхслойный пакет, который состоит из монокристаллической кремниевой пластины, диэлектрика и размещённого на нём тонкого поверхностного слоя кремния. В качестве диэлектрика может выступать диоксид кремния SiO<sub>2</sub> или, гораздо реже, сапфир (в этом

случае технология называется «кремний на сапфире» или КНС). Дальнейшее производство полупроводниковых приборов с использованием полученной подложки по своей сути практически ничем не отличается от классической технологии, где в качестве подложки используется монокристаллическая кремниевая пластина.

При построении схемы по данной технологии большая часть потребляемой мощности затрачивается на заряд паразитной ёмкости изолирующего перехода в момент переключения транзистора из одного состояния в другое, а время, за которое происходит этот заряд, определяет общее быстродействие схемы.

Основное преимущество технологии КНС состоит в том, что за счёт тонкости поверхностного слоя и изоляции транзистора от кремниевого основания удаётся многократно снизить паразитную ёмкость, а значит и снизить время её зарядки вкуче с потребляемой мощностью.

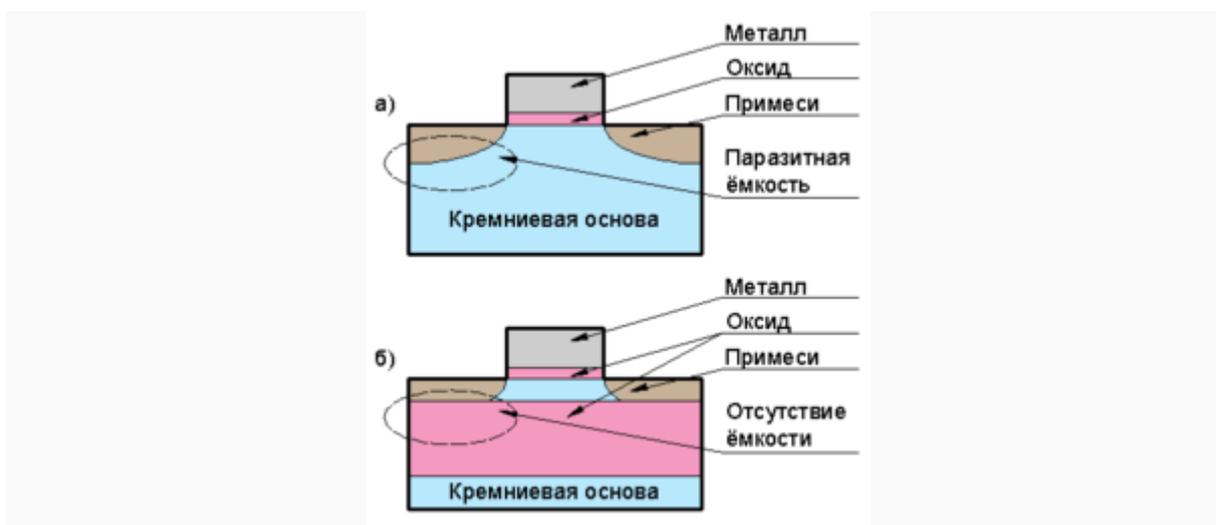


Рис. 1. Наноструктура КНС- датчика для измерения малых высокоточных параметров станка (б - показан (розовым цветом) слой диэлектрика(сапфира или SiO<sub>2</sub>))

Кроме всего вышперечисленного, тензорезисторные преобразователи на основе структуры КНС обладают целым рядом важнейших преимуществ, поскольку изготавливаются на основе интегрального кремниевого чувствительного элемента:

-упругий элемент таких полупроводниковых чувствительных датчиков может быть изготовлен из монокристалла кремния, так что в нем отсутствуют гистерезис и сопутствующие ему усталостные явления;

-тензорезисторы монолитно (на уровне атомов) связаны с упругим элементом, что исключает явления ползучести, характерные для слоев связующего клея;

-метод твердотельной технологии исключает появление низкой воспроизводимости характеристик датчика при массовом производстве их;

-датчики на основе КНС позволяют работать при измерении довольно больших перемещений и усилий, поскольку сапфир прочнее и жестче кремния и в принципе может выдерживать большой уровень деформаций;

-сапфир обладает отличными упругими и изолирующими свойствами (вплоть до температур порядка 1000 °С), что делает датчик на основе КНС работоспособным при высоких температурах (до начала пластических деформаций в кремнии, т.е. 700 °С);

-сапфир химически и радиационно исключительно стоек, поэтому элементы, выполненные из него, могут работать во всех агрессивных средах;

Тензорезисторные преобразователи на основе КНС работоспособны в самых жестких условиях эксплуатации узлов металлорежущих станков при широком

интервале рабочих температур (открытое либо закрытое помещение, термокомпенсация и т.д.) и обладают повышенной надежностью и стабильностью параметров.

Все вышеперечисленное дает тензорезисторным преобразователям на основе КНС возможность быть использованными во многих отраслях промышленности.

Обычные тензодатчики не позволяют измерять малые перемещения. Они не «улавливают» его. Но станки такие существуют и даже применяются в полупроводниковом и электровакуумном машиностроении.

В ходе исследований нами было изучено множество конструкций тензодатчиков, индуктивных датчиков, емкостных. Каждый из них имеет свои недостатки. Так, например, датчики индуктивного типа не используются для малых перемещений. Емкостные очень сложны в исполнении. Они «боятся» высоких частот.

Рассмотрев все разнообразие существующих датчиков и преобразователей, мы остановились на КНС. Несмотря на преимущества и возможную перспективу использования тензорезисторных преобразователей, возникает проблема подключения датчика. Необходимо решить проблему - как и куда подключить датчик на основе структуры КНС, если он никогда и нигде не использовался в качестве тензочувствительного датчика. Для этой цели пришлось изготовить и исследовать отдельный стенд, наглядно демонстрирующий возможности установки этих тензодатчиков в станке.

Кроме того, сложно добиться сбалансированности моста (равенства комплексных сопротивлений в плечах мостовой схемы). Для уравнивания мостовой схемы переменного тока нужно вручную (или автоматически) регулировать параметры как модуля, так и фазового угла. Мостовой схемой переменного тока, применяемой в исследованиях станков, принято называть четырехполюсник, к двум выводам которого подводится питающий его переменный ток, а к двум другим (на выходе) подсоединяется указатель равновесия (например, цифровой вольтметр). В плечи моста включаются ППИ. Плечи четырехполюсника строятся таким образом, чтобы при изменении одного или нескольких параметров ППИ можно было добиться равновесия моста (отсутствие сигнала на выходе четырехполюсника).

ППИ - первичные преобразователи информации. В настоящее время имеется большое число пособий по экспериментальным методам исследования машин, в которых излагаются требования к конкретной аппаратуре и ППИ. Однако вопросами обоснования выбора ППИ, расчета схем ППИ для металлорежущих станков уделено чрезвычайно малое влияние.

Комплексные сопротивления, образующие ветви моста, могут быть соединены в схему различным образом и указатель равновесия может быть подключен к различным точкам схемы. Все это вызывает необходимость отыскать правильную конфигурацию цепей схемы.

Мостовые схемы, являющиеся частью схем первичных преобразователей информации, известны давно. В станкостроении существует два вида подключения ППИ в измерительной аппаратуре-индивидуально или в виде мостовой схемы, обеспечивающей высокую чувствительность и малые габариты. С помощью мостовых схем в станкостроении измеряются многие неэлектрические величины: давление, виброперемещение, скорости, ускорения и др.

Существуют также другие разновидности мостовых схем (мосты Максвелла, Хейя, Вина, Шерринга), которые позволяют по добротности схемы определять механические параметры. В настоящее время существует, в основном, три вида питания мостовых схем переменным током (рис. 2).

В первом случае мостовая схема питается с помощью соответствующего генератора переменного тока (рис. 2, а). При изменении зазора  $x$  выходное напряжение генератора  $U$  делится на напряжение первое и второе с последующим уравновешиванием до получения равновесия.

При питании мостовой схемы, построенной на основе моста Максвелла, напряжения могут быть получены с помощью трансформатора с отдельными вторичными обмотками (рис. 2, б) (при питании мостовой схемы на основе структуры КНС от переменного напряжения). Основным достоинством таких схем, что очень важно для прецизионного станкостроения, является высокая точность исследования (например, зазора), а также значительная временная и температурная стабильность.

Для питания мостовой схемы могут также применяться стандартные электронные генераторы синусоидальных сигналов. Такая мостовая схема представлена на рис. 2, в, где напряжения формируются сдвоенным генератором переменного синусоидального напряжения. Основным требованием к данной мостовой схеме является жесткая связь выходного сигнала генератора с параметрами ППИ.

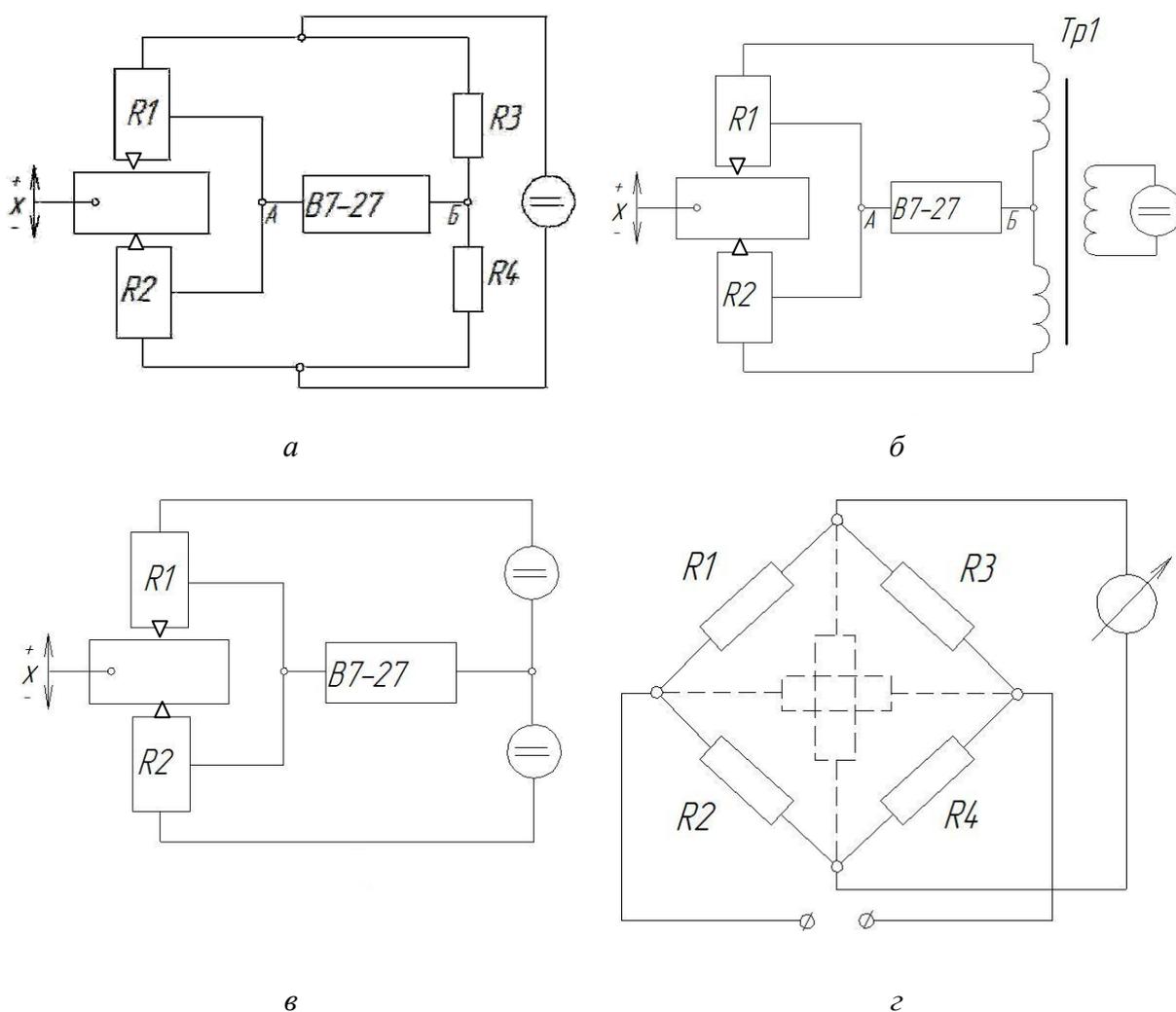


Рис. 2. Виды питания дифференциальных мостовых схем:  
 а - с помощью генератора переменного тока;  
 б - с помощью трансформатора с отдельными вторичными обмотками;  
 в - напряжения формируются сдвоенным генератором переменного синусоидального напряжения; г - питание тензорезисторного датчика КНС постоянным током

В созданной установке была учтена несбалансированность моста и возникновение новых сопротивлений в диагоналях моста.

Таким образом, в статье раскрыты все особенности, преимущества и недостатки тензорезисторных преобразователей «КНС». Наличие большого числа преимуществ увеличит возможности их применения и объем производства.

#### **Литература**

1. *Никулин Ю.В.* Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Материалы XVI Научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов под редакцией профессора В.Н. Азарова. - М.: МГИЭМ, 2004. -355 с.

2. *Дайчик М.Л., Ригоровский М.И., Хуришудов Г.Х.* Методы и средства натурной тензометрии. - М.: Машиностроение, 1989. -240с.