

К. Ю. Крайнова

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА

K. Y. Kraynova

MANUFACTURING TECHNOLOGY OF THE SEMICONDUCTOR SENSITIVE ELEMENT OF THE PRESSURE SENSOR BASED POLYCRYSTALLINE DIAMOND

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Актуальность статьи подтверждается повышенными требованиями к метрологическим характеристикам, предъявляемым к приборам в средствах выведения, космических аппаратах, пилотируемых комплексах и других отраслях промышленности, работающих в жестких условиях эксплуатации. Основной целью разработки высокоточного датчика давления является решение задач, направленных на увеличение диапазона температур и обеспечение долговременной стабильности. **Материалы и методы.** Проанализированы основные структуры и компоненты на основе полупроводниковых широкозонных материалов. Подробно рассмотрена структура датчика на основе поликристаллического алмаза, отличающегося от всех широкозонных материалов наилучшим сочетанием электрофизических параметров. Проведены экспериментальные исследования по созданию поликристаллических алмазных пленок, а также по созданию микрорельефа на их поверхности путем плазмохимического травления. **Результаты.** По результатам проведенных исследований выявлена возможность изготовления высокоточного датчика на основе поликристаллического алмаза. Технология получения пленок поликристаллического алмаза и обработки плазмохимическим травлением воспроизводима, однако целесообразно проведение дополнительных экспериментальных исследований по формированию структуры датчика кремний–диэлектрик–алмаз. **Выводы.** Предложенная структура датчика давления позволит использовать его для работы в диапазоне температур от минус 196 °С до плюс 300 °С и выше. Особые электрофизические параметры поликристаллического алмаза позволят применять датчик в условиях повышенной радиации.

A b s t r a c t. Background. Relevance of article is confirmed by increased requirements to the metrological characteristics required for measurements in the launch vehicles, spacecraft, manned space complexes and other industries operating in harsh environments. The main purpose of the development of high-precision pressure sensor is to solve problems, to increase the temperature range and ensuring long-term stability. **Materials and methods.** Analyzed the main structures and components based on semiconductor wide bandgap materials. Considered in detail the structure of the sensor on the basis of polycrystalline diamond, different from all the materials of wide best combination of electro-physical parameters. Experimental studies on the establishment of polycrystalline diamond films, as well as to create a microrelief on the surface by plasma-chemical etching. **Results.** The results of the study revealed the possibility of manufacturing high-precision sensor based on polycrystalline diamond. The technology of polycrystalline diamond films and processing by plasma etching is reproducible, but it is advis-

able to conduct additional experimental studies on the formation of the structure of the sensor silicon-insulator-diamond. **Conclusions.** The proposed structure of the pressure sensor will use it to work in a temperature range from $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ and above. Specific electrical parameters of polycrystalline diamond will allow to apply the sensor in high radiation environments.

К л ю ч е в ы е с л о в а: высокоточный датчик, поликристаллический алмаз, плазмохимическое анизотропное травление, МЭМС-структура.

К е у w o r d s: the high-precision sensor, polycrystalline diamond, the plasmachemical anisotropic etching, MEMS structure.

Развитие комплексной автоматизации в средствах выведения, космических аппаратах, пилотируемых комплексах и других отраслях промышленности требует применения датчиков различных физических величин, являющихся источником информации для автоматизированных систем контроля, управления или регулирования. Важной задачей создания датчиков является обеспечение требуемых метрологических характеристик системы, работающей в жестких условиях эксплуатации [1].

В настоящее время актуально создание высокоточных датчиков давлений, предназначенных для работы в диапазоне температур от минус $196\text{ }^{\circ}\text{C}$ до плюс $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше. Для такого диапазона температур в современной микроэлектронике применяют структуры и компоненты на основе полупроводниковых широкозонных материалов, из которых самыми перспективными являются следующие: «кремний-на-диэлектрике» (КНД) (рис. 1,а), карбид кремния (SiC) (рис. 1,б), а также пленки поликристаллического алмаза (рис. 1,в) [1–4].

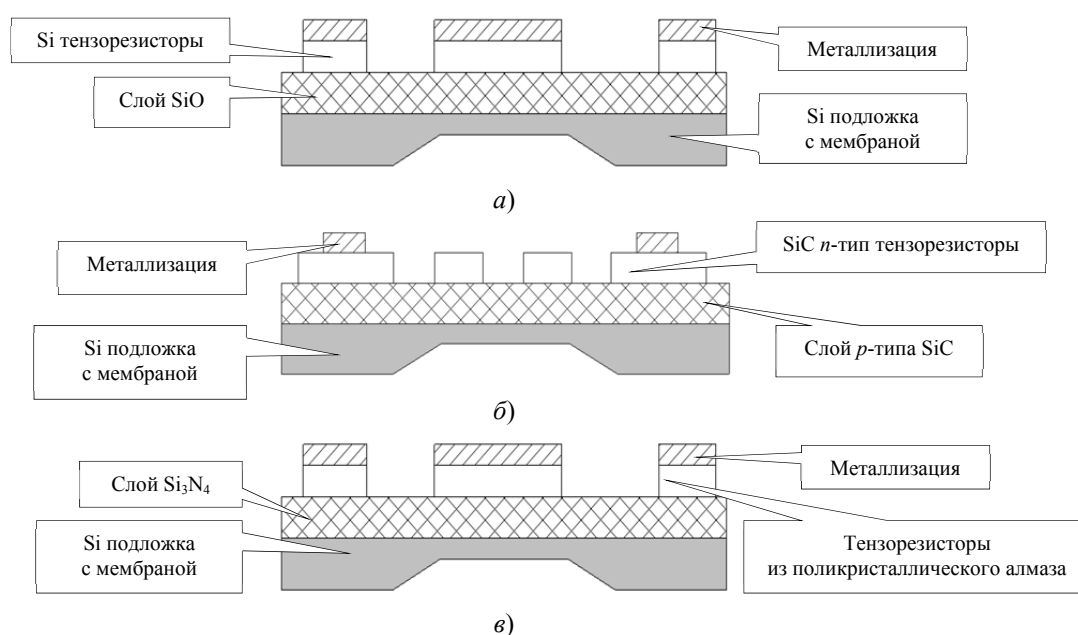


Рис. 1. Конструкции чувствительных элементов на основе перспективных структур и компонентов: а – «кремний-на-диэлектрике»; б – карбид кремния; в – пленки поликристаллического алмаза

Эффективность применения алмаза в датчиках давления объясняется тем, что изо всех широкозонных полупроводников алмаз отличается наилучшим для твердотельных приборов сочетанием основных электрофизических параметров. Алмаз имеет низкую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 5,7$), способствующую снижению диэлектрических потерь, высокие радиационную стойкость, дрейфовую скорость насыщения электронов и дырок ($\mu_e = 4500\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и $\mu_p = 3800\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) и напряженность поля электрического пробоя (до 10^{10} В/м). У алмаза наибольшая среди всех известных материалов теплопроводность до $24\text{ Вт/см}\cdot\text{К}$. При применении технологии легирования алмаза его удельное сопротивление изменяется в широком интервале, что делает его еще более широкозонным с шириной запрещенной зоны до $5,7\text{ эВ}$ [2].

Кроме того, алмаз доступен для применения в электронике в широких масштабах, так как освоено его выращивание с использованием промышленного оборудования в виде пленок и пластин толщиной до 1 мм и площадью, ограниченной размерами реакционной камеры для его выращивания.

Относительным ограничением при применении пленок поликристаллического алмаза в чувствительном элементе микроэлектромеханических датчиков давления могут являться следующие недостатки:

- графитизация при температуре выше 600 °С в присутствии кислорода и превращение в графит при 900 °С во время проведения технологических операций;
- трудности механической обработки (шлифовки, полировки);
- проведение традиционных технологических операций для получения микрорельефа на поверхности поликристаллической алмазной пленки, причем отклонение от вертикальности стенок не должно превышать 10°.

Наиболее перспективным методом для получения сверхчистых поликристаллических алмазных пленок (АП) является *CVD*-метод синтеза алмаза с активацией газовой смеси сверхвысокочастотным разрядом [5, 6]. С помощью установки, представленной на рис. 2, можно регулировать и поддерживать основные параметры процесса осаждения алмазной пленки: давление, состав и скорость прокачки газовой смеси, температуру подложки. Автоматическая система управления позволяет осуществлять процессы с длительностью в десятки часов, обеспечивая синтез пленок различной толщины.

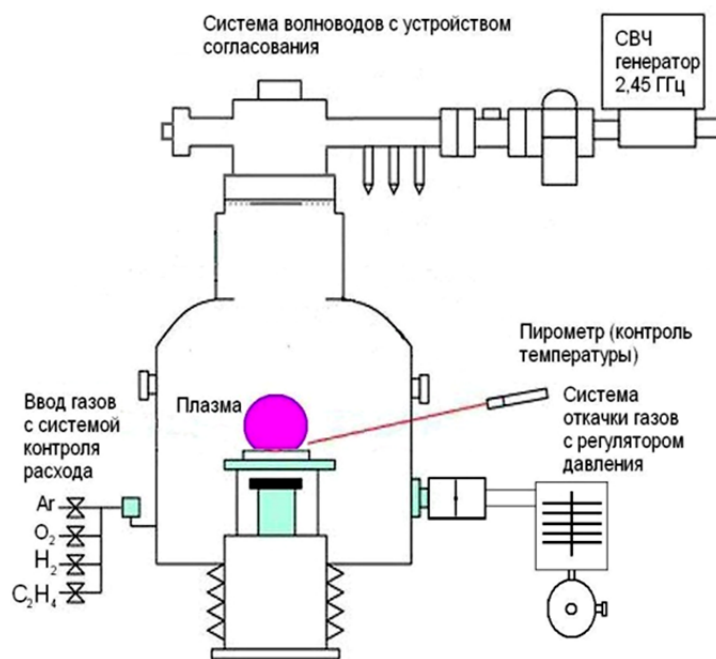


Рис. 2. Схема устройства *CVD*-установки

Наиболее распространенной и простой смесью, которую используют для синтеза АП, является смесь метан+водород (СН₄+ Н₂), причем получение качественных пленок осуществляется при соотношении компонентов (0,3–1) % СН₄ – (99,7–99) % Н₂ [7].

Типичное значение давления газа в камере составляет 5–20 кПа, а скорости осаждения – от 1 до 20 мкм/ч. В качестве подложек чаще всего используют кремний или молибден, но осаждать АП можно и на другие материалы, стойкие к нагреву до 1000 °С в присутствии атомарного водорода. Полученные АП могут быть химически отделены от подложки и использованы далее в виде пластин.

Таким образом, данный метод позволяет получать не только чистые поликристаллические АП толщиной от единиц микрометров до нескольких миллиметров, но и получать отдельные пластины, которые в размерах достигают диаметра более 100 мм и толщиной порядка 5 мм.

Однако в настоящее время остается нерешенной задача возможности формирования заданного микрорельефа на поверхности алмазной пленки. Одной из проблем является получение канавки на поверхности АП с высоким аспектным соотношением и отклонением от вертикальной стенки не более 10° при глубине травления свыше 5 мкм.

Проведенные исследования показывают, что плазмохимическое «сухое» травление является наиболее подходящим для получения канавок в алмазе, причем эту операцию можно проводить почти в тех же условиях, в которых обычно проводится травление кремния [8, 9]. Но углерод, из которого состоит АП, образует летучие соединения с газами, применяемыми в плазмохимии травления полупроводников – водородом, кислородом, фтором. Однако достигнутые скорости травления в плазме настолько низки, что операция снятия нарушенного слоя длится много часов, что осложняет технологию. Для увеличения скорости травления алмаза необходимо пересмотреть основные технологии травления из-за сильных отличий свойств алмаза и кремния. Для алмаза будут существенными следующие изменения: повышение энергии ионов из-за генерации дефектов в кристалле, повышение температуры из-за увеличения скорости изотропного, ненаправленного, травления, а также необходимы дополнительные неравновесные воздействия на поверхность из-за облучения жесткими квантами [10]. Для алмаза, который является намного более стойким к любым видам радиации и химическим воздействиям, эти приемы должны привести к желаемому результату.

Для получения глубоких канавок с наименьшим углом отклонения от вертикальности стенок при плазмохимическом травлении возможно применение реакторов высокоплотной плазмы, в частности реакторов индуктивно-связанной плазмы (ICP) с использованием фторсодержащих газовых смесей $CF_4 + O_2$ либо $SF_6 + O_2$ [9]. Данная технология предполагает высокую скорость глубокого травления АП (рис. 2) и высокую селективность процесса по отношению к маскирующим слоям, вместе с этим, обеспечивая корреляцию режимов, достигается высокая анизотропия процесса травления. Зависимость скорости плазмохимического травления алмаза в сравнении со скоростью травления кремния приведена на рис. 3.

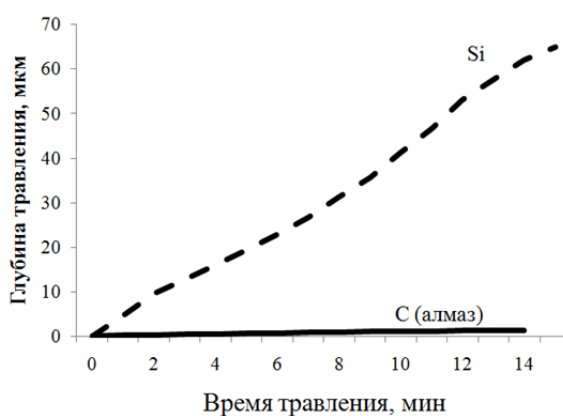


Рис. 3. Соотношение скоростей плазмохимического травления кремния и пленок поликристаллического алмаза

С другой стороны, сложной задачей является выбор маски для травления АП. Металлическую маску приходится применять, когда стойкости фоторезистивной маски или маски из другого материала недостаточно. Для достижения глубины травления АП в 1–2 мкм время «жизни» такой маски должно быть более 50 мин. Поэтому травление АП можно проводить при использовании медной маски. Применение металлической маски также облегчает процесс плазмохимического травления, так как при использовании обычных диэлектрических масок происходит зарядка поверхности, приводящая к появлению дефектов различного вида.

Существует ряд аспектов, которые влияют на скорость травления АП и на технологический процесс в целом:

1. Вытравливаемые канавки в микроэлектромеханических структурах находятся на расстоянии нескольких микрометров друг от друга, при этом важно не забыть, как данный аспект влияет на скорости травления структуры. Так, при травлении в АП канавки шириной 2–4 мкм

скорость составляет 0,3–0,5 мкм/мин, при увеличении канавки в несколько раз, скорость увеличилась на 0,04–0,07 мкм/мин [10].

2. На скорость травления АП будет влиять и аспектное отношение получаемого рельефа, так как реальная скорость травления будет снижаться по мере увеличения данного отношения. Так, если у кремния наблюдается аспектное отношение более двух, то средняя скорость травления будет уменьшаться по простой линейной зависимости: $R = 156 - A$, где R – средняя скорость травления, A – аспектное отношение (рис. 4). Учитывая, что средняя скорость травления алмаза более чем в 10 раз меньше, то и связь с аспектным отношением будет жестче [9].

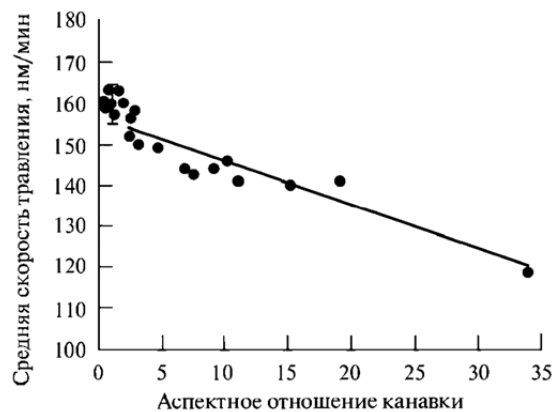


Рис. 4. Влияние аспектного отношения на среднюю скорость травления канавок кремния при давлении 5 Па

3. Помимо аспектного отношения на скорость травления влияет еще и давление (рис. 5), которое изменяет направление попадания активных «травящих» частиц и баланс между реакциями травления и осаждения в процессе травления микрорельефа. Это объясняется тем, что понижение давления приводит к увеличению средней энергии электронов и энергии падающих на подвергаемую травлению поверхность. Однако баланс давления очень важен; повышенное давление негативно влияет на микроструктуры и гребенки, получаемые травлением микрорельефа, разрушая их. Низкое давление повышает скорость травления, из-за чего образуются дефекты на поверхности пластины и стенках структуры, а при совсем низких давлениях плазма перестает зажигаться и процесс плазмохимического травления прекращается.

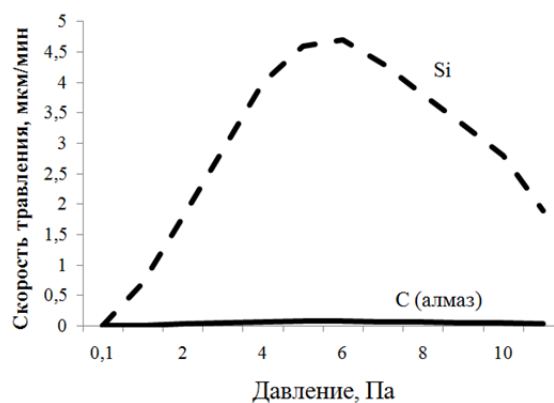


Рис. 5. Влияние давления в камере на скорость травления кремния и алмаза

4. Особое влияние оказывает расстояние между зоной генерации плазмы и пластиной. Эмпирическим путем было выявлено, что на расстоянии более чем 20 см травление алмаза прекращалось, для кремния данное расстояние превышало 25 см. Однако при увеличении процентного содержания в смеси газов кислорода данное расстояние становится незначительным. Так, увеличение процентного содержания кислорода в рабочем газе повышает скорость

травления пленки, однако локальный минимум скорости травления наблюдался при 90 % содержании O_2 в смеси, как видно из рис. 6 [11].

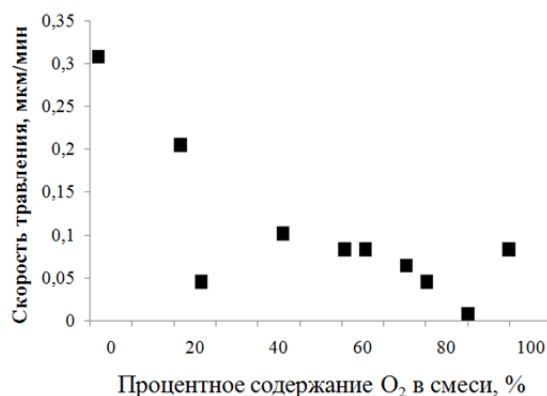


Рис. 6. Зависимость скорости травления алмаза в плазме $O_2 + SF_6$ от процентного содержания O_2 в смеси

Экспериментальные исследования показывают, что в случае повышения температуры травления пластина из кремния играет роль эффективного теплоотвода. Для этого образец выращенной алмазной пластины приклеивается к кремниевой пластине с помощью вакуумной смазки. Данная конструкция помещалась в камеру высокоплотной плазмы. Скорость травления определялась из измерений оптическим профилометром по величине ступеньки травления, протравленной за определенное время. Таким образом, при проведении травления в среднем в течение 12–15 мин в смеси газов в соотношении $Ar:O_2:SF_6:10:20:2$ см³/м при мощности источника порядка 0,8–1 кВт в присутствии стандартной частоты ИСР-источника $f = 13,56$ МГц и при среднем давлении 2–10 Па, вертикальность стенок достигала 80°, что приемлемо для получения резистивной структуры на основе поликристаллического алмаза [9, 12].

Проведенные исследования показывают, что современные технологии, использующие поликристаллический алмаз, позволяют создавать микрорельефы с различными формами и геометрическими размерами. В этой связи применение поликристаллического алмаза является перспективным технологическим решением для создания на их основе микроэлектронных датчиков давления для особо жестких условий эксплуатации по сравнению с использованием известных структур (ЧЭ на основе КНД-структуры, ЧЭ на основе SiC).

Библиографический список

1. Мокров, Е. А. Разработка высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / Е. А. Мокров, И. Н. Баринов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 1. – С. 23–27.
2. Баринов, И. Н. Особенности применения и разработки микроэлектронных датчиков давления на основе поликристаллического алмаза для работы в особо жестких условиях эксплуатации / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы. – 2013. – № 9. – С. 12–19.
3. Баринов, И. Н. Высокотемпературные полупроводниковые датчики давления с повышенной временной стабильностью / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – № 8. – С. 51–55.
4. Абдуллин, Ф. А. Технологические особенности формирования кремниевых пьезорезистивных акселерометров с расширенным температурным диапазоном измерений / Ф. А. Абдуллин, В. Е. Пауткин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 118–123.
5. Ральченко, В. CVD-алмазы. Применение в электронике / В. Ральченко, В. Конов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2007. – № 4. – С. 58–67.
6. Вопросы создания высокотемпературных датчиков физических величин. Материалы. Конструкции. Технологии / П. Г. Михайлов, Е. А. Мокров, В. В. Скотников, Д. А. Тютюников, В. А. Петрин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 4 (6). – С. 61–70.
7. CVD Diamond for Electronic Devices and Sensors / ed. by Ricardo S. Sussmann. – Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., 2009.

8. Галперин, В. А. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях : учеб. пособие / В. А. Галперин, Е. В. Данилкин, А. И. Мочалов ; под ред. С. П. Тимошенкова. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 283 с.
9. Tran, D. T. Microwave plasma-assisted etching of diamond / D. T. Tran, T. A. Grotjohn, D. K. Reinhard, J. Asmussen // *Diamond & Related Materials*. – 2008. – Issues 4-5. – С. 717–721.
10. Технология СБИС : в 2 кн. : пер. с англ. / под ред. С. Зи. – М. : Мир, 1986. – Кн. 2. – 453 с.
11. Амиров, И. И. Плазмохимическое травление природного алмаза / И. И. Амиров, А. Н. Магунов // *Intermatic-2010* : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., 23 – 27 ноября 2010 г. – М., 2010. – Ч. 2. – С. 228–231.
12. Sandru, G. S. Reactive ion etching of diamond / G. S. Sandru, W. K. Chu // *Appl. Phys. Lett.* 1989. – Vol. 55, № 5. – P. 437–439.

Крайнова Ксения Юрьевна

магистрант, инженер-технолог,
 Научно-исследовательский институт
 физических измерений
 (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
 E-mail: ksenya.kraynova.94@mail.ru

Kraynova Kseniya Yur'evna

graduate student, process engineer,
 Scientific-research Institute
 of physical measurements
 (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 621.3.032

Крайнова, К. Ю.

Технология изготовления полупроводникового чувствительного элемента датчика давления на основе поликристаллического алмаза / К. Ю. Крайнова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 90–96. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-13.