

06;12

## Использование тонких алмазных пленок для формирования интегральных схем

© В.К. Белый, В.П. Варнин, С.А. Гаврилов, Э.А. Ильичев,  
Э.А. Полторацкий, Г.С. Рычков, И.Г. Теремецкая

Федеральное государственное унитарное предприятие  
„Научно-исследовательский институт физических проблем  
им. Ф.В. Лукина“, Москва  
Институт физической химии, Москва  
E-mail: polt@niifp.ru

Поступило в Редакцию 16 декабря 2002 г.

Рассмотрена технология, позволяющая на основе поликристаллических алмазных пленок создавать интегральные эмиссионные элементы типа вакуумных триодов. Технология включает три основных момента. Создание на поверхности кремниевой подложки тонкой алмазной пленки, проведение на основе алюминиевой маски литографии по этой пленке и, наконец, доразращивание пленки в таком режиме, который обеспечивает ее эмиссионные свойства. Приводится конструкция эмиссионного триода, который может быть реализован на основе предлагаемой технологии.

Алмазные поликристаллические и нанокристаллические пленки [1,2], осаждаемые из газовой фазы, представляют значительный интерес для их применения в микро- и нанoeлектронике. Здесь надо отметить уникальные свойства этих пленок, дающих возможность получать высокие значения вторичной и полевой эмиссии электронов. Эти свойства позволяют вновь вернуться к использованию принципов вакуумной электроники на уровне микро- и нанoeлектроники, для чего необходимо научиться формировать локальные эмитирующие области микро- и наноразмеров. Настоящая работа и посвящена решению этой проблемы.

Задача решается посредством выращивания из активируемой газовой фазы тонких поликристаллических алмазных пленок на поверхности кремниевых подложек, проведения литографии по алмазным пленкам и последующего осаждения на определенных участках этой пленки слоев легированной алмазной или алмазоподобной пленки, обеспечивающих эффективную полевую эмиссию электронов.

Поликристаллические алмазные пленки выращивались методом горячей нити, в котором активация газовой фазы и получение высокой концентрации атомарного водорода достигается за счет нагрева газовой смеси до температур около  $2000^{\circ}\text{C}$ . В наших экспериментах активатор состоял из шести параллельно натянутых вольфрамовых проволочек. Проволочки отстояли друг от друга на расстоянии 3 мм и были натянуты горизонтально на высоте примерно 9 мм над молибденовым столиком, на котором и располагались кремниевые подложки. Температура вольфрамового активатора контролировалась с помощью оптического микропирометра и составляла около  $2050^{\circ}\text{C}$  при измерении на длине волны  $\lambda = 650 \text{ nm}$ .

В столике имелся вертикальный канал диаметром около 1 мм, используя который, контролировали температуру кремниевой подложки, измеряя с помощью оптического пирометра температуру ее нижней стороны, составляющую примерно  $850^{\circ}\text{C}$ .

Осаждение алмаза велось из смеси метана и/или ацетона с водородом при содержании углерода в смеси, равном около 1%. Общее давление газовой фазы составляло  $4 \cdot 10^3 \text{ Pa}$  при расходе водорода около 6 нормальных литров в час. Состав смеси задавали, устанавливая нужное соотношение массовых скоростей протока метана и водорода через реактор. Для осаждения легированных алмазных пленок и введения в газовую фазу бора в испаряемый ацетон добавляли раствор триметилбората в метиловом спирте.

Для получения сплошных алмазных пленок субмикронной толщины кремниевые подложки перед опытом засеивались ультрадисперсным алмазным порошком, в котором средний размер частиц составлял 5–10 нм. Средняя толщина осажденного слоя оценивалась по изменению массы подложек до и после опыта, определяемой с погрешностью примерно  $10 \mu\text{g}$ .

После образования на кремниевой подложке алмазной пленки, на ее поверхность с помощью прямой либо взрывной литографии наносилась алюминиевая маска толщиной  $0.1 \mu\text{m}$ . Травление алмазных пленок проводилось плазмой на установке реактивно-ионного травления 08 ПХТ-100Т-005. В связи с тем что основным реагентом для травления алмазных и алмазоподобных пленок является кислород, образующий с углеродом летучие соединения, в качестве маскирующего материала был выбран алюминий, на поверхности которого в кислородной среде образуется устойчивая пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

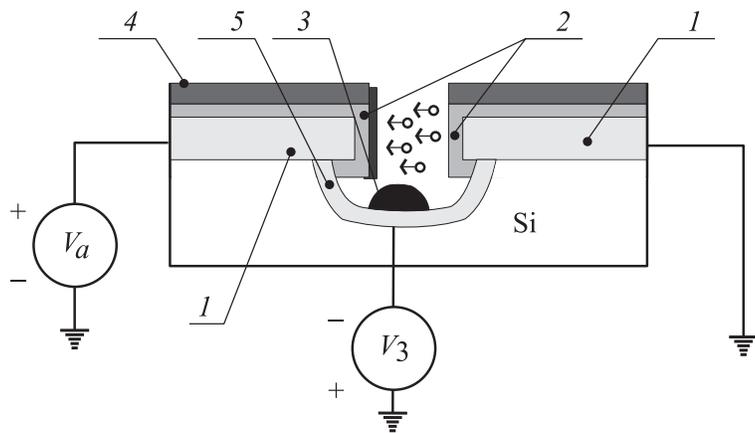


Рис. 1.

Пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  хорошо защищает поверхность алюминия также и при добавлении в кислородную плазму фторосодержащих хладонов для увеличения скорости травления алмазных пленок.

Травление алмазных пленок проводилось в среде  $\text{O}_2 + \text{CF}_4$  (порядка 10%). Мощность разряда 1.0 kW, частота 5.28 MHz, рабочее давление 3–5 Pa. Скорость травления при указанных режимах составляла 0.05–0.07  $\mu\text{m}/\text{min}$ . Низкие значения скорости травления обусловлены невысокой плотностью разряда, определяемой большой площадью электрода подложкодержателя.

В процессе травления алмазной пленки возникает необходимость протравить и кремний, окислить его поверхность или нанести диэлектрический слой. Это нужно для электрической изоляции кремния от формируемых металлических проводников. После формирования разводки производится доращивание алмазной пленки в таком режиме, который обеспечивает хорошую полевую эмиссию электронов [3–5].

На рис. 1 показана структура микровакуумного транзистора, который можно сформировать на основе предложенной технологии.

Транзистор состоит из двух локальных нелегированных областей алмазной пленки 1, расположенных на поверхности кремния. Свободная поверхность этих областей покрыта легированной бором алмазной

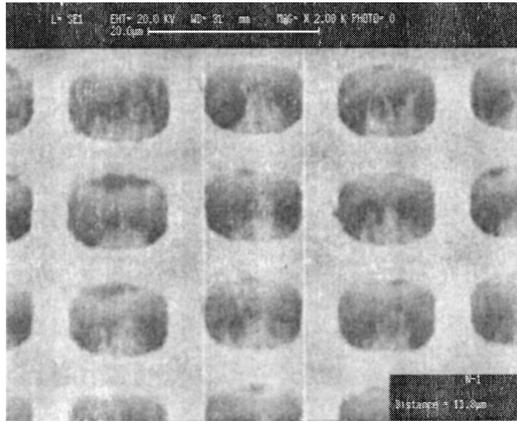


Рис. 2.

пленкой 2, имеющей хорошую полевую эмиссию. Локальные области разделены зазором, под которым находится затвор 3, сформированный косым напылением металла 4. При таком напылении торец у одной локальной области остается не запыленным металлом. Эта область является эмиттером для электронов, т.е. она может инжектировать электроны с торца. Другая локальная область служит анодом, который собирает электроны, инжектированные при приложении к аноду напряжения  $V_a$ . Затвор расположен в углублении под зазором на диэлектрике 5. При субмикронной величине зазора эффективная эмиссия электронов возникает уже при  $V_a \sim (1-10)$  В. Для управления потоком инжектированных электронов на затвор 3 следует подавать отрицательное напряжение  $V_3$ .

Предлагаемая технология была опробована при изготовлении пористых алмазных мембран для усилителей двумерного электронного потока. Для этого из тонкой алмазной пленки  $i$ -типа сначала формировалась сетка (рис. 2), которая впоследствии дорацивалась алмазной пленкой  $p$ -типа. При этом проводящая пленка покрывала и торец нелегированной алмазной пленки. Таким образом, экспериментально реализованы все необходимые технологические операции для создания микроэлектронных вакуумных интегральных схем.

## Список литературы

- [1] *Варнин В.П., Дерягин Б.В., Федосеев Д.В.* и др. // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. В. 4 (10). С. 1250.
- [2] *Варнин В.П., Дерягин Б.В., Федосеев Д.В.* и др. // Кристаллография. 1977. Т. 22. В. 4. С. 893–896.
- [3] *Yamada T., Sawabe A., Roizumi S.* et al. // Phys. Stat. Sol. (a). 2001. N 2. P. 257.
- [4] *Krauss A.R., Auciello J., Ding M.Q.* et al. // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. N 5. P. 2958.
- [5] *Karabutov A.V., Khmelnsky R.A., Negodaev M.A.* et al. // Diamond and related Materials. 2001. V. 10. P. 2178.