

TiNi-сталь зарегистрирован кривой излом в верхней части поля сканирования, что явно коррелирует с внешним видом при визуальном осмотре образца. Дальнейшие исследования требуют проведения верификации, тестовых испытаний и анализа полученных результатов.

1. Волкенштейн С.С., Хмыль А.А. Неразрушающие методы контроля качества монтажа полупроводниковых кристаллов в корпуса ИМС. Технологии в электронной промышленности, №2, 2011 г., с. 18-22
2. Волкенштейн С.С., Турцевич А.С., Соловьёв Я.А., Керенцев А.Ф., Хмыль А.А. Формирование и контроль системы металлизации Mo-Ni-Au на бериллиевой керамике. V Международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2012», Минск, Беларусь, 2012 г. с. 256-258

3. Schlobmacher P., Haas T., Schubler A. Laser-welding of a Ni-rich NiTi shape memory alloy // SMST-97: Proceedings Conference, California, 2-6 March 1997 / Ed. by A.Pelton.- Asilomar, California, 1997.- P. 137-142.
4. Schubler A. Micro-machining and joining of NiTi-alloys using Nd:YAG lasers // SMST-97: Proceedings Conference, California, 2-6 March 1997 / Ed. by A.Pelton.- Asilomar, California, 1997.- P. 143-148.
5. Рубаник В.В., Клубович В.В., Рубаник В.В.мл., Петров И.В., Рубаник О.Е. Получение трехслойных соединений сталь-Ti-Ni сваркой взрывом // Актуальные проблемы прочности. XLVI Международная конф. Тез. докл. Витебск, 15-17 октября 2007 г. – С.330-331.

УДК 621.315

ТЕХНОЛОГИЯ ЛЕГИРОВАНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР С ГЛУБОКИМИ МНОГОЗАРЯДНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Формирование приборных структур многофункциональных датчиков (МФД) на основе собственных полупроводников с глубокими многозарядными примесями возможно и традиционными методами, широко используемыми при формировании активных слоев с высокой концентрацией примеси. Однако процессы формирования активных слоев МФД на основе собственных полупроводников отличаются специфическими требованиями и для них желательно использовать ряд технологических операций, оптимизированных для формирования слоев с высокой чистотой примесного состава при низкой концентрации примеси.

Электронные свойства приборных структур, формируемых в собственных полупроводниках, в значительной степени зависят от метода их получения. Так, например, свойства активных слоев ряда МФД на основе собственных полупроводников формируются низкими концентрациями глубоких примесей с несколькими зарядовыми состояниями, но в той же области энергий образуются локализованные состояния, связанные с вводимыми при технологической обработке дефектами. Различные технологические операции характеризуются и различным составом, и концентрацией сопутствующих дефектов.

В отличие от традиционных, газоразрядный метод легирования, использующий в качестве материала электродов примесные элементы, позволяет получить легирующие примеси непосред-

ственно в установке диффузии или эпитаксиального наращивания. В качестве газа, в котором формируется разряд, используют инертные газы, которые не являются легирующими примесями, в качестве источника легирующих примесей используют сильнолегированный электрод в форме пластины (электрода-мишени). Легирующий элемент появляется в газовой среде за счет катодного распыления электрода-мишени при ионной бомбардировке. В дальнейшем ионы легирующего элемента ионизируются и внедряются в пластину.

Этот метод обеспечивает высокую чистоту процесса. Степень легирования легко управлять электрическими параметрами газового разряда и тем самым можно получать заданные распределения примесей в процессе эпитаксиального наращивания. Собственно, газоразрядный метод легирования обычно использует искровой или тлеющий разряды, часто при атмосферном давлении. Кроме того, плазма может быть возбуждена и с помощью лазерного излучения. Получение легирующей примеси непосредственно в процессе легирования позволяет избавиться от применения высокотоксичных соединений, которые к тому же являются нестабильными, например, диборан как соединение устойчив не более 2-х месяцев. Все это приводит к неконтролируемому легированию при использовании смесей.

Газоразрядные методы легирования лишены недостатков методов жидкостного легирования, индивидуальных легирующих соединений в потоке транспортирующего газа, газовых смесей. К преимуществам газоразрядных методов легирования относятся: возможность внедрения ряда элементов при отсутствии токсичных газов, более точный контроль условий легирования и меньшая степень загрязнения формируемых слоев.

Газоразрядный метод легирования позволяет получить легирующие примеси из материала электродов непосредственно в технологической установке. Этот метод при использовании электродов из примесных элементов обеспечивает высокую чистоту процесса. Степень легирования легко управлять электрическими параметрами газового разряда. Если электроды выполнены из различных материалов, то смена полярности разряда приведет и к смене вводимой в полупроводник примеси. При этом возможно формирование слоев с чередующимся типом проводимости.

Конструктивно основу технологической установки составляет диодная система, образованная сильнолегированным электродом-источником примеси, и размещенная в технологическом реакторе со средствами прокачки и напуска газов.

Наиболее просто реализуется искровой газовый разряд, он характеризуется большей интенсивностью процесса внедрения примеси, но он хуже управляем и не позволяет достичь тех же значений качества, которые реализуются в тлеющем разряде. Искровой метод легирования эпитаксиальных структур обладает рядом существенных недостатков: 1) применение искрового разряда для газоразрядного легирования приводит к заметному увеличению числа дефектов упаковки за счет образования аэрозолей; 2) управлять током искрового разряда с необходимой степенью точности невозможно; 3) в случае искрового разряда происходит значительное разрушение поверхности электродов, что приводит к изменению геометрии газоразрядного промежутка, а это, в свою очередь, вызывает изменение тока газового разряда, что обуславливает неконтролируемое легирование. Указанные недостатки могут быть исключены, если для осуществления газоразрядного легирования эпитаксиальных структур использовать тлеющий разряд. Поэтому в технологических установках необходим постоянный контроль процесса газового разряда для предотвращения перехода тлеющего разряда в искровой. В газоразрядных методах легирования фактором, ограничивающим применимость того или иного материала для легирования, является не его давление паров, как в традиционных методах, а электрическая про-

водимость электрода, который и является источником внедряемой примеси. Но и это ограничение снимается при возбуждении плазмы в области мишени-электрода с помощью лазерного излучения. Физические процессы, связанные с поглощением лазерного излучения в твердых телах, существенно разнятся для диэлектриков (прозрачные материалы) и металлов (сильно поглощающие материалы) только при сравнительно небольших плотностях мощности оптического излучения. С возрастанием плотности потока излучения диэлектрик также становится непрозрачным, и наблюдающиеся явления становятся близкими по своей физической природе. При некоторой пороговой плотности потока лазерного излучения поглощенная энергия превышает энергию связи атомов в веществе и энергию ионизации, в результате чего слой облучаемого вещества превращается в плазму. Сильно ионизированная плазма эффективно поглощает лазерное излучение, что приводит к ее значительному разогреву. Из-за большого градиента давления вещество выбрасывается с облученной поверхности мишени. При этом не важно, какими свойствами, диэлектрическими или металлическими, обладает мишень. Характерное время развития лавинной ионизации слабо зависит от начальной и конечной концентрации электронов и составляет около 10^{-10} с, что значительно меньше длительности импульсов технологических лазеров, например, длительности импульса лазера в режиме модулированной добротности (около 10^{-8} с). Это означает, что степень ионизации лазерной плазмы, образующейся при воздействии лазерного излучения с плотностью потока более 10^9 Вт/см², практически равна 100 %.

При использовании тлеющего разряда в газоразрядном легировании тлеющий разряд возбуждается в потоке водорода. В процессе развития разряда происходит изменение температуры и плотности газа, и, связанное с этим, перемещение зон ионизации. Характер разряда зависит от скорости газового потока. При увеличении скорости потока выше некоторого критического значения, разряд скачкообразно переходит в диффузную форму, характеризующуюся высокой степенью однородности. Критическая скорость потока газа увеличивается с ростом тока разряда. Однородность и воспроизводимость параметров формируемых слоев существенно выше при диффузной форме тлеющего газового разряда, поэтому важно поддерживать скорость прокачки газа выше критического значения. Уровень легирования слабо зависит от межэлектродного промежутка, и определяется в основном током разряда. Изменяя ток разряда можно управлять скоростью внедрения легирующей примеси в широких пределах, до нескольких десятков раз.

Газоразрядные методы легирования, включая лазерный метод возбуждения плазмы на поверхности мишени, отличаются тем, что легирующее соединение синтезируется в плазме тлеющего разряда между электродами, содержащими материал требуемой примеси. Это позволяет проводить контролируемое легирование полупроводниковых структур, расширяет диапазон концентрации вводимых примесей, дает возможность получать эпитаксиальные слои с количеством дефектов упаковки на несколько порядков меньше, чем это возможно в случае искрового метода, улучшает качество эпитаксиальных структур, позволяет создавать многослойные полупроводниковые структуры с заданным градиентом концентрации по глубине каждого слоя, поддается автоматизации. Исходя из требований, предъявляемых к структурам многофункциональных датчиков на основе собственных полупроводников (германия и кремния) с глубокими

многозарядными примесями (*Cu, Pt, Au, Ni, Fe, Se, S*), которые должны содержать минимально возможное количество структурных дефектов, низки требуемым уровнем легирования, можно сделать вывод, что газоразрядные методы легирования с лазерной инициализацией плазмы, хотя и не являются единственно пригодными, но желательными технологическими методами формирования активных слоев МФД.

5. Газоразрядные технологии легирования позволяют исключить из технологического процесса такие высокотоксичные химические соединения, как арсин, фосфин, диборан. Отказ от гидридов и галогенидов легирующих элементов позволяет проводить процесс плазменного легирования без специальных мер безопасности, убрать из процесса дорогостоящие высокочистые токсичные, пожаро- и взрывоопасные газы, упростить техпроцесс и снизить затраты.

УДК 544.22+544.08

ДАТЧИКИ ДИОКСИДА АЗОТА НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИИ WO_3 - In_2O_3

Гайдук Ю.С.¹, Реутская О.Г.², Савицкий А.А.¹, Таратын И.А.³

¹Белорусский государственный университет

²Белорусский национальный технический университет

³ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»,
Минск, Республика Беларусь

Полупроводниковые резистивные датчики на основе SnO_2 , In_2O_3 , WO_3 , ZnO и др. оксидов широко применяются для обнаружения и определения концентрации различных газов. В работе [1] исследовалось влияние добавки In_2O_3 в количестве 1,5, 3,0 и 5,0 % мас. на газочувствительные свойства WO_3 . Соответствующие композиции были получены твердофазным высокотемпературным синтезом из коммерчески доступных WO_3 и $InCl_3$. В интервале температур 100 – 200 °С датчики были селективны к NO_2 , при этом наибольшей чувствительностью к 4 ppm NO_2 в воздухе, превышающей 170 %, обладал состав, содержащий 3 % мас. In_2O_3 [1, рис. 2]. Целью нашей работы стало изучение структурных и газочувствительных свойств композиции оксидов вольфрама (WO_3) и индия (In_2O_3), полученных золь-гель методом. Золь-гель метод позволяет получать наноразмерные материалы с высокой однородностью и развитой удельной поверхностью, что особенно важно для оксидных газочувствительных материалов.

Методика эксперимента. Гель вольфрамовой кислоты получен из 1,23М р-ра вольфрамата натрия и 12М р-ра азотной кислоты. $Na_2WO_4 \times 2H_2O$ по каплям добавляли к раствору HNO_3 . При термическом разложении геля образуется нанокристаллический триоксид вольфрама.

Оксид индия In_2O_3 получали осаждением 9,24М р-ром аммиака гидроксида индия из 0,78 М р-ра $In(NO_3)_3 \times 4,5H_2O$. Отжиг высушенного при комнатной температуре ксерогеля в интервале 200 – 800 °С приводил к получению нанокристаллического In_2O_3 . Полученные золи смешивались в необходимых пропорциях для получения пористых газочувствительных наноконструкций, содержащих 3, 25, 50, 95, 99 % In_2O_3 .

С целью изучения газочувствительных свойств исследованных композиций были изготовлены двухэлектродные датчики (Рис. 1).

Газовые датчики были изготовлены по стандартной технологии следующим образом: на кремниевую пластину осаждалась методом магнетронного распыления платина. Затем производились процессы фотолитографии, ионно-лучевого травления платины с целью формирования нагревателей и электродов. Затем производили травление подложки для разделения на кристаллы 1,3 × 1,3 мм с одновременным формированием в них мембраны и сквозных участков, разварку в корпус платиновой проволоки диаметром 20–35 мкм, нанесение чувствительных слоев, приклеивание газопроницаемого колпака с сеткой из нержавеющей стали. Чувствительные слои после нанесения отжигали при 450–600 °С в течение 72 ч.