

УДК 621.382

Применение воздействия ионных пучков на структуры "пленка—подложка" в технологии полупроводниковых приборов и интегральных схем

А. Г. Шауцуков

Работа посвящена применению воздействия ионных пучков на структуры "пленка—подложка" для усовершенствования технологии формирования активных структур кристаллов мощных высоковольтных транзисторов, лавинно-пролетных диодов, систем металлизации ряда изделий полупроводниковой электроники.

PACS: 85.30.-z

Ключевые слова: ионный пучок, технология, полупроводниковая электроника.

Введение

При воздействии ионных пучков на структуры "пленка—подложка" в поверхностные слои подложки вводится одновременно контролируемое количество бомбардирующих ионов и атомов пленки (атомов отдачи). В этом смысле легирование подложки атомами отдачи и бомбардирующими ионами при воздействии ионных пучков на структуры "пленка—подложка" подобна обычному ионному легированию. Однако возможности такого легирования значительно шире, чем обычного ионного легирования.

В процессе воздействия пучков ионов на структуры "пленка—подложка" в приповерхностных слоях подложки одновременно образуются наноразмерный слой (толщиной несколько десятков ангстрем), легированный атомами пленки, и микроразмерный слой (толщиной несколько сотен ангстрем), легированный бомбардирующими ионами [1, 2].

Вместе с тем возможности процессов имплантации через пленки, легирования атомами отдачи значительно шире задач, связанных с формированием микро- и наноразмерных легированных слоев. Эти процессы легирования могут быть также использованы для совершенствования технологии ряда полупроводниковых приборов с уникальным распределением легирующих примесей в активных структурах, направленного изменения физико-химических свойств поверхности твердых тел и их межфазного взаимодействия.

В работе рассматриваются возможности использования процессов легирования атомами отдачи, имплантации ионов через пленки для совершенствования технологии мощных высоковольтных транзисторов, лавинно-пролетных диодов, систем металлизации ряда полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Применение процессов легирования атомами отдачи и имплантации через пленки в технологии формирования систем металлизации

Системы металлизации полупроводниковых приборов и интегральных схем должны удовлетворять целому комплексу электрических и металлургических требований. Электрические требования включают низкое сопротивление контактов и проводящих дорожек. Основными металлургическими требованиями являются: хорошая адгезия металлических слоев между собой и подложками (диэлектрическими, полупроводниковыми); физико-химическая стабильность контактных систем. Обеспечить сочетание этих свойств трудно. Существующая в настоящее время технология формирования ряда перспективных систем металлизации на основе золота и меди не обеспечивает их достаточную надежность из-за плохой адгезии пленок золота и меди к диэлектрическим и металлическим подложкам.

В работе [3] было показано, что адгезия металлических пленок к окислам и диэлектрическим подложкам на их основе определяется: разницей химического сродства к кислороду металла пленки (Me') и металла окисла подложки (Me''); интенсивностью протекания на границе раздела обменной реакции типа $Me' + Me'' \rightleftharpoons Me'OMe''$. В результате реакции кислород может переходить в металл либо образуя слой промежуточного окисла, либо растворяясь в нем. В обоих случаях имеет

Шауцуков Александр Ганибалович, доцент.
Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х. М. Бербекова.
Россия, 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.
Тел. 8 (8662) 77-18-88.

Статья поступила в редакцию 22 апреля 2010 г.

© Шауцуков А. Г., 2010

место контакт образовавшегося металлоокислородного сплава и поверхности диэлектрической подложки. Таким образом, сила сцепления металлической пленки и диэлектрической подложки определяется образованием переходного слоя. Механизм образования переходного слоя может быть различным. Он зависит как от природы компонентов, так и от условий получения анализируемой системы.

Плохую адгезию пленок меди и золота к диэлектрическим подложкам следует связывать с тем, что для меди переходный слой образуется не полностью в процессе ее нанесения, а для золота, имеющего наименьшее сродство к кислороду, переходный слой не образуется вообще и адгезия определяется силами Ван-дер-Ваальса.

В работе [4] было показано, что воздействие ионных пучков (Ag, P) на структуры "пленка (Mo, Cu, Au)—подложка (SiO₂, поликор, ситалл)" способствует увеличению силы адгезии металлических пленок к диэлектрическим подложкам. При этом влияние воздействия тем сильнее, чем больше сродство металла к кислороду. Для пленок молибдена переходный слой, соответствующий максимальной адгезии, образуется уже в процессе бомбардировки ионами (фосфор—аргон) на уровне доз $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Для систем "пленка (Au, Cu)—подложка (поликор, ситалл, SiO₂)" такое воздействие ионных пучков не приводит к значительному увеличению адгезии. Однако для этих систем после воздействия ионных пучков и последующего отжига сила адгезии пленок золота, меди к диэлектрическим подложкам увеличивается в несколько раз. При этом в системах, не подвергнутых воздействию ионных пучков, значительного увеличения силы адгезии не наблюдается и после отжигов.

В ряде специальных кремниевых приборах, таких как мощные СВЧ-транзисторы, лавинно-пролетные диоды наиболее перспективны для металлизации система "золото—молибден". Однако широкое применение этой системы затруднено из-за плохой адгезии пленок золота, осажденных на пленку молибдена, предварительно нанесенную на кремниевую подложку.

Такое контактное поведение пленок золота по отношению к пленке молибдена связано с тем, что в процессе формирования этой контактной системы невозможно обеспечить контакт ювенильных поверхностей этих пленок. Адгезия в этих системах определяется адгезией золота к окислам молибдена. Адгезию между слоями этой системы можно увеличить путем образования переходного слоя за счет вовлечения во взаимодействие более

глубоких слоев металлов [3]. Весьма перспективно для улучшения адгезии между слоями этой системы металлизации использование воздействия ионных пучков на системы "пленка—подложка". При воздействии ионных пучков на контактную систему "золото—молибден" в приповерхностные слои молибдена, содержащие окислы, внедряются атомы золота и бомбардирующие ионы, стимулируя взаимное проникновение золота и молибдена через окисленный слой молибдена и образование твердого раствора молибдена в золоте. В результате образуется переходный слой, способствующий увеличению силы адгезии между слоями системы в десятки раз [4].

В процессе бомбардировки контактной системы "золото—молибден"—(*n*-кремний) ионами фосфора в целях улучшения адгезии пленки золота к пленке молибдена часть бомбардирующих ионов может, пройдя слой золота и молибдена, достичь поверхности кремния и тем самым привести к уменьшению удельного переходного сопротивления контакта. В работе [5] было показано, что после воздействия на структуру "пленка золота (300 Å)—пленка молибдена (1000 Å)—кремниевая подложка" ионов фосфора для улучшения адгезии между слоями системы и отжига при 600 °С, удельное переходное сопротивление уменьшается в 2—3 раза. При этом барьерные свойства пленки молибдена по отношению к диффузии золота через молибден в кремний не ухудшаются.

Применение процессов легирования атомами отдачи и бомбардирующими ионами при воздействии ионных пучков на структуры "пленка—подложка" в технологии мощных высоковольтных транзисторов и лавинно-пролетных диодов

В технологии изготовления мощных высоковольтных транзисторов для формирования базовых областей с большой концентрацией *p*-примеси вблизи эмиттера и малым градиентом распределения примеси у коллекторного перехода используется метод двойной односторонней диффузии двух различных *p*-примесей алюминия и бора. Сначала внедряют примеси с высоким коэффициентом диффузии и малой растворимостью в кремнии, а затем примеси с относительно низким коэффициентом диффузии и высокой растворимостью в кремнии [6].

Однако этот способ обладает недостатками, присущими термической диффузии вообще и, в частности, диффузии из твердых источников (достаточно большой разброс параметров диффузии

по пластине и от процесса к процессу). Кроме того, ввиду высокой химической активности алюминия при используемых температурах к процессу диффузии алюминия предъявляются дополнительные высокие требования по инертности среды и чистоты оснастки.

Можно формировать базовые области, используя диффузию галлия [7]. Однако этот процесс более длительный, чем рассмотренный выше, и ему также присущи недостатки процесса термической диффузии. Устранить эти недостатки можно, если использовать для формирования базовых областей последовательную имплантацию алюминия и бора. Однако установки ионного легирования, используемые в производстве, не позволяют формировать пучки ионов алюминия.

В работах [8, 9] был разработан способ формирования базовых областей мощных высоковольтных транзисторов, предусматривающий:

нанесение на кремниевую подложку пленки алюминия;

бомбардировку системы "пленка алюминия—кремниевая подложка" ионами бора для одновременного легирования подложки атомами пленки и бомбардирующими ионами;

термическую разгонку внедренных атомов.

Применение этого способа в мезапланарной технологии мощных высоковольтных транзисторов позволяет исключить из технологического маршрута нетехнологичный процесс диффузии алюминия и снизить разброс значений параметров транзистора по пластине и от партии к партии.

Следует отметить, что мезапланарная технология изготовления мощных высоковольтных транзисторов, собранных по схеме Дарлингтона, обладает рядом недостатков, которые снижают процент выхода годных и надежность таких транзисторов.

В работе [10] была разработана планарная технология изготовления составных мощных высоковольтных транзисторов, включающая: выращивание на кремниевой подложке первого слоя SiO_2 ; вскрытие в первом слое SiO_2 областей резисторов; выращивание второго слоя SiO_2 ; вскрытие базовых областей и делительных колец; нанесение пленки алюминия; бомбардировку полученных структур ионами бора (для внедрения бомбардирующих ионов бора в маскирующую пленку SiO_2 , области резисторов и делительные кольца, и одновременного легирования базовых областей атомами алюминия и бомбардирующими ионами бора); термическую разгонку внедренных примесей.

Реализация разработанной технологии позволяет одновременно формировать базовые области,

резисторы, делительные кольца. При этом за счет образования алюмоборосиликатной маскирующей пленки улучшаются ее маскирующие свойства [11], подлегируются приповерхностные коллекторные области. Таким образом, применение процесса воздействия ионных пучков на структуры "пленка—подложка" в технологии планарных мощных высоковольтных транзисторов позволяет увеличить их надежность, повысить эффективность контроля электрических параметров, уменьшить расход контрольных пластин, снизить разброс значений параметров прибора внутри партии и от партии к партии, повысить пробивные напряжения коллекторных переходов, упростить сборочный цикл.

В настоящее время перспективным источником СВЧ-энергии в миллиметровом диапазоне длин волн является генератор на лавинно-пролетных пролетных диодах (ЛПД). Одним из перспективных направлений увеличения выходной мощности и КПД этих диодов является реализация двухпролетной структуры ЛПД, особенно со ступенчатым профилем легирования. Преимуществом двухпролетного ЛПД со ступенчатым профилем легирования является меньшая ширина области умножения. Это обуславливает меньший разброс носителей по энергиям, а значит больший КПД и большую выходную мощность. Однако серийное производство таких приборов сдерживается из-за значительных технологических трудностей, связанных с реализацией конструктивных параметров активной структуры таких ЛПД.

Параметры активных структур кристаллов двухпролетных ЛПД миллиметрового диапазона длин волн исключают возможность использования для их формирования процессов термической диффузии. Для формирования активных структур кристаллов этих ЛПД можно использовать процессы газовой эпитаксии, молекулярно-лучевой эпитаксии, ионного легирования. Однако возможности использования этих процессов в технологии ЛПД ограничены. В настоящее время с использованием метода газовой эпитаксии можно создавать эпитаксиальные слои с точностью по толщине и концентрации, равной $\pm 20\%$. Кроме того, при формировании эпитаксиальных структур этим методом образуются переходные слои (15, 30 % от толщины слоя).

Большими возможностями при создании кремниевых эпитаксиальных структур для ЛПД обладает процесс молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Однако низкая производительность и дороговизна оборудования для молекулярно-лучевой эпитаксии сдерживает широкое применение МЛЭ

в производстве ЛПД. Возможности использования процессов ионного легирования в производстве ЛПД также ограничены. Установки ионного легирования не позволяют создавать ионные пучки с малыми (< 10 кэВ) и большими (> 150 кэВ) энергиями.

В работах [12, 13] было предложено получать двухпролетные структуры кремниевых ЛПД с использованием эпитаксиального наращивания в реакторе пониженного давления, многократного ионного легирования, имплантации легирующей примеси через пленки, фотонного отжига ионно-легированных слоев. Разработанный технологический маршрут предполагал: формирование (n, n^+, n)-слоев на n^{++} -подложке эпитаксиальным наращиванием в реакторе пониженного давления, p -пролетных областей многократным легированием двухзарядными ионами бора, p^{++} -приконтактных областей имплантацией ионов бора через пленку хрома; активацию внедренной примеси и отжиг радиационных дефектов путем воздействия на ионно-легированные слои излучения галогенных ламп.

Применение разработанной технологии позволило создать и серийно выпускать двухпролетные ЛПД миллиметрового диапазона длин волн с вдвое увеличенной мощностью, чем у однопролетных и реализовать в условиях серийного производства двухпролетные ЛПД со ступенчатым профилем легирования, с уровнем выходной мощности на 10—15 % выше и КПД в 1,3—1,4 раза больше, чем у двухпролетных диодов с плоским профилем легирования.

Заключение

Рассмотренные примеры применения процессов легирования структуры "пленка—подложка" бомбардирующими ионами и легирования подложки атомами пленки при воздействии ионных пучков на структуры "пленка—подложка" иллюстрируют важные особенности этих процессов.

В технологии формирования систем металлизации процессы легирования подложки атомами пленки и бомбардирующими ионами способствуют увеличению интенсивности физико-химического взаимодействия металла пленки и подложки (металлической, диэлектрической), а значит и адгезии между слоями системы. В том числе и для слабозадействующих систем.

В технологии формирования омических контактов воздействие на них ионных пучков обеспечивает не только прочное соединение слоев системы, но и способствует уменьшению удельного

переходного сопротивления. В технологии мощных высоковольтных составных транзисторов (с уникальным распределением примеси в базовом слое) применение процессов легирования бомбардирующими ионами и атомами отдачи при воздействии ионных пучков на структуры "пленка—подложка" позволило разработать способ формирования легированных слоев с уникальным распределением легирующей примеси, устраняющей недостатки традиционных методов и усовершенствовать планарную технологию этих транзисторов. Ее реализация повышает процент выхода годных и надежность транзисторов по сравнению с транзисторами, изготовленными по традиционным технологиям.

Применение процессов имплантации через пленку, многократного ионного легирования двухзарядными ионами, фотонного отжига ионно-легированных слоев, эпитаксиального наращивания в реакторе пониженного давления позволило создать и серийно выпускать ряд перспективных двухпролетных ЛПД миллиметрового диапазона.

Литература

1. Шауцуков А. Г., Кузнецов Г. Д. Моделирование процесса одновременного легирования атомами отдачи и бомбардирующими ионами при бомбардировке структур "пленка—подложка" // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 9. С. 36—39.
2. Шауцуков А. Г., Кузнецов Г. Д. Возможность формирования наноразмерных слоев легированных атомами отдачи под воздействием ионных пучков // Электроника и электрооборудование транспорта. 2007. № 6. С. 34—46.
3. Шауцуков А. Г. Современное представление о возможных механизмах адгезии металлических пленок к различным подложкам // Прикладная физика. 2006. № 5. С. 16—22.
4. Шауцуков А. Г. Влияние ионной бомбардировки на адгезию металлических пленок к различным подложкам и некоторые свойства контактной системы золото—молибден—кремний: Дис. ... канд. техн. наук. — М.: МИС и С, 1980.
5. Шауцуков А. Г., Горелик С. С. и др. Ионная бомбардировка как метод улучшения качества контактной системы золото—молибден—кремний: В сб. Тонкие пленки в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем, 3-я отраслевая науч.-техн. конф. — Воронеж, 1978. С. 57—60.
6. Мазель Е. З. Мощные транзисторы. — М.: Энергия, 1969.
7. Фесюк К. Л., Старков В. И. и др. Исследование и разработка процесса диффузии галлия для создания базы высоковольтных кремниевых приборов. Сборник "Технология полупроводниковых приборов". — Таллин: Валгус, 1982.
8. Шауцуков А. Г., Никитенко В. А. и др. Способ создания базовых областей мощных высоковольтных транзисторов // А. с. № 1290951, СССР. 1985.
9. Шауцуков А. Г., Никитенко В. А. Формирование базовых областей мощных высоковольтных транзисторов путем одновременного легирования атомами отдачи и бомбарди-

рующими ионами// Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. 1990. № 3. С. 40, 41.

10. Шауцуков А. Г., Никитенко В. А. и др. Способ создания базовых областей планарных мощных высоковольтных транзисторов// А. с. № 1426347, СССР. 1986.

11. Сорокин Н. Н., Никитенко В. А., Шауцуков А. Г. Влияние имплантированной примеси на дискретность пленок оксида кремния при отжиге в аргоне// Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1988. С. 68—71.

12. Шауцуков А. Г., Шухостанов А. К. Разработка технологии создания p^+ -, p -областей двухпролетных ЛПД методом ионного легирования// Там же. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1988. № 1 (51). С. 62—68.

13. Шауцуков А. Г., Кузнецов Г. Д. Разработка алгоритмов моделирования процесса формирования p^{++} -, p^+ -, p -слоев двухпролетных ЛПД со ступенчатым профилем легирования// Прикладная физика. 2007. № 2. С. 12—15.

Application of influence of ion beams on structures “film—substrate” in technology of semiconductor devices and integrated schemes

A. G. Shautsukov

Kabardino-Balkarian State University, 173 Chernyshevsky str., Nalchik, 360004, Russian
Тел. 8 (662) 77-18-88

Work is devoted to application of influence of ionic bunches on structures “film—substrate” for improvement of technologies of formation of active structures of crystals of powerful high-voltage transistors, impact avalanche and transit time diodes, systems of metallization of some products of semiconductor electronics.

PACS: 85.30.-z

Keywords: ion beam, technology, semiconductor electronics.

Bibliography — 13 references.

Received April 22, 2010