

УДК 621.372.544.2

И.В. Федин, Е.В. Ерофеев

## Способ очистки наноразмерных элементов интегральных схем

Исследована возможность улучшения параметров омических контактов на основе Ge/Cu к *n-i*-GaAs с помощью модификации поверхности GaAs в потоке атомарного водорода, а также посредством воздействия ультрафиолетовым излучением, генерируемым KrCl эксилампой, на гидрогенизированную поверхность. Показано, что обработка предварительно гидрогенизированной поверхности *n-i*-GaAs ультрафиолетовым излучением с длиной волны  $\lambda = 222$  нм и плотностью мощности излучения  $P = 12$  мВт·см<sup>-2</sup>, выполняемая в вакууме перед осаждением металлизации омических контактов Ge/Cu, позволяет уменьшить приведённое контактное сопротивление в 3 раза.

**Ключевые слова:** GaAs, омический контакт, атомарный водород, ультрафиолет.

Очистка поверхности элементарных полупроводников, полупроводниковых соединений и твердых растворов – одна из наиболее важных технологических операций при изготовлении приборов и интегральных схем. Степень чистоты, электронная структура и кристаллическое совершенство поверхности определяют качество выращиваемых эпитаксиальных слоёв, электрофизические свойства структур диэлектрик – полупроводник и металл – полупроводник. Традиционно используемые для очистки поверхности методы мокрой химической обработки в водных растворах, сухой очистки в плазме агрессивных газов (F<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>), очистки ионной бомбардировкой и нагревом в сверхвысоком вакууме имеют ряд существенных недостатков. Так, мокрые методы не позволяют организовать единый вакуумный цикл и пластины после очистки неминуемо экспонируются на атмосфере и загрязняются. Сухая очистка в плазме агрессивных газов является экологически опасной операцией и требует специального коррозионно-стойкого технологического оборудования и систем утилизации продуктов реакций. Ионное распыление создаёт в приповерхностном слое большое количество радиационных дефектов, для устранения которых требуется высокотемпературный отжиг, а также может вызвать зарядку полупроводниковой структуры. Нагрев в вакууме для реализации очистки требует больших температур и не позволяет эффективно избавиться от углеродных загрязнений.

Предложенный в начале 80-х и развитый в 90-х годах метод очистки поверхности полупроводниковых материалов в атомарном водороде (АВ) лишён данных недостатков и обладает следующими преимуществами [1–3]:

- 1) низкая температура проведения процесса (25–400 °С);
- 2) высокое качество поверхности после очистки (реализуется монокристаллическая, атомарно чистая и атомарно-гладкая поверхность);
- 3) большой спектр очищаемых материалов: алмаз, Ge, Si, GaAs, GaP, AlGaAs, InP, InSb, Si<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub> и др.;
- 4) низкая селективность по отношению к удаляемым загрязнениям (оксиды, органические соединения и др.);
- 5) возможность выполнения очистки в едином вакуумном цикле с последующими процессами нанесения тонких плёнок;
- 6) возможность получения атомарно чистой поверхности, имеющей чрезвычайно низкую скорость окисления атмосферным воздухом;
- 7) возможность реализации очистки как горизонтальных (верхних и нижних), так и вертикальных поверхностей меза-структур;
- 8) высокая экологическая чистота процесса.

Ограничением использования очистки полупроводников в потоке атомарного водорода (гидрогенизация) в промышленном производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем является тот факт, что в процессе обработки на поверхности полупроводника остается тонкий хемосорбированный слой атомов водорода (As-H, Ga-H), который является чужеродным по своей природе и должен быть удален [4]. Наличие данного слоя приводит в дальнейшем к преждевременной

деградации электрических параметров приборов. Отсутствие эффективных способов удаления хемосорбированных слоев атомов водорода в едином вакуумном цикле с процессами напыления тонких пленок приводит к низкой практической ценности использования процессов очистки поверхности в потоке атомарного водорода в технологических маршрутах изготовления интегральных схем.

Можно предположить, что воздействие на предварительно гидрогенизированную поверхность полупроводника УФ-излучения с энергией кванта большей, чем энергия хемосорбированных атомов водорода с поверхностью, позволит получить химически чистую поверхность полупроводника и создать полупроводниковых приборы с улучшенным комплексом электрофизических параметров.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния ультрафиолетового излучения (УФ), генерируемого КгСІ эксилампой, на предварительно гидрогенизированную поверхность GaAs с целью улучшения электрических параметров омических контактов на основе Ge/Cu, сформированных к модифицированной поверхности GaAs.

**Методика эксперимента.** В экспериментах использовались ионно-легированные пластины *n-i*-GaAs с концентрацией электронов в слое толщиной  $d = 120$  нм, равной  $n = 2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, которые проходили предварительную очистку поверхности от собственных окислов мышьяка и галлия в водном растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1:10) в течение  $t = 3$  мин с последующей промывкой в деионизованной воде и сушкой в потоке азота. После этого на поверхности пластины формировалась двухслойная резистивная маска, в которой вскрывались окна в месте будущих омических контактов. Затем пластина делилась на образцы типа I, II, III и IV. Образцы всех типов для удаления собственных окислов мышьяка и галлия обрабатывались в водном растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1:10) в течение  $t = 3$  мин с последующей промывкой в деионизованной воде и сушкой в потоке азота. После чего образцы всех трёх типов загружались в вакуумную камеру и подвергались вакуумной сушке в процессе откачки до остаточного давления  $p = 10^{-6}$  торр в течение  $t = 60$  мин. Образцы групп III и IV проходили обработку в потоке атомарного водорода в течение  $t = 30$  с при комнатной температуре, после этого образцы групп II и IV дополнительно подвергались воздействию ультрафиолетового излучения, генерируемого КгСІ эксилампой с длиной волны  $\lambda = 222$  нм и плотностью мощности  $W = 12$  мВт·см<sup>2</sup> в течение  $t = 8$  с при давлении остаточной атмосферы в вакуумной камере, равном  $p = 10^{-6}$  торр. Затем на все образцы методом термического испарения производилось осаждение металлизации омического контакта на основе тонких пленок Ge и Cu общей толщиной 200 нм. Образцы извлекались из вакуумной камеры, и после удаления резистивной маски, формировалась топология контактов. Затем с целью формирования омических контактов образцы подвергались быстрой термической обработке при температуре  $T = 420$  °С в течение  $t = 60$  с.

Величины приведенного контактного сопротивления омических контактов  $\rho_c$  измерялись методом линии передач на 10 тестах, а затем усреднялись. Погрешность измерения величины  $\rho_c$  не превышала 30%.

**Обсуждение результатов.** На рис. 1 представлены закономерности изменения приведенного контактного сопротивления Ge/Cu омических контактов к *n-i*-GaAs, сформированных к негидрогенизированной (образцы типа I и II) и гидрогенизированной (образцы типа III и IV) поверхности пластин GaAs, которые после процессов гидрогенизации не подвергались (группы I и III) и подвергались обработке ультрафиолетовым излучением в вакууме (группы II и IV).

Из результатов, представленных на рис. 1, видно, что обработка образцов *n-i*-GaAs в потоке атомарного водорода приводит к снижению величины приведенного контактного сопротивления на 40%. Ультрафиолетовая обработка предварительно гидрогенизированной поверхности GaAs приводит к дополнительному снижению контактного сопротивления ещё на 260%. При этом воздействие ультрафиолета на образцы с негидрогенизированной поверхностью приводит к росту приведенного контактного сопротивления, что может быть вызвано ростом толщины собственного окисла на поверхности полупроводника в процессе экспонирования УФ-излучением.

Известно [5], что атомы водорода, попадая из газовой фазы на поверхность полупроводника, могут либо адсорбироваться на ней, либо отразиться обратно в вакуум. Вероятность процесса адсорбции характеризуется коэффициентом прилипания, величина которого для АВ обычно значительно больше, чем для молекулярного водорода и зависит от химического состава и электронной структуры поверхности, температуры образца, степени заполнения поверхности адсорбированными атомами и многого другого. Адсорбированный атом в процессе диффузионного блуждания по поверхности может столкнуться с другим таким же атомом или с атомом, поступившим на поверх-

ность из газовой фазы, и образовать молекулу водорода (рекомбинация по механизму Ленгмюра – Хиншеллуда или механизму Ридила – Или соответственно).

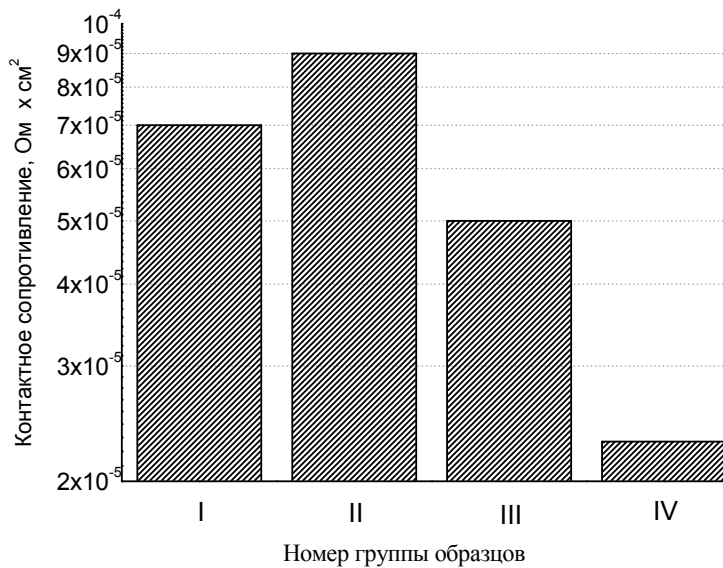


Рис. 1. Закономерности изменения приведенного контактного сопротивления Ge/Cu омических контактов к *n-i*-GaAs, сформированных к негидрогенизированной (образцы типа I и II) и гидрогенизированной (образцы типа III и IV) поверхности пластин GaAs, которые после процессов гидрогенизации не подвергались (группы I и III) и подвергались обработке ультрафиолетовым излучением в вакууме (группы II и IV)

При образовании молекулы выделяется энергия, приблизительно равная энергии диссоциации молекулы (4,5 эВ), которая может быть распределена по различным степеням свободы как молекулы (возбуждение колебательных состояний молекулы), так и твердого тела посредством образования фононов или возбуждения электронной подсистемы. Передача хотя бы части этой энергии твердому телу стабилизирует молекулу, и в дальнейшем она с высокой вероятностью десорбируется в вакуум. Поглощение энергии рекомбинации твердым телом приводит к возникновению ряда интересных явлений как на поверхности полупроводника, так и в приповерхностных его слоях. С другой стороны, адсорбированный атом водорода, обладая высокой химической активностью, может перейти в хемосорбированное состояние, образовав химическую связь с поверхностными атомами. При этом данные хемосорбированные атомы являются чужеродными поверхности и для эффективной очистки должны быть удалены. Поэтому при воздействии на гидрогенизированную поверхность GaAs ультрафиолетового излучения с энергией кванта большей, чем энергия связи -H атомов, должна наблюдаться эффективная фотодесорбция хемосорбированных слоев. В результате такой обработки с поверхности полупроводника, по-видимому, удаляется тонкий слой хемосорбированных атомов водорода, что и способствует более однородному взаимодействию металлической пленки омического контакта с GaAs в процессе термообработки и, как следствие, уменьшению величины  $\rho_c$  для образцов группы III по сравнению с образцами группы II.

**Заключение.** В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что применение дополнительной вакуумной ультрафиолетовой обработки предварительно гидрогенизированной поверхности GaAs перед осаждением металлизации омических контактов на основе композиции Ge/Cu приводит к уменьшению величины приведенного контактного сопротивления на 50%. Предложенные методы могут быть использованы в типовых технологических маршрутах изготовления полупроводниковых приборов и GaAs монолитных интегральных схем, в том числе в едином вакуумном цикле с последующими операциями осаждения тонких диэлектрических или металлических пленок.

#### Литература

1. Горбань А.Н. Взаимодействие атомных частиц с твердым телом / А.Н. Горбань, В.Г. Корнич, В.П. Пинчук, А.Н. Титов. – Харьков, 1976. – 166 с.
2. Белый В.И. Свойства поверхности соединений A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> и физико-химические процессы на границе раздела A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> – металл // Современные проблемы физхимии поверхности полупроводников. – Новосибирск, 1988. – С. 43–90.
3. GaAs-Oxide removal Using an Electron Cyclotron Resonance Hydrogen Plasma / Z. Lu, M.T. Schmidt, D. Chen et al. // Appl. Phys. Lett. – 1991. – Vol. 58, №11. – P. 1143–1145.
4. Friedel P. Interactions between H<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> plasmas and a GaAs (100) surface: chemical and electronic properties // Appl. phys. lett. – 1983. – Vol. 42, №6. – P. 509–511.

5. GaAs Surface Oxidation and Deoxidation Using Electron Cyclotron Resonance Oxygen and Hydrogen Plasmas / Z. Lu, M.T. Schmidt, D. Chen et al. // J. Vac. Sci. Technol. A. – 1991. – Vol. 9, №3. – P. 1040–1044.

---

**Федин Иван Владимирович**

Студент гр. 329 каф. физической электроники ТУСУРа

Тел.: +7-923-482-68-02

Эл. почта: ivan\_fedin@ Rambler.ru

**Ерофеев Евгений Викторович**

Канд. техн. наук, мл. науч. сотр. НИИ средств электросвязи ТУСУРа

Тел.: +7-913-887-60-39

Эл. почта: erofeev@sibmail.com

Fedin I.V., Erofeev E.V.

**The cleaning method for nanostructures of integrated circuits**

In the paper we investigate the possibility of improvement the parameters of Ge/Cu ohmic contacts to *n-i*-GaAs by the modification of a GaAs surface in an atomic hydrogen stream, and also by means of influence by the ultraviolet radiation generated by KrCl of exilamp, on the hydrogenated surface. It is shown that processing of a previously hydrogenated surface of *n-i*-GaAs by ultraviolet radiation with length of a wave  $\lambda = 222$  nm and density of capacity of radiation of  $P = 12$  mW·cm<sup>-2</sup>, and carried out in vacuum before deposition of Ge/Cu ohmic contacts metallization, allows to reduce the specific contact resistance by 3 times.

**Keywords:** GaAs, ohmic contact, atomic hydrogen, ultraviolet.

---