

Формирование потенциальных барьеров на контакте металл–полупроводник с использованием метода селективного удаления атомов

© Б.А. Гурович, Б.А. Аронзон, В.В. Рыльков, Е.Д. Ольшанский, Е.А. Кулешова,
Д.И. Долгий, Д.Ю. Ковалев[¶], В.И. Филиппов

Российский научный центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия

(Получена 3 февраля 2004 г. Принята к печати 11 февраля 2004 г.)

Исследована возможность формирования потенциального рельефа в полупроводнике путем создания на его поверхности металлической пленки, полученной селективным удалением атомов (СУА) кислорода пучком ускоренных протонов (с энергией около 1 кэВ) из предварительно нанесенного оксида металла. В качестве полупроводникового материала выбраны пленки эпитаксиально выращенного GaAs толщиной ~ 100 нм и с концентрацией электронов $2 \cdot 10^{17}$ см⁻³, а в качестве металла — W, полученный из WO₃. Потенциальный рельеф формировался за счет образования барьера Шоттки на границе W/GaAs. Обнаружено, что при использовании метода СУА формируется заметно более высокий барьер Шоттки на контакте W с GaAs (~ 1 эВ), чем при использовании обычной технологии нанесения металла (0,8 эВ для W/GaAs). Представлены данные, свидетельствующие об отсутствии дефектной прослойки в подзатворной области структур, наиболее подвергаемой воздействию протонов. В частности, показано, что подвижность электронов в этой области совпадает с подвижностью объемного GaAs с тем же уровнем легирования.

1. Введение

В настоящее время одно из доминирующих направлений развития микро- и нанотехнологий базируется главным образом на модернизации лежащих в основе современных микротехнологий методов оптической литографии. Фактически планируется осуществить трансформацию микротехнологии в нанотехнологию за счет постепенного усовершенствования оптической литографии [1].

Однако на определенных технологических направлениях, где недостатки и ограничения оптической литографии наиболее очевидны, вполне оправдана замена оптической литографии на альтернативные, более эффективные методы изготовления наноустройств. Прежде всего это относится к созданию многослойных наноустройств, где требуется совмещение элементов структуры в различных слоях с точностью, лучшей чем 5–7 нм, недостижимой при последовательном принципе изготовления. Для реализации такого совмещения желателен переход на параллельный принцип изготовления наноустройств, при котором формирование всех слоев производится заранее, а элементы структуры с требуемыми свойствами создаются в различных слоях одновременно через одну и ту же маску.

В работе [2] предложен новый метод создания наноструктур, позволяющий перейти от последовательного к параллельному принципу изготовления многослойных наноустройств и таким образом решить задачу совмещения элементов в различных слоях многослойных устройств с точностью до 1 нм. В основу этого метода было положено обнаруженное явление „селективного удаления атомов“ (СУА) из тонких пленок под действием пучков ускоренных частиц определенных энергий,

приводящее к радикальной модификации атомного состава твердых тел. Такая модификация сопровождается изменением физических свойств материала и позволяет осуществлять: переход изоляторов в металлы или полупроводники, немагнитных материалов — в магнитные, оптически прозрачных материалов — в оптически непрозрачные. Важно также, что такое воздействие позволяет создавать заданный „рисунок“ на поверхности твердых тел с нанометровым пространственным разрешением [2,3].

В работе исследуется возможность использования метода СУА для формирования потенциального рельефа в полупроводниковом материале, обладающем исходно высокой подвижностью носителей заряда, с целью создания элементов электроники наномасштабных размеров. Суть подхода заключается в следующем. Известно, что на контакте металла с полупроводником может формироваться потенциальный барьер типа Шоттки, высота которого, например, в случае GaAs составляет 0,72–0,88 эВ [4]. Если пленка полупроводника достаточно тонкая (квазидвумерная), а металлический рисунок на ее поверхности содержит щель, то в области полупроводника под щелью должна возникать потенциальная яма для электронов, формирующая при определенном рисунке одномерный проводящий канал заданной конфигурации. Данный способ создания наноструктур представляется перспективным, в силу того что в настоящее время технология создания двумерных поверхностных слоев хорошо отработана, а метод получения проводящего рисунка, развитый нами, обладает высоким пространственным разрешением. Вместе с тем при использовании нашего метода могут возникнуть определенные проблемы, связанные, например, с возможным воздействием протонов на полупроводник и его деградацией, ухудшающей подвижность носителей

[¶] E-mail: kovalev@imp.kiae.ru

заряда. Кроме того, необходимо было убедиться, что при использовании метода СУА формируется барьер Шоттки, обладающий управляемостью и достаточной высотой (при характерном масштабе размерного квантования 10 нм необходима амплитуда потенциального рельефа 1 эВ). В этой связи основная цель работы заключалась:

а) в создании транзисторных структур с затвором Шоттки на основе контакта металл–полупроводник, полученным как с использованием метода селективного удаления атомов, так и обычным путем создания затвора из чистого (напыленного) металла;

б) в исследовании основных характеристик этих объектов, включая определение высоты барьера Шоттки и подвижности носителей заряда в подзатворной области, наиболее подвергаемой воздействию протонов.

2. Объекты исследований

Транзисторные структуры двух типов были изготовлены на основе эпитаксиально-выращенного GaAs с концентрацией доноров в активной области $\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. В качестве затвора использовался вольфрам. В структурах первого типа вольфрам наносился путем напыления чистого W. Заметим, что высота барьера Шоттки для контакта (напыленный W)/GaAs хорошо известна и составляет 0.8 эВ [4]. Во втором случае в затворный промежуток наносился оксид вольфрама, который затем восстанавливался до чистого вольфрама за счет селективного удаления атомов кислорода. Предварительными экспериментами было показано, что облучение WO_3 протонами низкой энергии ($\sim 1 \text{ кэВ}$) приводит к появлению пленки W с проводимостью, характерной для квазиаморфных (ультрамикродисперсных) металлов. Транзисторные структуры обоих типов были выполнены в одинаковой кольцевой геометрии диска Корбино, позволяющей определять подвижность в активном слое методом геометрического магнитосопротивления [5].

В качестве заготовки для изготовления структур применялись стандартные пластины GaAs, используемые при производстве полевых транзисторов с затвором Шоттки, состоящие из:

- 1) высокоомной подложки GaAs,
- 2) буферного слоя из чистого GaAs толщиной $\sim 1 \text{ мкм}$,
- 3) активного слоя GaAs толщиной $\sim 150 \text{ нм}$,
- 4) контактного n^+ -слоя с концентрацией доноров $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ толщиной $\sim 100 \text{ нм}$.

Процесс изготовления структур включал следующую последовательность технологических операций. Вначале изготавливались контактные области истока и стока, покрытые металлической пленкой из Au. Затем формировалось окно под затвор с использованием фоторезиста взрывного типа. Далее на один тип пластин наносился чистый вольфрам толщиной 80 нм, а на другой — пленки WO_3 толщиной 40–45 нм. На пластинах второго типа осуществлялось селективное удаление атомов кислорода

из оксида вольфрама с образованием металлического вольфрама путем облучения низкоэнергетическими протонами. Процесс облучения контролировался *in situ* по изменению электросопротивления пленки — „свидетеля“ из WO_3 (пленки облучались до появления значений электросопротивления, характерных для металлического вольфрама). После удаления резиста и промывки пластин осуществлялась их резка на отдельные структуры.

Полученные транзисторные структуры имели внутренний диаметр истоковой области 75 мкм, внешний диаметр стоковой области 150 мкм. Между истоком и стоком располагался затвор шириной 40 мкм, отстоящий от истока на расстоянии 20 мкм.

Эксперименты были выполнены при комнатной температуре и включали исследования: выходных и передаточных характеристик транзисторных структур, магнитопольевых зависимостей тока стока при различных напряжениях на затворе, а также зависимости дифференциальной емкости затвор–сток на частоте 1 МГц от напряжения смещения.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Выходные характеристики структур (зависимости тока стока I_{ds} от напряжения между стоком и истоком U_d) при различных напряжениях на затворе V_g представлены на рис. 1, а и 1, б для транзисторов с затвором из напыленного вольфрама (в дальнейшем W_FET) и вольфрама, образованного из WO_3 за счет селективного удаления атомов кислорода (WO_FET), соответственно. В обоих случаях характеристики имеют вид, типичный для длинноканальных полевых транзисторов на основе GaAs с затвором Шоттки [4]. Ток стока монотонно растет с увеличением тянущего напряжения на стоке U_d , стремясь к насыщению при напряжениях, превышающих $U_d \approx 0.5 \text{ В}$. В области насыщения ток максимален при положительных напряжениях на затворе, при этом в структурах W_FET уже при небольших напряжениях на затворе ($V_g > 0.2 \text{ В}$) начинает проявляться ток утечки через затвор — остаточный ток стока заметно отличается от нуля при напряжении между истоком и стоком, близком к нулю (см. рис. 1, а). В случае структур WO_FET ток утечки через затвор отсутствует вплоть до $V_g \approx 0.7 \text{ В}$. При отрицательных напряжениях на затворе в обоих типах структур ток стока падает (более чем на 2 порядка при $U_g \approx -1 \text{ В}$). При этом в случае структур W_FET наблюдается, как правило, изменение знака тока, обусловленного утечками через затвор.

Факт сильной модуляции проводимости канала структур WO_FET свидетельствует о существенном изменении поверхностного потенциального барьера и, следовательно, об отсутствии пиннинга уровня Ферми, связанного с появлением большого количества возможных дефектов (локализованных электронных состояний) на границе (восстановленный W)/GaAs. На это указывает и вид передаточных характеристик структур WO_FET

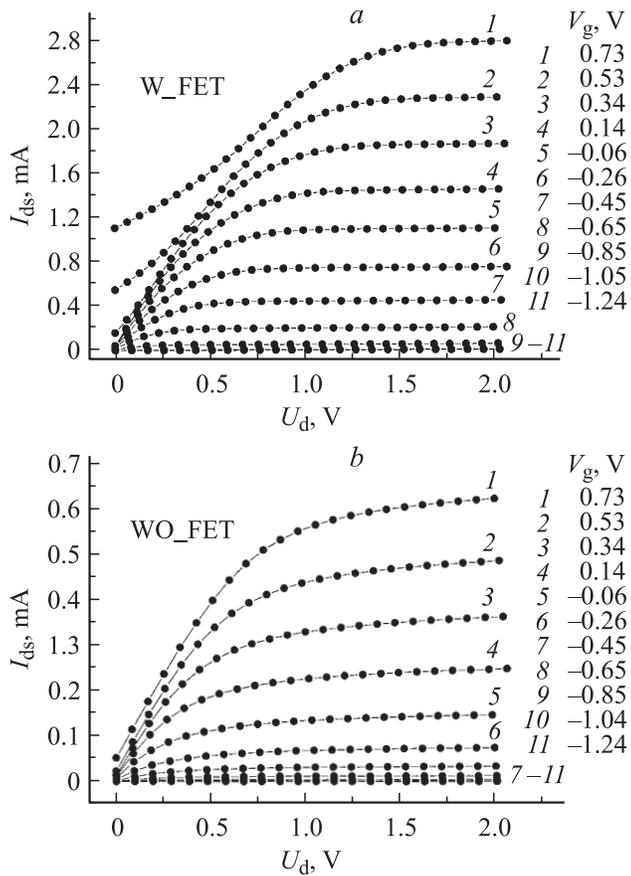


Рис. 1. Выходные (стоковые) характеристики транзисторных GaAs-структур с затвором: *a* — полученным напылением W и *b* — путем образования W из WO_3 методом селективного удаления атомов.

(зависимостей тока стока I_{ds} от напряжения на затворе V_g), представленных на рис. 2, *a* при разных значениях тянущего напряжения U_d . Для сравнения на рис. 2, *b* также показаны передаточные характеристики для структуры W_FET. В области отрицательных V_g приведенные зависимости не содержат ярко выраженных областей перегиба, которые могли бы возникать при наличии большого количества дискретных пограничных состояний [4]. Заметим, что проявление области перегиба при положительных V_g не связано с пограничными состояниями. Действительно, в этой области ширина проводящего канала достигает предельной величины, равной толщине активного слоя GaAs, что должно сопровождаться насыщением тока. С другой стороны, при этом контакт Шоттки оказывается включенным в прямом направлении, что приводит к токам утечки через затвор, т.е. дополнительному росту тока стока. Комбинация этих факторов и обуславливает перегиб передаточной характеристики. Кривые I' на рис. 2, *a* и 2, *b* представляют зависимости $I_d(V_g)$, полученные после вычитания токов утечки через затвор. Видно, что данные зависимости не содержат областей перегиба. Обратим внимание на тот факт, что область насыщения на кривой I' для структуры WO_FET сдвинута по

оси напряжений более чем на 0.2 В по сравнению со структурой W_FET. Это указывает на то, что высота барьера ϕ , формируемого на границе (образованный из окисла W)/GaAs, больше не 0.2 эВ, чем высота барьера на границе (напыленный W)/GaAs, т.е. достигает величины $\phi \approx 1$ эВ. Это подтверждается также результатами измерений дифференциальной емкости затвор–сток C на частоте 1 МГц в зависимости от напряжения смещения U , приведенными на рис. 3. Зависимость $C(U)$ содержит отчетливо выраженную область падения емкости при уменьшении U , связанную с увеличением ширины слоя Шоттки в области обратных напряжений смещения. Для нахождения ϕ , как известно [4], необходимо перестроить данную зависимость в координатах $1/C^2$ от U . На вставке к рис. 3 приведена зависимость $1/C^2$ от U . Линейная часть кривой (см. рис. 3) описывается функцией

$$1/C^2 [10^{-3} \text{ пФ}^{-2}] = 3.82 - 3.99U [\text{В}].$$

Значение $1/C^2 = 0$ соответствует отсечке $U = U_i = 0.96$ В. Значение $\phi = 0.96$ эВ хорошо согласуется с приведенной выше оценкой высоты барьера $\phi \approx 1$ эВ.

Факт увеличения высоты барьера на 0.2 эВ представляется не тривиальным, поскольку для ковалентных полупроводников типа GaAs определяющее влияние на формирование барьеров Шоттки оказывают приповерх-

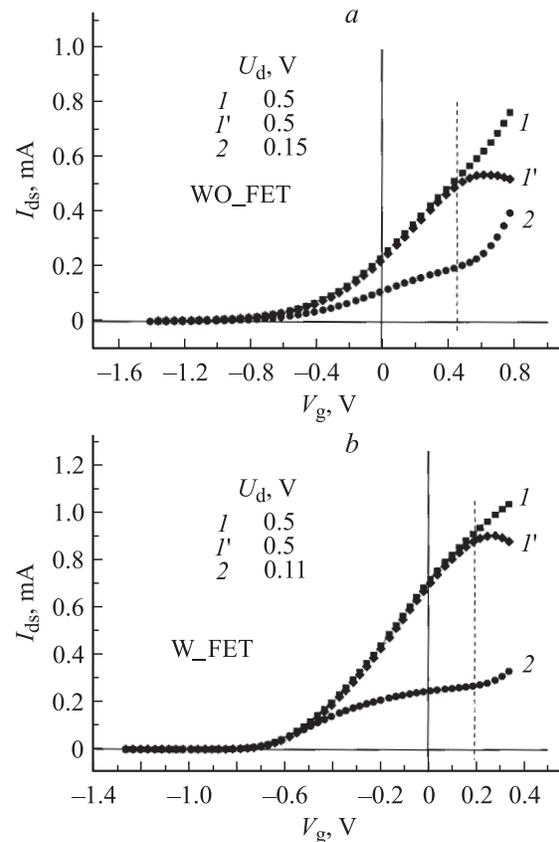


Рис. 2. Передаточные (сток-затворные) характеристики транзисторных GaAs-структур WO_FET (*a*) и W_FET (*b*) при различных напряжениях на стоке U_d . Кривые I' получены с вычитанием тока утечки через затвор.

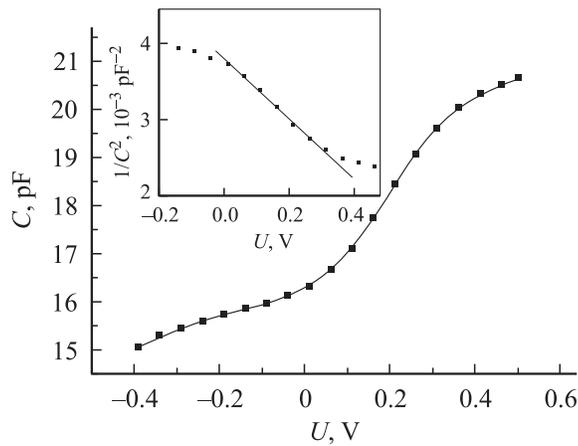


Рис. 3. Зависимость дифференциальной емкости затвор–сток C от напряжения смещения U для структуры WO_FET. На вставке — зависимость $1/C^2$ от U , а также результат подгонки ее линейной области полиномом первой степени.

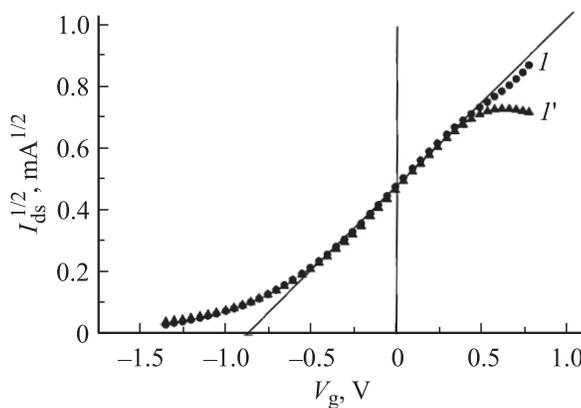


Рис. 4. Передаточная характеристика транзисторной WO_FET GaAs-структуры в координатах $\sqrt{I_{ds}} - V_g$. Кривая I' получена с вычитанием тока утечки через затвор. Напряжение на стоке $U_d = 0.5$ В.

ностные дефекты кристаллической структуры, образующиеся при нанесении металла. При этом высота барьера практически не зависит от химической природы металла и в случае GaAs составляет в среднем 0.8 эВ [4]. Возможным объяснением заметного увеличения высоты барьера при использовании метода СУА является введение в приповерхностную область водорода (протонов), который, как известно, пассивирует дефекты типа оборванных связей. Данное обстоятельство, в частности, широко используется (см. [6,7] и ссылки там) при получении высококачественного аморфного кремния ($a\text{-Si:H}$), а также для уменьшения плотности локализованных состояний на границе Si–SiO₂.

Идеальность транзисторных структур с барьером Шоттки часто оценивают по пороговому напряжению на затворе V_t , которое соответствует отсечке проводящего канала. Для идеальной структуры при однородном распределении легирующей примеси по глубине активного слоя величина V_t определяется условием $d = w$, где d —

толщина активного слоя, а w — ширина слоя Шоттки:

$$w = \sqrt{\varepsilon(\varphi + eV_t)/2\pi e^2 N_d}. \quad (1)$$

Здесь ε — диэлектрическая проницаемость (для GaAs $\varepsilon = 13.1$), φ — высота барьера Шоттки на контакте металл–полупроводник, N_d — концентрация доноров в активном слое структуры. Значение V_t можно найти экспериментально по передаточной характеристике, построив ее в координатах $\sqrt{I_{ds}} - V_g$ и экстраполировав линейную часть к нулю (напряжение на стоке должно при этом отвечать области насыщения выходных характеристик) [4]. Данная зависимость представлена на рис. 4. Из рисунка явствует, что пороговое напряжение составляет ~ 1 В. Подставляя это значение в (1) и полагая $\varphi = 1$ эВ, найдем $w = 120$ нм, что практически совпадает с технологически заданной толщиной активного слоя GaAs (~ 150 нм).

Рассмотрим теперь зависимости тока стока структур от величины магнитного поля B . Для образца в виде диска Корбино магнитосопротивление связано простым соотношением с подвижностью носителей заряда μ [5]:

$$\Delta R/R_0 \approx (\mu B)^2. \quad (2)$$

В нашем случае наличие кольцевого затвора дает возможность анализировать подвижность электрона в подзатворной области, поскольку при достаточно большом обедняющем напряжении именно этой областью определяется сопротивление образца.

На рис. 5 приведены магнитопольевые зависимости тока стока I_{ds} , полученные при тянущем напряжении $U_d = 0.12$ В и различных напряжениях на затворе для структур WO_FET (кривые 1, 2) и W_FET (кривые 3, 4). Напряжения на затворе выбраны таким образом, чтобы обеспечить полное открытие канала (кривые 2, 4) и его частичное обеднение (кривые 1, 3), при котором ток стока падает в 6–7 раз по сравнению с током в открытом состоянии, т.е. можно полагать, что в этих условиях сопротивление структуры определяется подзатворной областью. Для зависимостей 2, 4 заметный вклад в

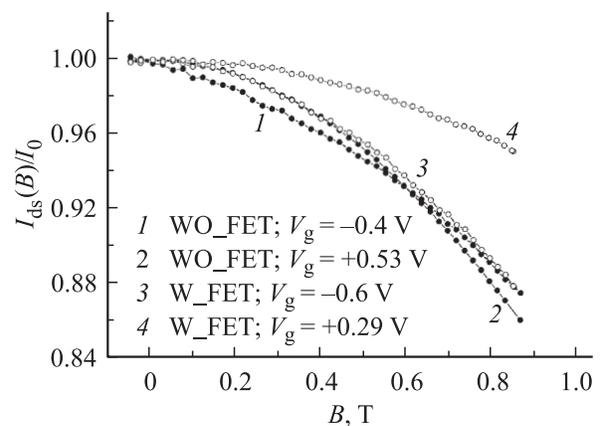


Рис. 5. Кривые магниторезистивного эффекта для транзисторных структур WO_FET (1, 2) и W_FET (3, 4), полученные при напряжении на стоке $U_d = 0.12$ В и различных напряжениях на затворе. I_0 — ток стока в нулевом магнитном поле.

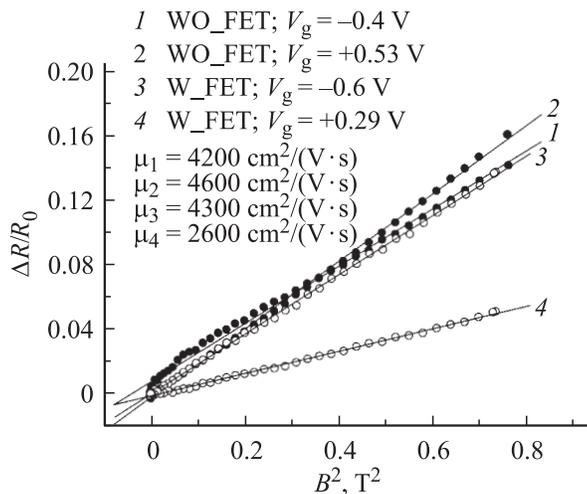


Рис. 6. Зависимости магниторезистивного эффекта транзисторных структур WO_FET (1, 2) и W_FET (3, 4) при различных напряжениях на затворе.

магнитосопротивление могут вносить области между затвором, стоком и истоком, поскольку их суммарная ширина (35 мкм) сравнима с шириной затвора 40 мкм. Заметим, что эти области были защищены от воздействия протонов резистом и, казалось бы, можно ожидать заметного магнитосопротивления для структуры WO_FET. В действительности для этой структуры магнитосопротивление в поле 9 кЭ для полностью открытого и частично обедненного каналов совпадает с точностью 10%. Между тем для структуры W_FET магнитосопротивление заметно уменьшается в случае полностью открытого канала. Зависимости $I_{ds}(B)$, пересчитанные в магнитосопротивление, приведены в координатах $\Delta R/R_0 = f(B^2)$ на рис. 6. Видно, что они имеют приблизительно линейный характер в соответствии с (2). Для структуры W_FET уменьшение магнитосопротивления в открытом состоянии составляет 2.6 раза. Этот факт следует связывать с существенными утечками через затвор (см. рис. 1, а), вследствие чего холловский ток шунтируется металлическим электродом затвора (часть тока в открытом состоянии протекает через затвор). Для структуры WO_FET этот эффект не играет существенной роли. Подвижности для этой структуры, найденные по наклону зависимостей 1 и 2, составляют $\mu = (4200-4600) \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а для структуры W_FET в условиях частично пережатого канала (зависимость 3) $\mu = 4300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, что хорошо согласуется с данными по подвижности монокристаллического GaAs ($\mu \approx 4500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $N_d = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $T \approx 300 \text{ К}$) [4].

4. Заключение

Таким образом, представленные данные свидетельствуют об отсутствии дефектной прослойки на границе (образованный из окисла W)/GaAs и о несущественном влиянии облучения протонами на свойства GaAs

при выбранных режимах процесса СУА. Сравнительный анализ структур показал также, что при использовании метода селективного удаления атомов формируется заметно более высокий барьер Шоттки на границе W/GaAs (на 0.2 эВ), чем при использовании обычной технологии нанесения металла (0.8 эВ для контакта W/GaAs), что является важным обстоятельством при создании элементов электроники наномасштабных размеров (в частности, „проводящих“ рисунков с баллистическим транспортом носителей заряда), или при использовании диодов Шоттки в солнечных элементах.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 01-02-16420).

Список литературы

- [1] С. Wyon. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **186**, 380 (2002).
- [2] Б.А. Гурович, Д.И. Долгий, Е.А. Кулешова, Е.П. Велихов, Е.Д. Ольшанский, А.Г. Домантовский, Б.А. Аронзон, Е.З. Мейлихов. УФН, **171**, 105 (2001).
- [3] В.А. Gurovich, D.I. Dolgy, E.A. Kuleshova, E.Z. Meilikhov, A.G. Domantovsky, K.E. Prikhodko, K.I. Maslakov, B.A. Aronzon, V.V. Rylkov, A.Yu. Yakubovsky. Microelectron. Engin., **69**, 358 (2003).
- [4] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов (М., Мир, 1984) т. 1.
- [5] К. Зеегер. Физика полупроводников (М., Мир, 1977).
- [6] О.А. Голикова. ФТП, **31**, 281 (1997).
- [7] И.В. Антонова, Й. Стано, Д.В. Николаев, Д.В. Наумова, В.П. Попов, В.А. Скуратов, ФТП, **36**, 65 (2002).

Редактор Т.А. Полянская

Potential patterns forming on the contact of metal–semiconductor by selective removal of atoms

B.A. Gurovich, B.A. Aronzon, V.V. Rylkov, E.D. Olshansky, E.A. Kuleshova, D.I. Dolgy, D.Yu. Kovalev, V.I. Filippov

Russian Research Center „Kurchatov Institute“,
123182 Moscow, Russia

Abstract Possibility of a potential pattern being formed in the semiconductor due to creation on its surface a metallic film as a result of selective removal of atoms (SRA) of oxygen by a beam of accelerated protons (having the energy about 1 keV) out of the preliminary created coating of metallic oxide was investigated. As the semiconductor material epitaxial growing GaAs films with $\sim 100 \text{ nm}$ thickness and electron concentration $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, and as the metal — W, obtained from WO_3 , were selected. Potential pattern was forming due to the generation of Shottki barrier on the W/GaAs boundary. With the using of SRA method was forming much higher Shottki barrier on the contact of W with GaAs ($\sim 1 \text{ eV}$), than using usual technology of metal coating (0.8 eV for W/GaAs). Presented data is evidence of the absence of faulty layer in the subgate region of structures, most subjected to the proton effect. In particular, the electron mobility in this region coincides with the bulk GaAs electron mobility with the same doping level.