

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.382.3

ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР НА ГИДРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗА

© 2014 г. Ю. В. Гуляев¹, А. Ю. Митягин¹, Г. В. Чучева¹, М. С. Афанасьев¹, К. Н. Зяблук¹, Н. Х. Талипов¹, П. Г. Недосекин², А. Э. Набиев³

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Российская Федерация, 141196 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

²Производственно-технологический центр “УралАлмазИнвест”, Российская Федерация, 121108 Москва, ул. Ивана Франко, 4

³Азербайджанский государственный педагогический университет, Азербайджан, 370000 Баку, ул. У. Гаджибекова, 34

Поступила в редакцию 25.06.2012 г.

Показана возможность создания полевого транзистора на гидрированной поверхности алмаза. Рассмотрена технология получения и свойства проводящей гидрированной поверхности алмаза. По разработанной технологии изготовлен полевой транзистор на гидрированной поверхности природного 2А алмаза с ориентацией поверхности (110).

DOI: 10.7868/S0033849414030061

ВВЕДЕНИЕ

Высокая теплопроводность и напряжение пробоя полупроводникового алмаза делают его перспективным материалом для изготовления мощных микроэлектронных элементов, в частности, мощных СВЧ-транзисторов и высоковольтных сильноточных диодов [1]. Однако контроль проводимости алмаза и сложность изготовления и обработки по-прежнему остаются нерешенными проблемами, препятствующими появлению алмазных приборов, способных конкурировать с приборами на основе GaN и SiC. Плотная кристаллическая решетка алмаза затрудняет его легирование большинством элементов, а энергия активации уровней доноров и акцепторов достаточно высока.

Фактически единственным акцептором, делающим алмаз проводящим при комнатной температуре, является бор. Алмаз может быть легирован как методами ионной имплантации, так и в процессе эпитаксиального роста. При низкой степени легирования энергия активации бора составляет 0.37 эВ, поэтому при комнатной температуре степень активации дырок составляет десятки доли процента. Вследствие этого образцы полевых транзисторов, изготовленных на легированном бором алмазе [2, 3], имеют малый ток исток–сток, который возрастает многократно при нагреве прибора. При повышении степени легирования энергия активации акцепторов бора падает, при кон-

центрации свыше 10^{20} см⁻³ большинство акцепторов активны при комнатной температуре, однако подвижность дырок в таких образцах слишком мала. Наиболее перспективной основой алмазных транзисторов является чистый алмаз с δ -легированным слоем бора толщиной 1 нм и степенью легирования $>10^{20}$ см⁻³. В таком кристалле дырки диффундируют из сильно легированного слоя в чистый алмаз, где их подвижность выше. Полностью активный при комнатной температуре δ -слой на алмазе был получен методами эпитаксиального роста в [4], а полевой транзистор на основе δ -легированного алмаза – в [5]. Однако технология его изготовления достаточно сложна и не отработана, поэтому ток исток–сток и предельные частоты усиления полученного образца невысоки.

Более успешные результаты были получены на полевых транзисторах, изготовленных на алмазах с гидрированной поверхностью. Алмазы, обработанные в водородной плазме, обладают p -проводящим поверхностным слоем толщиной ~ 1 нм и поверхностной концентрацией дырок $\sim 10^{13}$ см⁻². Это позволяет изготовить полевой транзистор на его поверхности, что и было впервые продемонстрировано в [6]. Технология изготовления такого транзистора сравнительно проста: она описана в [7] и сводится к изготовлению омических контактов истока и стока (как правило, Au) и барьерного контакта затвора (как правило, Al) на изолированном участке гидрированного алмаза. Впослед-

ствии эта технология использовалась с небольшими модификациями во многих работах (см. обзор [8]) для изготовления транзисторов на гидрированных алмазах. К настоящему времени получены алмазные транзисторы с максимальными частотами усиления по току 45 ГГц и по мощности 120 ГГц [9], максимальной выходной мощностью 2.1 Вт/мм на частоте 1 ГГц [10], максимальным током исток–сток 850 мА/мм [11] на единицу ширины затвора.

Однако несмотря на определенный прогресс, ряд нерешенных проблем препятствует дальнейшему развитию транзисторов на гидрированной поверхности алмаза. К ним относятся высокое сопротивление поверхности $\sim 10...20$ кОм/□, плохая адгезия металлических контактов, ограниченная температурная и химическая стабильность поверхности, зависимость от атмосферных условий. Одним из вариантов решения проблемы адгезии контактов истока и стока является процесс легирования бором участков алмаза под омическими контактами [12]. Для решения проблем стабильности гидрированной поверхности алмаза необходима пассивация открытых участков. В недавней работе [13] сообщается, что пассивация гидрированной поверхности слоем Al_2O_3 значительно улучшает стабильность работы изготовленного на ней полевого транзистора. Также сообщается [14] об изготовлении транзисторов на гетероструктуре AlN/алмаз(111). Они сходны по характеристикам с транзисторами на гидрированных алмазах, что может быть связано с промежуточной очисткой алмаза путем отжига в смеси H_2 и NH_3 до нанесения слоя AlN.

1. ПРОВОДЯЩАЯ ГИДРИРОВАННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ АЛМАЗА

Как было обнаружено в [15], алмазные CVD-пленки обладают поверхностной проводимостью, которая исчезает после отжига на воздухе или обработки в окисляющих кислотах. Проводимость p -типа возникает после обработки алмазов в водородной плазме, которая приводит к образованию C–H-связей на поверхности кристалла (см. обзор [16]). Сопротивление гидрированной поверхности непосредственно после обработки плазмой довольно высоко, $\sim 10^{10}$ Ом/□, однако на воздухе оно падает вплоть до $\sim 10^4$ Ом/□ [17]. Таким образом, проводимость связана с адсорбцией атмосферных газов гидрированной поверхностью алмаза. Недавно показано [18], что добавка газов NO_2 и O_3 в состав воздуха может увеличить поверхностную проводимость в несколько раз.

В данной работе были использованы алмазные пластины, полученные из природных 2A алмазов, и синтетические CVD-монокристаллы n -типа [19]. Поперечный размер пластин составлял 3...3.5 мм,

толщина 0.3...0.5 мм. Кристаллографическая ориентация поверхности природных алмазов (110), синтетических (100). Поверхность пластин подвергали механической полировке до шероховатости < 5 нм. Для формирования гидрированной поверхности кристаллы отжигали в водороде при атмосферном давлении. После охлаждения в атмосфере водорода кристаллы размещали на воздухе, и они приобретали проводящие свойства. Для измерения проводимости к углам пластин прикрепляли золотые проволоки с помощью токопроводящей серебряной пасты. Холловские измерения осуществляли при комнатной температуре методом ван дер Пау в магнитном поле с индукцией 0.6 Тл. Результаты измерения подвижности и поверхностной плотности дырок различных образцов приведены на рис. 1.

Было установлено, что в результате отжига в водороде при атмосферном давлении в течение 30 мин, при температурах выше $700^\circ C$ происходит образование слоя p -типа проводимости на гидрированной поверхности алмаза. Наилучшие результаты (подвижность $150...200$ см²/(В с)) были получены при термообработке (100) CVD алмазных слоев в потоке водорода в диапазоне температур $800...1000^\circ C$. При температуре $700^\circ C$ проводящий слой, по-видимому, только начинает формироваться, поэтому он обладает высоким сопротивлением. Данный метод термообработки в водороде может служить альтернативой общепринятому методу формирования H-слоя в СВЧ-плазме водорода как более простой и воспроизводимый.

Проводимость гидрированного алмаза является поверхностной, так как она исчезает даже после кратковременной (~ 1 мин и менее) обработки в воздушной плазме при давлении 0.5 Торр, при которой не происходит травления кристалла. В то же время поверхность стабильна на воздухе вплоть до температуры $300^\circ C$, при более высоких температурах проводимость начинает медленно падать. Как видно из рис. 1, природные кристаллы обладают большей поверхностной плотностью дырок и меньшей подвижностью, чем кристаллы CVD. Это может быть связано с различной ориентацией поверхности кристаллов: плоскости (110) имеют более высокую поверхностную плотность C–H-связей, чем плоскости (100) [20].

Механизм формирования поверхностной проводимости до конца не ясен. Наиболее разумным представляется формирование дырочного слоя за счет возникновения электростатического потенциала и изгиба энергетических зон E_C , E_V вблизи поверхности кристалла (рис. 2а). Измерения холловской проводимости в [18] показали, что воздействие адсорбируемых газов может в несколько раз менять поверхностную плотность дырок p_s , но мало влияет на подвижность. Это позволило сде-

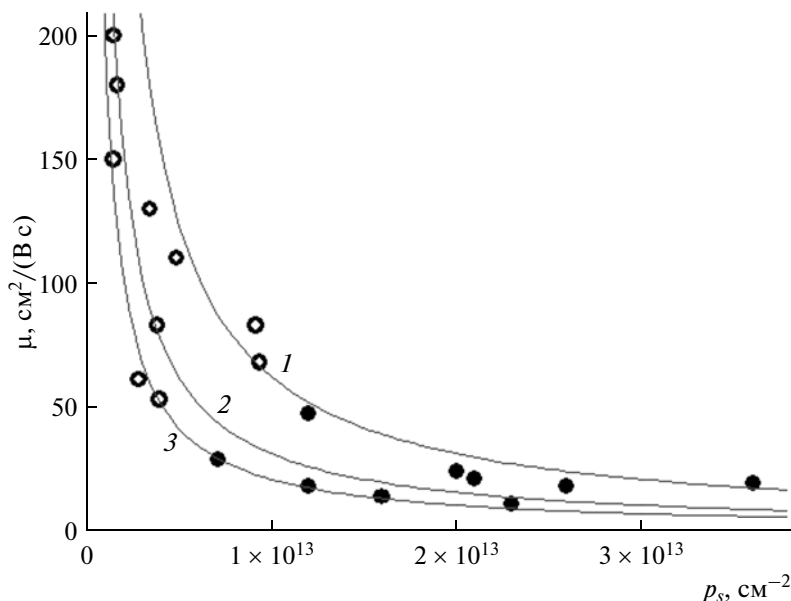


Рис. 1. Зависимости подвижность от поверхностной плотности дырок, измеренные методом Холла, на природных образцах монокристаллического алмаза (темные точки) и на CVD-образцах (светлые точки). Для наглядности проведены линии, соответствующие поверхностным сопротивлениям 10 (1), 20 (2) и 30 кОм/□ (3).

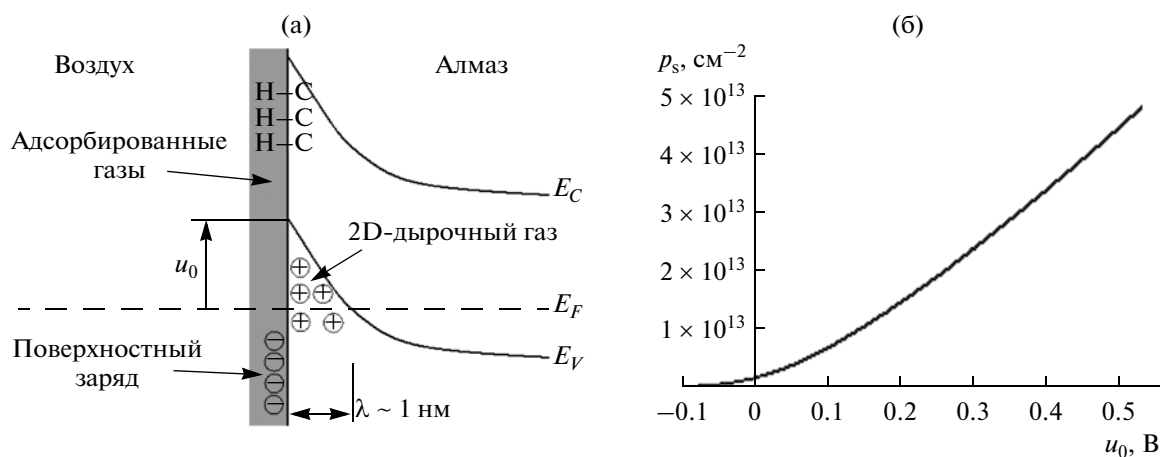


Рис. 2. Схема изгиба границы валентной зоны E_V вблизи поверхности гидрированного алмаза, приводящего к образованию двумерного дырочного газа (а) и зависимость поверхностной плотности дырок p_s от потенциала $u_0 = E_V(0) - E_F$ на поверхности (б).

лать предположение, что электроны пространственно разнесены от дырочного слоя. Авторы [18] предполагают, что при адсорбции молекул газа M происходит образование отрицательных ионов газа на поверхности и дырочного слоя под ней: $CH-M \rightarrow C^+H-M^-$. Дырочки не рассеиваются на адсорбированных ионах M^- , поэтому их плотность мало влияет на подвижность дырок.

Предполагая, что единственным источником заряда вблизи поверхности являются дырки, можно рассчитать профиль концентрации дырок $p(x)$ вблизи поверхности как функцию потенциа-

ла валентной зоны $u(x) = E_V(x) - E_F$, отсчитываемой от энергии Ферми, на поверхности кристалла $u_0 = u(0)$. При $u_0 < 0$ дырки подчиняются бoльцмановской статистике $p(x) = N_V \exp(u(x)/kT)$ и уравнение Пуассона может быть решено аналитически. При $u_0 < 0$ вырождение дырочного газа становится существенным, и поэтому необходимо учитывать статистику Ферми–Дирака. Решение показывает, что основная часть дырочного газа сосредоточена в слое толщиной $\lambda = \sqrt{2\epsilon\epsilon_0 kT / (e^2 N_V)} = 0.8$ нм (при $T = 300$ К и плотности состояний $N_V = 2.5 \times$

$\times 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Максимальная поверхностная плотность дырок, получаемая в экспериментах, составляет $p_s \sim 5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$, что соответствует напряженности электрического поля на поверхности алмаза $\sim 15 \text{ МВ/см}$. Такое значение соответствует теоретическому напряжению пробоя алмаза. Как показывает численное решение уравнения Пуассона (см. рис. 2б), поверхностный потенциал u_0 в большинстве случаев находится в диапазоне $0 \dots 0.5 \text{ В}$. Следует ожидать, что наличие дефектов в алмазе или примесей с концентрацией $\sim N_V$ будет мешать дырочной проводимости. Действительно, некоторые кристаллы (в частности, с высоким содержанием азота) не приобретают проводимость после обработки водородом. Отметим также, что проведенные в [21] измерения на атомно-силовом микроскопе контактных разностей потенциала различных участков поверхности алмаза дали значение 0.7 В для поверхностного потенциала гидрированной поверхности исследуемого образца относительно уровня Ферми.

Разброс значений проводимости, который хорошо виден на рис. 1, означает, что для воспроизводимости результатов необходим точный контроль технологических параметров от выбора кристалла до пассивации поверхности.

2. КОНТАКТЫ

Известно [16, 23], что благородные металлы, в частности Ag, Au, Cu, Pt, образуют омические контакты на проводящей гидрированной поверхности алмаза, в то время как большинство других металлов — барьер Шоттки с различными характеристиками.

Наибольшее внимание уделяется контактам Al, которые в большинстве случаев демонстрируют обратный ток (при положительном напряжении контакта) на уровне чувствительности измерений. В ряде работ [23–26] сообщается о воспроизводимом получении Al-контактов на гидрированной поверхности CVD-алмазов с ориентацией (100) с фактором идеальности $n = 1$. Однако измеренные значения барьера Шоттки ϕ_B различаются: в работе [23] барьер равен 0.59 В , в то время как в [25] величина барьера идеальных Al-контактов оценивается в $1.5 \dots 1.6 \text{ В}$. Также в [25] сообщается о зависимости фактора идеальности от качества CVD-пленок: идеальные контакты образуются на атомарно плоских поверхностях, получаемых при очень низких соотношениях $\text{CH}_4/\text{H}_2 = 0.016\%$; при более высоких соотношениях концентраций метан/водород значение фактора идеальности находилось в диапазоне $n = 1.3 \dots 1.8$. В случае неидеальных контактов величина барьера зависит от модели, используемой для параметризации тока.

С целью исследования свойств контактов в данной работе на гидрированную поверхность алмазов были осаждены металлы Cu и Al. Исходные кристаллы после полировки поверхности и очистки подвергали гидрированию путем отжига в водороде при 900°C . После этого на поверхность кристаллов через маску с окнами $0.8 \times 0.8 \text{ мм}^2$ осаждался металл методом резистивного испарения в вакууме. Для лучшей адгезии металла до осаждения кристаллы кратковременно прогревали в вакууме. Кристаллы с контактными площадками приклеивали с помощью Ag-пасты обратной стороной на подставку с электродом и измеряли его вольт-амперные характеристики.

Контакты Cu демонстрировали линейные вольт-амперные характеристики (относительно обратной стороны с Ag-пастой) в диапазоне $-1 \dots +10 \text{ В}$, однако при отрицательных напряжениях на Cu ток растет медленнее, достигая соотношения $I(+10\text{В})/I(-10\text{В}) \sim 2 \dots 3$. Это может объясняться различными свойствами контактов Ag и Cu.

Контакты Al демонстрировали барьерные свойства с различными характеристиками. На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики контактов на образцах природного 2A кристалла и синтетического CVD. В диапазоне $0 \dots -0.3 \text{ В}$ они линейны в логарифмическом масштабе: штриховыми линиями показана экспоненциальная интерполяция $I = I_s \exp(V/nkT)$ с фактором идеальности n . На образце CVD не удалось получить идеального контакта: интерполяция показанного на рисунке образца дает $n = 1.74$. В то же время на природном 2A алмазе один из контактов демонстрирует идеальные барьерные свойства: обратный ток находится в пределах шумов ($< 0.1 \text{ нА}$), а соответствующая интерполяция на рис. 3 отложена с фактором идеальности $n = 1$. Расчет обратного тока $I_s/S = AT^2 \exp(-\phi_B/kT)$ дает значение барьера $\phi_B = 1.09 \text{ В}$ для данного образца.

Отличие полученного значения ϕ_B от измерений в других работах (как и отличия опубликованных измерений между собой) может иметь много причин: различные типы кристалла, ориентации поверхности, поверхностная плотность C–H-связей, условия адсорбции и технологические операции в процессе нанесения контактов. Также следует отметить определенную сложность измерений из-за очень слабой адгезии Al на гидрированной поверхности алмаза. Это приводит к частым разрушениям контакта при прикосновении зонда или к отслаиванию Al при высыхании нанесенной на него контактной пасты (чего не происходило с Cu-контактами). Это может быть причиной определенной неповторяемости результатов, гистерезисов и деградации некоторых контактов в течение нескольких дней. Для более

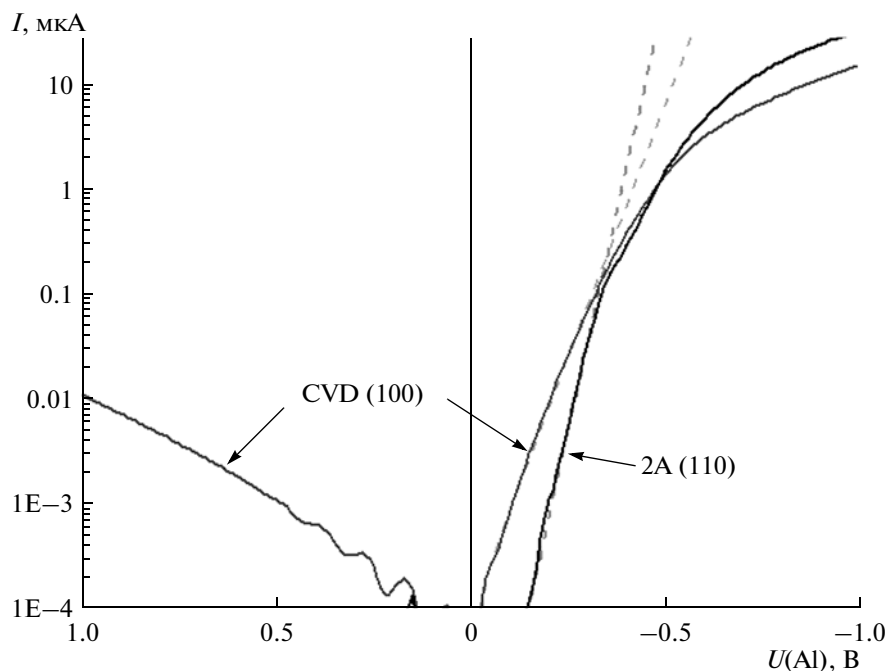


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики Al-контактов на гидрированной поверхности образцов. Штриховыми прямыми показана экспоненциальная экстраполяция на участке 0...–0.3 В.

точных измерений необходима пассивация проводящей поверхности с контактами.

3. ТРАНЗИСТОР

Последовательность технологических операций изготовления полевого транзистора на гидрированных алмазах приведена в [7, 27]. Несмотря на относительную простоту процесса, существует ряд особенностей, затрудняющих изготовление. Во-первых, формирование проводящей поверхности происходит при температуре около 900°C, которую не выдерживают большинство контактов. Поэтому сначала необходимо провести операцию гидрирования поверхности. Во-вторых, гидрированная поверхность не выдерживает воздействия плазмы и окисляющих кислот. Это ограничивает возможность применения сильных травителей, плазменной зачистки и магнетронного напыления контактов. В-третьих, слабая адгезия контактов на гидрированной поверхности часто приводит к их отслаиванию при различных операциях, в частности, при ультразвуковой очистке.

В данной работе был изготовлен полевой транзистор на гидрированной поверхности природного 2А алмаза с ориентацией поверхности (110). Схема транзистора приведена на рис. 4а. Последовательность операций в общих чертах повторяет приведенную в работе [26], за исключением материала омических контактов. После механической полировки поверхности кристалл подвергали отжигу в атмосфере водорода при температуре

900°C в течение 20 мин для формирования гидрированной поверхности. Затем на всю поверхность кристалла наносили слой Cu толщиной около 200 нм методом резистивного испарения в вакууме. После этого с помощью фотолитографии металл вытравливался вне активной зоны транзистора (на рис. 4а активная зона обведена пунктирной линией). Затем с целью изоляции активной зоны образец обрабатывали в воздушной плазме при давлении 0.4 Торр в течение 1 мин, что уничтожало водородную поверхность на открытых участках, но сохраняло ее на активной зоне, защищенной слоем Cu. На обработанный таким образом образец наносили маску из фоторезиста с окном под затвор. Затем осуществляли травление Cu в области под затвором с подтравливанием под края резиста, чтобы обеспечить зазор между контактами затвора и истока–стока. Методом резистивного испарения в вакууме на образец осаждался слой Al толщиной 60 нм, после чего резист удалялся. Для измерений к контактам присоединяли проволоку с помощью серебряной контактной пасты (контактол). Длина затвора $L = 35$ мкм, ширина $W = 1$ мм, зазоры исток–затвор и затвор–сток около 75 мкм.

На рис. 4б представлена вольт-амперная характеристика изготовленного образца. В диапазоне напряжений сток–исток 0...–10 В и затвор–исток 0...–5 В изготовленный образец демонстрировал основные свойства полевых транзисторов, а именно: модуляцию тока напряжением затвора, перекрытие канала и насыщение. Данный обра-

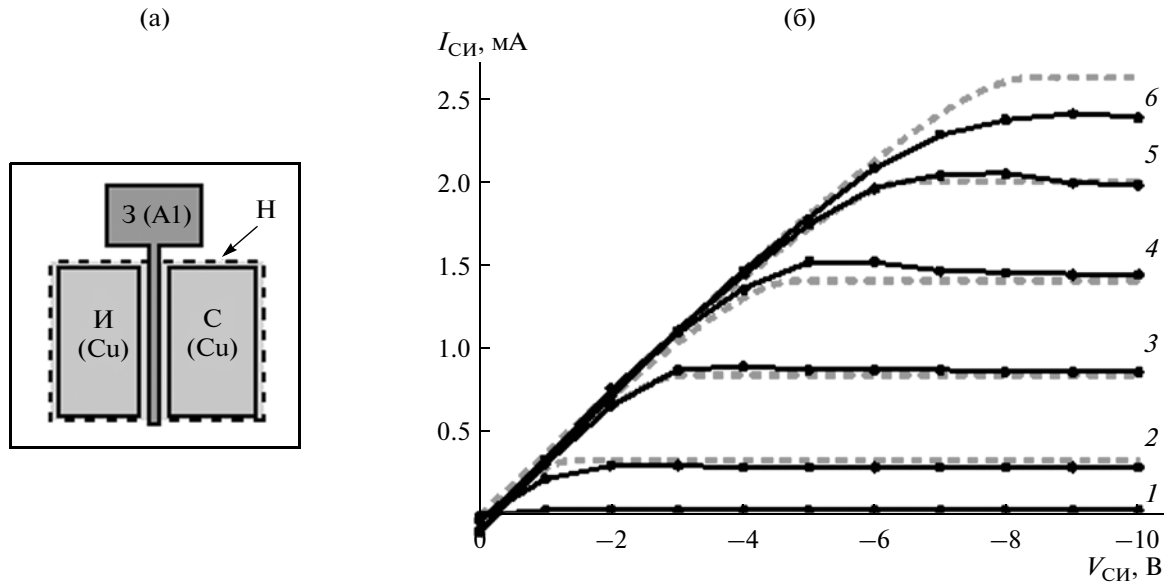


Рис. 4. Схема полевого транзистора на гидрированной поверхности алмаза (а) и вольт-амперная характеристика изготовленного образца (б) (сплошные линии – эксперимент, штриховые – расчет по модели плавного канала), $V_{зи} = 0$ (1), -1 (2), -2 (3), -3 (4), -4 (5), -5 В (6).

зец демонстрирует малые утечки через затвор, а именно малый ток при нулевом напряжении стока и отсутствие наклона ВАХ в режиме насыщения.

Приведенные вольт-амперные характеристики хорошо описываются моделью плавного канала, где контакт затвора и проводящий канал представляются как обкладки конденсатора с поверхностной емкостью C_i и меняющимся потенциалом под затвором. Также необходимо учитывать сопротивление R участка исток–затвор и затвор–сток. Формулы для тока исток–сток

$$I_{си} = \frac{A}{2} \begin{cases} \frac{V_{си}(2V_{зи} - V_{си})}{1 + AR(2V_{зи} - V_{си})}, \\ V_{си} < V_{нас} = \frac{1 + 2ARV_{зи} - \sqrt{1 + 2ARV_{зи}}}{AR}, \\ \left(\frac{\sqrt{1 + 2ARV_{зи}} - 1}{AR} \right)^2, & V_{си} > V_{нас}, \end{cases} \quad (1)$$

$$A = \mu C_i \frac{W}{L}$$

определяются двумя параметрами – A и R . На рис. 3 представлена экспоненциальная экстраполяция, рассчитанная по формуле (1) с параметрами $A = 2 \text{ кОм}^{-1}$, $R = 1.3 \text{ кОм}$, что соответствует поверхностному сопротивлению 17 кОм . Если считать, что поверхностная емкость барьерного слоя алюминий–гидрированный алмаз равна $C_i = 1 \text{ мкФ/см}^2$, как следует из измерений вольт-фарадных характеристик в [22], то подвижность получается равной $\mu = 70 \text{ см}^2/(\text{В с})$.

Если барьерный слой имеет структуру алмаза с диэлектрической константой $\epsilon = 5.7$, то удельная емкость 1 мкФ/см^2 соответствует толщине слоя 5 нм . Максимальное напряжение затвора, при котором производились измерения, $V_{зи} = -5 \text{ В}$. После вычета падения напряжения на зазоре исток–затвор разность потенциалов между контактом затвора и проводящим каналом со стороны истока равна 1.6 В . Таким образом, в рамках данной модели напряженность в диэлектрическом барьере в данном режиме составляет 30 МВ/см , что даже превышает теоретическую напряженность пробоя алмаза (данный расчет не учитывает поверхностный потенциал алмаза, который согласно рис. 2 может достигать 0.5 В). Действительно, после подачи напряжения затвора $V_{зи} = -7 \text{ В}$ (на других образцах транзисторов) результаты предыдущих измерений воспроизвести не удалось: последующие измерения демонстрировали большие утечки через затвор, что свидетельствует о пробое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продemonстрирована возможность создания полевого транзистора на гидрированной поверхности алмаза. Рассмотрена технология получения и свойства проводящей гидрированной поверхности алмаза. Наилучшие результаты (подвижность $150...200 \text{ см}^2/(\text{В с})$) были получены при термообработке (100) CVD алмазных слоев в потоке водорода в диапазоне температур $800...1000^\circ\text{C}$. Данный метод термообработки в водороде может служить альтернативой общепринятому методу

формирования H-слоя в СВЧ-плазме водорода, как более простой и воспроизводимый. На основе этой технологии был изготовлен полевой транзистор на гидрированной поверхности природного 2A алмаза с ориентацией поверхности (110). В диапазоне напряжений сток–исток 0...–10 В и затвор–исток 0...–5 В представлена вольт-амперная характеристика изготовленного образца. На данном образце обнаружены малые токи утечки через затвор, а именно малый ток при нулевом напряжении стока и отсутствие наклона ВАХ в режиме насыщения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства промышленности и торговли РФ (госконтракт № 11411.1006800.11.297), Министерства образования и науки РФ (госконтракт № 16.513.11.3072) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 11-07-00288-а и № 12-07-00662-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Denisenko A., Kohn E.* // *Diamond Related Mater.* 2005. V. 14. P. 491.
2. *Vescan A., Gluche P., Ebert W., Kohn E.* // *IEEE Electron Device Lett.* 1997. V. 18. P. 222.
3. *Ueda K., Kasu M.* // *Japan. J. Appl. Phys.* 2010. V. 49. № 4. P. 04DF16-1.
4. *El-Hajj H., Denisenko A., Bergmaier A. et al.* // *Diamond Related Mater.* 2008. V. 17. P. 409.
5. *El-Hajj H., Denisenko A., Kaiser A. et al.* // *Diamond Related Mater.* 2008. V. 17. P. 1259.
6. *Kawarada H., Aoki M., Ito M.* // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 65. P. 1563.
7. *Hokazono A., Ishikura T., Nakamura K. et al.* // *Diamond Related Mater.* 1997. V. 6. P. 339.
8. *Kasu M., Ueda K., Yamauchi Y. et al.* // *Diamond Related Mater.* 2007. V. 16. P. 1010.
9. *Ueda K., Kasu M., Yamauchi Y. et al.* // *IEEE Electron Device Lett.* 2006. V. 27. P. 570.
10. *Kasu M., Ueda K., Ye H. et al.* // *IEEE Electron Lett.* 2005. V. 41. P. 1249.
11. *Hirama K., Tsuge K., Sato S. et al.* // *Appl. Phys. Express.* 2010. V. 3. № 4. P. 044001-1.
12. *Kueck D., El-Hajj H., Kaiser A., Kohn E.* // *Diamond Related Mater.* 2008. V. 17. P. 732.
13. *Kasu M., Sato H., Hirama K.* // *Appl. Phys. Express.* 2012. V. 5. № 2. P. 025701-1.
14. *Imura M., Hayakawa R., Ohsato H. et al.* // *Diamond Related Mater.* 2012. V. 24. P. 206.
15. *Landstrass M.I., Ravi K.V.* // *Appl. Phys. Lett.* 1989. V. 55. P. 975.
16. *Kawarada H.* // *Surface Sci. Reports.* 1996. V. 26. P. 205.
17. *Ristein J., Maier F., Riedel M. et al.* // *Diamond Related Mater.* 2001. V. 10. P. 416.
18. *Sato H., Kasu M.* // *Diamond Related Mater.* 2012. V. 24. P. 99.
19. CVD diamond eShop <http://www.e6cvd.com/>
20. *Hirama K., Takayanagi H., Yamauchi S. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. № 11. P. 112107-1.
21. *Rezek B., Sauerer C., Nebel C.E. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82. P. 2266.
22. *Kubovic M., Kasu M., Yamauchi Y. et al.* // *Diamond Related Mater.* 2009. V. 18. P. 796.
23. *Tsugawa K., Noda H., Hirose K., Kawarada H.* // *Phys. Rev. B.* 2010. V. 81. P. 045303-1.
24. *Hayashi K., Yamanaka S., Watanabe H. et al.* // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 81. P. 744.
25. *Takeuchi D., Yamanaka S., Watanabe H. et al.* // *Appl. Surf. Sci.* 2000. V. 159–160. P. 572.
26. *Nebel C.E., Rezek B., Shin D., Watanabe H.* // *Physica Status Solidi.* 2006. V. 203. P. 3273.
27. *Гуляев Ю.В., Бугаев А.С., Митягин А.Ю. и др.* // *Успехи совр. радиоэлектроники.* 2011. № 12. С. 3.