

УДК 53

А.Э.Набиев

*Азербайджанский государственный педагогический университет
asaf.fizik@mail.ru*

ПОЛУЧЕНИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛМАЗНЫХ СТРУКТУР

Ключевые слова: алмазные структуры, ионная имплантация, парофазное химическое осаждение, легирование бором, электрофизические свойства, полевой транзистор

Определены оптимальные технологические условия формирования алмазных структур и представлены электрофизические параметры структур, полученных при различных режимах ионной имплантации бора в кристалл и последующего отжига. Показана возможность создания полевого транзистора на гидрированной поверхности алмаза.

А.Ə.Nəbiyev

ALMAZ QURULUŞLARIN ALINMASI VƏ ELEKTROFİZİKİ XASSƏLƏRİ

Açar sözlər: *almaz quruluşlar, ion implantasiya, kimyəvi buxar yağıntı, borla doldurma, elektrofiziki xassələr, sahə effektiv tranzistor*

Almaz quruluşlarının formalaşdırılmasının texnoloji şərtləri və Bor atomlarının bu kristallara müxtəlif rejimlərdə implantasiyası rejimləri işlənmiş, həmin quruluşların elektrofiziki parametrləri təyin edilmişdir. Almazın hidrogenləşmiş səthində sahə effektiv tranzistorların alınma imkanları göstərilmişdir.

A.A.Nabiyev

OBTAINING AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF DIAMOND STRUCTURES

Keywords: *diamond structures, ion implantation, chemical vapor deposition, doping with boron, electrophysical properties, field-effect transistor*

The optimal technological conditions for the formation of diamond structures were determined and the electrophysical parameters of the structures obtained under various modes of ion implantation of boron into a crystal and subsequent annealing are presented. The possibility of creating a field effect transistor on the hydrogenated diamond surface is shown.

Введение

В настоящее время технология микроэлектромеханических систем является одним из самых революционных направлений в разработке изделий сверхвысокочастотного (СВЧ)-диапазона. Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к современным и перспективным изделиям СВЧ-техники, является повышение их функциональности, рабочей частоты и уровня интеграции одновременно с снижением их веса, объёма, потребляемой мощности и стоимости. Одним из наиболее перспективных материалов, на основе которого могут быть построены различные приборы и устройства микро- и наноэлектроники, считается алмазные пленки [1; 2].

Алмаз является уникальным материалом, обладающим набором непревзойденных характеристик. В частности, отмечаются превосходящие, по сравнению с другими полупроводниками, свойства алмаза: большая ширина запрещенной зоны, высокая подвижность носителей заряда и их малое время жизни, очень большое темновое сопротивление и высокая электрическая прочность, высокая теплопроводность, а также низкий уровень собственных шумов и высокое быстродействие, повышенная температурная и радиационная стойкость, высокая химическая устойчивость, позволяющая работать алмазным приборам в неблагоприятных условиях. Химическая инертность алмаза позволяет обеспечить таким покрытиям, осаждаемым из газовой фазы, дополнительную защиту при функционировании в агрессивных средах. Уникальная совокупность физических свойств алмаза несомненно, приведет к его широкому применению в энергетике, микроэлектронике и других областях новой техники [3; 4].

Прочность и твердость алмаза связана с высокой плотностью атомов углерода в решетке и сильными ковалентными связями между ними. Высокая теплопроводность алмаза обусловлена исключительно сильной межатомной связью, легкой массой углерода и простой структурой его кристаллической решетки со слабым ангармонизмом. За счет рекордной теплопроводности алмаз является лучшим материалом для разного рода теплоотводов [5; 6], успешно используется и в качестве пассивных элементов электроники. Например, уже достаточно давно применяются дискретные теплоотводы для полупроводниковых приборов – лавинно-пролетных, лазерных и диодов Гана.

Несмотря на достаточно длительный период исследований, приборы на природном алмазе не получили широкого распространения. Трудности возникают из-за того, что не существует двух одинаковых кристаллов, поэтому свойства каждого такого прибора являются уникальными, что не является преимуществом для серийного производства и приборы на

природном алмазе экономически не выгодно. Поэтому крайне важно использовать синтетический алмаз в производстве. Необходимость использовать в производстве именно синтетический алмаз ставит перед исследователями задачу получения алмаза с требуемыми и необходимыми свойствами.

Искусственные монокристаллы, выращиваемые в аппаратах высокого давления и высокой температуры (HighPressureHighTemperature - HPHT метод), все еще не имеют достаточно высокого качества, как природные алмазы, поэтому пока не получили широкого распространения для изготовления приборов на их основе. На сегодняшний день единственным методом получения искусственных монокристаллических алмазных слоев с высоким качеством, повторяющимся от кристалла к кристаллу, является способ химического осаждения из газовой фазы (chemicalvapordeposition – CVD) в плазмохимических реакторах с активацией углеродсодержащего газа плазмой СВЧ разряда [6]. Совершенствование технологии CVD алмаза приводит к снижению стоимости выращивания алмаза и расширяет круг его применения. Слабой стороной данного метода выращивания алмазных пленок является достаточно малая скорость роста (1-2 мкм/час) пленок.

Методика получения алмазоподобных пленок

Термодинамическое ограничение в методе CVD обходится использованием процесса с участием реагентов с высоким химическим потенциалом. Обычно в качестве активного реагента выступает атомарный водород, иногда кислород, хотя нет причин, запрещающих использование других активных химических реагентов. Атомарный водород (H), имеющий высокий химический потенциал, образуется в процессе термической или плазменной активации реагентов. Он участвует в нескольких реакциях, каждая из которых термодинамически выгодна и сопровождается уменьшением свободной энергии Гиббса. В результате этих процессов образуется алмаз, а атомарный водород (H) либо участвует в образовании углеводородов, либо возвращается в молекулярную форму (H_2) с выделением энергии, полученной от плазмы или от горячего катода.

Пленки наносились на монокристаллическую кремниевую подложку CVD методом. Данный метод позволяет эффективно управлять параметрами процесса формирования пленок, а именно: изменять остаточное давление в диапазоне $0,8 \div 1,33$ Па ($6 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст.); температуру подложки в диапазоне $500 \div 900$ °С; мощность излучения газового разряда в диапазоне $50 \div 300$ Вт; использовать различные газовые и жидкие реакционные среды.

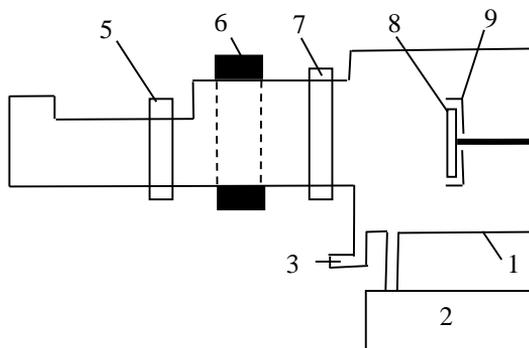


Рис. 1. Схема установки для формирования алмазоподобных пленок в плазме газового разряда низкого давления: 1) реакционная вакуумная камера; 2) система вакуумной откачки; 3) ввод подачи рабочего газа; 4) СВЧ магнетрон; 5) циркулятор; 6) соленоид; 7) прозрачное окно, для излучения СВЧ; 8) подложка; 9) нагреватель подложки

Технология формирования пленок на подложке осуществляется путем разложения в СВЧ-разряде газовой смеси $CH_4 - H_2$ при концентрации 2 % CH_4 - 98 % H_2 и остаточном давлении $\sim 0,27$ Па с последующим осаждением алмазоподобного слоя (выращивание) при высокой температуре подложки [7].

На рис. 1 схематически представлена установка для получения алмазоподобных пленок в плазме газового разряда низкого давления, которая состоит из реакционной камеры – 1, системы вакуумной откачки – 2, газовой системы подачи реакционной смеси – 3, магнетрона – 4, циркулятора – 5, соленоида – 6, диэлектрического окна – 7, прозрачного для прохождения излучения СВЧ магнетрона. В вакуумной реакционной камере – 1, представляющей цилиндр, установлен нагреваемый держатель подложки – 9 с подложкой – 8, который может перемещаться вдоль оси реакционной камеры. Температура подложки – 8 контролируется с точностью 3 °С. Вакуумная система – 2 обеспечивает остаточное давление в реакционной камере не выше $\sim 6,7 \cdot 10^{-3}$ Па. Система подачи реакционной смеси – 3 позволяет одновременно использовать несколько видов рабочих сред. В качестве источника излучения используется магнетрон М-105, работающий на частоте 2,45 ГГц с максимальной мощностью 300 Вт. Циркулятор – 5 гасит отраженную волну магнетрона – 4. Зона газового разряда в реакционной камере находится на расстоянии 80 мм от диэлектрического окна – 7. Для стабилизации газового разряда используется соленоид – 6 с магнитным полем 2,5 Тл.

Перед началом процесса осаждения АП давление в реакционной вакуумной камере – 1 установки рис. 1 понижается до значения $\sim 9 \cdot 10^{-3}$ Па при помощи вакуумной системы – 2. В это время подложка – 8 нагревается до заданной температуры (500...900 °С). Затем включается магнетрон – 4 при мощности излучения генератора 200 Вт и в камеру – 1 напускается рабочая газовая смесь состава $CH_4 - H_2$ до остаточного давления в пределах $0,14 \div 0,4$ Па. Под воздействием излучения магнетрона в камере – 1 зажигается ВЧ-плазма разряда, в которой протекают реакции ионизации и разложения рабочей газовой смеси $CH_4 - H_2$. Вследствие плазмохимических реакций на подложке из монокристаллического кремния КДБ-12 с ориентацией [100] осаждается алмазоподобное покрытие. Время нанесения алмазоподобного покрытия определяется от заданной величины толщины наносимого слоя пленки и составляет $50 \div 120$ мин.

Для контроля толщины получаемой АП использовался ряд методов. При толщине алмазоподобной пленки, превышающей 1 мкм использовался интерференционный метод, реализованный в микроскопе «МИИ-4», на длине световой волны $\lambda = 605$ нм с абсолютной погрешностью, не превышающей 20 нм. Пленки нанометровых толщин контролировались с помощью электронного и атомно-силового микроскопов. Структура алмазоподобных пленок контролировалась с помощью дифрактограмм и электронограмм, снятых на установке ДРОН-4, а также по SiK_{α} -излучению.

Экспериментально установлено, что получаемые в СВЧ-плазме разряда пленки алмазоподобной структуры формируются при разложении газовой смеси $CH_4 - H_2$ с концентрацией 2 % CH_4 -98 % H_2 при остаточном давлении $\sim 0,27$ Па и температуре подложки ~ 900 °С. Рентгенографические исследования полученных АП показали, что их структура имеет компоненты кубического алмаза с преимущественной ориентацией [100].

Электрофизические свойства алмаза

Легирование алмаза занимает центральное место в полупроводниковой алмазной технологии. В качестве технологии микрообработки алмазных материалов нами выбран процесс ионной имплантации. Процесс ионной имплантации широко применяется в электронике при легировании полупроводниковых материалов различными примесями. Преимуществом ионной имплантации по сравнению с другими методами является возможность внедрения контролируемой дозы ионов легирующей примеси вплоть до предела растворимости. Ионы

имплантируемого материала разгоняются в ионном ускорителе до энергий 10 – 5000 КэВ и внедряются образец.

Ионная имплантация приводит к разупорядочению кристаллической решетки вплоть до аморфизации и последующей графитизации. Внедрение ионов в кристаллическую решетку обрабатываемого материала приводит к появлению дефектов кристаллической структуры. Степень аморфизации кристаллической решетки и глубина залегания нарушенного слоя зависят от вида внедряемых ионов, количества ионов на единицу поверхности (дозы) и их энергии.

Поэтому необходимо проводить постимплантационные отжиги кристаллов, во-первых, для восстановления кристаллической структуры и, во-вторых, для электрической активации внедренных атомов примеси. Во время нагрева кристаллическая решетка восстанавливается, происходит эпитаксиальный рост в твердой фазе на основе кристаллической решетки, расположенной глубже, чем нарушенная ионами область.

Проблема легирования алмаза связана с высокой концентрацией атомов углерода в решетке, наибольшей из всех полупроводников, высокой энергией связи атомов и их малым атомарным радиусом. Поэтому число примесей, способных к изоморфному замещению атомов углерода в кристаллической решетке алмаза, до вольно ограничено. В качестве легирующих атомов для алмаза наиболее подходящими по соотношению радиусов являются бор, азот и фосфор. Замещающие углерод в узлах решетки атомы фосфора имеют очень малую растворимость в алмазе. Азот – донор с глубокими центрами.

В настоящее время основным методом легирования природного алмаза является ионная имплантация бора – акцепторной примеси, которая создает мелкие уровни с энергией активации $E_A = E_V + 0.37$ эВ. С практической точки зрения представляет особый интерес пространственное распределение в алмазе внедренных ионной имплантацией атомов бора. Расчет пространственного распределения имплантированных атомов бора в алмазе проводился методом SRIM-2013 (StoppingRangeinMaterial) [8].

На рис. 2. приведены распределения по глубине внедренных в алмаз с различной энергией ($E = 10-25$ кэВ) атомов бора через маску из алюминия толщиной 30–80 нм (кривые 1–4) и без маски (кривые 5–6). Толщина маски из алюминия для соответствующей энергии ионов бора подбиралась таким образом, чтобы проецированный пробег ионов бора в *Al* лежал на границе раздела маска-алмаз. Из рис. 1 видно, что в случае наличия *Al* маски максимум профиля распределения атомов бора лежит непосредственно в при поверхностном слое толщиной 15-20 нм (кривые 1–4), а “хвост” профиля (максимальный пробег ионов бора) тянется до глубины 30-50 нм.

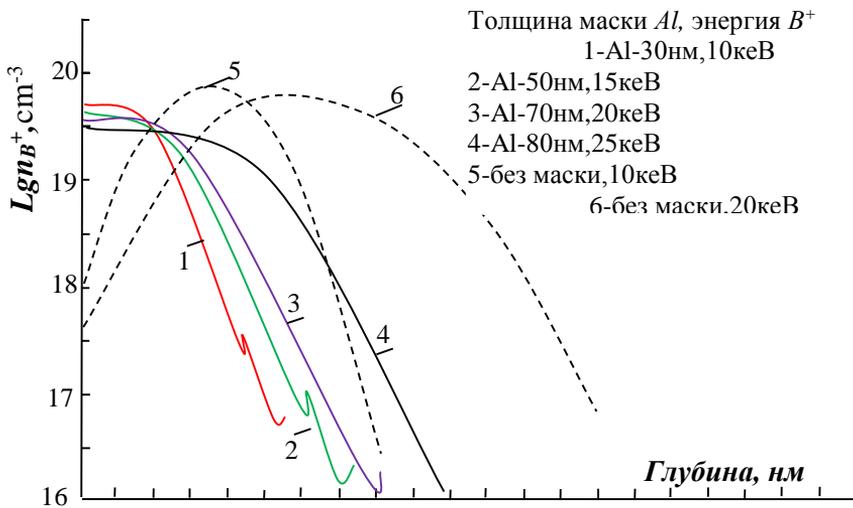


Рис.2. Распределение по глубине атомов бора, внедренных в алмаз с различной энергией через маску из Al и без маску

Имплантация ионов B⁺ в непокрытый алмаз (кривые 5 и 6) приводит к тому, что в приповерхностном слое на глубине 10 нм концентрация атомов бора почти на два порядка ниже, чем в окрестности проецированного пробега, что не позволяет создавать поверхностный δ-легированный p-канал без травления поверхности на глубину 20-30 нм.

Азот является глубоким донорным центром в алмазе с энергией активации 1,7 эВ, поэтому его вклад в электропроводность пренебрежимо мал. Как видно из рис. 2, в приповерхностной области на глубине 10 нм концентрация атомов азота, внедренных с энергией 15–20 кэВ, на порядок ниже, чем концентрация атомов бора (кривые 1–4), поэтому в этой области бор не будет перекомпенсироваться азотом и в ней сформируется δ-легированный бором p-канал. В области “хвоста” профиля распределения атомов бора концентрация азота превышает концентрацию бора, поэтому азотные донорные центры скомпенсируют акцепторные центры бора и эта область будет обладать сопротивлением, превышающим сопротивление p-канала на несколько порядков.

На рис. 3 приведены профили распределения внедренных атомов бора при имплантации с энергией 60 и 350 кэВ дозами $3 \cdot 10^{15}$ и $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Как видно из рисунка, имплантация ионов бора с высокой энергией $E = 350 \text{ кэВ}$ позволяет создать скрытые проводящие слои, а низкоэнергетическая имплантация – приповерхностные проводящие слои. В случае имплантации ионов B⁺ при

высокой энергии ($E = 350$ кэВ) постимплантационный отжиг создает проводящий захороненный слой толщиной порядка 100 нм. При энергии ионов бора 2 МэВ проводящие захороненные слои формируются на глубине 1,2 мкм. Подбирая дозу и энергию ионов бора, в объеме кристалла алмаза можно создавать захороненные сильно компенсированные, слаболегированные слои p -типа и сильнолегированные проводящие слои p^+ -типа.

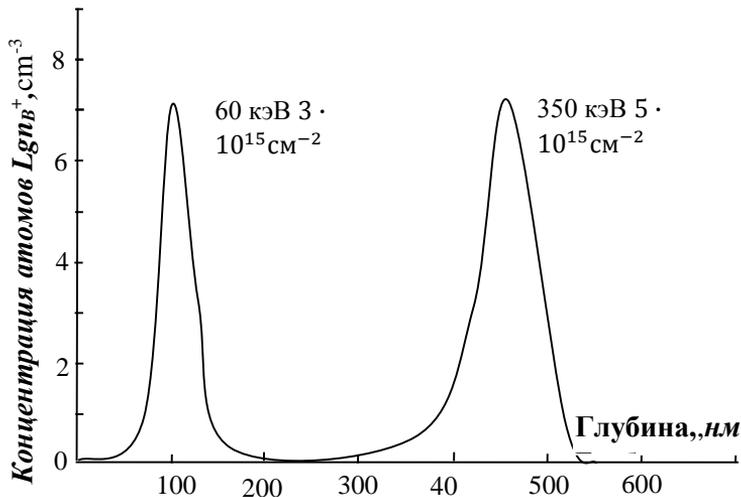


Рис.3. Распределение атомов бора в кристалле алмаза при разных режимах имплантации

Этот захороненный слой можно использовать в качестве канала МДП-транзистора, а диэлектриком в данном случае будет служить непроводящий приповерхностный слой алмаза толщиной порядка 200 нм, на котором можно сформировать металлический затвор по стандартной технологии. Реализуемость такой технологии обусловлена тем, что алмаз обладает огромным удельным сопротивлением $10^{12} \div 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, поэтому утечки тока через алмазный подзатворный диэлектрик будут незначительные.

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 [9]. Сопротивление гидрированной поверхности непосредственно после обработки плазмой довольно высоко, $\sim 10^{10} \text{ Ом/см}^2$, однако на воздухе оно падает вплоть до $\sim 10^4 \text{ Ом/см}^2$ [10]. Таким образом, проводимость связана с адсорбцией атмосферных газов гидрированной поверхностью алмаза. Недавно показано [11], что добавка

газов NO₂ и O₃ в состав воздуха может увеличить поверхностную проводимость в несколько раз.

В данной работе были использованы алмазные пластины синтетические CVD- монокристаллы [12]. Поперечный размер пластин составлял 3-3.5 мм, толщина 0.3-0.5 мм. Кристаллографическая ориентация поверхности (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.

Было установлено, что в результате отжига в водороде при атмосферном давлении в течение 30 мин, при температурах выше 700°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°C. При температуре 700°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.

Методом Ван-дер Пау исследовалась температурная зависимость удельной проводимости в интервале температур 80– 700 К. Результаты зависимости $\sigma(T)$ для всех четырех кристаллов представлены на рис. 4. Образцы 1–3 измерялись с исходной поверхностью, у четвертого кристалла легированная поверхность была частично стравлена. Образцы 1–3 имеют близкие значения проводимости. Видно, что на зависимости $\sigma(T)$ явно наблюдаются три участка с различной низкой энергией активации, которая изменяется от $E_A = 0.03$ эВ при низких температурах, до $E_A = 0.07$ эВ – при высокой температуре. Аналогичная зависимость проводимости от температуры с низкой энергией активации $E_A = 0.05 - 0.11$ эВ наблюдается в имплантированном бором с энергией 60 кэВ и высокой дозой $2 \cdot 10^{16}$ см⁻² поликристаллическом CVD алмазе (рис. 4) [13]. Увеличение энергии активации с ростом температуры авторы [14] связывают с размытием акцепторного уровня бора в легированном слое в связи с неоднородностью распределения атомов бора по глубине, которое обусловлено перекрытием пробегов ионов B^+ при разных энергиях. В областях с более высокой концентрацией бора уровень E_A мельче, с более низкой – глубже. Поэтому при низких температурах вначале начинает активироваться бор с более мелких уровней, а с ростом температуры

концентрация электрически активного бора и, следовательно, проводимость, растет за счет более глубоких центров. Подтверждением этому служит температурная зависимость проводимости у образца 4 с частично стравленным легированным слоем, которая почти на два порядка ниже проводимости образцов 1–3 (рис. 4). Меньшая проводимость стравленного слоя обусловлена распределением бора в «хвосте» пробега с более низкой концентрацией, поэтому при высоких температурах энергия активации у данного образца ($E_A = 0.11$ эВ) намного выше, чем у нетравленных образцов ($E_A = 0.07$ эВ).

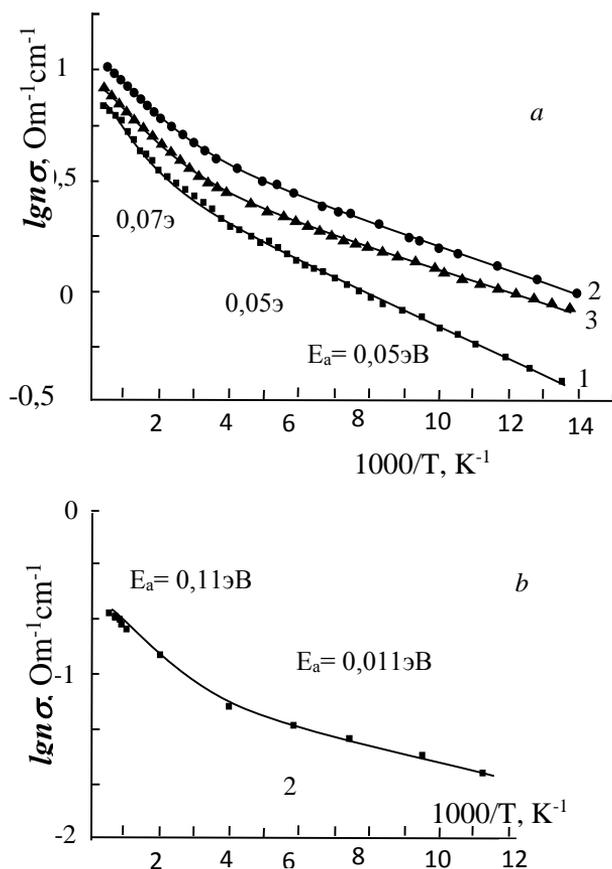


Рис.4. Зависимости удельной проводимости алмаза, легированного бором в режиме полиэнергетической имплантации ионов B^+ , от температуры, измеренные исходных образцах 1–3(а), и образце частично стравленной поверхностью (б)

Результаты холловских измерений электрофизических параметров имплантированных во втором эксперименте образцов представлены в табл. 1. Из таблицы видно, что концентрация и подвижность дырок незначительно меняется от режимов имплантации и отжига. Однако концентрация азота сильно влияет на электрофизические параметры. В связи с высокой концентрацией азота в природном алмазе трудно судить об эффективности активации внедренных атомов бора и определить степень компенсации, поскольку бор может быть связан в нейтральные донорно-акцепторные комплексы. Образец 2 (табл. 1) имеет самую низкую концентрацию азота и наибольшую концентрацию дырок. Напротив, образец 5 (табл. 1) имеет самую высокую концентрацию азота и самую низкую концентрацию дырок. В этом образце произошла сильная

компенсация электрически активного бора азотными донорными центрами. Вследствие низкой концентрации дырок в образце 5 существенно выросла их подвижность ($520 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$) по сравнению с другими кристаллами. Рекордная для имплантированных слоев подвижность дырок $1150 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ (при слоевой концентрации на порядок ниже, чем у образца 5) получена в работе [15] в CVD пленках алмаза, имплантированных бором и отожженных в режимах, аналогичных тем, что указаны в табл. 1.

Таблица 1

Электрофизические параметры кристаллов алмаза, имплантированных ионами B^+

Образец	Концентрация азота, 10^{18} см^{-3}	Доза имплантации, 10^{14} см^{-2}	Постимплантационный отжиг		Объемная концентрация дырок p , 10^{19} см^{-3}	Слоевая концентрация дырок p_s , 10^{13} см^{-2}	Подвижность дырок μ_p , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Слоевое сопротивление R_s , $\text{кОм}/\text{см}^2$
			Температура $^{\circ}\text{C}$	Время, мин				
1	1,28	30	1500	60	9.2	9.2	5	14
2	0.21	30	1500	60	280	280	2	1
3	2,72	30	1500	60	2.6	2.6	86	3
4	5,13	30	1500	60	50	50	2	5
5	15	30	1500	60	0.3	0.31	520	4
6	6,95	5	1380	1	0.89	0.89	30	24
7	6,59	5	1380	1	2.0	2.0	12	25

Таким образом, ионная имплантация больших доз ионов бора позволяет получать проводящие слои с высокой подвижностью дырок и высокой проводимостью уже при комнатной температуре, что обусловлено низкой энергией активации имплантированного бора при высокой концентрации.

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°C , при более высоких температурах проводимость начинает медленно падать.

Транзистор

Последовательность технологических операций изготовления полевого транзистора на гидрированных алмазах приведена в [16, 17]. 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. Затем с целью изоляции активной зоны образец обрабатывали в воздушной плазме при давлении 0.4 Торр в течение 1 мин, что

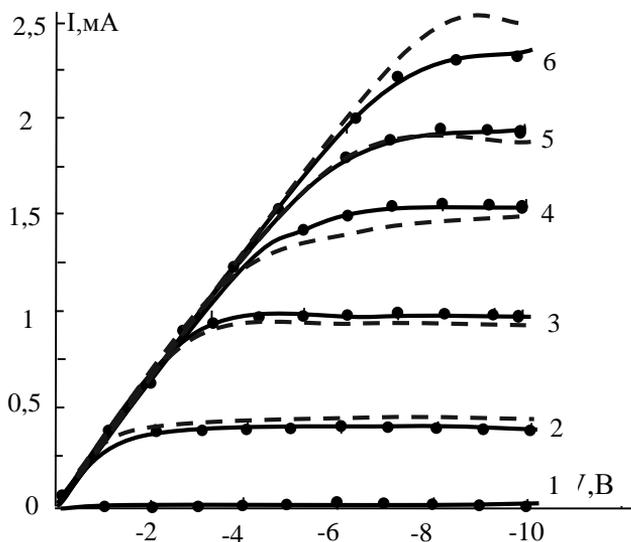


Рис.5. Вольт-амперная характеристика транзистора изготовленного на гидрированной поверхности алмаза образца (сплошные линии — эксперимента, штриховые — расчет по модели плавного канала), $V_{зи}=0$ (1), -1(2), -2(3), -3(4), -4(5), -5В(6)

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 под травлением 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. 5 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 образец 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. 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 [18], то подвижность получается равной $\mu = 70 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Если барьерный слой имеет структуру алмаза с диэлектрической константой $\varepsilon = 5.7$ 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). 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

В результате проведенных исследований процесса легирования природного алмаза методом ионной имплантации бора было установлено, что этот метод позволяет получать проводящие слои с высокой подвижностью дырок и высокой проводимостью при комнатной температуре. Гомоэпитаксиальные алмазные структуры, выращенные методом парофазного химического осаждения в плазме водорода, обладают высокими электрофизическими параметрами, которые свидетельствуют о высоком совершенстве материала, пригодного для изготовления на его основе полупроводниковых приборов, работающих в широком температурном диапазоне. Продемонстрирована возможность создания полевого транзистора на гидрированной поверхности алмаза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nazare M.H., Neves A.J. Properties, Growth and Application of Diamond.// INSPEC. The Institution of Electrical Engineers. London, 2001
2. Wort C.J.H., Balmer R.S. Diamond as an electronic material // Materials Today, 2008, vol. 11, Is. 1-2, pp.22-28
3. Iwasaki T., Kato H., Makino T. et al. High-Temperature Bipolar-Mode Operation of Normally-Off Diamond JFET // IEEE Journal of the Electron Devices Society 2017, Vol. 5, Is. 1, pp. 95-99
4. Matsumoto T., Kato H., Makino T., et al. Direct observation of inversion capacitance in p-type diamond MOS capacitors with an electron injection layer // Japanese Journal of Applied Physics 57, 04FR01, 2018
5. Ральченко В., Конов В. CVD-алмазы. Применение в электронике // Электроника: Наука, Технология. Бизнес. 2007, № 4, с.58-67
6. Хмельницкий Р.А., Талипов Н.Х., Чучева Г.В. Синтетический алмаз для и оптики М.: Из.ИКАР, 2017
7. Афанасьев М.С., Лучников П.А., Митягин А.Ю., Чучева Г.В. Технологические возможности формирования тонкопленочных гетероструктур на основе алмазоподобных и сегнетоэлектрических материалов // Вестник науки Сибири. Серия 5. Инженерные науки, 2012, № 1 (2) с.114-119
8. James F. Ziegler. The Stopping and Range of Ions in Matter // <http://www.srim.org>.
9. Kawarada H. // Surface Sci. Reports. 1996, v. 26, p.205
10. Ristein J., Maier F., Riedel M. et al.// Diamond Related Mater, 2001, v.10, p. 416
11. Sato H., Kasu M. // Diamond Related Mater. 2012, v. 24, p.99
12. Гуляев Ю.В., Чучева Г.В., Афанасьев М.С. и др. Полевой транзистор на гидрированной поверхности алмаза // Радиотехника и электроника, 2014, Т. 59, № 3, с.304–310
13. Kalish R., Uzan-Sague C., Samoiloff A., Locher R. and Koid P. // Doping of polycrystalline diamond by boron ion implantation. // Appl. Phys. Lett. 1994, v. 64. pp.2532-2534
14. Зяблук К.Н., Митягин А.Ю., Талипов Н.Х. и др. Технология создания легированных бором слоев на алмазе. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2012, № 5, с.39-43
15. Алтухов А.А., Вихарев А.Л., Горбачев А.М. и др. Исследование свойств монокристаллического алмаза, выращенного из газовой фазы на подложках из природного алмаза // ФТП, 2011, Т. 45, В. 3, с.403-407
16. Hozazono A., Ishikura T., Nakamura K. et al. // Diamond Related Mater. 1997, v. 6, p.339
17. Гуляев Ю.В., Бугаев А.С., Митягин А.Ю. и др. // Успехи совр. Радиоэлектроники, 2011, № 12, с.3
18. Kubovic M., Kasu M., Yamauchi Y. et al. // Diamond Related Mater, 2009, v.18, p.796