

Полевой СВЧ-транзистор на основе алмаза с δ -легированным бором каналом

¹Алтухов А.А., ²Талипов Н.Х., ²Чучева Г.В.

¹ООО «ПТЦ УралАлмазИнвест»

г. Москва, 121108, Российская Федерация

uai-co@yandex.ru

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники

им. В.А. Котельникова РАН

г. Фрязино Московской области, 141196, Российская Федерация

niyazt@yandex.ru

Аннотация: Рассматривается новый метод формирования на поверхности алмаза δ -легированного р-канала полевого СВЧ-транзистора низкоэнергетической ионной имплантацией бора через маску из Al и азота – без маски, в результате которой в алмазе формируется δ -слой р-типа толщиной ~ 10 нм за счет компенсации бора азотом на “хвосте” профиля распределения атомов бора. Приводятся рассчитанные методом SRIM профили распределения в алмазе имплантированных ($E = 10\text{--}25$ кэВ) через маску из Al атомов бора и без маски – атомов азота, а также технологический маршрут формирования СВЧ-транзистора.

Ключевые слова: широкозонные полупроводники, ионная имплантация в алмаз, дельта-легирование алмаза, алмазный СВЧ-транзистор.

1. Введение

Уникальные свойства алмаза по сравнению с другими широкозонными полупроводниками SiC и GaN такие, как высокая подвижность электронов $4500\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и дырок $3800\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, а также соответствующие скорости дрейфа в насыщении $(1,5\text{--}2,7)\cdot 10^7$ и $(0,85\text{--}1,2)\cdot 10^7$ см/с, рекордная теплопроводность $22\text{ Вт}/(\text{см}\cdot\text{К})$, высокая напряженностью электрического поля пробоя и сравнительно низкая диэлектрическая проницаемость при удельном сопротивлении нелегированного материала $\sim 10^{16}$ Ом·см, делают алмаз перспективным материалом для мощных СВЧ-приборов [1]. Разработка технологии выращивания пластин CVD алмаза [2] позволяет производить алмазные транзисторы в промышленном масштабе. Легированный бором CVD алмаз обладает необходимыми электрофизическими параметрами для изготовления полевых СВЧ-транзисторов. В настоящее время основным методом легирования алмаза является ионная имплантация бора –

акцепторной примеси, которая создает уровни с энергией активации $E_A = E_V + 0,37$ эВ. Преимуществом ионной имплантации по сравнению с другими методами является возможность внедрения контролируемой дозы ионов легирующей примеси вплоть до предела растворимости. Данный метод, с целью отжига созданных ионной бомбардировкой нарушений кристаллической структуры и электрической активации внедренных атомов бора, требует очень больших температур постимплантационного отжига вплоть до 1600 °С в высоком вакууме, предотвращающем графитизацию алмаза [3], либо при отжиге методом высоких давлений и высокой температуры, (так называемый метод НРНТ), с помощью которого был создан полевой СВЧ-транзистор на имплантированном бором CVD алмазе [4]. Альтернативными ионной имплантации бора методами создания δ -легированного p -слоя на алмазе являются трудно контролируемый плазмохимический метод легирования бором в процессе роста CVD алмаза [5] и гидрирование поверхности [6], позволяющее создавать полевые СВЧ-транзисторы [7].

Однако метод создания p -канала полевых СВЧ-транзисторов с помощью высокоэнергетической ($E \geq 50$ кэВ) ионной имплантации бора [4], в результате которой толщина легированного слоя составляет несколько десятков нанометров, требует введения дополнительного ионно-лучевого травления имплантированного канала транзистора с целью его утонения, что является трудно контролируемым процессом на алмазе.

В данной работе приводятся профили распределения в алмазе внедренных с низкой энергией атомов бора и азота, а также технологический маршрут формирования СВЧ-транзистора.

2. Ионная имплантация бора и азота в алмаз

Расчет пространственного распределения имплантированных атомов бора и азота в алмазе проводился методом SRIM-2013 [8].

На рис. 1. приведены распределения по глубине внедренных в алмаз с различной энергией ($E = 10\text{--}25$ 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 приповерхностном слое толщиной 15–20 нм (кривые 1–4), а “хвост” профиля (максимальный пробег ионов бора) тянется до глубины 30–50 нм.

Имплантация ионов B^+ в непокрытый алмаз (кривые 5 и 6) приводит

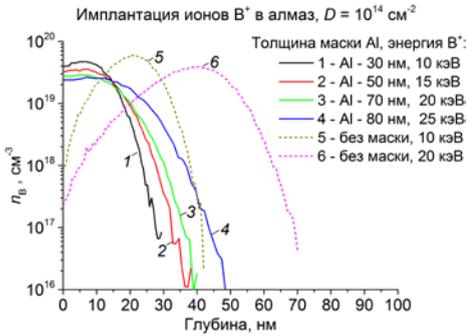


Рис. 1. Распределение по глубине атомов бора, внедренных в алмаз с различной энергией через маску из Al и без маски

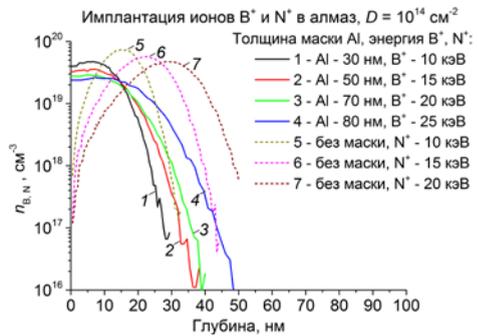


Рис. 2. Распределение по глубине внедренных в алмаз с различной энергией через маску из Al атомов бора и без маски – атомов азота

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.

На рис. 2 приведены пространственные распределения внедренных в алмаз с различной энергией ($E = 10\text{--}25$ кэВ) атомов бора через маску из алюминия толщиной 30–80 нм (кривые 1–4) и атомов азота с энергией 10–20 кэВ – без маски (кривые 5–7). 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 (кривые 6 и 7), 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 компенсируют акцепторные центры бора и эта область будет обладать сопротивлением, превышающим сопротивление p -канала на несколько порядков.

3. Полевой транзистор с δ -легированным бором каналом

На рис. 3 приведена схема полевого транзистора на алмазе с δ -легированным бором каналом. Технологический маршрут изготовления транзистора состоит из следующих основных операций:

1. Фотолитография – формирование меток совмещения.
2. Фотолитография – изготовление окна в фоторезисте под ионную имплантацию азота в компенсирующую область под затвором.
3. Имплантация ионов N^+ с энергией $E = 15\text{--}20$ кэВ, дозой $D = (1\text{--}3)\cdot 10^{14}$ см $^{-2}$. Удаление фоторезиста.
4. Напыление алюминия толщиной 50–70 нм.
5. Имплантация ионов B^+ с энергией $E = 15\text{--}20$ кэВ, дозой $D = (1\text{--}3)\cdot 10^{14}$ см $^{-2}$.
6. Фотолитография – вскрытие окон в фоторезисте над областями стока и истока под ионную имплантацию бора.
7. Имплантация ионов B^+ с энергией $E = 15\text{--}20$ кэВ, дозой $D = 1\cdot 10^{15}$ см $^{-2}$. Удаление фоторезиста и маски из Al.
8. Активационный отжиг методом НРНТ при $P \sim 7$ ГПа и $T = 1350$ °С.
9. Формирование контакта затвора Шоттки (платина или алюминий).
10. Формирование контактов истока и стока (золото с подслоем титана).

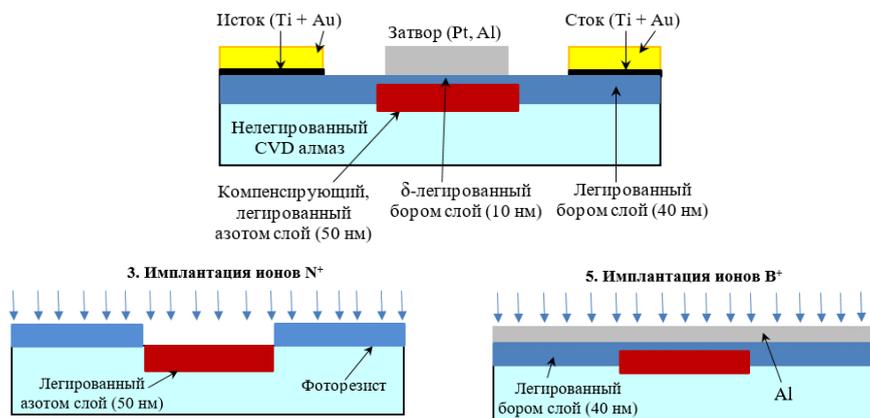


Рис. 3. Схема полевого транзистора на алмазе с δ -легированным бором каналом и затвором Шоттки и основные технологические операции его изготовления (согласно маршруту): 3 – имплантация ионов N^+ в окно в фоторезисте; 5 – имплантация ионов B^+ через маску из Al

С целью уменьшения сопротивления контактов истока и стока, эти области дополнительно легируются бором (формируются p^+ -области истока и стока за счет существенного уменьшения энергии активации бора при высокой его концентрации). Контакты затвора, истока и стока изготавливаются стандартными технологическими методами фотолитографии и напыления металлов.

Активационный отжиг методом НРНТ позволяет активировать до 7% внедренных атомов бора, что гораздо выше, чем при вакуумном отжиге [9]. В отличие от отжига в вакууме, метод НРНТ не приводит к формированию графитизированного слоя на поверхности алмаза толщиной в несколько десятков нанометров, тем самым сохраняется сформированный ионной имплантацией бора δ -легированный p -слой.

4. Заключение

Таким образом, в предлагаемом методе вначале в алмаз проводится имплантация ионов N^+ (азот – донор) с энергией 15–20 кэВ дозой $(1-3) \cdot 10^{14}$ $см^{-2}$. Затем на поверхность алмаза напыляется маска из алюминия толщиной от 50 до 70 нм, через которую проводится имплантация ионов B^+ с энергией 15–20 кэВ дозой $(1-3) \cdot 10^{14}$ $см^{-2}$. Энергия ионов B^+ выбирается в зависимости от толщины маски таким образом, чтобы проецированный пробег ионов бора в Al лежал на границе раздела маска-алмаз. В результате в алмазе формируется δ -легированный низкоэнергетическими (значительная часть энергии теряется в Al) ионами B^+ слой толщиной ~ 10 нм за счет компенсации бора азотом на “хвосте” профиля распределения атомов бора.

Список литературы

- [1] Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. – М.: ТЕХНОСФЕРА. 2011. С. 186-199.
- [2] CVD Diamond for Electronic Devices and Sensors / ed. By R.S. Sussmann, John Wiley and Sons. 2009.
- [3] Вавилов В.С. Возможности и ограничения ионной имплантации в алмаз и их сопоставление с другими методами введения электрически активных примесей // УФН. 1994. Т. 164. № 4. С. 429-433.
- [4] Kenji Ueda and Makoto Kasu. High temperature operation of boron-implanted diamond field-effect transistors // Japanese Journal of Applied Physics. 2010. V. 49. P. 04DF16-1-04DF16-4.
- [5] Shiomi H., Nishibayashi Y., Toda N., Shikata S.I., Pulse-doped diamond p -channel metal semiconductor field-effect transistor // Electr. Dev. Lett., IEEE. 1995. V. 16. P. 36-38.
- [6] Алтухов А.А., Афанасьев М.С., Зяблюк К.Н., Митягин А.Ю., Талипов Н.Х., Чучева Г.В. Формирование дельта-легированного водородом p -слоя в природных и CVD кристаллах алмаза // Техн. и констр. в электронной аппаратуре. 2011. № 5. С. 14-16.
- [7] Гуляев Ю.В., Митягин А.Ю., Чучева Г.В., Афанасьев М.С., Зяблюк К.Н., Талипов Н.Х., Недосекин П.Г., Набиев А.Э. Полевой транзистор на гидрированной поверхности алмаза // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. № 3. С. 304-310.
- [8] James F. Ziegler. The Stopping and Range of Ions in Matter // <http://www.srim.org>.
- [9] Ueda K and Kasu M. High-pressure and high-temperature annealing effects of boron-implanted diamond // Diamond & Related Materials. 2008. V. 17. P. 502-505.