

К. т. н. А. А. АЛТУХОВ, к. ф.-м. н. М. С. АФАНАСЬЕВ,
к. ф.-м. н. К. Н. ЗЯБЛЮК, д. ф.-м. н. А. Ю. МИТЯГИН,
к. ф.-м. н. Н. Х. ТАЛИПОВ, д. ф.-м. н. Г. В. ЧУЧЕВА

УДК 621.382.3

Россия, г. Москва, ПТЦ “УралАлмазИнвест”;
Военная академия ракетных войск стратегического назначения;
г. Фрязино, Филиал ИРЭ РАН им. В. А. Котельникова
E-mail: alexandr-mityagin@yandex.ru; 208_otd@mail.ru

Дата поступления в редакцию
19.05 2011 г.

ФОРМИРОВАНИЕ ДЕЛЬТА-ЛЕГИРОВАННОГО ВОДОРОДОМ *p*-СЛОЯ В ПРИРОДНЫХ И CVD-КРИСТАЛЛАХ АЛМАЗА

Исследованы электрофизические параметры и термическая стабильность дельта-легированных водородом слоев в природных и выращенных методом CVD кристаллах алмаза. Показана возможность создания барьеров Шоттки на гидрированной поверхности алмаза, термообработанного в потоке водорода.

Развитие технологий использования алмазных материалов является актуальным и современным направлением в электронике [1]. Алмаз — перспективный материал для создания СВЧ-транзисторов, поскольку обладает максимальной подвижностью дырок ($3800 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) в изотопически чистом алмазе) и максимальными дрейфовыми скоростями носителей заряда среди других материалов современной электроники [2]. Расчеты показывают, что в перспективе СВЧ-транзисторы на алмазе превзойдут по совокупности параметров все другие СВЧ полупроводниковые транзисторные аналоги. Все это определяет лидирующее место алмаза и формирует круг прикладных задач для СВЧ-электроники и технологий двойного назначения. Было обнаружено [3], что алмазные пленки, выращенные методом химического напыления (CVD) в атмосфере водорода, обладают поверхностной проводимостью *p*-типа. Исследования [4] показали, что такая поверхность насыщена С–Н-связями, поэтому она получила название гидрированной поверхности или Н-поверхности. Модулируемая поверхностная проводимость Н-слоя позволяет изготовить полевой транзистор, если для контактов истока и стока выбрать металл, образующий омический контакт (обычно это Au), а для контакта затвора — металл, образующий барьер Шоттки (обычно Al).

Для изготовления мощного полевого СВЧ-транзистора на алмазе необходима проводящая поверхность с большой поверхностной плотностью носителей заряда (но не превышающей 10^{13} см^{-2}) и максимально высокой их подвижностью. С целью определения оптимальных условий для образования про-

водящей гидрированной поверхности алмаза с указанными характеристиками и условий ее стабильности были проведены эксперименты по отжигу алмазных образцов в атмосфере водорода при температуре $700\text{—}1000^\circ\text{C}$, их обработке в ВЧ-плазме водорода при температуре 750°C и последующему отжигу в атмосфере аргона или в вакууме при температуре $300\text{—}500^\circ\text{C}$.

Экспериментальные результаты

В качестве образцов использовались пластины (110) природного алмаза 2А-типа и пленки (110) алмаза, выращенные методом CVD. Концентрация примесного азота в природном алмазе и в пленках составляла $(0,5\text{—}1)\cdot 10^{18}$ и $(0,6\text{—}1)\cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, соответственно. Удельное сопротивление нелегированных кристаллов изменялось в интервале $10^{13}\text{—}10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Поверхность кристаллов алмаза обоих типов механически полировалась. Шероховатость обработанной поверхности, измеренная на сканирующем зондовом микроскопе фирмы “NT-MTD” и профилометре “Dektak-8”, составляла $0,5\text{—}2,0 \text{ нм}$. Этого было достаточно для формирования поверхностного дельта-легированного *p*-слоя. Кристаллы алмаза подвергались термообработке в кварцевой трубе в потоке осушенного, атомарно-чистого водорода при температуре $700\text{—}1000^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. Также проводилась обработка образцов в плазме СВЧ-разряда (с частотой $2,45 \text{ ГГц}$) водорода при температуре $T=750^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. Схема эксперимента по плазменной обработке была аналогична описанной в [6]. Изохронные отжиги обработанных в водороде образцов проводились в атмосфере аргона при $T=300\text{—}500^\circ\text{C}$ в течение 1 часа или в вакууме при $T=400^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. Холловские измерения осуществлялись при комнатной температуре и при $T=196^\circ\text{C}$ методом Вандер-Пау в магнитном поле с индукцией $B=0,6 \text{ Тл}$. Также измерялись вольт-амперные характеристики барьера Шоттки между дельта-легированным *p*-слоем и алюминием, который был напылен в вакууме на гидрированную поверхность алмаза.

Было установлено, что в результате термообработки образцов как в водороде при атмосферном давлении, так и в СВЧ-плазме водорода происходит образование слоя *p*-типа проводимости на гидрированной поверхности алмаза (см. табл. 1 и 2).

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 11-07099288.

Таблица 1

Электрофизические параметры природных кристаллов алмаза, обработанных при различных режимах в водороде, а также в СВЧ-плазме водорода с последующим отжигом в атмосфере аргона, измеренные при комнатной температуре

Тип образца	Режим обработки и последующего отжига	Слоевая концентрация дырок $p_s, 10^{13} \text{ см}^{-2}$	Подвижность дырок $\mu_p, \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	Слоевое сопротивление $R_s, \text{ кОм}/\square$
А-180	Термообработка в H_2 , 1000°C, 30 мин	3,6	19	9
	1-й отжиг в Ar, 300°C, 1 ч + 400°C, 1 ч	2,0	24	13
	1-й отжиг в Ar, 500°C, 1 ч	*	*	100
А-158	Термообработка в H_2 , 800°C, 30 мин	2,3	11	23,8
	1-й отжиг в Ar, 300°C, 1 ч + 400°C, 1 ч	1,2	18	27,4
	2-й отжиг в Ar, 500°C, 1 ч	*	*	167
А-159	1-я термообработка в H_2 , 700°C, 30 мин	*	*	61
	2-я термообработка в H_2 , 910°C, 30 мин	2,1	21	14,3
А-065	Термообработка в H_2 , 900°C, 30 мин	2,6	18	13
А-212	Термообработка в H_2 , 900°C, 30 мин	1,6	14	28
А-073	Обработка в СВЧ-плазме H_2 , 750°C, 30 мин	0,72	29	30
А-088	Обработка в СВЧ-плазме H_2 , 750°C, 30 мин	1,2	47	11

* Параметры не определены вследствие сильного шума холловского напряжения для данных режимов

Таблица 2

Электрофизические параметры CVD-кристаллов алмаза после термообработки в водороде и последующего отжига в вакууме, измеренные при комнатной и азотной температурах

Тип образца	Режим обработки и последующего отжига	Температура измерений	Слоевая концентрация дырок $p_s, 10^{12} \text{ см}^{-2}$	Подвижность дырок $\mu_p, \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	Слоевое сопротивление $R_s, \text{ кОм}/\square$	
DB-14	Термообработка в H_2 , 900°C, 30 мин	комнатная	1,5	150	28	
DB-40	Термообработка в H_2 , 900°C, 30 мин	комнатная	1,5	200	21	
		Отжиг в вакууме 400°C, 30 мин	комнатная	1,7	180	20
		77	5,9	130	83	
DB-51	Термообработка в H_2 , 900°C, 30 мин	комнатная	3,9	83	19	
		Отжиг в вакууме 400°C, 30 мин	комнатная	2,9	61	36
		77	0,52	53	227	

Как видно из табл. 1, наилучшие результаты были получены при термообработке природных кристаллов алмаза в потоке водорода в диапазоне температуры 800—1000°C. При температуре 700°C проводящий слой, по-видимому, только начинает формироваться, поэтому он обладает высоким сопротивлением. Такой метод термообработки в водороде может служить альтернативой общепринятому методу формиро-

вания Н-слоя в СВЧ-плазме водорода (см. табл. 1) как более простой и воспроизводимый.

Образцы из природных алмазов после термообработки в водороде имели высокую слоевую концентрацию дырок $p_s = (1,6—3,6) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ со сравнительно низкой подвижностью $\mu_p = 11—47 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Отжиг в аргоне при температуре 300°C практически не влияет на электрофизические параметры Н-слоя, а

отжиг при 400°C снижает слоевую концентрацию носителей до приемлемого для изготовления транзистора уровня (порядка 10^{13} см^{-2}) и увеличивает их подвижность на 20—50%. Отжиг в атмосфере аргона при температуре 500°C приводит к деградации проводящей гидрированной поверхности. Это означает, что технологические операции изготовления алмазного транзистора, следующие после образования гидрированной поверхности, должны исключать нагрев алмазного образца выше температуры 400°C. Можно сделать вывод, что температурная стабильность гидрированной поверхности алмаза в атмосфере аргона выше, чем на воздухе, где деградация наступает при 250—300°C.

CVD-кристаллы алмаза после обработки в аналогичных режимах (табл. 2) обладали более низкой по сравнению с природными алмазами слоевой концентрацией дырок $p_s = (1,5—3,9) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, имеющих значительно большую подвижность $\mu_p = 83—200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, что соответствует лучшим параметрам, полученным при обработке в СВЧ-плазме водорода [7]. Последующий отжиг в вакууме гидрированных CVD-кристаллов при температуре 400°C практически не меняет электрофизические параметры n-слоя, что позволяет проводить на таких структурах технологические операции напыления металлов в вакууме при повышенных температурах для улучшения адгезии. Следует отметить, что при температуре жидкого азота и слоевая концентрация дырок, и их подвижность меньше, чем при комнатной температуре (часть носителей вымораживается). Данный эффект отмечен нами впервые и требует дальнейшего исследования. После отогрева CVD-образцов до комнатной температуры их параметры возвращались к исходным значениям.

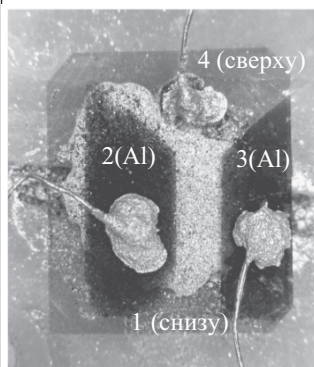


Рис. 1. Снимок тестового образца структуры с барьером Шоттки, сформированного на гидрированной поверхности природного алмаза размером 4×4 мм

На рис. 1 показан тестовый образец структуры с барьерами Шоттки из алюминия, напыленного в вакууме на гидрированную поверхность природного алмаза, а затем отожженного в водороде при $T=900^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. Базовые контакты 1 и 4 сформированы из токопроводящего клея “Контактол” К-12Б. Контакты 2 и 3 — барьеры Шоттки — сформированы напылением алюминия в вакууме (темная область) через маску, к которому внешние выводы присоединены с помощью “Контактола”.

Вольт-амперная характеристика полученной структуры представлена на рис. 2. Сопротивление при нулевом смещении составляло порядка 10 МОм, сопротивление на прямой ветви ВАХ при больших сме-

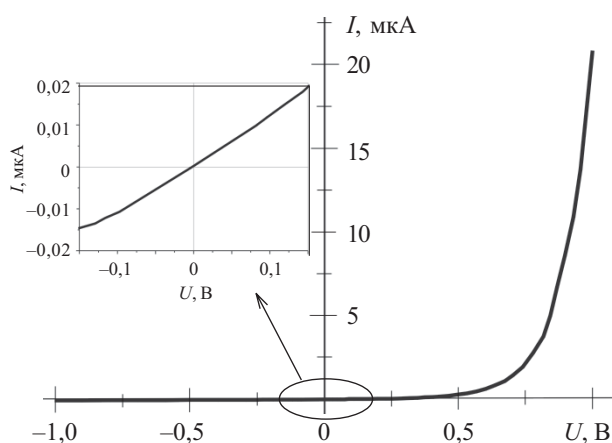


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика тестового образца с барьером Шоттки

щениях (около 10 В) ограничивалось сопротивлением растекания проводящего слоя и составляло 8 кОм.

При измерении прямой ветви потенциал «+» подавался на базовый электрод, потенциал «-» — на алюминиевый электрод. Из результатов данного эксперимента можно сделать вывод, что алюминий, напыленный на гидрированную при термообработках в водороде алмазную поверхность, может служить в качестве затвора Шоттки в полевых СВЧ-транзисторах, изготовленных по технологии MESFET.

Таким образом, представленные результаты по формированию дельта-легированного p-слоя при термообработках алмаза в потоке водорода при температуре 800—1000°C позволяют сделать вывод, что данный метод может быть использован в технологии создания полевых СВЧ-транзисторов с алюминиевыми затворами. Граничная температура технологических операций при работе с гидрированной алмазной поверхностью составляет 400°C

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. May P. W. Diamond thin films: a 21st-century material // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.— 2000.— Vol. 358.— P. 473—495.
2. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках.— М.: Техносфера, 2011. [Vasilyev A. G. Moscow. Technosfera. 2011]
3. Kawarada H., Aoki M., Ito M. Enhancement mode metal-semiconductor field effect transistors using homoepitaxial diamonds // Appl. Phys. Lett.— 1994.— Vol. 65, N 12.— P. 1563—1565.
4. Tsugawa K., Kitatani K., Noda H. et al. High-performance diamond surface-channel field-effect transistors and their operation mechanism // Diamond and Related Materials.— 1999.— N 8.— P. 927—933.
5. Kasu M., Ueda K., Kageshima H., Yamauchi Y. Gate interfacial layer in hydrogen-terminated diamond field-effect transistors // Diamond and Related Materials.— 2008.— N 17.— P. 741—744.
6. Borst T. H., Weis O. Boron-doped homoepitaxial diamond layers: fabrication, characterization, and electronic application. // Phys. stat. sol. (a).— 1996.— Vol. 154.— P. 423—444.
7. Rezek B., Watanabe H., Nebel C.E. High carrier mobility on hydrogen terminated <100> diamond surfaces // Appl. Phys. Lett.— 2006.— Vol. 88.— P. 042110-1—042110-3.