

УДК 621.382.3

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА CVD АЛМАЗНЫХ СТРУКТУР

Академик РАН, д. ф.-м. н. Ю. В. Гуляев, к. ф.-м. н. А. Э. Набиев<sup>1</sup>,  
к. ф.-м. н. Н. Х. Талипов, к. ф.-м. н. Р. А. Хмельницкий, д. ф.-м. н. Г. В. Чучева

Фрязинский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Россия;  
<sup>1</sup>Азербайджанский государственный педагогический университет, г, Баку  
gvc@ms.ire.mssi.ru

*Демонстрируются результаты исследования монокристаллических гомоэпитаксиальных алмазных структур, выращенных методом парофазного химического осаждения и in-situ легированных бором. Полученные значения подвижности дырок в CVD-алмазе  $1210\text{--}600\text{ см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$  в температурном интервале  $190\text{--}300\text{ К}$  свидетельствуют о высоком совершенстве материала. Проводимость алмазных CVD-структур имеет активационный характер с энергией активации бора  $0,37\text{ эВ}$ .*

*Ключевые слова:* CVD-алмаз, широкозонные полупроводники, парофазное химическое осаждение, легирование бором.

В последние десятилетия в мире идет интенсивный поиск новых современных материалов для электронных и полупроводниковых приборов. Особый интерес для специалистов представляют CVD-кристаллы и эпитаксиальные структуры алмаза, который благодаря своим уникальным свойствам является среди других широкозонных полупроводников наиболее привлекательным для создания на его основе электронных приборов и характеризуется как «материал XXI века» [1].

Легированные бором эпитаксиальные слои алмаза обладают необходимыми электрофизическими параметрами для изготовления многоэлементных матричных фотоприемников и полевых СВЧ-транзисторов. В настоящее время основным методом легирования алмаза является ионная имплантация бора — акцепторной примеси, которая создает мелкие уровни с энергией активации  $E_A = E_v + 0,37\text{ эВ}$ . Преимуществом ионной имплантации по сравнению с другими методами является возможность внедрения контролируемой дозы ионов легирующей примеси вплоть до предела растворимости. Однако при данном методе требуется постимплантационный отжиг созданных ионной бомбардировкой нарушений кристаллической структуры и электрической активации внедренных атомов бора, для чего нужна очень большая температура отжига (вплоть до  $1600^\circ\text{C}$ ) в высоком вакууме, предотвращающем графитизацию алмаза [2]. Также можно производить отжиг методом высоких давлений и высокой температуры (так называемый метод НРНТ), с помощью которого недавно был создан полевой СВЧ-транзистор на имплантированном бором CVD-алмазе [3]. Поэтому актуальным является поиск альтернативных ионной имплантации методов легирования алмазных структур бором в процессе выращивания гомоэпитаксиальных CVD-слоев алмаза либо из источника диборана ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ), добавляемого в поток смеси газов  $\text{H}_2/\text{CH}_4/\text{Ar}$  [4], либо в СВЧ-плазме водорода с парами спирта и триметилборана ( $\text{B}(\text{OCH}_3)_3$ ) при температуре  $850^\circ\text{C}$  [5].

В данной работе исследовались электрофизические параметры монокристаллических гомоэпитаксиальных алмазных структур, выращенных методом парофазного химического осаждения (ПФХО) и in-situ легированных бором.

Гомоэпитаксиальное выращивание алмазных структур методом ПФХО в СВЧ-реакторе в плазме водорода проводилось на подложках размером  $3\times 3\times 0,3\text{ мм}$ , вырезанных из монокристаллов синтетического алмаза в кристаллографической плоскости (001). В качестве источника углерода для эпитаксии алмаза был выбран этиловый спирт  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , поскольку небольшое содержание кислорода в газовой смеси благотворно сказывается на качестве поверхности в процессе роста алмазной пленки. При этом кислород не загрязняет растущий алмаз и даже способствует уменьшению концентрации других примесей. Легирование бором осуществлялось добавлением в спирт триметилбората (ТМБ) в определенной пропорции. ТМБ, как борсодержащее вещество, был выбран из-за его малой токсичности и хорошей растворимости в

спирте. Типичные условия выращивания алмаза следующие: СВЧ мощность на частоте 2,45 ГГц — 700—800 Вт, содержание смеси  $C_2H_5OH+V(OCH_3)_3$  — от 7 до 15%, расход  $H_2$  — 10 л/ч, давление в камере 70—75 мбар, температура подложки 900—1000°C. После окончания процесса осаждения образец отжигался в водороде около десяти минут для того, чтобы удалить  $sp^2$ -фазу, образующуюся на поверхности образца. Толщина выращенных ПФХО алмазных структур составляла  $d=0,67—3,6$  мкм; концентрация доноров  $N_D(N) \approx 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; измеренная методом вторичной ионной масс-спектрометрии концентрация атомов бора  $N_A(B) = (6-8) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . С целью электрической активации бора после роста структуры алмаза отжигались в вакууме при  $T=1500^\circ\text{C}$  с последующей химической очисткой. На выращенных структурах ПФХО-алмаза были изготовлены омические контакты (Ti+Pt+Au) для измерения электрофизических параметров методом Ван-дер-Пау в температурном интервале 190—300 К на автоматизированном стенде для холловских измерений при величине индукции магнитного поля 0,7 Тл. Результаты измерения электрофизических параметров экспериментального образца ПФХО-алмаза толщиной 3,6 мкм при различных температурах представлены в таблице.

Концентрация  $p$  и подвижность  $\mu_p$  дырок, а также поверхностное сопротивление  $R_s$  в ПФХО-алмазе, *in-situ* легированном атомами бора с концентрацией  $N_A(B) = 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

| $T, \text{ K}$ | $p, \text{ см}^{-3}$ | $\mu_p, \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ | $R_s, \text{ Ом/}$ |
|----------------|----------------------|---|--------------------|
| 300            | $1,9 \cdot 10^{15}$  | 600   | $1,6 \cdot 10^4$   |
| 280            | $6,7 \cdot 10^{14}$  | 670   | $4,1 \cdot 10^4$   |
| 250            | $9,5 \cdot 10^{13}$  | 800   | $2,4 \cdot 10^5$   |
| 230            | $1,9 \cdot 10^{13}$  | 910   | $1,1 \cdot 10^6$   |
| 210            | $2,8 \cdot 10^{12}$  | 1040  | $6,3 \cdot 10^6$   |
| 190            | $2,8 \cdot 10^{11}$  | 1210  | $5,4 \cdot 10^7$   |

Из данных таблицы по температурной зависимости концентрации дырок  $p(1/T)$  была определена энергия активация акцепторного уровня бора, которая имела значение  $\Delta E_A = 0,37$  эВ, что соответствует данным, полученным нами ранее [5] и литературным данным [6]. Рост холловской подвижности дырок практически пропорционален уменьшению температуры:  $\mu_p \sim T^{-1,5}$ , что объясняется снижением рассеяния на тепловых колебаниях решетки.

Таким образом, гомоэпитаксиальные алмазные структуры, выращенные методом ПФХО в плазме водорода с парами спирта и триметилборана, обладают высокими электрофизическими параметрами, которые свидетельствуют о высоком совершенстве материала, пригодного для изготовления на его основе полупроводниковых приборов, работающих в широком температурном диапазоне.

#### 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. 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.
3. Kenji Ueda and Makoto Kasu. High temperature operation of boron-implanted diamond field-effect transistors // Japanese Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 49. – P. 04DF16-1 — 04DF16-4.
4. Gabrysch M., Majdi S., Hallén A., Linnarsson M., Schöner A., Twitchen D. and Isberg J. Compensation in boron-doped CVD diamond // Phys. Stat. Sol. (a). – 2008. – Vol. 205. – N. 9. – P. 2190 – 2194.
5. Зяблюк 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.
6. Квасков В. Б. Природные алмазы России. – Москва: Полярон, 1997.

Yu. V. Gulyaev, A. E. Nabiev, N. H. Talipov, R. A. Khmel'nitsky, G. V. Chucheva  
**Electrophysical properties of CVD diamond structures.**

The paper presents the research results on single-crystal homoepitaxial diamond structures grown by vapor phase chemical vapor deposition and in-situ boron doped. Values, obtained for the holes mobility in the CVD diamond are 1200–600  $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  at temperature of 300–190 K, show high perfection of the material. The conductivity of diamond CVD structures has an activation nature with boron activation energy of 0.37 eV.

Keywords: CVD diamond, wide-gap semiconductors, vapor-phase chemical deposition, boron doping.