

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ВСЕРОССИЙСКАЯ ГРУППА ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ ИЕЕЕ
АКАДЕМИЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ООО «ОТКРЫТЫЕ РЕШЕНИЯ»
ОБЩЕСТВО «ЗНАНИЕ» РОССИИ
ПРИВОЛЖСКИЙ ДОМ ЗНАНИЙ

*XXII Международная
научно-техническая конференция*

**ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАТИКИ
В ОБРАЗОВАНИИ, УПРАВЛЕНИИ,
ЭКОНОМИКЕ И ТЕХНИКЕ**

Сборник статей

Декабрь 2022 г.

Пенза

УДК 004
ББК 32.81я43+74.263.2+65.050.2я43
П781

П781 **ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАТИКИ В ОБРАЗОВАНИИ,
УПРАВЛЕНИИ, ЭКОНОМИКЕ И ТЕХНИКЕ :**
сборник статей XXII Международной научно-технической
конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2022. – 356 с.

ISBN 978-5-8356-1800-2
ISSN 2311-0406

Под редакцией *В.И. Горбаченко*, доктора технических наук,
профессора;
В.В. Дрождина, кандидата технических наук,
профессора

Информация об опубликованных статьях предоставлена в систему Рос-
сийского индекса научного цитирования (РИНЦ) по договору
№ 573-03/2014К от 18.03.2014.

ISBN 978-5-8356-1800-2
ISSN 2311-0406

© Пензенский государственный
университет, 2022
© АННМО «Приволжский Дом знаний», 2022

*XXII International
scientific and technical conference*

**PROBLEMS OF INFORMATICS
IN EDUCATION, MANAGEMENT,
ECONOMICS AND TECHNICS**

December, 2022

Penza

6. ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИНФОРМАТИКИ

УДК 621.315.592

ГРНТИ 47.45.99

СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ АЛМАЗНЫХ СВЧ-ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ БОРА¹

А. А. Алтухов

CREATION OF ELEMENTS OF DIAMOND MICROWAVE SOLID-STATE STRUCTURES USING ION-IMPLANTED BORON-BASED LAYERS.

A. A. Altukhov

Аннотация. Приводятся результаты экспериментальных исследований низкотемпературной зависимости активации бора, имплантированного в кристаллы алмаза CVD и HPHT типов при больших дозах с энергиями 25, 36, 50, 71, 95 кэВ (полиэнергетическая ионная имплантация) с целью получения однородно легированного слоя. На каждом шаге доза ионов B^+ составляла $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, суммарная доза – $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

По результатам исследований предложен и экспериментально обоснован новый метод формирования в приповерхностной зоне алмаза захороненных и приповерхностных р-слоев, основанный на модифицированной технологии низкоэнергетической ионной имплантации.

Ключевые слова: СВЧ-электроника, алмаз, диод, транзистор, ионная имплантация.

Abstract. The results of experimental studies of the low-temperature dependence of the activation of boron implanted in diamond crystals of CVD and HPHT types at high doses with energies of 25, 36, 50, 71, 95 keV (poly-energy ion implantation) in order to obtain a uniformly doped layer are presented. At each step, the dose of B^+ ions was $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, the total dose was $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$.

Based on the research results, a new method for the formation of buried and near-surface p-layers in the near-surface zone of diamond, based on a modified technology of low-energy ion implantation, is proposed and experimentally substantiated.

¹Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSFZ-2022-0006).

Key words: microwave electronics, diamond, diode, transistor, ion implantation.

Алмаз является одним из наиболее перспективных материалов для создания твердотельных СВЧ-микроселектронных приборов.

Уникальные свойства алмаза по сравнению с другими (GaAs, SiC, GaN) полупроводниками, включая широкозонные материалы, см. рис. 1, позволяют рассматривать его как наиболее перспективный материал для создания быстродействующих и мощных СВЧ-приборных структур, включая диодные и транзисторные структуры, см. [1 - 6, 9, 10].



Рис. 1. Электрофизические параметры алмаза относительно других полупроводников

В [6 - 10] можно найти подробный анализ перспектив, технологических направлений, и конструктивно-технологических решений основанных на использовании алмазных материалов для создания новых микроэлектронных устройств, элементов СВЧ-полевых диодных и транзисторных структур, и где были рассмотрены как преимущества, так и существующие проблемы их практической реализации.

Перспективы практического освоения алмазных СВЧ-структур, в первую очередь, связаны с несколькими крупными нерешенными физико-технологическими проблемами.

К ним, в первую очередь, относятся следующие:

а) сложности получения и технико-экономические факторы внедрения крупноформатных монокристаллических алмазных подложек приборного качества;

б) проблемы легирования алмаза, включая проблемы создания легированных областей (в первую очередь, - n-типа проводимости).

в) недостаточный научно-технологический уровень освоения планарных алмазных транзисторных и диодных структур.

Алмаз отличается следующими сравнительными преимуществами:

Высокое напряжение пробоя.

Позволяет поднять рабочее напряжение структуры без изменения ее размеров, тем самым, увеличивать мощность без ухудшения высокочастотных характеристик.

Высокая теплопроводность.

Обладая рекордной теплопроводностью, алмаз позволяет осуществлять эффективный отвод тепла от активной зоны СВЧ-структуры. Так, теплопроводность алмаза в 10 раз выше теплопроводности GaN, транзисторы на основе которого демонстрируют рекордную на сегодняшний день удельную мощность единицы длины затвора.

Низкая диэлектрическая проницаемость.

У алмаза в 2 раза ниже значение диэлектрической проницаемости, чем у Si, GaAs, SiC, GaN, что означает в 2 раза меньшие паразитные емкости полевых транзисторов, следовательно, меньшие потери при работе на высоких частотах.

К основным технологическим проблемам, сдерживающим практическое применение алмаза, относятся:

1) отсутствие доступных по цене монокристаллических подложек размером свыше $\sim 1\text{см}^2$;

2) сложности реализации технологий легирования алмаза.

Следует учитывать, что бор является в алмазе единственной легирующей акцепторной примесью с энергией активации 0.37 эВ.

Азот и фосфор являются донорами с энергией активации 1.7 эВ и

0.6 эВ соответственно, поэтому при комнатной температуре они фактически не активны. Ранние попытки изготовления биполярного транзистора на алмазе [12, 13] приводили к малым значениям управляемого тока даже при высоких температурах. Поэтому с практической точки зрения наибольший интерес представляют алмазные полевые диоды и мощные СВЧ-транзисторы.

Среди технологических направлений исследований по созданию алмазных СВЧ-структур можно отметить технологии, основанные на использовании диодов Шоттки [10, 11, 16], а также технологии, основанные на использовании легированных слоев, включая гидри-рованные структуры [9, 13, 15].

Оптимальной технологией для формирования проводящих слоев и каналов для изготовления алмазных СВЧ-элементов, помимо методов гидрирования поверхности, в т.ч. в водородной плазме и формированию дельта-легированного слоя при термообработках в потоке водорода [20, 21], позволяющие создавать полевые СВЧ-структуры, может быть легирование бором, см. например, [13, 14]. Легированный бором CVD алмаз обладает необходимыми электрофизическими параметрами для изготовления СВЧ-диодов и транзисторов [4 - 6]. Данные направления формирования проводящих каналов для изготовления алмазных СВЧ приборных структур продолжают активно развиваться [10, 22, 23].

Метод легирования бором может быть реализован различными способами, в т.ч., например, легированием в процессе CVD роста в ВЧ-плазме, см. например, [13, 18, 19]. Более предпочтительным и контролируемым методом легирования алмаза бором является ионная имплантация [1, 14]. Преимуществом ионной имплантации по сравнению с другими методами является возможность внедрения контролируемой дозы ионов легирующей примеси вплоть до предела растворимости. Бор является акцепторной примесью, которая создает уровни с энергией активации $E_A = E_V + 0,37$ эВ.

Метод ионной имплантации требует очень больших температур постимплантационного отжига с целью отжига созданных ионной бомбардировкой нарушений кристаллической структуры и электрической активации внедренных атомов бора. Либо отжиг вплоть до 1600 °С в высоком вакууме, предотвращающем графитизацию алмаза, либо необходим отжиг методом высоких давлений и высокой температуры (метод НРНТ), с помощью которого был создан один из первых в мире полевых СВЧ-транзисторов на имплантированном бором CVD алмазе [14].

В связи с этим представляет особый интерес развитие метода ионной имплантации бора, включая разработки оптимальных технологических режимов для формирования проводящих приповерхностных и захоро-

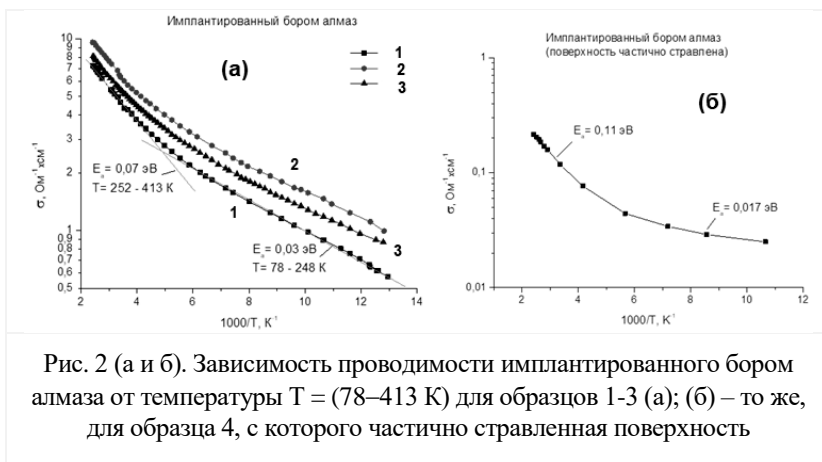
ненных слоев, исследования методов активации бора, имплантированного в кристаллы алмаза.

Нами были выполнены экспериментальные исследования низкотемпературной зависимости активации бора, имплантированного при больших дозах в кристаллы алмаза. В экспериментах, использовались CVD и HPHT кристаллы алмаза размером 3×3 мм. Концентрация азота в исходных алмазных образцах составляла менее $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Особенностью эксперимента являлась полиэнергетическая имплантация с энергиями 25, 36, 50, 71, 95 кэВ с целью получения однородно легированного слоя. На каждом шаге доза ионов B^+ составляла $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, суммарная доза – $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Постимплантационный отжиг проводился в вакууме при температуре 1450°C в течение 30 минут. Проводимость исследовалась в вакуумном, термостабилизированном азотном криостате методом Ван дер Пау в интервале температур 78–413 К.

Результаты представлены на рисунке 2, на котором показаны зависимости (а) проводимости имплантированного бором алмаза от температуры $T = (78-413) \text{ К}$ для образцов 1-3; и (б) зависимости проводимости имплантированного бором алмаза от температуры $T = (78-413) \text{ К}$ для образца 4, у которого частично стравлена поверхность.

Из данных, представленных на рисунке 2.а, видно, что на зависимости $\sigma(T)$ явно наблюдаются три участка с различной низкой энергией активации, что ранее наблюдалось в имплантированном CVD алмазе.



На рисунке 2.6 показана зависимость проводимости имплантированного бором алмаза для образца №4, у которого был частично стравлен поверхностный слой. Ввиду этого, его сопротивление примерно на порядок больше значений у первых трех образцов; при этом данные измерений соответствуют нашей модели, при которой у образцов с меньшей концентрацией, наблюдается больше энергии активации.

Предложен и экспериментально обоснован новый метод формирования в приповерхностной зоне алмаза захороненных и приповерхностных р-слоев, основанный на модифицированной технологии низкоэнергетической ионной имплантации.

Результаты работы представляют интерес для разработки оптимальных режимов ионного легирования в технологии СВЧ-диодных и транзисторных приборных структур на алмазе, а именно для применения метода ионной имплантации бора для формирования элементов СВЧ-диодных и транзисторных приборных структур и экспериментальном определении низкотемпературной зависимости активации бора, имплантированного при больших дозах в кристаллы алмаза.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSFZ-2022-0006).

Библиографический список

1. Вавилов В.С. Алмаз в твердотельной электронике. Успехи физических наук. Том 167, №1. 1997. С. 17-22.
2. May P.W. Diamond thin films: a 21st-century material. // Phil. Trans. R. Soc. Lond.A. – 2000. – Vol. 358. – P. 473 – 495.
3. Wort C.J.H., Balmer R.S. Diamond as an electronic material // Material Today. 2008. V.11. P.22–28.
4. Sussmann, R.S. CVD Diamond for Electronic Devices and Sensors (2009) CVD Diamond for Electronic Devices and Sensors, pp. 1-571. <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9780470740392> ISBN: 978-047074039-2; 978-047006532-7 doi: 10.1002/9780470740392.
5. Ральченко В.Г., Конов В.И. CVD-алмазы. Применение в электронике // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2007. – №4. – С.58-67.
6. Васильев А.Г., Колковский Ю.В., Концевой Ю.А. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. – М.: Техносфера, 2011, 416 с.
7. Алтухов А.А., Любченко В.Е., Митягин А.Ю., Поморцев Л.А. Алмаз – перспективный материал для нанoeлектроники // Инженерная физика. - 2003. - №5. - С. 51-58.

8. Altukhov A.A., Afanas'ev M.S., Kvaskov V.B., Spitsyn B.V. [etal]. (2004). Application of Diamond in HighTechnology. *InorganicMaterials*, 40, S50-S70.

9. Алтухов А.А., Бугаев А.С., Гуляев Ю.В. [и др.]. Перспективы создания СВЧ-элементов на основе полупроводниковых алмазных материалов // *Успехи современной радиоэлектроники*. ISSN 2070-0784. - 2011. - № 6. - С.3 - 18.

10. N. Donato, N. Rouger, J. Pernot, F. Udre. Diamond power devices: State of the art, modeling and figures of merit. October 2019 *Journal of Physics D Applied Physics* 53(9). DOI: 10.1088/1361-6463/ab4eab.

11. S. Tarelkin, V. Bormashov, S. Buga [et al]. Power diamond vertical Schottky barrier diode with 10 A forward current, *Phys. Status Solidi A*. 212 (2015) 2621. doi:10.1002/pssa.201532213.

12. Kohn E., Denisenko A. Concepts for diamond electronics. *Thin solid films*. 2007. V.515. P.4333–4339.

13. T.H. Borst, O. Weis. Boron-doped homoepitaxial diamond layers: fabrication, characterization, and electronic application. // *Phys. stat. sol. (a)*. 1996. Vol. 154. P. 423 - 444.

14. K. Ueda, M. Kasu. High temperature operation of boron-implanted diamond field-effect transistors // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2010. V. 49. P. 04DF16-1-04DF16-4.

15. Y. Sasama, T. Kageura, M. Imura [et al]. High-mobility p-channel wide-bandgap transistors based on hydrogen-terminated diamond/hexagonal boron nitride heterostructures. 2022. *Nature Electronics* 5:1, 37-44. Online publication date: 23-Dec-2021.

16. Makino, Toshiharu, Kato, Hiromitsu, Takeuchi, D. [et al]. (2012). Device Design of Diamond Schottky-pn Diode for Low-Loss Power Electronics. *Japanese Journal of Applied Physics*. 51. 0116-. 10.1143/JJAP.51.090116.

17. J. Y. Tsao, S. Chowdhury, M. A. Hollis [et al]. Ultrawide-Bandgap Semiconductors: Research Opportunities and Challenges. *Advanced Electronic Materials*. Review. January 2018. V.4, Issue 1.P. 1600501. <https://doi.org/10.1002/aelm.201600501>.

18. Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Lobaev M.A [et al]. Novel microwave plasma assisted CVD reactor for diamond delta doping, *Physica Status Solidi RRL*, 10 (2016) 324.

19. Vikharev A.L.; Gorbachev A. M.; Kozlov A. V.; Caplan, M.; Homoepitaxial single crystal diamond growth at different gas pressures and MPACVD reactor configurations Published: 2006 in *Diamond and Related Materials* DOI: 10.1016/J.DIAMOND.2005.10.044.

20. B. Rezek, H. Watanabe, C.E. Nebel. High carrier mobility on hydrogen terminated <100> diamond surfaces. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 042110-1 - 042110-3.

21. Алтухов А.А., Афанасьев М.С., Зяблюк К.Н. [и др.]. Формирование дельта легированного водородом р-слоя в природных и CVD кристаллах алмаза // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2011. - № 5. - С. 14-16.

22. Мальцев П., Шахнович И. СВЧ-технологии - основа электроники будущего. Тенденции и рынки // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. - 2015. - № 8 (148). - С. 72-85.

23. Xiao-luYuan, Yu-tingZheng, Xiao-huaZhu [etal]. (2019). Recent progress in diamond-based MOSFETs. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials 26:10, 1195-1205. Online publication date: 4-Oct-2019.

Алтухов Андрей Александрович

МИРЭА - Российский
технологический университет,
г. Москва, Россия

Altukhov A. A.

MIREA - Russian Technological
University,
Moscow, Russia

УДК 311.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ СБОРА И ОБРАБОТКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ В МЕДИЦИНЕ

З. И. Баусова, А. М. Медведев, П. О. Прокофьев

IMPROVING THE METHODS OF COLLECTING AND PROCESSING STATISTICAL DATA IN MEDICINE

Z.I. Bausova, A.M. Medvedev, P.O. Prokofev

Аннотация. Рассмотрены основные методы сбора статистической медицинской информации и определены этапы ее исследования. Обсуждены возможные варианты представления данных.

Ключевые слова: статистические данные, сбор информации, обработка данных.