

В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, А.Ю. Головин, Д.С. Мироненко**СИСТЕМА БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ БАТАРЕИ БПЛА С ФУНКЦИЯМИ
БАЛАНСИРОВКИ НАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ**

Рассмотрен вопрос создания системы беспроводной зарядки бортовой батареи беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с учетом необходимости балансировки напряжений ее элементов. При проектировании системы на основании краткого обзора принципов реализации беспроводной передачи энергии за основу взят принцип использования магнитно-связанных контуров как наиболее подходящий по своим технико-экономическим свойствам. Целью работы является разработка схемного решения системы беспроводной зарядки батареи БПЛА с возможностью балансировки напряжений как при зарядке, так и во время работы на нагрузку. Применение такой системы позволит повысить безопасность эксплуатации батареи и продлить срок ее службы за счет выравнивания степени износа (старения) элементов. В результате исследования разработана схема и изготовлен экспериментальный образец указанной системы беспроводной зарядки. При синтезе схемы ставилась задача минимизации количества компонентов в силовых цепях с целью уменьшения массы системы и ее стоимости. Максимальная мощность экспериментальной системы беспроводной зарядки превышает 100 Вт (25 В 4 А) и для примененной бортовой аккумуляторной батареи емкостью 1500 мА·ч является несколько избыточной. Принудительного охлаждения приемной части не требуется. Масса приемной части, устанавливаемой на беспилотный летательный аппарат, составляет 79 г (40 г – приемная катушка и 39 г – блок электроники) и имеет резервы для уменьшения за счет снижения сечения проводников приемной катушки, применения в блоке электроники текстолита с меньшей толщиной, уплотнения монтажа и применения двустороннего расположения компонентов. Проведены лабораторные испытания, подтверждающие работоспособность предложенных технических решений, выполнена оценка эффективности балансировки при зарядке. Для оценки эффективности системы балансировки в ходе экспериментов осуществлен расчет выходного сопротивления приемника ($\partial U / \partial I$) относительно одного из элементов бортовой аккумуляторной батареи при изменении напряжения на нем. Результат составил 1,9 Ом при токе заряда 0,8 А (батарея 6S 1500 мА·ч).

Беспроводная зарядка; воздушный трансформатор; балансировка батареи; синхронный выпрямитель; резонансный трансформатор.

V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, A.Y. Golovin, D.S. Mironenko**WIRELESS UAV CHARGING SYSTEM WITH BATTERY BALANCING
FUNCTIONALITY**

The issue of creating a wireless charging system for an on-board battery of an unmanned aerial vehicle (UAV) is considered, taking into account the need to balance the voltages of its elements. When designing the system, based on a brief overview of the principles of wireless energy transmission, the principle of using magnetically coupled circuits is taken as the most suitable in terms of its technical and economic properties. The aim of the work is to develop a circuit solution for a UAV's wireless battery charging system with the ability to balance voltages both during charging and during load operation. The use of such a system will improve the safety of battery operation and extend its service life by leveling the degree of wear (aging) of the elements. As a result of the research, a circuit was developed and an experimental sample of the specified wireless charging system was manufactured. When synthesizing the circuit, the task was to minimize the number of components in the power circuits in order to reduce the mass of the system and its cost. The maximum power of the experimental wireless charging system exceeds 100 Watts (25 V · 4 A) and is somewhat excessive for an on-board battery with a capacity of 1,500 mAh. Forced cooling of the receiving part is not required. The weight of the receiving part mounted on an unmanned aerial vehicle is 79 g (40 g is the receiving coil and 39 g is the electronics unit) and has reserves for reduction by reducing the cross-section of the receiving coil conductors, using a textolite with a lower thickness in the electronics unit, sealing the installation and using a two-sided arrangement of components. Laboratory tests have been carried out, confirming the operability of the proposed technical solutions, and the effectiveness of balancing during charging has been evaluated. In order to evaluate the effectiveness of the balancing system during the experiments, the output resistance ($\partial U / \partial I$) was calculated relative to one of the elements of the on-board battery when the voltage on it changes. The result was 1.9 ohms with a charge current of 0.8 A (6S 1500 mAh battery).

Wireless charging; air-core transformer; battery balancing; synchronous rectification; resonant transformer.

Введение. Современные направления развития технологий беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) предполагают увеличение степени их автономности. Одна из задач, которую необходимо решать на этом пути, – организация зарядки бортовой аккумуляторной батареи (АКБ) БПЛА в автоматическом режиме. Наиболее удобно зарядку АКБ осуществлять с применением беспроводной передачи энергии. Работы в этом направлении ведутся многими командами исследователей и разработчиков, проводятся эксперименты с использованием разных способов беспроводной передачи энергии с наземной станции на БПЛА. Известны системы, использующие передачу энергии в виде СВЧ луча [1–4], луча лазера [5, 6], имеющие дальность до нескольких км. Преимуществами систем «дальнего» поля является дальность действия и возможность одновременной передачи данных в луче, однако они имеют ряд серьезных фундаментальных недостатков: довольно низкая эффективность передачи, проблемы с безопасностью эксплуатации.

Другой класс систем беспроводной передачи энергии – системы «ближнего» поля – используют емкостную [7–14] или индуктивную связь [15], а также связанные резонансные контуры [16]. Дальность действия таких систем обычно не превышает нескольких метров для резонансных, нескольких десятков см для индуктивно-связанных и нескольких мм для емкостно-связанных. Емкостно-связанные системы пока не находят широкого распространения из-за большей напряженности электрического и магнитного полей по сравнению с индуктивно-связанными системами [17, 18].

Имеются и другие способы зарядки батарей, использующие иные физические принципы, например, использование восходящих потоков и порывов ветра [19, 20], интеграция солнечных панелей в конструкцию БПЛА [21] и даже применение сбрасываемых батарей [22].

Постановка задачи. При решении задачи создания системы беспроводной передачи энергии для зарядки АКБ основными целями обычно являются минимизация потерь, снижение массы и габаритов системы (особенно приемной части, устанавливаемой на БПЛА). Между тем, при зарядке литиевых батарей необходимо пристальное внимание уделять балансировке напряжений их элементов, поскольку перезаряд отдельного элемента может привести к выходу из строя всей батареи (иногда и к возгоранию – из-за большой удельной энергии элементов на основе лития). Балансировка желательна также и при работе батареи на нагрузку, особенно нестационарную и с большой пиковой мощностью – для предотвращения глубокого разряда отдельных элементов, что также может привести к серьезному отказу. Исходя из этого, балансировка напряжений элементов бортовой АКБ БПЛА является актуальной задачей, позволяет повысить безопасность и продлить срок эксплуатации АКБ.

Изложение основного материала. Авторами предложен вариант построения системы беспроводной зарядки АКБ БПЛА с функцией балансировки напряжений элементов, а также с возможностью выполнения балансировки также и в полете. При синтезе схемы ставилась задача минимизации количества компонентов в силовых цепях с целью уменьшения массы системы и ее стоимости. Создан и опробован экспериментальный образец описанной далее системы.

Схема передающей части системы представлена на рис. 1 и является дальнейшим развитием работы [23].

Силовая часть передатчика состоит из полумоста на транзисторах VT1, VT2, нагруженного на передающий контур C_TX, L_TX. Конденсаторы C1 – C3 – блокировочные по переменному току. Блок управления содержит однокристалльный микроконтроллер (в экспериментальном образце применен STM32F030F4P6), драйвер управления полумостом (применен IRS2186S) и цепи согласования. Предусмотрено измерение напряжения источника питания и выходного тока полумоста (с помощью трансформатора тока СТ1). Программное обеспечение контроллера обеспечивает регулирование частоты переключения полумоста VT1VT2, измерение полного и активного тока контура, ограничение полного тока контура и регулирование активной мощности. Максимальная выходная мощность экспериментального образца передатчика составляет более 200 Вт при напряжении питания 24 В. В качестве VT1, VT2 применены IRFB3307Z, установленные на те-

плоотводе. В передающем контуре $C_{TX} = 0,33$ мкФ, $L_{TX} = 15$ мкГн (воздушная катушка диаметром 300 мм). Передающая часть системы каких-либо специальных особенностей не имеет.

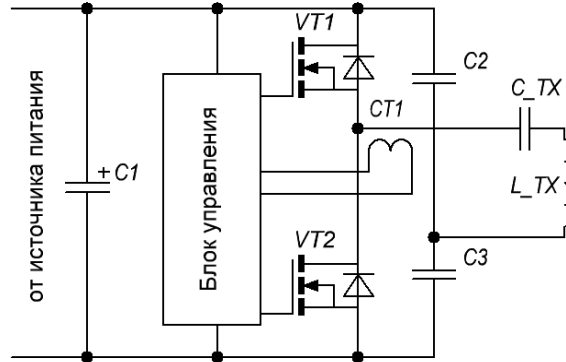


Рис. 1. Схема передающей части системы беспроводной зарядки

Схема приемной части системы для 6-элементной батареи приведена на рис. 2. Принцип построения, использованный в схеме балансировки, является модифицированным вариантом [24].

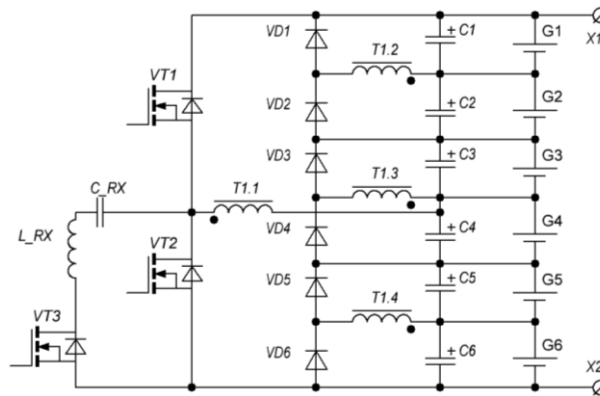


Рис. 2. Схема приемной части системы беспроводной зарядки с активной балансировкой

При работе в режиме беспроводной зарядки транзистор VT3 открыт, VT1, VT2 закрыты. Переменный ток последовательного контура L_{RX} , C_{RX} замыкается через открытый канал VT3, обратные диоды VT1, VT2, обмотку T1.1 и конденсаторы C4 – C6 (имеющие на рабочей частоте системы практически нулевой импеданс). Заряд всех элементов АКБ осуществляется двумя путями: основной – через обратные диоды VT1 и VT2 и дополнительный – от обмоток T1.2 – T1.4 через выпрямители VD1 – VD6, C1 – C6, при этом на обмотке T1.1 действует то же переменное напряжение, что и на входе основного выпрямителя. Поскольку числа витков обмоток T1.2 – T1.4 одинаковы и эти обмотки имеют хорошую магнитную связь, происходит заряд с балансировкой напряжений на элементах АКБ. Элементы с меньшим напряжением будут заряжаться большим током и наоборот. При этом для снижения потерь мощности в выпрямителях и повышения эффективности балансировки в качестве диодов VD1 – VD6 применены диоды Шоттки с малым падением напряжения (в экспериментальном образце установлены SS34). Следует заметить, что кажущаяся на первый взгляд заманчивой идея применить в качестве VD1 – VD6 сборки синхронных выпрямителей (например, DK5V45R10), содержащие полевой MOSFET транзистор и схему управления его затвором, неэффективна, поскольку из-за небольшой разницы между ЭДС обмоток и напряжением

элементов АКБ не гарантируется устойчивое переключение транзистора синхронного выпрямителя. Как следствие, будет наблюдаться неустойчивая работа схемы балансировки с возможными автоколебательными процессами из-за магнитной связи обмоток. Применение же сборок синхронного выпрямления эффективно в основном канале – путем их включения параллельно с VT1 и VT2. Так, упомянутая выше DK5V45R10 имеет сопротивление канала 10 мОм, а это означает, что падение напряжения на такой микросборке при токах до 10 А составляет всего 0,1–0,2 В, что существенно ниже, чем даже на специализированных диодах Шоттки.

При необходимости балансировки элементов АКБ в полете транзистор VT3 запирается, а полумост VT1 – VT2 начинает работу с коэффициентом заполнения около 50 %. На обмотке T1.1 появляется напряжение прямоугольной формы с амплитудой, равной сумме трех напряжений элементов АКБ (G1 – G3 или G4 – G6). Число витков обмотки T1.1 в 3 раза больше, чем число витков T1.2 – T1.4, это обязательное условие. Далее происходят два процесса: при неравенстве сумм напряжений элементов G1 – G3 и G4 – G6 в обмотке T1.1 появляется постоянная составляющая тока, которая обеспечивает выравнивание этих суммарных напряжений. Кроме этого, балансировка отдельных элементов также имеет место благодаря работе выпрямителей VD1 – VD6. Ограничение постоянной составляющей тока в T1.1 осуществлено за счет выбора транзисторов VT1, VT2 с соответствующим сопротивлением канала (в экспериментальном образце – 0,4 Ом, применены AOD11S60). Параллельно VT1 и VT2 установлены сборки DK5V45R10 (см. выше).

Для оценки эффективности системы балансировки в ходе экспериментов осуществлен расчет выходного сопротивления приемника ($\partial U / \partial I$) относительно одного из элементов АКБ при изменении напряжения на нем. Результат составил 1,9 Ом при токе заряда 0,8 А (батарея 6S 1500 мА·ч). При отключении обмотки T1.1 выходное сопротивление приемника стремится к бесконечности (т.е. изменение напряжения на одном из элементов АКБ не приводит к изменению его тока заряда).

В приемной части экспериментального образца системы трансформатор выполнен на ферритовом кольце T18×12×8; управление VT1, VT2 осуществлено от специализированного драйвера IR2153S с автогенератором и функцией отключения. Приемная катушка использовалась диаметром 300 мм, без сердечника, с индуктивностью 15 мГн. Резонансный конденсатор C_RX – силовой металлоплёночный типа МКРН, емкостью 0,33 мкФ.

Выводы. Предложено схемное решение системы беспроводной зарядки с функцией балансировки напряжений элементов заряжаемой батареи. Изготовлен экспериментальный образец системы, проведено опробование, показавшее работоспособность предложенных технических решений. Максимальная мощность экспериментальной системы беспроводной зарядки превышает 100 Вт (25 В 4 А) и для примененного АКБ емкостью 1500 мА·ч является несколько избыточной. Принудительного охлаждения приемной части не требуется. Масса приемной части, устанавливаемой на БПЛА, составляет 79 г (40 г – приемная катушка и 39 г – блок электроники) и имеет резервы для уменьшения за счет снижения сечения проводников приемной катушки, применения в блоке электроники текстолита с меньшей толщиной, уплотнения монтажа и применения двустороннего расположения компонентов.

Дальнейшим направлением работы является интеграция системы зарядки с полетным контроллером БПЛА с целью обеспечения контроля напряжения АКБ, управления процессом зарядки путем обмена информацией с зарядной станцией (способы могут быть различными), автоматического поиска и посадки на зарядную станцию. Решение этой задачи позволит приблизиться к созданию комплекса оборудования, обеспечивающего автономную работу БПЛА с автоматической зарядкой его АКБ. Это даст возможность расширить спектр задач, для решения которых в настоящее время используются БПЛА.

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FRRG-2023-0011.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chen R., Lee, and Y., Sun J.* Design and experiment of a loop rectenna for rfid wireless power transmission and data communication applications // Proceedings of the PIERS, Beijing, China. – 2009. – Vol. 2327. – P. 528531.
2. *Costanzo A. and Masotti D.* Energizing 5g: Near-and far-field wireless energy and data transfer as an enabling technology for the 5g iot // IEEE Microwave Magazine. – 2017. – Vol. 18, No. 3. – P. 125-136.
3. *Garnica J., Chinga R.A., and Lin J.* Wireless power transmission: From far field to near field // Proceedings of the IEEE. – 2013. – Vol. 101, No. 6. – P. 1321-1331.
4. *Li K.-R., See K.-Y., Koh W.-J., and Zhang J.-W.* 'Design of 2.45 GHz microwave wireless power transfer system for battery charging applications // in Proc. Prog. Electromagn. Res. Symp.-Fall (PIERS-FALL). – Nov. 2017. – P. 2417-2423.
5. *Ouyang J., Che Y., Xu J., and Wu K.* Throughput maximization for laser-powered uav wireless communication systems // in 2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). – IEEE, 2018. – P. 1-6.
6. *Iyer V., Bayati E., Nandakumar R., Majumdar A., and Gollakota S.* 'Charging a smartphone across a room using lasers // Proc. ACM Interact., Mobile, Wearable Ubiquitous Technol. – Jan. 2018. – Vol. 1, No. 4. – P. 1-21.
7. *Huang L., Hu A.P., Swain A., Kim S., and Ren Y.* An overview of capacitively coupled power transfer – a new contactless power transfer solution // in 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – IEEE, 2013. – P. 461-465.
8. *Raciti A., Rizzo S.A., and Susinni G.* Drone charging stations over the buildings based on a wireless power transfer system // in 2018 IEEE/IAS 54th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). – IEEE, 2018. – P. 1-6.
9. *Aldhafer S., Mitcheson P.D., Arteaga J.M., Kkelis G., and Yates D.C.* Light-weight wireless power transfer for mid-air charging of drones // in 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). – IEEE, 2017. – P. 336-340.
10. *Vincent D., Huynh P.S., Patnaik L., and Williamson S.S.* Prospects of capacitive wireless power transfer (c-wpt) for unmanned aerial vehicles // in 2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (Wow). – IEEE, 2018. – P. 1-5.
11. *Koruprolu A., Nag S., Erfani R., and Mohseni P.* Capacitive wireless power and data transfer for implantable medical devices // in 2018 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS). – IEEE, 2018. – P. 1-4.
12. *Yao Y., Wang Y., Liu X., Cheng H., Liu M., and Xu D.* Analysis, design, and implementation of a wireless power and data transmission system using capacitive coupling and double-sided lcc compensation topology // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2018. – Vol. 55, No. 1. – P. 541-551.
13. *Li Y. and Stevens C.J.* 'Capacitor connected grids for wireless power transfer // in Proc. IEEE Wireless Power Transf. Conf., May 2014. – P. 122-125.
14. *Minnaert B., Mastri F., Mongiardo M., Costanzo A., and Stevens N.* Constant capacitive wireless power transfer at variable coupling // in IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., May 2018. – P. 1-4.
15. *Ustun D., Balci S., and Sabanci K.* A parametric simulation of the wireless power transfer with inductive coupling for electric vehicles, and modelling with artificial bee colony algorithm // Measurement. – Jan. 2020. – Vol. 150. – Art. no. 107082.
16. *Shi Y., Zhang Y., Shen M., Fan Y., Wang C., and Wang M.* Design of a novel receiving structure for wireless power transfer with the enhancement of magnetic coupling // AEU-Int. J. Electron. Commun. – Oct. 2018. – Vol. 95. – P. 236-241.
17. *Dai J. and Ludois D.C.* Wireless electric vehicle charging via capacitive power transfer through a conformal bumper // in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC), Mar. 2015. – P. 3307-3313.
18. *Lu F., Zhang H., and Mi C.* A review on the recent development of capacitive wireless power transfer technology // Energies. – Nov. 2017. – Vol. 10, No. 11. – P. 1752.
19. *Deittert M., Richards A., Toomer C.A., and Pipe A.* Engineless unmanned aerial vehicle propulsion by dynamic soaring // J. Guid., Control, Dyn. – Sep. 2009. – Vol. 32, No. 5. – P. 1446-1457.
20. *Richardson P.L.* Upwind dynamic soaring of albatrosses and UAVs // Prog. Oceanogr. – Jan. 2015. – Vol. 130. – P. 146-156.
21. *Malaver A., Motta N., Corke P., and Gonzalez F.* Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse gases // Sensors. – Feb. 2015. – Vol. 15, No. 2. – P. 4072-4096.
22. *Galkin B., Kibilda J., and DaSilva L.A.* UAVs as mobile infrastructure: Addressing battery lifetime // IEEE Commun. Mag. – Jun. 2019. – Vol. 57, No. 6. – P. 132-137.

23. Бурлака В.В., Гулаков С.В., Головин А.Ю., Мироненко Д.С. Система беспроводной передачи электрической энергии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 5 (235). – С. 174-182.
24. Moghaddam Farzan A. and Van den Bossche A. A single transformer for active cell equalization method of lithium-ion batteries with two times fewer secondaries than cells // Electronics. – 2019. – Vol. 8, No. 9. – Art. no. 951.

REFERENCES

1. Chen R., Lee, and Y., Sun J. Design and experiment of a loop rectenna for rfid wireless power transmission and data communication applications, *Proceedings of the PIERS, Beijing, China*, 2009, Vol. 2327, pp. 528531.
2. Costanzo A. and Masotti D. Energizing 5g: Near-and far-field wireless energy and data trantransfer as an enabling technology for the 5g iot, *IEEE Microwave Magazine*, 2017, Vol. 18, No. 3, pp. 125-136.
3. Garnica J., Chinga R.A., and Lin J. Wireless power transmission: From far field to near field, *Proceedings of the IEEE*, 2013, Vol. 101, No. 6, pp. 1321-1331.
4. Li K.-R., See K.-Y., Koh W.-J., and Zhang J.-W. 'Design of 2.45 GHz microwave wireless power transfer system for battery charging applications, in *Proc. Prog. Electromagn. Res. Symp.-Fall (PIERS-FALL)*, Nov. 2017, pp. 2417-2423.
5. Ouyang J., Che Y., Xu J., and Wu K. Throughput maximization for laser-powered uav wireless communication systems, in *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. IEEE, 2018, pp. 1-6.
6. Iyer V., Bayati E., Nandakumar R., Majumdar A., and Gollakota S. 'Charging a smartphone across a room using lasers, *Proc. ACM Interact., Mobile, Wearable Ubiquitous Technol.*, Jan. 2018, Vol. 1, No. 4, pp. 1-21.
7. Huang L., Hu A.P., Swain A., Kim S., and Ren Y. An overview of capacitively coupled power transfer – a new contactless power transfer solution, in *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. IEEE, 2013, pp. 461-465.
8. Raciti A., Rizzo S.A., and Susinni G. Drone charging stations over the buildings based on a wireless power transfer system, in *2018 IEEE/IAS 54th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*. IEEE, 2018, pp. 1-6.
9. Aldhafer S., Mitcheson P.D., Arteaga J.M., Kkelis G., and Yates D.C. Light-weight wireless power transfer for mid-air charging of drones, in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. IEEE, 2017, pp. 336-340.
10. Vincent D., Huynh P.S., Patnaik L., and Williamson S.S. Prospects of capacitive wireless power transfer (c-wpt) for unmanned aerial vehicles, in *2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (Wow)*. IEEE, 2018, pp. 1-5.
11. Koruprolu A., Nag S., Erfani R., and Mohseni P. Capacitive wireless power and data transfer for implantable medical devices, in *2018 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*. IEEE, 2018, pp. 1-4.
12. Yao Y., Wang Y., Liu X., Cheng H., Liu M., and Xu D. Analysis, design, and implementation of a wireless power and data transmission system using capacitive coupling and double-sided lcc compensation topology, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, Vol. 55, No. 1, pp. 541-551.
13. Li Y. and Stevens C.J. 'Capacitor connected grids for wireless power transfer, in *Proc. IEEE Wireless Power Transf. Conf.*, May 2014, pp. 122-125.
14. Minnaert B., Mastri F., Mongiardo M., Costanzo A., and Stevens N. Constant capacitive wireless power transfer at variable coupling, in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, May 2018, pp. 1-4.
15. Ustun D., Balci S., and Sabanci K. A parametric simulation of the wireless power transfer with inductive coupling for electric vehicles, and modelling with artificial bee colony algorithm, *Measurement*, Jan. 2020, Vol. 150, Art. no. 107082.
16. Shi Y., Zhang Y., Shen M., Fan Y., Wang C., and Wang M. Design of a novel receiving structure for wireless power transfer with the enhancement of magnetic coupling, *AEU-Int. J. Electron. Commun*, Oct. 2018, Vol. 95, pp. 236-241.
17. Dai J. and Ludois D.C. Wireless electric vehicle charging via capacitive power transfer through a conformal bumper, in *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC)*, Mar. 2015, pp. 3307-3313.
18. Lu F., Zhang H., and Mi C. A review on the recent development of capacitive wireless power transfer technology, *Energies*, Nov. 2017, Vol. 10, No. 11, pp. 1752.
19. Deittert M., Richards A., Toomer C.A., and Pipe A. Engineless unmanned aerial vehicle propulsion by dynamic soaring, *J. Guid., Control, Dyn.*, Sep. 2009, Vol. 32, No. 5, pp. 1446-1457.
20. Richardson P.L. Upwind dynamic soaring of albatrosses and UAVs, *Prog. Oceanogr.*, Jan. 2015, Vol. 130, pp. 146-156.

21. Malaver A., Motta N., Corke P., and Gonzalez F. Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse gases, *Sensors*, Feb. 2015, Vol. 15, No. 2, pp. 4072-4096.
22. Galkin B., Kibilda J., and DaSilva L.A. UAVs as mobile infrastructure: Addressing battery lifetime, *IEEE Commun. Mag.*, Jun. 2019, Vol. 57, No. 6, pp. 132-137.
23. Burlaka V.V., Gulakov S.V., Golovin A.Yu., Mironenko D.S. Sistema besprovodnoy peredachi elektricheskoy energii [Wireless electric power transmission system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 5 (235), pp. 174-182.
24. Moghaddam Farzan A. and Van den Bossche A. A single transformer for active cell equalization method of lithium-ion batteries with two times fewer secondaries than cells, *Electronics*, 2019, Vol. 8, No. 9, Art. no. 951.

Бурлака Владимир Владимирович – ФГБОУ ВО "ПГТУ"; e-mail: vburlaka@rambler.ru; г. Мариуполь, Россия; тел.: +79497048603; научно-технический центр силовой электроники; д.т.н.; доцент; директор центра.

Гулаков Сергей Владимирович – e-mail: gulakov.s.v@yandex.ru; тел.: +79497298638; научно-технический центр силовой электроники; д.т.н.; профессор.

Головин Андрей Юрьевич – e-mail: a.golovin@tms-2022.ru; тел.: +79497128054; научно-технический центр силовой электроники; мл. науч. сотрудник.

Мироненко Дмитрий Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: mironenko.d.s@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89885153109; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; к.т.н.; доцент.

Burlaka Vladimir Vladimirovich – FSBEI of HE "PSTU"; e-mail: vburlaka@rambler.ru; Mariupol, Russia; phone: +79497048603; Scientific and Technical Center for Power Electronics; dr. of eng. sc.; associate professor; director of the center.

Gulakov Sergey Vladimirovich – e-mail: gulakov.s.v@yandex.ru; phone: +79497298638; Scientific and Technical Center for Power Electronics; dr. of eng. sc.; professor.

Golovin Andrey Yurievich – e-mail: a.golovin@tms-2022.ru; phone: +79497128054; Scientific and Technical Center for Power Electronics; research associate.

Mironenko Dmitrii Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: mironenko.d.s@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79885153109; the department of software engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 620.3

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-273-280

Е.А. Лахина, Н.Е. Черненко, Н.А. Шандыба, С.В. Балакирев, М.С. Солодовник
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОТЖИГА ПОДЛОЖКИ GaAs(111)
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОУГЛУБЛЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ
ФОКУСИРОВАННЫМИ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ВРЕМЕНИ
ВОЗДЕЙСТВИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов формирования углублений методом фокусированных ионных пучков на подложках GaAs(111) и их последующей трансформации в процессе отжига в сверхвысоковакуумной камере молекулярно-лучевой эпитаксии в потоке мышьяка и в его отсутствие. Установлено, что при времени воздействия ионного пучка, равного 1 мс, процессы накопления ионов в подложке преобладают над процессами распыления материала, тогда как при времени, равном 5 мс, происходит интенсивное распыление материала подложки в точках воздействия ионного пучка с увеличением глубины вытравливаемых участков при повышении числа проходов. После отжига подложек с участками, модифицированными фокусированным ионным пучком, углубления значительно увеличиваются в размерах в результате процессов локального капельного травления. Исследования показали, что размеры углублений после отжига в потоке мышьяка превышают размеры углублений после отжига в отсутствие потока