

Физические основы выбора типа и параметров подсистем лазерной системы передачи энергии в космосе

© А.С. Коноплев, А.П. Смахтин

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Россия

Концепция беспроводной передачи энергии с помощью сфокусированных пучков электромагнитного излучения открывает принципиально новые возможности в наземной и космической энергетике. Одним из перспективных направлений развития беспроводной энергетике является создание лазерных систем передачи энергии для решения разнообразных задач космической энергетике. Для эффективного приема и преобразования лазерного излучения в электрическую энергию можно использовать стандартные полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи энергии, параметры которых соответствуют параметрам лазера. Приведен анализ влияния типов и параметров различных лазеров и приемников-преобразователей энергии лазерного излучения в электрическую энергию на эффективность передачи энергии в целом.

Ключевые слова: *беспроводная передача энергии, приемник-преобразователь, лазерное излучение, электрическая энергия, фотоэлектрический преобразователь, эффективность.*

Введение. Впервые идеи использования беспроводной передачи энергии в космосе приведены в работах Э.К. Циолковского и других пионеров освоения космического пространства [1]. В дальнейшем исследования в этой области были продолжены. Первое технически обоснованное предложение по созданию орбитальных электростанций для передачи энергии на Землю по сфокусированному лучу сверхвысокой частоты (СВЧ) было опубликовано в работе [2]. Следует отметить, что беспроводная передача энергии является наиболее естественным способом передачи энергии по сравнению с передачей ее по проводам. Солнце передает свою энергию на Землю и другие небесные тела излучением. Запасы всех углеводородных топлив на Земле представляет собой законсервированную энергию Солнца.

Варианты использования беспроводных энергосистем и анализ их эффективности. В настоящее время рассматриваются пять вариантов использования беспроводных энергосистем [2, 3].

1. Передача энергии из космоса на Землю.
2. Передача энергии с поверхности Земли на борт орбитальных космических аппаратов (КА).
3. Передача энергии от мощного космического энергетического модуля на борт группы искусственных спутников Земли (ИСЗ).

4. Передача энергии из одной точки Земли в другую с помощью орбитального ретранслятора.

5. Передача энергии с окололунной или марсианской орбиты на лунную или марсианскую базы.

Поскольку для организации лазерного излучения используются существенно меньшие размеры приемно-передающих систем, а в космическом вакууме электромагнитное излучение не поглощается и фронт волны излучения не искажается, лазерное излучение является более эффективным для решения задач космической беспроводной энергетики по сравнению с СВЧ-излучением при расстояниях передачи энергии, превышающих сотни километров. Среди различных потенциально возможных применений лазерных систем передачи энергии в космическом пространстве можно выделить следующие:

- создание мощного космического энергетического модуля на околоземной орбите для централизованного энергоснабжения группы ИСЗ различного назначения. При этом появляется возможность эффективного обеспечения электрической энергией орбитального КА при существенно неравномерной циклограмме энергопотребления. Согласование циклограмм энергопотребления группы ИСЗ позволит обеспечить высокую эффективность решения общей задачи, используя преимущества теории массового обслуживания [4];

- создание космической технологической системы на основе малого ИСЗ с пассивной системой гравитационной стабилизации и космического энергетического модуля с лазерной энергетической установкой на борту для передачи энергии на борт малого ИСЗ. В результате возможно снижение уровня остаточных микроускорений в центре массы малого ИСЗ до уровня $(10^{-8} \dots 10^{-7})g_0$, где g_0 — ускорение свободного падения на поверхности Земли. Создание такой орбитальной технологической системы позволит получать кристаллы полупроводников с высокой степенью однородности, повысить степень очистки медицинских препаратов и, тем самым — эффективность их действия [5];

- возможно применение лазерных систем передачи энергии с борта КА, оснащенного ядерной энергетической установкой, на борт другого КА для существенного снижения уровня радиационного облучения на этом КА. Это особенно важно, если второй КА пилотируемый [6].

Очевидно, что по мере развития космической техники и систем лазерной передачи энергии возможное применение таких систем в космосе расширится.

В состав лазерной системы передачи энергии входят последовательно соединенные блоки лазерного излучателя, системы фокусировки и наведения лазерного луча, приемник-преобразователь лазер-

ного излучения в энергию постоянного электрического тока. Необходим системный подход к построению лазерной системы передачи энергии для достижения наибольшей эффективности ее работы [7, 8].

Как известно, в качестве высокоэффективного приемника-преобразователя лазерного излучения в электрическую энергию можно использовать стандартные полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) энергии, которые широко применяются в составе солнечных батарей в космической и наземной энергетике. При облучении ФЭП сплошным солнечным спектром КПД ФЭП на основе кремния и арсенида галлия относительно небольшой — порядка $\eta = 18...20\%$. Однако, если облучать ФЭП монохроматическим излучением, у которого энергия кванта $h\nu$ равна ширине запрещенной зоны полупроводника ΔE , существенно возрастает КПД. При этом, КПД ФЭП на основе кремния $\eta = 50...55\%$ при длине волны облучения лазером $\lambda = 1,11$ мкм, а КПД ФЭП на основе арсенида галлия $\eta = 55...60\%$ при $\lambda = 0,87$ мкм.

Предварительные оценки показывают, что с увеличением ширины запрещенной зоны ΔE и, соответственно, с уменьшением оптимального значения λ , КПД возрастает вследствие уменьшения обратного больцмановского тока через потенциальный барьер, равный ширине запрещенной зоны ΔE . Кроме того, для каждого полупроводника существует оптимальное значение плотности мощности лазерного облучения, так как с увеличением плотности мощности облучения ФЭП повышается рабочая температура ФЭП, снижается ΔE и возрастает обратный больцмановский ток [9].

В настоящее время в качестве источников лазерного излучения с длиной волны λ порядка 1 мкм можно выбирать волоконные лазеры с различными длинами волн и величинами выходной мощности.

В начале 1970-х годов появились так называемые наноантенны на основе графитовых нанотрубок, которые позволяют формировать приемники лазерного излучения по принципу металлических решетчатых антенн [10]. Высокая эффективность приемников-преобразователей энергии монохроматического электромагнитного излучения в электрическую энергию — порядка 50 % и выше — получена при облучении наноантенн длиной волны λ порядка 10 мкм. Это позволяет рассматривать наравне с комбинацией волоконный лазер — полупроводниковый ФЭП комбинацию газоразрядный CO_2 -лазер ($\lambda = 1,06$ мкм) — наноантенна. CO_2 -лазеры обладают высокой выходной мощностью до нескольких десятков киловатт при КПД порядка 10 %. Такие лазеры являются весьма перспективным излучателем в системе лазерной передачи энергии, поскольку, изменяя характерную длину нанотрубок в составе наноантенн, можно подстраивать характеристики наноантенн к параметрам излучателя. Этот процесс значительно проще тех-

нологически, чем изменение ширины запрещенной зоны ФЭП путем легирования материала полупроводника.

Заключение. Выбор типа лазерного излучателя и приемника-преобразователя энергии лазерного излучения в электрическую энергию, а также рабочих параметров основных подсистем общей системы лазерной передачи энергии является сложной многопараметрической задачей оптимизации. Лазерная система передачи энергии в космосе представляет собой каскад последовательно соединенных подсистем: излучателя, излучающего фокусирующего зеркала, приемника-преобразователя энергии лазерного излучения в энергию постоянного тока. В этом случае, как известно, общий КПД каскада равен произведению КПД всех подсистем, и, следовательно, для получения высокой эффективности работы лазерной системы передачи энергии в космосе необходимо исключить слабое звено в цепи последовательно соединенных подсистем.

В настоящее время отсутствуют опыт практической реализации подобных проектов и база экспериментальной проверки теоретических оценок различных рабочих параметров систем беспроводной передачи энергии. Тем не менее, перспектива реализации концепции беспроводной энергетики в космосе и возможность решения на более высоком уровне как традиционных задач космонавтики, так и принципиально новых задач космической энергетики обуславливает необходимость дальнейшего теоретического и экспериментального исследования проблем беспроводной энергетики.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Циолковский К.Э. *Исследование мировых пространств реактивными приборами*. Москва, Машиностроение, 1967, с. 375.
- [2] Glaser P.E. Power From the Sun: its Future. *Science*, 1968, vol. 162, pp. 857–861.
- [3] Глезер П. Перспективы космических солнечных электростанций. *Ракетная техника и космонавтика*, 1979, т. 17, № 1, с. 176–190.
- [4] Бургасов М.П., Грабин Б.В., Грехнев А.Б. и др. Централизованное энергоснабжение в космосе: анализ возможностей и выбор приоритетных задач. *Тр. V Междунар. совещания-семинара «Инженерно-физические проблемы новой техники»*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998, с. 290–291.
- [5] Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П. и др. Концепция космической системы для высоких технологий в условиях предельно низкой гравитации. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2004, № 6, с. 40–45.
- [6] Каландаришвили А.Г., Компаниец Г.В., Новиков Д.Г. и др. Энергосиловая установка для пилотируемых полетов на базе ядерного реактора с машинным преобразователем энергии и беспроводной передачи энергии. *Тез. докл. 8-й Междунар. конф. «Авиация и космонавтика – 2009»*. Москва, МАИ-ПРИНТ, 2009, с. 173.

- [7] Солдатов В.И., Смахтин А.П., Чуюн Р.Л. Новые возможности космической энергетики на основе лазерных систем передачи энергии. *Аннотирован. сб. мат. «Всероссийская научно-техническая конференция «Расплетинские чтения — 2016»*, Москва, 2015, с. 140–141.
- [8] Коноплев А.С., Смахтин А.П. Физические основы выбора типа и параметров приемников-преобразователей энергии лазерного излучения в электрическую энергию. *Сб. тез. XL академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, с. 65.
- [9] Смахтин А.П., Чуюн Р.Л. Экспериментальные исследования рабочих характеристик полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей энергии при монохроматическом облучении. *Нано- и микросистемная техника*, 2012, № 5 (142), с. 44–48.
- [10] Слюсар В. Наноантенны: подходы и перспективы. *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2009, № 2, с. 58–65.

Статья поступила в редакцию 15.07.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Коноплев А.С., Смахтин А.П. Физические основы выбора типа и параметров подсистем лазерной системы передачи энергии в космосе. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-08-1525>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.

Коноплев Артем Сергеевич родился в 1993 г., окончил Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), факультет «Двигатели летательных аппаратов» (кафедра «Электроракетные двигатели, энергофизические и энергетические установки») в 2016 г.

Смахтин Андрей Петрович родился в 1947 г., старший преподаватель Московского авиационного института (национального исследовательского университета), кафедра «Электроракетные двигатели, энергофизические и энергетические установки» факультета «Двигатели летательных аппаратов». e-mail: kaf208@mai.ru

Physical foundations of selecting types and parameters for subsystems of laser wireless power transmission system in space

© A.S. Konoplev, A.P. Smakhtin

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia

Conception of wireless power transmission (WPT) by using focused electromagnetic beams opens principle new possibilities in terrestrial and space power engineering. One of the most promising options of wireless power engineering is the creation of laser WPT systems for solving a variety of space power engineering problems. Effective reception and conversion of laser radiation into electric power needs the use of standard semiconductor photovoltaic (PV) convertors, operating parameters of which correlate to the laser operating parameters. The article analyzes the impact of the various types and parameters of laser transmitting and receiver subsystems into the efficiency of wireless power transmission (WPT) systems as whole.

Keywords: wireless power transmission, receiver-convertor, laser radiation, electric power, photovoltaic convertor, efficiency.

REFERENCES

- [1] Tsiolkovsky K.E. *Issledovaniye mirovykh prostranstv reaktivnymi priborami* [Outer Space Investigation with Reactive Devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967, pp. 375.
- [2] Glaser P.E. Power From the Sun: its Future. *Science*, 1968, vol. 162, pp. 857–861.
- [3] Glezer P. *Raketnaya tekhnika i kosmonavtika — AIAA Journal, Russian edition*, 1979, vol. 17, no. 1, pp. 176–190.
- [4] Burgasov M.P., Grabin B.V., Grekhnev A.B., et al. Tsentralizovannoye energosnabzheniye v kosmose: analiz vozmozhnostey i vybor prioritnykh zadach [Centralized power supply in space: an analysis of opportunities and selection of priorities]. *Trudy V Mezhdunar. soveshchaniya-seminara “Inzhenerno-fizicheskiye problemy novoy tekhniki”* [Proceedings of the V Intern. meeting-seminar “Engineering and physical problems of new technology”]. Moscow, BMSTU, 1998, pp. 290–291.
- [5] Zemskov V.S., Rauhmann M.R., Shalimov V.P., et al. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, Sinkhrotronnye i Neitronnye Issledovaniya — The Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2004, no. 6, pp. 40–45.
- [6] Kalandarishvili A.G., Kompaniets G.V., Novikov D.G., et al. Energosilovaya ustanovka dlya pilotiruyemykh poletov na baze yadernogo reaktora s mashinnym preobrazovatelem energii i besprovodnoy peredachi energii [Power plant for manned missions on the basis of a nuclear reactor with machine energy converter and wireless power transmission]. *Tez. dokl. 8-y Mezhdunar. konf. “Aviatsiya i kosmonavtika — 2009”* [Abstracts of the reports at the 8th Int. Conf. “Aviation and Astronautics — 2009”]. Moscow, MAI-Print, 2009, pp. 173.
- [7] Soldatov V.I., Smakhtin A.P., Chuyan R.L. Novye vozmozhnosti kosmicheskoy energetiki na osnove lazernykh sistem peredachi energii [New opportunities of space power engineering on the basis of laser power transmission systems]. *Annotirovannyi sbornik materialov “Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Raspletinskiye chteniya — 2016”* [Annotated Coll. mat. “All-

Russia scientific-technical conference “Raspletinskiye reading — 2016”]. Moscow, 2015, pp. 140–141.

- [8] Konoplev A.S., Smakhtin A.P. Fizicheskiye osnovy vybora tipa i parametrov priyemnikov-preobrazovateley energii lazernogo izlucheniya v elektricheskuyu energiyu [Physical basis of selecting the type and parameters of the laser energy converters-receivers into electric energy]. *Sb. tez. XL akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva* [Coll. Abstracts. XL Academic Conference on Astronautics devoted to the memory of Academician S.P. Korolev]. Moscow, BMSTU, 2015, pp. 65.
- [9] Smakhtin A.P. Chuyan R.L. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika — Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2012, no. 5 (142), pp. 44–48.
- [10] Slyusar V. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes — Electronics: Science, Technology, Business*, 2009, no. 2, pp. 58–65.

Konoplev A.S. (b. 1993) graduated from the Moscow Aviation Institute (National Research University), Faculty “Aircraft engines”, Department “Electric Rocket Engines, Energy-Physical and Power Plants” in 2016.

Smakhtin A.P. (b. 1947), Senior Lecturer at the Moscow Aviation Institute (National Research University), Faculty “Aircraft engines”, Department “Electric Rocket Engines, Energy-Physical and Power Plants”. e-mail: kaf208@mai.ru