

Создание новых систем охлаждения светодиодов высокой мощности для повышения надежности и долговечности

Соглашение № 14.613.21.0067 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014-2020 годы»

Приоритетное направление: Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика

Период выполнения: 03.10.2017- 31.12.2019

Отчетный период: 01.01.2019 – 31.12.2019

Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Иностранные партнеры: Indian Institute of Technology Kanpur (ИТК), Канпур, Индия; State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering (SKLMFPE), Xi'an Jiaotong University, Сиань, Китай

Цели выполнения прикладных научных исследований

Создание научно-технического задела по созданию эффективных систем охлаждения для высокопроизводительных электронных устройств и мощных светодиодов, также создание систем ускоренного тестирования жизненного цикла светодиодных устройств.

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии от 03.10.2017г. № 14.613.21.0067 с Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе № 3 в период с 01.01.2019 г. по 31.12.2019 г. выполнялись следующие работы:

Разработан и создан экспериментальный образец гибридной пленочно-капельной газовой микроканальной системы охлаждения.

Разработаны Программа и методики экспериментальных исследований экспериментального образца гибридной пленочно-капельной газовой микроканальной системы охлаждения.

Проведены экспериментальные исследования экспериментального образца гибридной пленочно-капельной газовой микроканальной системы охлаждения по разработанной Программе и методикам экспериментальных исследований.

Проведен анализ результатов экспериментальных исследований экспериментального образца гибридной пленочно-капельной газовой микроканальной системы охлаждения. Проведено тестирование экспериментального образца гибридной пленочно-капельной газовой микроканальной системы охлаждения в модели светодиода.

Сделаны обобщение и оценка полученных результатов исследований.

Разработаны предложения и рекомендации по реализации (коммерциализации) результатов исследований.

Проведены дополнительные патентные исследования в соответствии с ГОСТ 15.011-96. Государственной ключевой лабораторией многофазных течений в энергетике Сианьского университета (SKLMFPE): Проведены исследования различных многокомпонентных рабочих жидкостей для определения жидкости, обеспечивающей максимальную скорость

движения контактной линии. Проведено экспериментальное исследование течения газового потока и жидкости в микроканале с учетом совместного эффекта многокомпонентной рабочей жидкости, неоднородности стенки и внешнего электрического поля. Сделано предсказание срока службы светодиодов с различными технологиями охлаждения и эксперименты в течение 6000 часов для проверки надежности модели.

Индийским технологическим институтом Канпура (ИТК): Изготовлены новые би-пористые структуры фитиля в миниатюрной контурной тепловой трубе для высоких тепловых потоков от 0,5 кВт/см² до 1 кВт/см².

При этом были получены следующие результаты:

Проведены экспериментальные исследования экспериментального образца гибридной пленочно-капельной газовой микроканальной системы охлаждения по разработанной Программе и методикам экспериментальных исследований. Следуя программе эксперименты включают экспериментальные исследования спрейного охлаждения светодиодного модуля в зависимости от расхода жидкости и мощности; экспериментальные исследования по взаимодействию капель жидкости с нагретой поверхностью в зависимости от интенсивности нагрева; экспериментальные исследования изменения температуры в экспериментальном образце гибридной пленочно-капельной газовой микроканальной системы охлаждения в зависимости от теплового потока. Показано, что для относительно небольшой мощности до 200 Вт нет существенной разницы между подаваемым расходом жидкости и газа, и температура была значительно ниже 41 °С. Однако увеличение электрической мощности приводит к увеличению разницы температур поверхности при различных скоростях струйного потока. Для рассмотренных случаев эта разница может составлять до 20 °С. Был достигнут тепловой поток до 95 Вт/см² (мощность 757 Вт) при охлаждении нашей струйной/спрейной системой охлаждения, когда температура поверхности поддерживалась ниже 70 °С. Изучена динамика взаимодействия падающей капли жидкости с нагретой поверхностью. Изучена динамика контактного диаметра, в том числе максимального, во времени при соударении капли жидкости с нагретой поверхностью. Изучено изменение высоты жидкого столба в зависимости от температуры на стадии отката капли.

Проведен анализ результатов экспериментальных исследований экспериментального образца гибридной пленочно-капельной газовой микроканальной системы охлаждения. Выявлено, сильно неравномерное распределение температуры для высоких мощностей светодиодного модуля, что свидетельствует о важности конструкции устройства сопла. Поэтому в будущем следует рассмотреть минимизацию размера и расхода системы охлаждения, а также оптимизацию конструкции расположения форсунок для равномерного распределения температуры для номинальной мощности, обеспечивающей высокое качество света и срок службы светодиода. Показано, что повышение температуры приводит к уменьшению контактного диаметра во время стадии отката. Это может быть связано с уменьшением вязкости при повышении температуры, что приводит к увеличению скорости на стадии отката. Увеличение скорости также влияет на высоту столба жидкости и отрыв капель. Высота столба жидкости увеличивается с температурой и снова уменьшается при температуре кипения и выше. Гибридная система показала большую охлаждающую способность.

Проведены обобщение и оценка полученных результатов исследований. Получены важные фундаментальные знания по течению жидких пробок в микроканале, которые

показывают существенную интенсификацию теплообмена за счет тепломассообмена вблизи контактной линии. Также получены хорошие результаты по взаимодействию капель с нагретой подложкой, которые указывают на важность изменения свойств жидкости, таких как вязкость и поверхностное натяжение, за счет повышения температуры, на динамику и соответственно на теплообмен. Эти результаты безусловно будут использованы для систем охлаждения с газочапельными потоками. Созданы и протестированы два экспериментальных образца для применения в системах охлаждения. Проведены эксперименты по изучению охлаждения реального светодиодного модуля, которые показали, что система охлаждения может работать даже при более высоких мощностях чем номинальная мощность светодиодного модуля.

В целом, Государственной ключевой лабораторией многофазных течений в энергетике Сианьского университета (SKLMFPE): Проведены исследования различных многокомпонентных рабочих жидкостей для определения жидкости, обеспечивающей максимальную скорость движения контактной линии. Проведено экспериментальное исследование течения газового потока и жидкости в микроканале с учетом совместного эффекта многокомпонентной рабочей жидкости, неоднородности стенки и внешнего электрического поля. Сделано предсказание срока службы светодиодов с различными технологиями охлаждения и эксперименты в течение 6000 часов для проверки надежности модели.

Делегация из Китая в составе 8 человек сделали визит в Новосибирск, Россия (август 2019). Подробно обсуждены результаты совместных исследований, а также перспективы дальнейшего сотрудничества (обмен студентами, аспирантами) между партнерами. Поданы три статьи в высокорейтинговых изданиях совместно с партнерами из Китая и Индии по результатам проекта.

Иностранным партнером из Индии выявлены механизмы, лежащие в основе отвода тепла двухфазной спрейной охлаждающей системой (выполнено иностранным партнером ИТК). Состоялись визиты ведущего эксперта в области пульсационных тепловых труб С. Кандекара (руководителя проекта из Индии) и профессора К. Муралидара в Новосибирск май-июль 2019. В ходе своего визитов профессор прочитали курс лекций для широкой аудитории ИТ СО РАН. Проф. Кандеккар поделился своим опытом в создании тепловых труб, при его консультациях создан экспериментальный экспериментальный стенд. Проведены эксперименты на этом стенде и подготовлены и опубликованы 3 совместные статьи по результатам исследований и обсуждений.

В ходе выполнения этапа работ принято участие в 6 мероприятиях, направленных на освещение и популяризацию результатов, опубликовано и подано 8 научных статьи, в изданиях индексируемых в Scopus и Web of Science, в том числе из первого квартиля, защищена 1 диссертация, получено и подано 2 патента.

Получателем субсидии за отчетный период по этапу 3 выполнены все работы в соответствии с Требованиями к работам и их результатам, Плана-графика исполнения обязательств, требованиям по достижению значений показателей результативности, отчетная документация оформлена в надлежащем порядке. Обязательства, указанные в пунктах 1.3 и 3 соглашения по 3 этапу исполнены надлежащем образом и в полном объеме.

Получателем субсидии за весь период исполнения проекта 3 октября 2017 - 31 декабря 2019 выполнены все работы в соответствии с Требованиями к работам и их результатам, Плана-графика исполнения обязательств, требованиям по достижению значений показателей результативности, отчетная документация оформлена в надлежащем порядке.

Обязательства, указанные в пунктах 1.3 и 3 соглашения исполнены надлежащим образом и в полном объеме. Все поставленные перед проектом цели достигнуты.

В целом, получены фундаментальные знания по течению жидких пробок в микроканале, которые показывают существенную интенсификацию теплообмена за счет тепломассообмена вблизи контактной линии. Также получены новые результаты по взаимодействию капель с нагретой подложкой, которые указывают на важность изменения свойств жидкости, таких как вязкость и поверхностное натяжение, за счет повышения температуры, на динамику и на теплообмен. Созданы и протестированы два экспериментальных образца для применения в системах охлаждения. Проведены эксперименты по изучению охлаждения реального светодиодного модуля, которые показали, что система охлаждения может работать даже при более высоких мощностях чем номинальная мощность светодиодного модуля.

Также положительным моментом является установление тесного сотрудничества с иностранными партнерами, что подтверждается совместными работами, визитами и публикациями. Коллегиально принято решение о дальнейшем плодотворном сотрудничестве.

В ходе выполнения проекта принято участие в 13 мероприятиях, направленных на освещение и популяризацию результатов, опубликовано и подано 16 научных статей в изданиях реферируемы в Scopus/Web of Science, из них 7 статей в изданиях из первого квартала:

1. Gatapova E.Ya., Kirichenko E.O., Bai B., Kabov O.A., Interaction of Impacting Water Drop with a Heated Surface and Breakup into Microdrops, *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, Vol 6, Issue 1, 75–88 (2018) <http://dx.doi.org/10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2018026089>
2. Shang X., Luo Z., Gatapova E.Ya., Kabov O.A., Bai B., GNBC-based front-tracking method for the three-dimensional simulation of droplet motion on a solid surface, *Computers and Fluids*, 172, 181–195 (2018) <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.06.021> Q1, IF=2.221
3. Gatapova E.Ya., Kabov O.A., Temperature discontinuity and resistance at the liquid-gas interface of thin liquid film and droplet under heating, *Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16 August 10-15, 2018, Beijing, China*, pages 1479-1484 (2018) <http://dx.doi.org/10.1615/IHTC16.bae.024310>
4. Cheverda V., Ronshin F., Water pulsating heat pipe, *EPJ Web of Conference* 196, 00043 (2019) <https://doi.org/10.1051/epjconf/201919600043>
5. Polikarpov A., Graur I., Tadrist L., Gatapova E., Kabov O., Non-equilibrium phenomena on the liquid-vapor interface, *Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16 August 10-15, 2018, Beijing, China*, pages 6617-6624 (2018) <http://dx.doi.org/10.1615/IHTC16.mpf.024466>
6. Kabov O.A., Gatapova E.Ya., Semenov A.A., Jutley M., Ajaev V., Kirichenko E.O., Feoktistov D.V., Kuznetsov G.V., Zaitsev D.V., Experimental and numerical studies of evaporation of a sessile water drop on a heated conductive substrate, *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, Vol 6 (4), p. 421–435 (2018) DOI: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2019030862
7. Fina V.P., Ronshin F.V., Two-phase flow regimes in a horizontal microchannel with the height of 50 μm and width of 10 mm, *Journal of Physics: Conference Series*, 925, 012034 (2017) <https://doi.org/10.1088/1742-6596/925/1/012034>

8. Svetlichnaya O.V., Cheverda V.V., Kirichenko E.O., Varieties of the gas driven water rivulet flow regimes in the minichannels, Journal of Physics: Conference Series, 925, 012010 (2017) <https://doi.org/10.1088/1742-6596/925/1/012010>
9. Alekseev M.V., Vozhakov I., Lezhnin S.I., Simulation of the flow of superheated fluid into a closed volume, Interfacial Phenomena and Heat Transfer, Vol 7, Issue 3, p. 197-208, (2019) DOI: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2019031375
10. Gatapova E.Ya., Khandekar S., Spatial temperature distribution of an open square capillary tube wall during passage of a Taylor liquid plug, Journal of Physics: Conference Series, 1369 (2019) 012003, doi:10.1088/1742-6596/1369/1/012003
11. Khandekar S., Sahu G., Muralidhar K., Gatapova E.Ya., Kabov O.A., Hu R., Luo X., Zhao L., Cooling of High-Power LEDs by Liquid Sprays: Challenges and Prospects, Applied Thermal Engineering, Q1, IF=4.02, подана (2020)
12. Zheng W., Sibiryakov N., Kabov O., Bai B., Surfactant adsorption-induced contact line movement of a sessile water droplet: behaviors at different time scales, Langmuir, Q1, IF=3.683, подана (2020)
13. Gatapova E.Ya., Sahu G., Khandekar S., Hu R., Thermal Management of High-Power LED Module with Single-phase Liquid Jet Array, Applied Thermal Engineering, Q1, IF=4.02, подана (2020)
14. Gatapova E.Ya., Khandekar S., Evaporation of a Taylor Liquid Plug in an Open Square Capillary Tube, International Journal of Thermal Sciences, Q1, IF=3.488, подана (2020)
15. Gluzdov D.S., Gatapova E.Ya., Reduction of viscous resistance in microchannel with rectangular cross section, Experimental Thermal and Fluid Science, Q1, IF=3.493, подана (2020)
16. Kabov O.A., Tkachenko E.M., Belosludsev V.V., Fan E., Guo H., Zaitsev D.V., Interfacial Phenomena in shear-driven thin liquid films under intense heating, International Journal of Multiphase Flow, Q1, IF=2.829, подана (2020)

Получено и подано 2 патента:

1. Получен патент на изобретение № 2706325 «Способ охлаждения электронного оборудования пленочными и капельными потоками жидкости с использованием оребрения» от 19 ноября 2019 г. (заявка №2018146202/06(077245) от 25.12.2018);
2. Заявка на изобретение № 2019144491 «Способ охлаждения электронного оборудования с использованием комбинированных пленочных и газо-капельных потоков» от 27.12.2019г.

Защищено 2 кандидатские диссертации:

1. Шатский Е.Н. Влияние термокапиллярных эффектов на характеристики течения нагреваемой пленки жидкости (2018)
2. Роньшин Ф.В. Двухфазные течения в коротких прямоугольных микроканалах (2019)

Результаты выполнения проекта могут оказать принципиальное влияние на развитие техники охлаждения светодиодного и микроэлектронного оборудования. Разрабатываемые технологии предназначены для подготовки технических решений для систем охлаждения светодиодных модулей, а также микропроцессоров высокопроизводительной вычислительной техники. Результаты научно-исследовательской работы проекта должны быть внедрены в образовательный процесс посредством дополнения лекции для студентов Новосибирского Государственного Университета, методики исследований должны найти применение в профессиональной подготовке дипломных работ студентов, молодых ученых.