

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПЫЛЕЗАЩИТНОГО ЭКРАНА ДЛЯ СМЯГЧЕНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ. К. Р. Бюлер<sup>1</sup>, М.

Йохансен<sup>1</sup>, М. Дюпои<sup>1</sup>, М. Хоуг<sup>1</sup>, Дж. Филлипс<sup>1</sup>, Дж. Малисса<sup>1</sup>, Дж. Ванг<sup>1</sup> и К.И. Калле<sup>1</sup>, <sup>1</sup>Лаборатория электростатики и физики поверхности, NASA KSC, почтовый код: UB-G, Космический центр имени Кеннеди, штат Флорида, 32899 (Charles.r.buhler@nasa.gov).

**Введение:** Электродинамический пылезащитный экран (ЭДЗ) разрабатывался как средство для подъема, транспортировки и удаления пыли с поверхностей в течение более 18 лет в лаборатории электростатики и физики поверхности в Космическом центре НАСА имени Кеннеди. Последние достижения в технологии позволили изготавливать крупномасштабные ЭДП с использованием рулонных технологий для быстрой эффективной обработки.

Цель данного исследования - продемонстрировать трехмерную (3-D) версию EDS и ее применимость к различным поверхностям, представляющим интерес в рамках программы Artemis и требующим очистки от пыли. Традиционная двумерная (2-D) система EDS состоит из межзубных электродов, расположенных на 180° переменной полярностью для создания неоднородных электрических полей в интересующем месте, с которого необходимо удалить частицы. Двухмерная система может быть сконструирована таким образом, чтобы в ней можно было использовать различные фазы. Например, двухфазный EDS состоит из двух электродов, расположенных на 180° вне фазы, а трехфазный EDS - на 120° вне фазы с соседней ногой. Возможны и 4-фазные конфигурации EDS, но для каждой квадратной волны на каждую ногу подается сигнал высокого напряжения.

**Фазы:** Преимущества выбора количества фаз определяются пользователем. Например, для простого удаления пыли из интересующей зоны можно использовать любое количество фаз, даже двухфазные. Однако если необходимо воспользоваться преимуществами динамики бегущей волны, потребуются 3- или 4-фазные системы. Это относится к пользователям, которые хотят, чтобы пыль оседала в известном или контролируемом месте. Недостатком многофазных систем является то, что они требуют более совершенных схем и более мощной электроники, которая также может потреблять большую мощность.

**Размерность:** Пользователи могут воспользоваться преимуществами дополнительной размерности EDS. Например, до сих пор большинство ЭОП состояло из электродов, размещенных на двумерной поверхности для создания электрических полей, необходимых для удаления пыли, как показано в верхней части рис. 1. Электрическое поле, исходящее от положительного (синего) электрода, распространяется над и под поверхностью через местоположение перемещаемой частицы и заканчивается у отрицательного (красного) электрода. Это пространственно- и временно-зависимое поле поднимает и перемещает частицы. Основным недостатком этой конструкции является то, что электрическое поле между следами довольно велико, требует очень высокого диэлектрического пробоя.

прочность материалов на поверхности. Таким образом, требуемая прочность на пробой покрытия и/или адгезива ограничивает электрическое поле (и напряжение), которое можно применить для удаления пыли.

Лучшим вариантом является использование трехмерной версии электродинамического пылезащитного экрана, показанной на рис. 1 (бот.). Здесь пространственно-зависимое поле обеспечивается не соседними трассами, а нанесением грунтового слоя под подложку. При этом поле, необходимое для удаления частиц с поверхности, все равно обеспечивается. Хотя бегущие волны не являются опцией для трехмерной версии, такой выбор конфигурации электродов имеет ряд преимуществ, таких как:

- (1) Пробой происходит уже не по поверхности, а *через* диэлектрик. Основной диэлектрик не только обладает более высокой прочностью, чем клей или клей, но и гораздо толще и прочнее. Поверхностный пробой встречается в материалах гораздо чаще, чем объемный.
- (2) Все электроды на поверхности имеют одну полярность и могут быть соединены электрически. Таким образом, если отрезать отдельную трассу, EDS будет функционировать нормально, и характеристики останутся неизменными.
- (3) Наземная плоскость обеспечивает "безопасную зону", в которую не могут проникнуть большие электрические поля и которая будет использоваться для шлемов, скафандров и т.д. для защиты астронавтов.

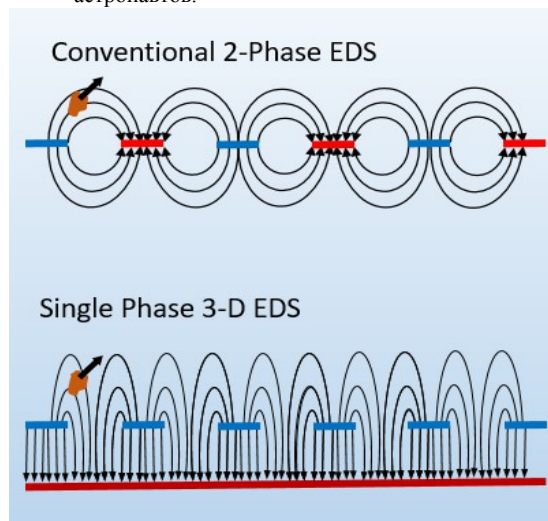


Рисунок 1. (вверху) Обычная двухмерная ЭДП с электродами на поверхности. (внизу) Трехмерная версия EDS с плоскостью земли под плоскостью электродов.

**Примеры:** Существует множество примеров типов ЭЦП, разработанных за многие годы. Ниже приведен краткий список их применения.

**Оптические системы:** В прозрачной версии EDS используются электроды из оксида индия-олова (ITO) на двумерных поверхностях. Уровень TRL для этой технологии довольно высок - TRL 8, и в настоящее время ее версия летает в составе полезной нагрузки MISSE-11 на МКС. Было показано, что электроды ITO на стекле с верхним слоем из стекла удаляют более 98 % пыли в условиях высокого вакуума [1]. Испытания образцов Apollo в условиях имитации лунной гравитации также показали такую эффективность очистки [2]. Эти стеклянные системы идеально подходят для объективов фотокамер и систем лазерных покровных стекол. Прошлые и текущие проекты включают объективы для марсохода RASSOR, камеры RESOLVE и объективы для камер для будущих миссий CLIPS.

**Фотоэлектрические системы:** EDS, состоящие из полиэтилентерефталата (PET) с покрытием ITO, были изготовлены для покрытия коммерческих солнечных фотоэлектрических панелей (PV) и могут быть сделаны размером 152 см × 101 см с помощью рулонной обработки. В качестве подложки используется акрил, который отличается гибкостью, прочностью и легкостью. В настоящее время ведутся работы по внедрению технологии EDS в сами солнечные элементы. KSC сотрудничает с Исследовательским центром Гленна, чтобы внедрить электроды EDS в производство солнечных батарей в 2020 финансовом году.

**Тепловые радиаторы:** В ESPL разработаны трехмерные версии EDS для систем окраски тепловых радиаторов, таких как термокраски AZ-93 и A276, а также трехмерные и двухмерные версии EDS с использованием отражающих поверхностей, таких как зеркала первой и второй поверхности с алюминиевым покрытием из фторированного этиленпропилена (FEP) [1]. Ключевым моментом в разработке EDS является то, что ее универсальность позволяет изготавливать устройства из материалов, характерных для данной системы. В данном случае алюминий является материалом для электродов, но он также присущ самому радиатору. Таким образом, добавление новых материалов или компонентов сводится к минимуму при включении EDS в существующую систему.

**Ткани:** EDS также были сформированы из тканей. Ткань, содержащая проводящие элементы, может быть "превращена" в систему пылеудаления. Например, электростатически рассеивающая ткань, используемая для чистых помещений, обычно содержит проводящие нити, вплетенные в небольшие узоры. Если подать напряжение на нити и обеспечить металлический заземленный слой внутри скафандра, можно добиться повторного удаления пыли с помощью лунного симулятора. Скафандр космонавта будет содержать как минимум один, а то и много (MLI) проводящих слоев заземления для защиты астронавта, которые смогут надежно удерживать поле от эрегированных нитей снаружи. ESPL показала, что это возможно, и были написаны отчеты о новых технологиях [3].

**Требования к источникам питания:** Современные источники питания для EDS требуют примерно 2-4 Вт мощности независимо от размера EDS. Объем источника питания MISSE в настоящее время составляет 5 см × 10 см × 13 см = 666 см<sup>3</sup>, и он находится в процессе миниатюризации с целью сделать его не пачки жевательной резинки. Это возможно, поскольку мощность, необходимая для удаления пыли на EDS (только ток смещения), в идеале составляет порядка нескольких мВт (~μA·kV), поэтому большая часть энергии, используемой в текущей конфигурации, приходится на сам источник питания.

**EMI/EMC:** EDS и его высоковольтный источник питания прошли испытания на EMI/EMC в соответствии со стандартом ISS Standard 30238 [4] и соответствуют требованиям к излучаемой эмиссии [см. 5-6] для использования на носителе MISSE и не являются значительным источником шума.

**Режимы работы:** Пользователь может работать с EDS в двух режимах: непрерывном или прерывистом. Выбор зависит от требований к загрузке и очистке пыли для каждой системы. Например, для поверхностей, требующих строгой очистки, может потребоваться непрерывный режим работы, чтобы частицы не соприкасались с поверхностью. Такой бесконтактный режим устраняет хорошо известную силу сцепления Ван-дер-Ваальса, которую трудно преодолеть. Другие системы, способные справиться с умеренным количеством мелкой пыли, могут рассматривать работу EDS в прерывистом режиме для экономии энергии.

**Благодарности:** Мы хотели бы выразить благодарность Инновационной инициативе по лунной поверхности за финансирование данного исследования.

**Ссылки:** [1] Calle, C. I., C. R. Buhler, M. R. Johansen, M. D. Hogue, and S. J. Snyder. "Технология активного контроля пыли и смягчения ее воздействия для исследования Луны и Марса". *Acta Astronautica* 69, № 11-12

:1082-1088. (2011). [2] Calle, C.I. et al., "Демонстрация в полете с пониженной гравитацией технологии пылезащитного экрана для оптических систем". In *2009 IEEE Aerospace conference* (1-10). (2009). [3] Manyapu, Kavya K., Peltz L., de Leon P., Gaier J.R., Tsentalovich D., Calle C. and Mackey, P., "Investigating the Feasibility of Utilizing Carbon Nanotube Fibers for Spacesuit Dust Mitigation." 46-я Международная конференция по экологическим системам, (2016). [4] Space Station Electro-magnetic Techniques, SSP 30238 Revision D (1998).

[5] Carmody, Lynne M., and Carl B. Boyette. "EMC Отчет об испытаниях электродинамического пылезащитного экрана". EML-0069- REF (2 мая 2014 г.). [6] Carmody, Lynne M., Birr, R.B., and Carl B. Boyette. "EMC Test Report Electrodynamic Dust Shield (EDS) High Voltage Power Supply (HVPS)" EML-0204-REF (March 20, 2018).