

ВАКУУМНОЕ КОРПУСИРОВАНИЕ НА УРОВНЕ ПЛАСТИНЫ ГЕТТЕРЫ

А.Скупов¹

УДК 621.382
БАК 05.27.06

Для работы многих микроэлектромеханических систем (МЭМС), микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС) и ряда других устройств требуется вакуум. Герметизация с помощью дискретных корпусов – довольно дорогостоящее и сложное решение, поэтому перспективным представляется применение корпусирования на уровне пластины. В данной статье рассматриваются возможные методы реализации этой технологии. Основной акцент сделан на решении проблемы сохранения требуемого уровня вакуума в течение длительного времени, что достигается благодаря оптимальному выбору материалов и внедрению в герметичный объем геттеров. Анализируются также основные технологические аспекты применения геттеров, их свойства и характеристики.

Существует довольно обширный класс МЭМС, МОЭМС и устройств вакуумной микроэлектроники, для работы которых требуется пониженное давление – вакуум. К таким устройствам относятся гироскопы, акселерометры, датчики абсолютного давления, матрицы микроболометров и приборы, принцип действия которых основан на движении свободных электронов в электрическом поле. Перечисленные изделия имеют широчайшие перспективы применения: в системах инерциальной навигации в автомобилях и летательных аппаратах, системах ночного видения, контроля потерь тепла на энергетических объектах и др. При этом ключевые требования к данным изделиям – минимальный размер и низкая стоимость при высокой долговечности и надежности.

В настоящее время для создания вакуума в МЭМС и микроболометрах часто используют специальные корпуса. Однако это существенно увеличивает стоимость устройств и удлинит производственный цикл. Привлекательная идея – применение так называемого корпусирования на уровне пластины (WLP – wafer level packaging). Метод основан на сварке пластин (wafer bonding), когда пластина со сформированными функциональными структурами совмещается и затем неразрывно соединяется с пластиной-крышкой. Данный процесс позволяет значительно упростить и удешевить технологию, поскольку корпусируются одновременно несколько устройств, расположенных на одной пластине (рис.1).

Сварка пластин может выполняться как непосредственно (кремний-кремний; стекло-кремний), так и при помощи различных промежуточных слоев: металлов и сплавов, полимеров, стеклокерамических припоев.

¹ ООО "Остек-Интегра", главный специалист отдела технического сопровождения, skupov.a@ostec-group.ru.



Рис.1. Иллюстрация идеи корпусирования на уровне пластины

Задача обеспечения и поддержания определенного уровня вакуума при корпусировании на уровне пластины весьма сложная, поскольку ни одно соединение не является абсолютно герметичным, и приходится бороться с утечками и дегазацией. Данные проблемы особенно сильно проявляются, когда объем герметизируемого пространства очень мал, то есть именно в случае корпусирования на уровне пластины. Для реализации такой технологии часто требуется использовать материалы, поглощающие газы (геттеры), стеклокерамические припои (например, Namics, Ferro), специальные сплавы и др. Успешное решение задачи по поддержанию нужного уровня вакуума в течение всего периода эксплуатации устройства зависит от выбора материалов и методов сварки пластин, требований надежности и долговечности.

ПРИЧИНЫ ДЕГРАДАЦИИ ВАКУУМА ВНУТРИ ГЕРМЕТИЧНОГО ОБЪЕМА МЭМС

После прекращения откачки внешним насосом давление внутри любой герметичной полости неизбежно изменится. Если внутри полости нет геттеров, то давление может только увеличиваться, что обусловлено тремя причинами (рис.2) [1]: проницаемостью материала для газа; утечками по соединению; дегазацией.

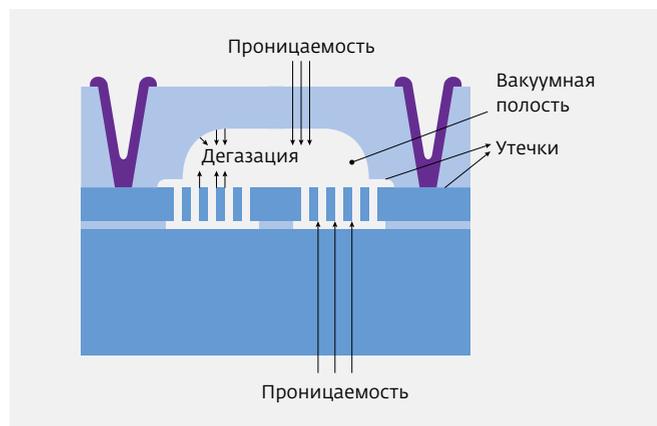


Рис.2. Иллюстрация причин деградации вакуума в МЭМС

Проницаемости лучше всего препятствуют кристаллы, металлы и сплавы. Стекла также обладают приемлемой проницаемостью. Однако полимеры не способны противостоять проникновению через их толщю газов, что связано со структурой данных веществ [2]. Поэтому в качестве оптимального решения для вакуумного корпусирования рассматривают сварку через эвтектические сплавы (например, AuSn, AuSi), интерметаллические соединения (CuSn) и легкоплавкие металлы (например, In). Также вакуум-плотных соединений можно добиться при сварке пластин через специальную стеклянную пасту (коммерчески доступны от Ferro и Namics). При анодной сварке пластин и низкотемпературной непосредственной сварке тоже можно создавать герметичные соединения (табл.1) [3].

Утечки по границам материалов и дегазация – основные факторы, вызывающие повышение давления внутри герметичного объема. Влияние данных факторов проявляется тем сильнее, чем ниже степень вакуума, необходимая для работы устройства (табл.2) [4]. Эти факторы не критичны, например, для МЭМС-акселерометров, датчиков давления и микроключей (RF MEMS switches),

Таблица 1. Методы сварки пластин, пригодные для вакуумного корпусирования на уровне пластины

Приборная пластина	Пластина-крышка	Метод сварки	Возможность достижения высокого вакуума	Совместимость с КМОП
Кремний	Стекло	Через полимер	Нет	Да
Стекло	Кремний	Эвтектическая	Возможно при определенных условиях	Нет
Стекло	Кремний	Анодная	Да	Нет
Кремний	Кремний/стекло	Через стеклокерамический припой (glass frit)	Да	Возможна при определенных условиях

Таблица 2. Уровни вакуума, необходимые для работы различных устройств

Устройство	Требуемое давление, Па	Уровень вакуума
МЭМС-акселерометр	10^2-10^4	Низкий и средний
Датчик давления	$10^{-2}-10^5$	От низкого до высокого
МЭМС-гироскоп	$10-10^{-2}$	Средний и высокий
Радиочастотный МЭМС-переключатель	$10-10^{-2}$	Средний и высокий
Микроболометр	$<10^{-2}$	Высокий
Туннельные приборы	$<10^{-1}$	Высокий

которые обычно работают при низком ($>10^3$ Па) и среднем (10^3-10^{-1} Па) уровнях вакуума. В этом случае изменение давления из-за дегазации может быть незначительным даже после многих лет эксплуатации [5]. Иная картина характерна для устройств, требующих в своей работе высокого вакуума (ниже 10^{-1} Па). К таковым относятся некоторые МЭМС-гироскопы, резонаторы, микроболометры и приборы вакуумной микроэлектроники. Высокий вакуум очень быстро нарушается после прекращения откачки (рис.3) [5], поэтому для его сохранения требуется интегрировать внутрь герметичной полости газопоглотитель (геттер).

ГЕТТЕРЫ

Существует два вида геттеров: распыляемые и нераспыляемые (NEG – non evaporable getter) [6]. В первом случае вещество нагревается в вакууме, в результате чего испаряется и пересаживается какой-либо ком-

понент, который затем поглощает газ. Поскольку при таком технологическом решении неизбежно изменится масса чувствительных элементов МЭМС, оптические свойства МОЭМС и эмиссионные характеристики изделий вакуумной микроэлектроники, такой тип геттеров неприемлем для корпусирования перечисленных изделий на уровне пластины. В этих случаях применяются нераспыляемые геттеры. Материал такого типа поглощает газ сразу, но требует активации температурой при пониженном давлении.

Эффективность любого геттера характеризуется двумя наиболее важными параметрами:

- сорбционная емкость – количество газа, которое может быть ими поглощено за единицу времени;
- избирательность – газы, по отношению к которым геттер проявляет активность.

При известных скоростях утечек по соединению и величине дегазации нужно выбирать такой тип гет-

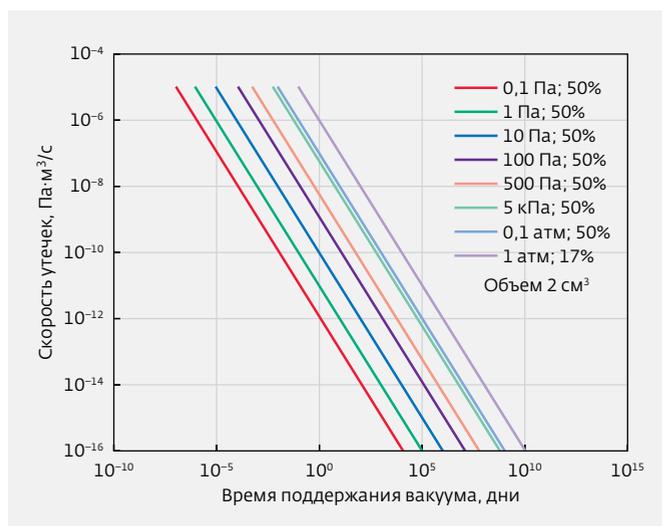


Рис.3. Изменение внутрикорпусного давления (в % от начального) в зависимости от скорости утечек и времени

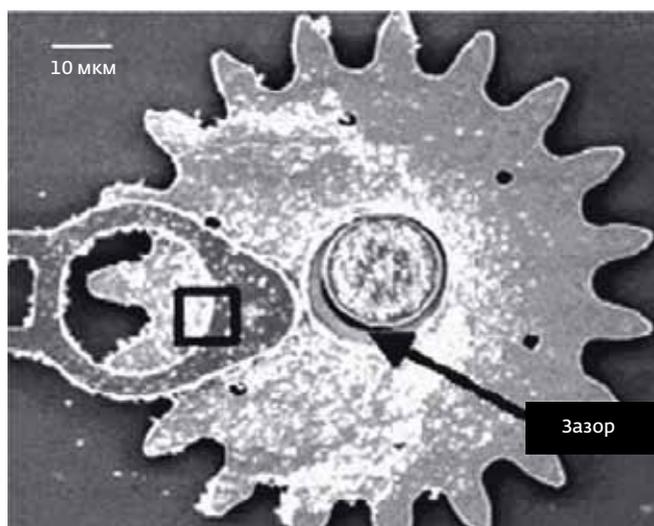


Рис.4. Износ оси вращения микрошестерни вследствие эксплуатации при повышенной влажности окружающего воздуха

Таблица 3. Состав остаточной атмосферы в герметичном объеме

Газ	Парциальное давление, Па	%
H ₂	5,37·10 ¹	73,08
He	0,00	0,00
CO	1,36	1,85
N ₂	9,96·10 ⁻¹	1,36
CH ₄	1,51·10 ¹	20,55
H ₂ O	0,00	0,00
O ₂	0,00	0,00
C ₂ H ₆	1,23	1,67
C ₃ H ₈	4,43·10 ⁻¹	0,60
Ar	7,87·10 ⁻²	0,11
CO ₂	5,72·10 ⁻¹	0,78
Kr	0,00	0,00
В сумме	7,35·10 ¹	100

тера, сорбционная емкость которого обеспечит требуемый уровень давления внутри изделия на протяжении всего периода эксплуатации.

Важно знать состав остаточной атмосферы внутри герметичного объема МЭМС, МОЭМС и прочих полупроводниковых устройств. Это позволяет понять, против каких газов необходимо применять геттеры, и насколько эффективно будет их использование.

Довольно часто значительную часть остаточной атмосферы составляют пары воды, кислород и азот, но их концентрация не соответствует таковой в нормальной атмосфере [6]. Приведем в качестве примера состав остаточной атмосферы при вакуумной анодной сварке пластин стекла и кремния (табл.3) [7]. Основным компонентом атмосферы в данном случае является водород.

Некоторые газы могут вызвать негативные последствия для функционирования устройств. Например, при избыточной концентрации паров воды в корпусе изнашиваются подвижные узлы (рис.4) [8]. Приведенные примеры показывают, что геттеры могут понадобиться не только для вакуумного корпусирования, но и для строгого контроля состава газовой среды внутри герметичного объема.

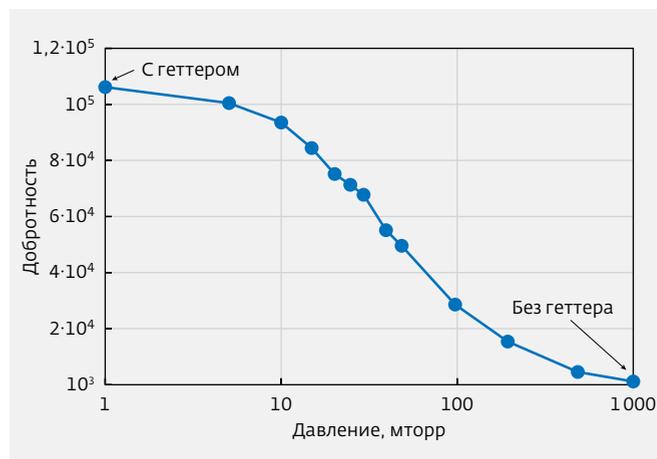


Рис.5. Зависимость добротности микрорезонатора от уровня окружающего давления

Рассмотрим влияние уровня вакуума на добротность МЭМС-гироскопа (рис.5) [9]. Из графика очевидно, что увеличение давления вызывает существенное снижение добротности, то есть КПД колебательной системы. Без геттера время жизненного цикла любого вакуумного устройства можно вычислить по формуле [10]:

$$t = \frac{P_{max} V}{P_{atm} v},$$

где P_{max} – максимальное давление внутри полости, V – объем полости, P_{atm} – атмосферное давление, v – скорость утечек.

Типичный объем МЭМС, корпусированных на уровне пластины, составляет порядка 10⁻³ см³, скорость утечек в лучшем случае – около 10⁻¹⁴ см³/с. Таким образом, если гироскоп имеет максимальное внутреннекорпусное давление 1 Па, оно продержится менее месяца [10]. Очевидно, что в этом случае данное устройство нельзя применять в системе курсовой устойчивости автомобиля, где оно должно исправно работать несколько лет. Конечно, вышеупомянутая скорость не учитывает дегазацию, что еще больше сокращает время эксплуатации. Геттер же

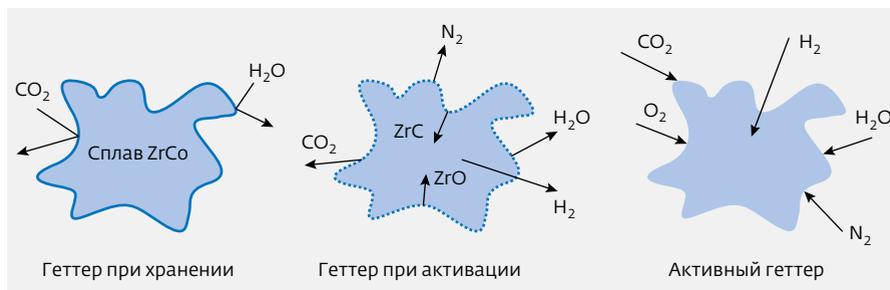


Рис.6. Иллюстрация активации геттера

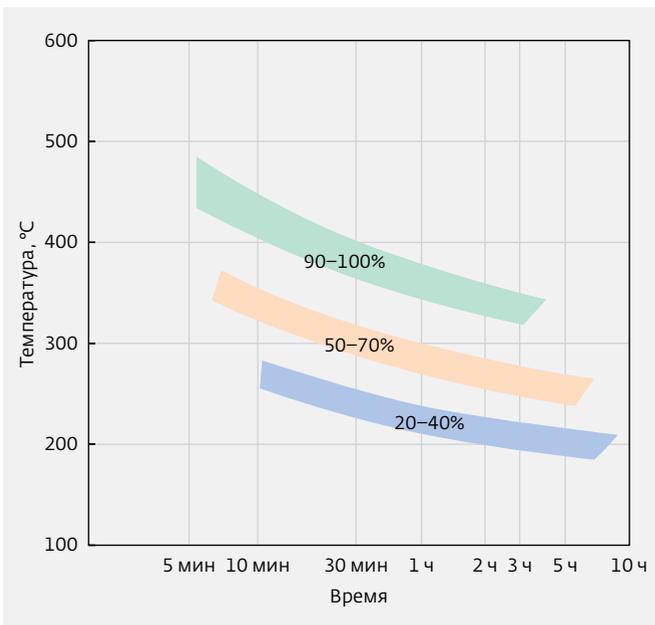


Рис.7. Эффективность активации геттера при различных температурах

позволяет в значительной степени компенсировать как утечки, так и дегазацию.

Механизм действия геттера заключается в адсорбции газов поверхностью и последующем химическом связывании (рис.6) [11]. Нераспыляемые геттеры формируются из металлических сплавов на основе Zr, Ti, V, Fe, Co [6, 12]. Наиболее часто используют соединения на основе Zr (например, продукты фирмы SAES Getters), поскольку прочие металлы вызывают некоторые избыточные сложности с формированием стойких поверхностных оксидов. Перечисленные металлы взаимодействуют с кислородом, водой и углекислым газом, образуя твердые соединения. Водород может быть поглощен внутри объема металла с образованием гидридов.

После контакта с атмосферой поверхность сформированной пленки геттера загрязняется продуктами реакции металлов с различными газами. Поэтому для начала поглощения газов геттер необходимо подвергнуть специальной обработке, то есть активировать. Общепринятый метод активации геттера – его нагрев при пониженном давлении. Данная процедура приводит к миграции оксидов в объем металла и десорбции молекул с поверхности. Температура активации геттеров обычно находится в диапазоне 300–450 °С. Данный диапазон полностью совместим с большинством видов сварки пластин, а также с полупроводниковыми компонентами устройств. Полнота активации геттера зависит не только от температуры, но и от времени (рис.7) [12]. Геттер достаточно активировать на 85–90% для сокращения времени процесса сварки пластин.

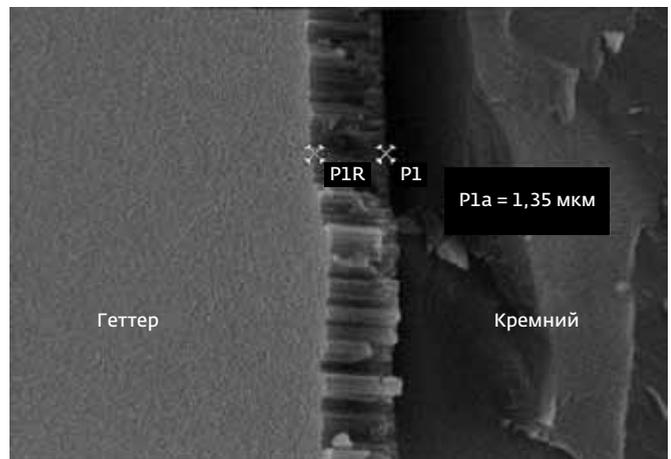


Рис.8. Микрофотография пленки геттера, сформированного на Si-пластине. P1a – расстояние между точками P1R и P1

Для повышения эффективности геттер формируют с максимально большой площадью поверхности (рис.8) [13].

Коммерчески доступны геттеры, поставляемые в виде преформ определенного размера, которые помещаются в специально сформированную выемку в корпусе. Данные продукты имеет смысл использовать на стадии разработок. Для серийного производства предлагаются сервисы, позволяющие сформировать пленку геттера на пластине заказчика согласно его требованиям и топологии (рис.9) [14].

Таким образом, геттеры позволяют решить проблему сохранения стабильного давления внутри герметично корпусированных МЭМС, МОЭМС и прочих полупроводниковых приборов. Этот результат достигается за счет надежного химического связывания молекул газов, составляющих основную часть остаточной атмосферы. Кроме того, в ряде применений геттеры могут быть полезны с точки зрения удаления определенных компонентов атмосферы.



Рис.9. Кремниевая пластина фирмы SAES Getters со сформированным рисунком тонкопленочного геттера для корпусирования на уровне пластины

Группа компаний Остек поставляет оборудование и материалы для вакуумного корпусирования на уровне пластины для создания МЭМС, МОЭМС и других изделий микроэлектроники. Специалисты компании готовы оказать поддержку при выборе материалов – пластин, сплавов, высокочистых металлов, стеклокерамических припоев и геттеров, а также при отработке разнообразных технологий, необходимых для реализации вакуумного корпусирования на уровне пластины.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wu G. et al.** Wafer level vacuum packaged resonator with in-situ Au-Al eutectic re-distribution layer. – Sensors, 2012 IEEE, Taipei, 28–31 Oct. 2012, p. 1–4.
2. **Niklaus F. et al.** Adhesive wafer bonding, Journal of applied physics 99, 2006 – homepages.rpi.edu/~luj/Papers/lujq2.pdf
3. **Lemoine D.** Vacuum packaging at the wafer level for the monolithic integration of MEMS and CMOS, McGill University, 2009.
4. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies / Edited by V. Lindroos [and co-authors]. Burlington: Elsevier Inc., 2010, 636 p.
5. **Gan Z. et al.** Getter free vacuum packaging for MEMS, Sensors and Actuators A 149, 2009, pp. 159–164.
6. **Ramesham R.** Evaluation of Non-Evaporable Getters for High Vacuum Hermetic Packages, California Institute of Technology, 1999.
7. **Chidambaram V., Ling X., Bangtao C.** Titanium-Based Getter Solution for Wafer-Level MEMS Vacuum Packaging, Journal of Electronic Materials, 2013, Vol. 42, Issue 3, pp. 485–491.
8. **Gilleo K.** MEMS/MOEMS Packaging. New York: McGraw-Hill, 2005, 220 p.
9. **Torunbalci M.M. et al.** A method of fabricating vacuum packages with vertical feedtroughs in a wafer level anodic bonding process, EUROSENSORS 2014, the XXVIII edition of the conference series, pp. 887–890.
10. **Marinis T.F. et al.** Wafer Level Vacuum Packaging of MEMS Sensors, IEEE 2005 Electronic Components and Technology Conference, pp. 1081–1088.
11. **Reinert W.** MEMS packaging, Advanced Solder Materials for High Temperature Application (HISOLD) Working Group Meeting, Vienna, 2008, Unpublished.
12. **Moraja M. et al.** New getter configuration at wafer level for assuring long term stability of MEMS, Proceedings of SPIE, Vol. 4980, pp. 260–265.
13. **Muhs D. and Barnes P.** Controlling vacuum levels in discrete MEMS packages. – Proceedings of IMAPS international conference and Exhibition on device packaging (DPC2006), Phoenix, Arizona, March 20–23, 2006.
14. saesgetters.com

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 760 руб.

РЕЗАНИЕ МЕТАЛЛОВ ИЗЛУЧЕНИЕМ МОЩНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Вакс Е.Д., Лебёдкин И.Ф., Миленький М.Н., Сапрыкин Л.Г., Толочков А.В.

Первый раздел книги посвящен расширенному рассмотрению определяющих результатов процесса лазерного резания физических закономерностей. К таковым относятся: зависимость коэффициента отражения металлов от температуры их нагрева; прохождение ассистирующего газа по фронту реза и его влияние на удаление образующейся на поверхности фронта жидкой фазы; необходимость ограничения максимально возможной величины скорости резания; оптимизация ширины реза на его входе; более эффективный способ локализации излучения; согласование фокусных расстояний фокусирующего объектива и коллиматора лазера; влияние на показатели резания тепловых деформаций.

В двух других разделах книги приводятся установленные анализом результатов проведенных в НПЦ "Лазеры и аппаратура ТМ" в период 2005–2014 гг. экспериментальных исследований закономерности лазерного резания металлов, наиболее часто используемых отечественной промышленностью. Таковыми являются конструкционная сталь, резание которой проводится в зависимости от ее толщины в среде сжатого воздуха или кислорода, нержавеющей стали и сплавы алюминия различных марок, резание которых необходимо проводить в среде нейтральных газов, а также ряд других металлов, необходимых для изготовления изделий различного назначения.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. — 352 с. + 4 стр. цв. вклейки
ISBN 978-5-94836-427-8

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; ✉ knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru