

ПРИМЕНЕНИЕ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК В КАЧЕСТВЕ МЕТОДА СДЕРЖИВАНИЯ РОСТА ВИСКЕРОВ

О.Симонов¹

УДК 621.793
БАК 05.27.06

Образование нитевидных кристаллов (вискерров) на поверхности электрических выводов приводит к риску короткого замыкания между близкорасположенными компонентами печатных плат или соседними выводами одного компонента. Данная статья касается перспектив использования защитных покрытий, препятствующих образованию вискерров, как одного из способов решения вышеуказанной проблемы. Конкретно речь пойдет о таком методе нанесения покрытий, как атомно-слоевое осаждение. Эта технология характеризуется высокой степенью однородности тонких пленок, их конформностью к подложке и другими преимуществами.

ВИСКЕРЫ В ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

Феномен образования вискерров (от англ. whisker – волос, усик) известен достаточно давно, в том числе и как один из негативных факторов, снижающих надежность электронной аппаратуры и требующих принятия мер по предотвращению их роста [1].

Вискерами принято называть кристаллические образования с сильно выраженными анизотропными свойствами, проявляющимися в преимущественном росте в одном направлении. Благодаря этому, отношение их геометрических размеров достигает значений 1:1000 и более. При характерном диаметре 1–10 мкм длина нитей достигает порядка нескольких миллиметров, что сопоставимо с расстояниями между компонентами печатных плат и их выводами.

Имеется большое разнообразие форм роста вискерров для различных материалов. Помимо характерной для олова нитевидной формы, встречаются спиральные, ступенчатые, скрученные образования, зубцы, ленты и т.д. (рис.1). Несмотря на более чем семидесятилетний период их исследования, физико-химические процессы, лежащие в основе феномена, являются недостаточно изученными. В частности, неясен вопрос о самом зарождении вискерров, из-за чего "инкубационный" период, предшествующий их появлению, плохо поддается прогнозированию.

Вискеры представляют собой объект пристального внимания исследователей по причине своих уникальных свойств: повышенной, по сравнению с обычными кристаллами того же материала, прочности, гибкости, проводимости, коррозионной стойкости и т.д. [2]. В сочетании эти свойства открывают весьма заманчи-

¹ Компания "Евроинтех", sov@eurointech.ru.

вые возможности. Среди практических применений можно упомянуть использование нитевидных кристаллов различных материалов в качестве армирующих волокон в композитах. Также необходимо отметить широкие перспективы использования вискеро- в качестве микромасштабных зондов, например для кантилеверов атомно-силовых микроскопов, в качестве манипуляторов для наноразмерных объектов, вживляемых электродов для биологических и медицинских исследований, квантовых точек и т. д.

Однако, найдя полезное применение во многих областях, вискры давно известны как источник проблем при производстве электроники и, в частности, монтаже электронных модулей. В таких случаях возникает задача предотвращения образования вискеро- в, для чего разработан и применяется ряд технологических методов.

Как показали исследования, существует определенная связь между возникновением вискеро- в и внутренними механическими напряжениями сжатия. К примеру, припои Sn-Pb практически не образуют вискры, поскольку свинец придает материалу припоя пластичность, в то время как для чистого олова – при возникновении в нем достаточно больших внутренних напряжений – эта проблема очень характерна. Механические напряжения обусловлены множеством факторов, как конструктивного (например, форма выводов, внутренняя структура паяного соединения), так и технологического характера (параметры процессов при производстве электронных компонентов), а также наличием дефектов, к примеру, царапин.

Переход на бессвинцовые технологии вместе с общей тенденцией к миниатюризации изделий и уменьшению межвыводных расстояний сделали особенно актуальной проблему короткого замыкания выводов с Sn-покрытием нитевидными кристаллами, спонтанно образующимися на их поверхности. Применение припоя Sn-Pb в производстве печатных плат не является полноценным решением проблемы, поскольку выводы самих компонентов, в соответствии с экологическими требованиями, как правило, не содержат свинец, и после монтажа на них остаются

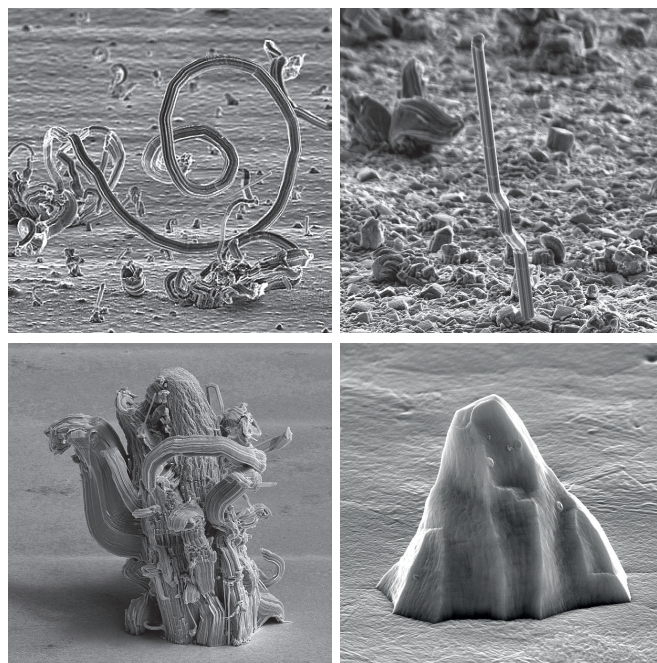


Рис.1. Вискры различной форма на поверхности Sn, Zn и Cd. Фото: dspace.lboro.ac.uk

участки, не покрытые припоем. Ситуация усложняется еще и тем, что образование вискеро- в имеет скрытый период, из-за которого на стадии производства изделий их образование, как правило, невозможно обнаружить с помощью визуального контроля.

Существуют различные технологические способы ослабления роста вискеро- в, среди которых стоит отметить:

- оплавление Sn-покрытия выводов при сборке;
- формирование подслоя (Ni, Ag) между Sn-покрытием и медной выводной рамкой;
- отжиг выводных рамок непосредственно после формирования Sn-покрытия при производстве компонентов;
- нанесение защитных покрытий на заключительном этапе сборки.

Эти способы представлены в табл.1. Последний способ отличается от остальных тем, что вместо уstra-

Таблица 1. Технологические способы уменьшения образования вискеро- в

Способ	Этап	Механизм воздействия
Формирование подслоя	Производство компонентов	Снижение механических напряжений
Отжиг выводных рамок	Производство компонентов	Снижение механических напряжений
Оплавление покрытия выводов	Сборка печатных плат	Снижение механических напряжений
Нанесение защитных покрытий	Сборка печатных плат	Формирование физического барьера

нения причины образования вискоз – внутренних механических напряжений – он обеспечивает физический барьер, препятствующий их росту. Мы рассмотрим его более подробно на примере использования технологии атомно-слоевого осаждения (АСО) – перспективного метода формирования тонких пленок, широко применяемого в настоящее время в полупроводниковой промышленности и многих других отраслях.

ТЕХНОЛОГИЯ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ КАК ПЕРЕДОВОЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ УЛЬТРАТОНКИХ ПОКРЫТИЙ

Атомно-слоевое осаждение (англ. ALD – Atomic Layer Deposition) – химический метод нанесения сверхтон-

ких пленок из газовой фазы, основанный на самонасыщаемых реакциях адсорбции между поверхностью и прекурсорами, отличающийся высокой однородностью и конформностью покрытия, высокой воспроизводимостью, возможностью контролировать толщину осаждаемого материала на уровне <1 нм и сравнительно низкими температурами при проведении процесса осаждения [3, 4].

Процесс АСО заключается в циклическом чередовании подачи прекурсоров и продувки реакционной камеры инертным газом (прекурсор А – продувка – прекурсор В – продувка ...) заданное количество раз, в соответствии с требуемым количеством атомных слоев. Обычно проводятся процессы осаждения двойных соединений, с использованием двух пре-

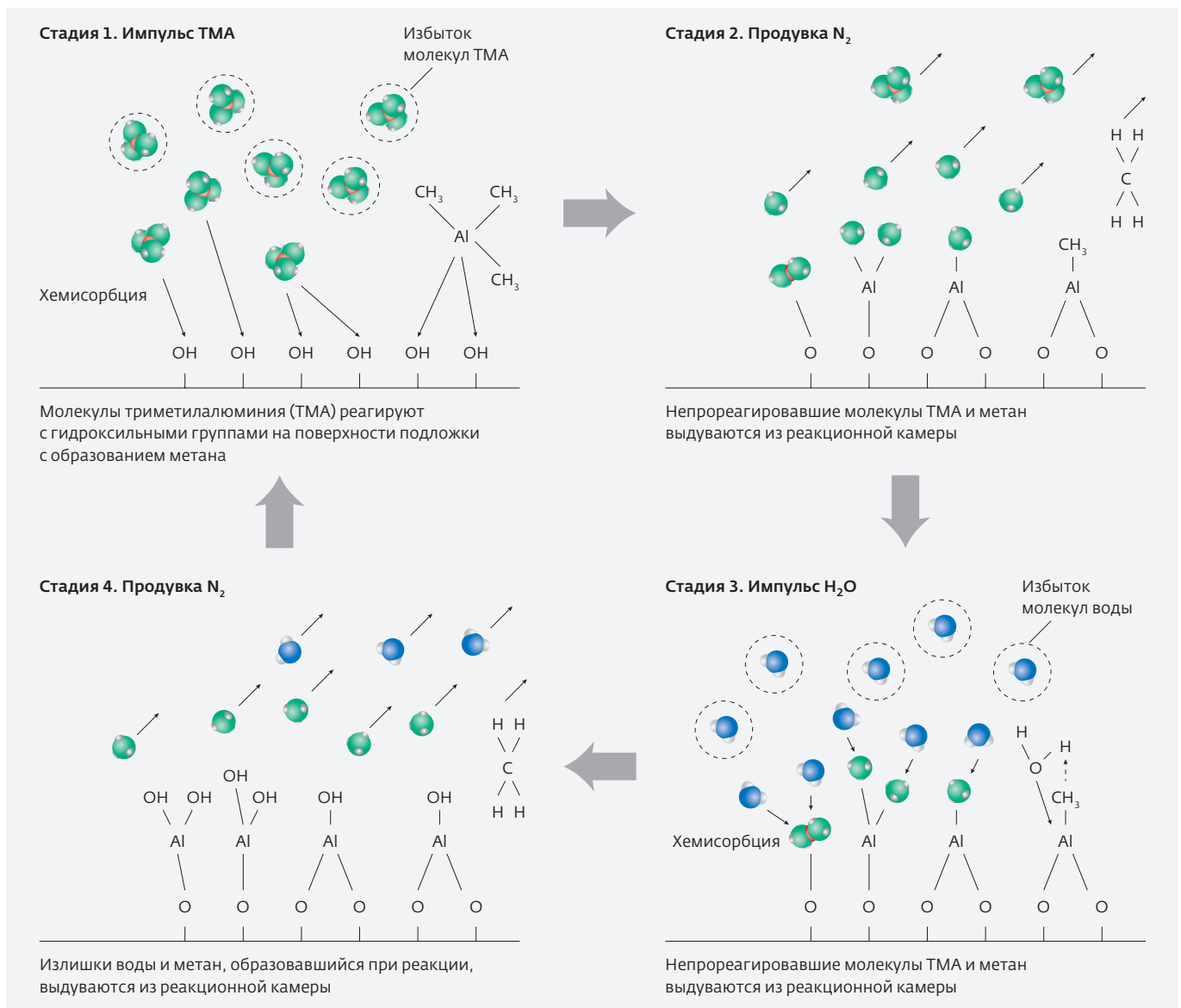


Рис.2. Цикл осаждения одного слоя оксида алюминия

курсов, один из которых является металлоорганическим соединением, а второй – окислителем (пары воды, аммиак, озон и т.д.), но также возможно циклическое осаждение большего числа материалов. В последнем случае формируются многослойные структуры (наноламинаты).

В отличие от других методов нанесения материалов на подложку, таких как химическое осаждение из газовой фазы (англ. CVD – Chemical Vapor Deposition), магнетронное напыление, электронно-лучевое и термовакuumное испарение, в случае АСО рост тонких пленок контролируется не источником материала, а самой поверхностью изделий, на которую невозможно осадить более одного атомного слоя за цикл (за счет поверхностного самонасыщения реакции). Принцип технологии АСО на примере формирования одного слоя оксида алюминия показан на рис.2.

В настоящее время отработана технология осаждения для следующих групп материалов:

- диэлектрики (оксиды, нитриды, фториды, сульфиды и карбиды);
- полупроводники (группа A^3B^5 , группа A^2B^6);
- некоторые металлы, в том числе благородные (рутений, серебро, золото, платина, иридий).

Некоторые типовые процессы осаждения приведены в табл.2.

Наиболее часто АСО применяется в полупроводниковой индустрии, где благодаря своим преимуществам в осаждении ультратонких пленок при производстве интегральных микросхем – на фоне постоянно растущих требований к их однородности по толщине и качеству – АСО постепенно вытесняет традиционные PVD-процессы (англ. PVD – Physical Vapor Deposition). Не менее важными областями применения АСО является производство МЭМС, где необходимо осаждать однородные пленки в структурах с очень высоким аспектным отношением, а также в производстве светоизлучающих диодов, в том числе OLED (англ. OLED – Organic Light Emission Diode), для которых особенно важно отсутствие наноразмерных пор, гарантирующее надежную изоляцию от атмосферной влаги, вызывающей деградацию материала. Помимо микроэлектроники, АСО находит все больше применений в следующих отраслях:

- оптические покрытия;
- солнечная энергетика;
- аккумулялирование энергии;

Таблица 2. Типовые режимы осаждения некоторых материалов

Материал	Прекурсоры	Температура процесса	Время осаждения одного атомного слоя
Al_2O_3	$TMA^+ + H_2O$	100 °C	5 с
Al_2O_3	$TMA + O_3$	100 °C	5 с
TiN	$TiCl_4 + NH_3$	400 °C	6 с
AlN	$TMA + NH_3$	350 °C	8 с

* TMA – триметилалюминий.

- биосовместимые покрытия для медицинских изделий и устройств;
- антимикробные покрытия;
- микрофлюидные устройства с гидрофобными / гидрофильными покрытиями;
- катализ;
- нанопорошки и устройства с микроканалами;
- устройства с разветвленной геометрией поверхности.

Можно заметить, что перечисленные области относятся к так называемым "высоким технологиям", формирующим будущее человечества.

ПОКРЫТИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

Более подробно стоит остановиться на применении АСО для осаждения тонких пленок на трехмерные макроскопические объекты, так как в группу этих применений входит интересующая нас задача: формирование защитных покрытий, препятствующих росту вискерсов на печатных платах.

Поскольку технология АСО обеспечивает конформное покрытие для объектов самой сложной (практически любой) геометрии, существуют широчайшие возможности ее использования для создания покрытий на механических деталях и инструментах. Покрытия могут выполнять, например, следующие функции:

- коррозионная защита;
- снижение трения и фрикционного износа;
- придание поверхности изделия водоотталкивающих свойств.

АСО также используется для создания декоративных покрытий в ювелирной и часовой промышленности. Спектральные характеристики тонких пленок (зависимость коэффициентов отражения и поглощения от длины волны) связаны с их толщиной, варьируя которую можно придавать изделиям желаемый оттенок. АСО позволяет делать это с большой точностью и стабильно воспроизводить требуемый резуль-



Рис.3. Детали механических часов с декоративным покрытием (© He-Arc)

тат. В качестве примера подобного применения технологии АСО на рис.3 показаны детали механических часов с различной толщиной осажденных пленок АСО. Кроме того, защитные тонкие пленки, полученные методом АСО, препятствуют истиранию и потускнению ювелирных изделий, монет и т.д.

В производстве печатных плат АСО нашло применение в тех областях, которые являются наиболее требовательными к качеству и надежности изделий – аэрокосмической, военной и атомно-энергетической отраслях. Возникновение вискерсов в изделиях, применяемых в этих сферах, недопустимо, поскольку выход из строя электронного оборудования вследствие короткого замыкания создает угрозу жизни и здоровью людей, а также может привести к безвозвратной потере дорогостоящей аппаратуры. Повышенные требования к надежности изделий в данном случае перевешивают финансовые издержки от использования высокотехнологического оборудования.

В качестве примера исследований в данном направлении можно привести недавно завершённый совместный проект Европейского космического агентства (European Space Agency, сокр. ESA – международная организация космических исследований, в которую входят большинство стран Евросоюза и Канада) и компании Picosun Oy (Финляндия) [5], являющейся ведущим разработчиком оборудования и технологических процессов АСО. Результаты, полученные в ходе данного исследования, были признаны положительными, а предварительная экономическая оценка их применения в мировом масштабе – весьма впечатляющей.

Высокая плотность, герметичность, полная конформность поверхности у пленок, полученных в ходе исследования, позволили эффективно снизить образование вискерсов на исследуемых образцах. При этом защитная пленка является ультратонкой: толщина ее лежит в пределах от единиц до нескольких сотен

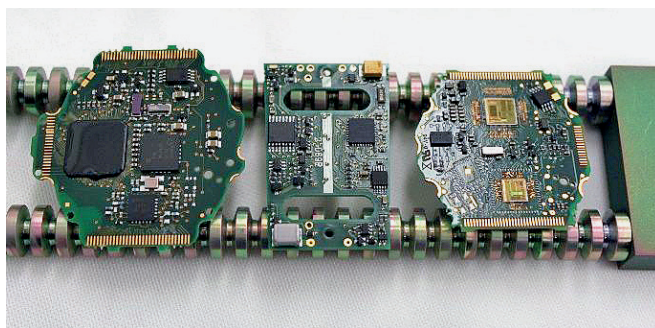


Рис.4. Держатель с печатными платами, на которые нанесены ультратонкие пленки АСО (© Picosun Oy)

нанометров, то есть на уровне 10^{-6} – 10^{-4} относительно характерного размера компонентов, установленных на печатной плате. Наличие пленки практически не оказывает влияния на финишную сборку электронной аппаратуры. Особенностью процессов осаждения пленок по методу АСО, применяемых к печатным платам, является низкая температура, позволяющая избежать перегрева чувствительных компонентов.

В качестве оборудования, на котором проводилась разработка защитного покрытия, использовалась промышленная установка Picosun, отличительными особенностями которой являются возможность проведения групповой обработки изделий, предусмотренная конструкцией рабочей камеры, и полностью автоматическая загрузка / выгрузка изделий. В совокупности



Рис.5. Промышленная установка Picosun P-300B: рабочий модуль с реакционной камерой, блок управления и панель интерфейса с сенсорным экраном (© Picosun Oy)

эти особенности обеспечивают достаточно высокую производительность. На рис.4 представлен держатель для загрузки печатных плат в рабочую камеру установки АСО.

Промышленные установки Picosun (рис.5), особенно модели P-300 и P-1000, в наибольшей степени подходят для покрытия макроскопических 3D-объектов во всех областях применений, упомянутых в этом разделе, включая защиту печатных плат от образования вискерсов. Стоит отметить, что модель P-300F, по признанию экспертов, обладает самой низкой стоимостью владения в отрасли (сюда входят расходы на реагенты, техническое обслуживание и энергоресурсы).

Одним из основных направлений дальнейшего развития технологии атомно-слоевого покрытия печатных плат представляется увеличение объема рабочей камеры и пропускной способности оборудования, что даст новые возможности по ее использованию в крупносерийном производстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

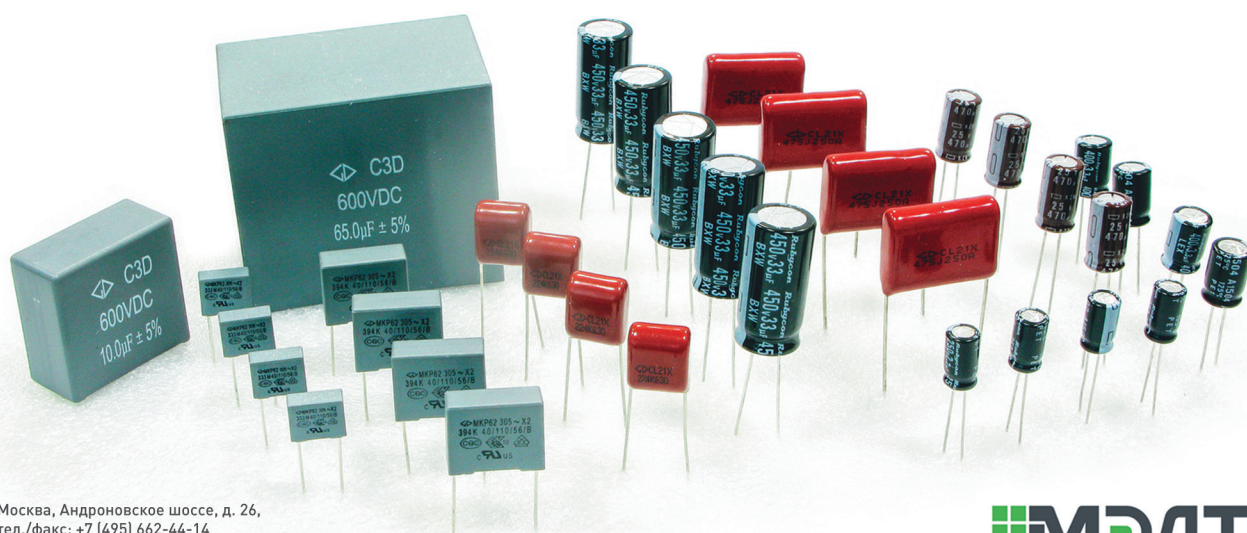
Технология АСО продолжает активно развиваться и находить все новые применения: от микроэлектроники, где она уже стала привычной и незамени-

мой для множества задач, до печатного монтажа, где позитивные результаты первых исследовательских разработок открывают широкие перспективы для использования. Нет оснований сомневаться, что по мере совершенствования технологии АСО в этом новом для нее приложении она будет востребована повсеместно. Однако в первую очередь ее внедрение предполагается в производстве изделий, к которым предъявляются повышенные требования по надежности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Егоров Л.** Паяные соединения. Проблема вискерсов Sn-покрытий выводов компонентов // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2011. № 3. С. 134.
2. **Гудилин Е.** Микроструктуры новых функциональных материалов. Неорганические волокна: учебные материалы по неорганической химии МГУ (Химический факультет).
3. **Симонов О.** Атомно-слоевое осаждение – технология, меняющая мир // Наноиндустрия. 2015. № 4. С. 40.
4. **Веселов А.** Оборудование для синтеза сверхтонких пленок по технологии атомно-слоевого осаждения // Наноиндустрия. 2015. № 7. С. 72.
5. www.picosun.com

КОНДЕНСАТОРЫ ПЛЕНОЧНЫЕ И ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ



- **ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ**
- **ВЫСОКОНАДЕЖНЫЕ**
- **В НАЛИЧИИ НА СКЛАДЕ И ПОД ЗАКАЗ**

Москва, Андроновское шоссе, д. 26,
тел./факс: +7 (495) 662-44-14

www.melt.com.ru

