

МАССОПЕРЕНОС В ЖИДКИХ СРЕДАХ ПРИ СОВМЕСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

к.т.н., доцент В.Л. Ланин

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

Исследованы процессы массопереноса в жидких средах полярного типа и расплавах при совместном воздействии ультразвуковых и электрических полей и их влияние на свойства контактных соединений в изделиях электроники.

Введение

Электрические и механические свойства контактных соединений в изделиях электроники во многом зависят от характера физико-химических процессов, протекающих при их формировании. Кинетика процессов смачивания, диффузии, поглощения энергии, физико-химического взаимодействия компонентов расплава и материалов усложняется при совместном воздействии энергии ультразвуковых (УЗ) и электрических полей. УЗ активация интенсифицирует удаление окисных пленок, ускоряет процессы смачивания и диффузии, увеличивает тепловую энергию системы в результате поглощения энергии и т.д.[1]. Воздействие энергии электрического поля ускоряет подвижность носителей заряда в жидких средах, процессы направленной диффузии реакционно-активных компонентов в соединении, достижение температуры пайки, увеличивает растекание припоя под действием пондеромоторных сил. Массоперенос в жидких средах обусловлен как за счет конвективной диффузии, так и движения частиц в виде макро и микропотоков под действием сил УЗ поля и направленной электродиффузии компонентов. Сложность протекающих процессов обуславливает необходимость теоретических и экспериментальных исследований явлений в жидких средах при совместном воздействии энергии УЗ и электрических полей.

Методы исследований

Массоперенос в жидких средах за счет конвективной диффузии в УЗ поле приобретает вид [1]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + D' \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где C - концентрация вещества, U - составляющая скорости конвективного движения по оси x , D' - коэффициент диффузии

$$D' = D_0 \cdot e^{\frac{E - \Delta E}{k \cdot T}}, \quad (2)$$

где ΔE - изменение энергии активации диффузии в УЗ поле.

Направленное движение частиц в УЗ поле под действием силы F происходит со средней скоростью

$$U = \nu \cdot F, \quad (3)$$

где ν - подвижность частиц.

Силовое воздействие УЗ поля зависит от частоты ω , амплитуды колебаний A , акустического сопротивления среды ρc

$$F = \rho c \cdot \omega A \cdot S. \quad (4)$$

Суммарный массоперенос частиц в жидкой среде включает составляющую конвекционной диффузии и поток частиц, движущихся под действием силы УЗ колебаний

$$J = -D' \frac{\partial C}{\partial x} + UC \cos \beta, \quad (5)$$

где β - угол между вектором силы УЗ поля и градиентом диффузионного потока.

Подставляя выражение (3) и (5) в (4) получим:

$$J = -D' \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + v \cdot \rho c \cdot \omega A \cdot SC \cos \beta. \quad (6)$$

Массоперенос в жидких средах под воздействием УЗ поля связан с проявлением электрокинетического эффекта, который заключается в том, что УЗ активация увеличивает подвижность носителей заряда в жидкости, возникает их направленный массоперенос в направлении от излучателя под действием давления УЗ волны. Поскольку в жидкой среде одновременно находятся заряженные частицы различной концентрации и подвижности, то суммарная плотность потока частиц в единицу времени составит

$$J_{\text{эн}} = \sum_{i=1}^n B_u \cdot C_i \cdot F, \quad (7)$$

где B_u – подвижность ионов, C_i – концентрация ионов.

Величина тока в жидкой среде, обусловленная электрокинетическим эффектом

$$I = \sum_{i=1}^n B_u \cdot C_i \cdot Q_i \cdot F \cdot S, \quad (8)$$

где Q_i – заряд иона.

В процессе кавитации в жидкостях и расплавах возникают электрические импульсы малой длительности, которые обусловлены отрицательными электрическими зарядами кавитационных пузырьков [2]. Сложность исследования динамики захлопывания кавитационных полостей в жидкостях и расплавах обусловлена кратковременностью процесса кавитационных полостей и очень малыми размерами полостей. Для исследования динамики захлопывания кавитационных импульсов в жидкой среде 1 возбуждали продольные УЗ колебания частотой 22 кГц и амплитудой 8-15 мкм с помощью ступенчатого излучателя 3. Пьезоэлектрический преобразователь 4 состоял из двух пьезокерамических колец диаметром 30 мм и двух частотно-понижающих накладок, соединенных резьбовыми шпильками (рис. 1). Для регистрации динамических импульсов кавитации в жидкостях применен миниатюрный пьезодатчик 2 из биморфной пластины толщиной 0,1 мм, сигнал с которого подавался на усилитель с коэффициентом усиления 100 в диапазоне частот от 200 кГц до 10 МГц, а затем на фильтр низких частот. Усиленные и отфильтрованные импульсы регистрировались запоминающим осциллографом С8-19 с частотным диапазоном до 10 МГц.

Датчик располагали на расстоянии 1-5 мм от излучателя. Контроль амплитуды колебаний осуществляли с помощью пьезоэлектрического датчика 5, приклеенного к неизлучающей стороне частотно-понижающей обкладки и соединенного с виброметром.

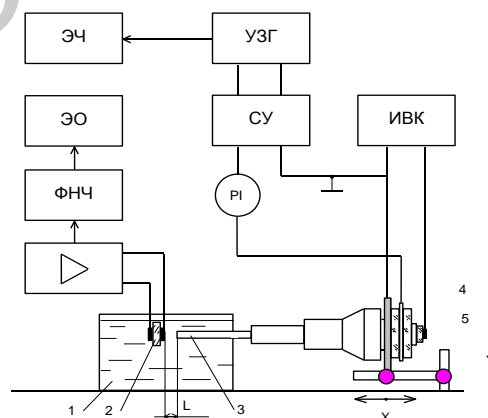


Рис. 1. Схема исследования кавитационных импульсов в жидких средах

Для исследования электрокинетического эффекта УЗ колебания частотой 22 кГц возбуждались в жидкостях и расплавах амплитудой 10 мкм с помощью погружного излучателя поршневого типа. Величина постоянного тока, возникающего в жидкости, регистрировалась микроамперметром типа Ф116/1, подключенным между излучателем и электродом из нержавеющей стали, расположенным на дне емкости с исследуемой жидкостью.

Для исследования совместного воздействия энергии УЗ и электрического полей на расплавы и на прочность соединений установка, дополнительно включала ванночку с расплавом, размещенную на нагревателе, температура которого стабилизировалась. Величину постоянного тока, пропускаемого через расплав, регулировали в пределах 0-15А и контролировали прибором М2020, включенным в электрическую цепь с дополнительным шунтом. УЗ колебания в расплав подавались через 20-30 с после начала пропускания тока для устранения погрешности измерений из-за разогрева проводов и балансного резистора.

Результаты исследований и их обсуждение

Осциллограммы электрических импульсов (рис. 2), свидетельствуют о том, что при увеличении амплитуды УЗ колебаний амплитуда импульсов также растет, а интервалы между ними уменьшаются. Процесс кавитации носит нестабильный характер и во многом зависит от процентного содержания примесей и структурных несовершенств расплавов. Время жизни импульсов не более 20 мкс. При принудительной подаче пузырьков воздуха средним диаметром 50 мкм амплитуда импульсов захлопывания пузырьков меньше в 2 - 2,5 раза, но время колебательного процесса больше в 2,5 раза, что позволяет сделать процесс кавитации более стабильным, так как зародышеобразование в жидкой среде становится управляемым.

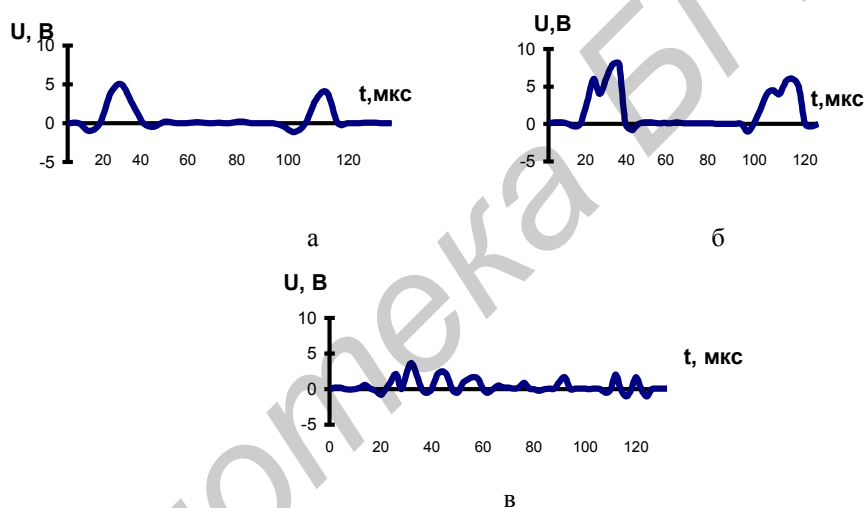


Рис. 2. Осциллограммы кавитационных импульсов при различной амплитуде УЗ колебаний: а - 7,5 мкм, б - 10 мкм, в - 7,5 мкм и газовая активация

Исследование электрокинетического эффекта показало (табл.1), что наибольшее увеличение величины тока массопереноса носителей заряда наблюдается у жидкостей с наименьшим электрическим сопротивлением и вязкостью. Время достижения равновесия тока в жидкостях пропорционально ее вязкости. Максимальный эффект увеличения тока отмечен при расстоянии от 5 до 7 мм между электродами, так как при этом вся зона между электродами занята кавитационными пузырьками (рис.3). При меньших расстояниях между электродами вследствие микропотоков носители заряда частично выталкиваются из зоны. При расстояниях, больших 7 мм электрокинетический эффект в жидкостях ослабевает, так как кавитационная область не захватывает всю зону между электродами [3]. Увеличение тока через жидкость можно объяснить тем, что при подаче УЗ-колебаний увеличивается подвижность носителей заряда в жидкости, возникает направленный массоперенос в направлении от излучателя, а при захлопывании кавитационных полостей генерируются дополнительные носители - отрицательно заряженные кавитационные пузырьки, которые также участвуют в массопереносе. Время достижения максимального тока и его величина зависит от амплитуды УЗ колебаний и подвижности носителей заряда.

При амплитуде УЗ колебаний менее 5 мкм давление УЗ поля недостаточно для создания необходимой подвижности ионам и процесс нарастания тока растянут по времени. При амплитуде 7 мкм время достижения максимального тока сокращается, а его значение увеличивается, так как растет количество ионов с максимальной подвижностью, участвующих в создании тока. При амплитудах УЗ колебаний более 10 мкм время достижения экстремума тока минимально, а амплитуда ионного тока

подает. Это связано с большой подвижностью ионов и плохой направленностью потока ионов вследствие усиления кавитационных процессов и нарушения ближнего порядка в жидкой среде.

Таблица 1

Изменение тока через жидкие среды при УЗ активации

Исследуемая жидкость	Электросопротивление, Ом·м	Вязкость Па·с	Изменение тока ΔI , мА	Время достижения равновесия, с
Масло минеральное	10^{13}	3,2-3,3	0,01	>100
Глицерин	10^{12}	1,5-1,6	0,06	70
Вода дистиллированная	10^3	0,32-0,33	0,6	50
Спирт этиловый	10^4	0,24-0,25	1,4	10
Кислота органическая	1 -10	0,24-0,25	2,0-3,5	5-7
Электролит с ионами Cl	0,3-0,5	0,32-0,33	3,0-4,5	1-3

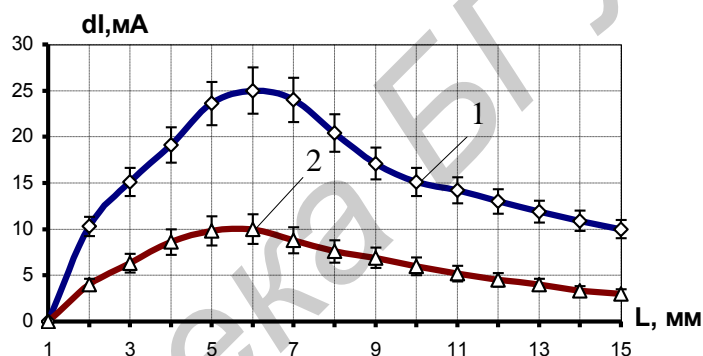


Рис. 3. Зависимости изменения тока в жидкости в УЗ поле от расстояния между электродами: 1 - вода с ионами хлора, 2 - органическая кислота

Для проверки гипотезы о полярности ионов, участвующих в образовании тока вблизи излучателя, расположили третий электрод в виде сетки, на который подавали постоянное напряжение 400- 500 мВ от внешнего источника. При положительном потенциале на сетчатом электроде величина тока возрастала в среднем в 3 раза, а при отрицательном - ток уменьшался и менял направление. Это объясняется тем, что в переносе зарядов участвовали в основном положительные ионы, находящиеся в жидкой среде.

Исследование воздействия УЗ поля на слабо полярные жидкости (жидкое стекло) показало, что при подаче потенциала на излучатель значение тока увеличивается на 20%, а максимум тока достигается за 130 с. После внесения микрочастиц цинка, которые в процессе УЗ активации приобрели положительный заряд, амплитуда тока через жидкость возросла в 1,6 раза. В электролитах, содержащих отрицательные ионы ОН, начальный уровень тока ниже в 3 раза, однако амплитуда тока при этом имеет более выраженный экстремум [4].

Анализ экспериментальных данных показывает, что заметное увеличение массопереноса за счет электрокинетического эффект происходит при значительных амплитудах УЗ активации в жидких средах полярного типа. Для управления процессами УЗ активации рационально использование электрических полей в жидких средах, создаваемых внешними источниками [5]. Под действием электрического тока в жидкости происходит перемещение ионов водорода, их восстановление в виде газовых пузырьков размером 50-100 мкм, которые являются зародышами кавитации. Непрерывное накопление зародышей кавитации в рабочей зоне и их захлопывание под действием УЗ колебаний увеличивает интенсивность кавитационных процессов, что ускоряет процесс разрушения жировых пленок на поверхности детали и повышает качество очистки за счет более равномерного распределения зародышей кавитации по всей обрабатываемой поверхности под действием силовых линий тока.

В металлических расплавах ввиду высокой электропроводности и отсутствия свободных носителей заряда не удалось выявить электрокинетический эффект, однако зарегистрировано изменение

тока. При величинах токов до 10 А за счет микропотоков и кавитационных явлений в расплаве нарушался ближний порядок частиц, что увеличивало его сопротивления и, соответственно, уменьшало ток через расплав на 50-80 мА (рис. 4). При токе свыше 10А электрическое поле упорядочивало перемещение носителей заряда между электродами амплитуде 15 мкм и увеличивало ток через расплав до 100 мА. При дальнейшем увеличении тока припой интенсивно разогревался, что приводило к увеличению его сопротивления и, следовательно, к снижению изменения тока через расплав.

Прочность соединений припоя ПОС 61 с алюминиевыми образцами зависела от величины постоянного тока, пропускаемого в направлении от излучателя к детали, при следующих параметрах: частоте 22 кГц, амплитуде 10 мкм, температуре 240 С, времени 10 с. Наибольшее увеличение прочности соединений на 35% отмечено для значений постоянного тока в диапазоне 10-12 А. Вероятной причиной увеличения прочности является токовая стимуляция процесса диффузии компонентов припоя в материал детали, которая проявляется при плотностях тока, больших 1-1,5 А/мм². Увеличение тока свыше 15 А снижало прочность соединений вследствие перегрева припоя и роста окисных пленок.

Возникновение процесса электродиффузии обусловлено соотношением действующих на термически возбужденный ион металла сил, направленных навстречу электрическому потоку (действие внешнего поля), и по направлению электронного потока («электронный ветер»). Вследствие экранирующего влияния электронов влияние электрического поля невелико, поэтому преобладающей является сила «электронного ветра», которая возрастает с увеличением плотности тока. В результате возбужденные ионы имеют большую вероятность перейти в вакансию по движению электронов, чем против движения. Таким образом, вакансии перемещаются к отрицательному полюсу, а ионы металла - к положительному, увеличивая тем самым ширину диффузионной зоны и, соответственно, прочность соединений.

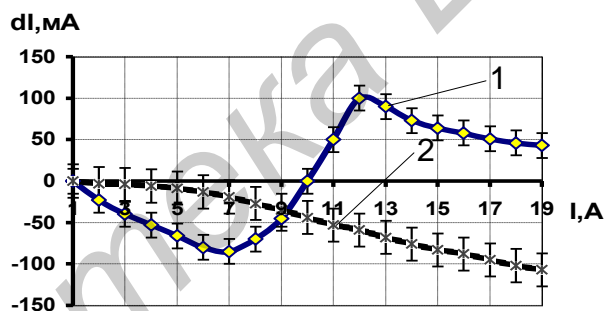


Рис. 4. Зависимости изменения тока в расплаве при УЗ активации от величины тока и амплитуды колебаний: 1 - A = 5 мкм, 2 - A = 15 мкм

Ширина диффузионной зоны, измеренная с помощью растрового электронного микроскопа, в этом случае составляла 4-5 мкм для припоев ПОЦ 10 и ПОС 61. Для припоя ПОЦ 10 диффузионная зона была несколько больше из-за наличия в расплаве электроподвижного цинка, который мигрировал к границе алюминий-припой и далее вглубь алюминиевой детали, увеличивая ширину диффузионной зоны. При пропускании тока в обратном направлении прочность соединений с материалом основания практически не увеличивалась, так как олово и свинец, составляющие припой, не обладают такой подвижностью, как алюминий. Ширина диффузионной зоны при этом составляла около 2 мкм. Пропускание импульсов тока при УЗ активации через зону формирования соединения в направлении от припоя к паяемому материалу повысило прочность в 1,25-1,5 раза за счет увеличения ширины диффузионной зоны соединяемых материалов и электромиграции алюминия в припой.

Выводы

Активация жидких сред, преимущественно полярного типа, может быть осуществлена совместным действием энергии УЗ и электрических полей. За счет образования газовых зародышей кавитации в рабочей зоне при пропускании электрического тока через жидкую среду от излучателя ультразвука к детали ускоряются процессы очистки от загрязнений. Совместное воздействие УЗ и электрических полей вызывает усиление процесса диффузии, что связано с массопереносом частиц диффузионно-подвижных металлов в расплавах при плотностях тока, больших 1-1,5 А/мм². Тем самым

увеличивается прочность контактных соединений из химически разнородных материалов в изделиях электроники.

Литература

1. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. Т.1. / С.П. Кундас, В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский и др.; Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко.- Мн.: Бестпринт, 2002.- С. 267-285.
2. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция. - М.: Химия, 1986.-288 с.
3. Румак Н.В., Бондарик В.М., Ланин В.Л. Электрические эффекты в жидкостях и расплавах под воздействием ультразвуковых колебаний // Доклады Академии наук Беларуси. - 1994. - т. 38. - № 2. - С. 115-118.
4. Lanin V.L. Electrical phenomena's in liquids and melts by ultrasound processing// Proc. 3-rd Conf. on Applications o Power Ultrasound in Physical and Chemical Processing. – 13 –14 December 2001. -Paris. – 2001. -S. 143-146.
5. Lanin V.L. Activation of Ultrasonic Clearing in the Liquid Environments // Proceedings 4th Conf. on Application of Power Ultrasound in Physical and Chemical Processing. 22 – 23 May, Besancon, France, 2003.- P. 210- 213.

Библиотека БГУИР

КАРТОЧКА АВТОРА

1. Фамилия: Ланин
2. Имя: Владимир
3. Отчество: Леонидович
4. Должность: доцент кафедры «Электронная техника и технология»
Белорусского Государственного университета информатики и
радиоэлектроники, р. тел. + 375 (017)-239-88-88
5. Ученая степень: кандидат технических наук
6. Домашний адрес: 220116, г. Минск, ул. Алибегова, д. 3, кв. 24 тел.+375 (017)-271-58-12
7. E-mail: vlanin@bsuir.unibel.by

Библиотека БГУИР