УДК 666.1.037.5

Н.С.ПЩЕЛКО, *канд. тех. наук, доцент, nikolsp@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

N.S.PSHCHELKO, *PhD in eng. sc., associate professor, nikolsp@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining University

ВЛИЯНИЕ ДИСКРЕТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДА НА ЭЛЕКТРОАДГЕЗИЮ

Появление больших тянущих полей в процессе получения электроадгезионного соединения становится возможным благодаря миграционной поляризации диэлектрика, развивающейся под действием приложенного к нему электрического напряжения. Это приводит к накоплению слоя отрицательного заряда малой толщины у анода. Поэтому приложенное напряжение распределяется не по всей толщине диэлектрика, а фактически оказывается приложенным к тонкому слою объемного заряда у анода. Возникающие при этом сильные электрические поля приводят к соединению контактирующих материалов. Разработана физико-математическая модель, позволяющая оценить силовые характеристики неоднородного электрического поля. Исследование влияния прерывистости заряда на напряженность электростатического поля на небольших расстояниях до заряженной плоскости показало значительные отличия результатов выполненного и традиционного расчета.

Ключевые слова: электрическое поле, дискретный заряд, электроадгезия.

INFLUENCE OF DISCRETELY DISTRIBUTED CHARGE ON ELECTRIC ADHESION

The appearance of great pulling electric fields at anodic bonding process with a conductor surface to dielectric turns out to be possible due to the interlayer polarization developing in dielectric under the action of electric voltage. This results in a negative charge accumulation in a layer of small thickness beside anode. Thus applied electric voltage is distributed not through the whole thickness of a dielectric, but in fact is applied to a narrow area of the three-dimensional charge beside anode. Arising strong electric fields force the connected materials to unite. The physical and mathematical models for force characteristics of non-uniform electric field are developed. Research of a charge intermittence influence on intensity of an electrostatic field has shown a considerable differences on small distances to the charged surface between carried out and traditional ways of calculation.

Key words: electric field, discrete charge, electric adhesion.

В настоящее время процессы склеивания, прилипания, постоянного или временного закрепления объектов фигурируют в том или ином виде практически во всех областях производства. Для проектирования новых изделий и внедрения передовых технологий актуальна не только разработка новых материалов, обладающих заданными свойствами, но и проблема их соединения – склеивания, сварки и других способов постоянного или временного закрепления. Соединения материалов, сочетающих различные механические и электрические свойства, необходимы в том или ином виде практически во всех областях производства. В частности, особый интерес представляет проблема соединения металлов, других проводящих материалов, в том числе и полупроводников, с диэлектриками. Многие из этих материалов мало пластичны, нераство-

римы друг в друге, имеют высокую температуру плавления. Применяемые способы соединения (например, сварка плавлением, контактная сварка, диффузионная сварка) не всегда могут преодолеть барьер несовместимости металлов и полупроводников с неметаллическими материалами и обеспечить получение высококачественных соединений многих из них. Поэтому разработка теоретических представлений об адгезии, а также разработка новых способов соединения материалов представляет безусловный интерес.

Под адгезией (от латинского adhaesio – прилипание, сцепление, притяжение) подразумевается связь между разнородными конденсированными телами при их контакте. Проявляется адгезия в способности контакта двух разнородных тел сопротивляться разрушению. Поэтому явления, связанные с адгезией, естественно относить к поверхностным явлениям, контролируемым поверхностными силами. Еще в 40-х годах прошлого века была выдвинута теория адгезии, основанная на общем положении Гельмгольца о возникновении двойного электрического слоя на границе раздела фаз. Ее дальнейшим развитием явилась электронная теория адгезии, в которой исследовались процессы формирования двойного слоя при образовании связи между соединяемыми поверхностями и его вклад в прочность последней [2]. В соответствии с теоретическими исследованиями развивались и экспериментальные работы, в которых подтверждались основные положения электронной теории адгезии и обозначилась новая область исследований – электроадгезионные явления. Под этим термином подразумеваются электрические явления, связанные с процессами установления и разрушения связи между телами. В экспериментах выявилась связь электроадгезионных явлений с явлениями трибоэлектричества и триболюминесценции, была обнаружена эмиссия быстрых электронов при нарушении адгезионного контакта в вакууме.

Основной задачей, требующей решения для получения надежного соединения двух поверхностей, является повышение их адгезии. Известны два основных фактора, способных увеличить адгезию:

1. *Диффузия.* Упрочнение места контакта разнородных тел может происходить в результате диффузии атомов и молекул обоих тел, что приводит к размыванию их границы раздела. Резкая граница раздела превращается в переходный слой, состав которого постепенно меняется от слоя к слою. Такой процесс, стимулируемый внешним давлением и повышенной температурой, лежит в основе известного метода диффузионной сварки.

2. *Образование на контакте двойного электрического слоя.* Плотность зарядов этого слоя велика как раз в случае контактирования существенно разнородных тел, например металла и диэлектрика, когда диффузионное срастание затруднено. Отметим, что роль рассматриваемого фактора в явлениях адгезии, на наш взгляд, часто недооценивается. Действительно, как было показано в [3], повышая за счет внешнего электрического напряжения плотность зарядов на контакте соединяемых тел, можно получить давления, обусловленные действием электростатических сил, на уровне используемых при диффузионной сварке (около 10^7 Па) и добиться не только временного, но и постоянного соединения деталей. Такой способ соединения деталей называется электроадгезионным, и собственно этот способ и является предметом рассмотрения в настоящей работе. Роль двойного электрического слоя на границе контакта не сводится только к созданию электростатических (пондеромоторных) сил. Так, в [2] указывается на способность двойного электрического слоя обезвреживать эмбриональные трещины, образующиеся в плоскости адгезионного контакта и могущие расширяться под влиянием внешних воздействий (сил или термических и усадочных напряжений). Объясняется это тем, что силы притяжения между разноименно заряженными обкладками двойного слоя убывают медленно и притом скорее в функции времени, а не расстояния, отличаясь в этом отношении радикально от молекулярных сил. Поэтому после кратковременного силового воздействия эмбриональные трещины способны под влиянием электростатических сил притяжения

смыкаться. Аналогично двойной слой должен повышать и усталостную прочность адгезионных контактов при периодических воздействиях.

Настоящая работа посвящена оценке влияния дискретности распределения электрического заряда в двойном электрическом слое на характеристики электрического поля и силовые характеристики электроадгезионного контакта. При расчете силы взаимодействия, обусловленной притяжением зарядов противоположных знаков, распределенных по плоскостям двойного электрического слоя, обычно используется формула плоского конденсатора

$$p = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon}, \qquad (1)$$

где p – пондеромоторное давление; ε_0 – электрическая постоянная; ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала между взаимодействующими слоями; σ – поверхностная плотность зарядов двойного электрического слоя.

При этом подразумевается, что заряды по плоскостям распределены непрерывно и равномерно. При более строгом подходе становится очевидным, что такая модель не соответствует действительности, так как электрический заряд дискретен (элементарный электрический заряд $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл) и, следовательно, электрическое поле системы точечных зарядов, вообще говоря, неоднородно. В то же время модель для расчета пондеромоторного действия электрического поля на основе (1) вполне приемлема в случае, когда расстояние между плоскостями двойного электрического слоя значительно больше расстояний между дискретно расположенными элементарными зарядами. В случае, когда расстояние между плоскостями двойного электрического слоя соизмеримо с расстоянием между дискретно расположенными элементарными зарядами, например при получении электроадгезионных соединений [3], должна сказываться неоднородность электрического поля. Это приведет к тому, что полученные по (1) результаты будут неточны.

Выясним, на каких расстояниях между рассматриваемыми плоскостями формула (1) не будет адекватно отражать реальную физическую ситуацию. Рассмотрим для примера равномерно заряженную плоскость с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 10^{-4}$ Кл. Как известно, напряженность электрического поля, создаваемая в вакууме ($\varepsilon = 1$), будет равна $E_h = \sigma/(2\varepsilon_0\varepsilon) = 5{,}65 \cdot 10^6$ В/м. Именно такие по порядку величины напряженности электрических полей и используются при получении электроадгезионных соединений. Указанному значению σ, очевидно, соответствует $N = \sigma/e = 6{,}25 \cdot 10^{14}$ элементарных зарядов, приходящихся на 1 м^2 площади. Следовательно, среднее расстояние между ними $a = 1/\sqrt{N} = 4 \cdot 10^{-8}$м. Таким образом, при расстояниях между плоскостями двойного электрического слоя, соответствующих по порядку величины десятым долям микрона, формула (1) может давать не соответствующие действительности значения. Отметим, что именно указанные выше расстояния между зарядами используются в процессе получения электроадгезионных соединений, так как зазор между соединяемыми деталями обусловлен, в основном, шероховатостью соединяемых поверхностей, которые обычно обрабатывают не хуже, чем по 11-му классу чистоты. К тому же в процессе получения электроадгезионных соединений поверхности сближаются и расстояние между ними уменьшается. Для справки отметим, что величина среднеарифметического отклонения профиля шероховатой поверхности для деталей, обработанных по 11-му классу, составляет 0,08 мкм, а для обработанных по 14-му классу – 0,01 мкм.

Таким образом, при малых расстояниях между заряженными плоскостями необходимо учитывать дискретность распределения электрического заряда. Действительно, в экспериментах [2] часто наблюдаются значения пондеромоторных сил, которые существенно превышают рассчитанную по (1) величину. Одной из причин, объясняющих этот результат, вероятно, является дискретность распределения заряда.

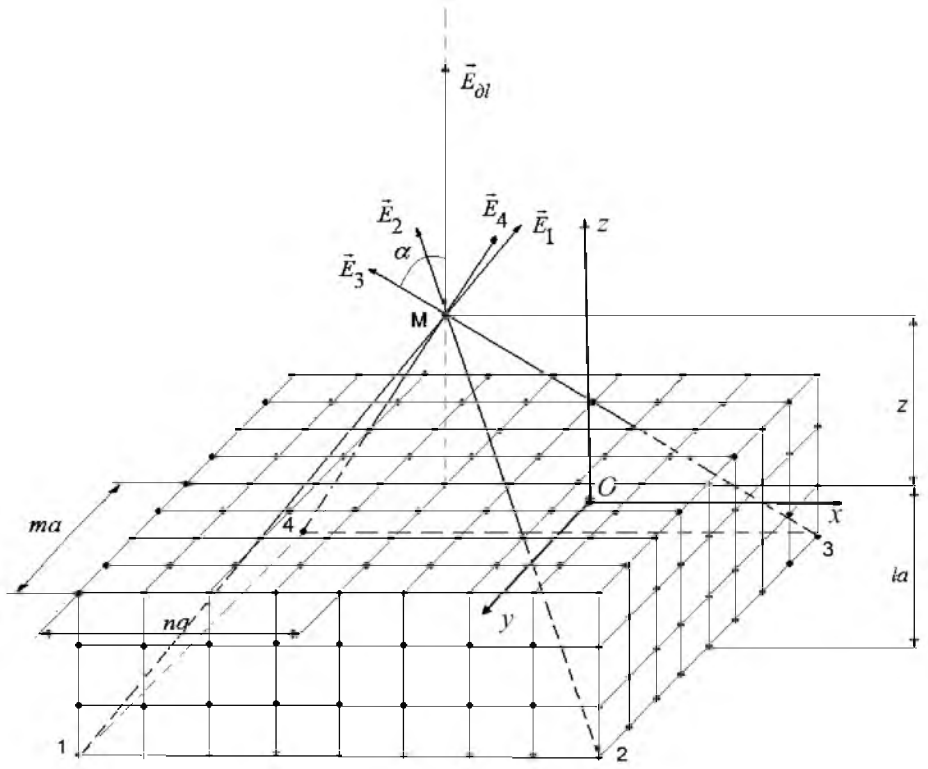

Рис.1. Модель слоя с прерывистым распределением зарядов. В качестве пояснения изображено несколько векторов напряженности и их результирующая в точке, расположенной на одной нормали с зарядом

n, l и m – целые числа

Рассмотрим локализованные элементарные заряды в слое, состоящем из нескольких плоскостей (рис.1). Толщина слоя объемно распределенного заряда равна la, где l – количество плоскостей; a – минимальное расстояние между зарядами в системе. Подадим на рассматриваемый объем слоя тот же суммарный заряд, что и в случае непрерывного распределения заряда по плоскости. Определим напряженность электрического поля $\vec{E}$ в точке М, создаваемую системой дискретно расположенных на расстоянии a друг от друга элементарных зарядов. В нашем случае $\vec{E}$ есть поле заряженного слоя с линейными размерами в плоскости xOy (система координат модели – см. рис. 1), значительно превосходящими расстояние от текущей точки пространства до заряженной плоскости. Это позволяет перейти к одномерной задаче в полупространстве, ограниченном бесконечно протяженной заряженной плоскостью.

Рассмотрим две ситуации: с непрерывно распределенным зарядом и с локализованным в связи с существованием элементарного заряда ($q_1 = e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл) – и оценим различие в результатах расчета напряженностей электрических полей. На основе симметрии модели, принципа суперпозиции, геометрических соображений и закона Кулона совокупное влияние зарядов, показанных на рис.1, можно свести в итоге к сумме

$$E_{\partial} = \sum_{l=0}^{L-1}\left(\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \times \right.$$

$$\times \frac{4(z+al)}{\left((z+al)^2 + a^2(m^2+n^2)\right)^{3/2}} +$$

$$\left. + \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon(z+al)^2} \right). \qquad (2)$$

Численные расчеты показывают незначительность влияния толщины слоя на результирующее электрическое поле, поэтому

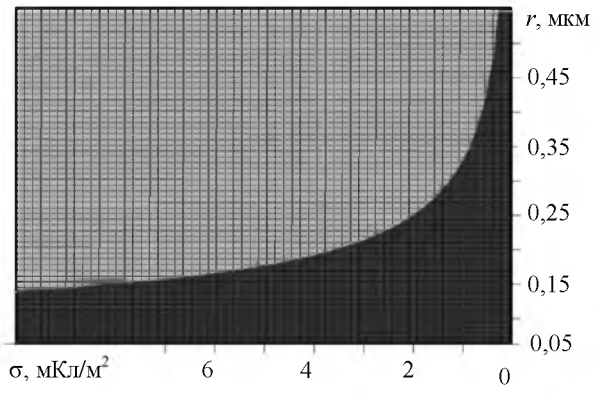

Рис.2. Границы применимости классической формулы для расчета напряженности электрического поля заряженной плоскости в случае распределения заряда в слое малой конечной толщины. Светлое поле – относительная ошибка $\Delta E_{\text{отн}} = (E_{\partial} - E_{н} / E_{н})100\,\%$ применения классической формулы не превышает 10 %, темное – больше 10 %

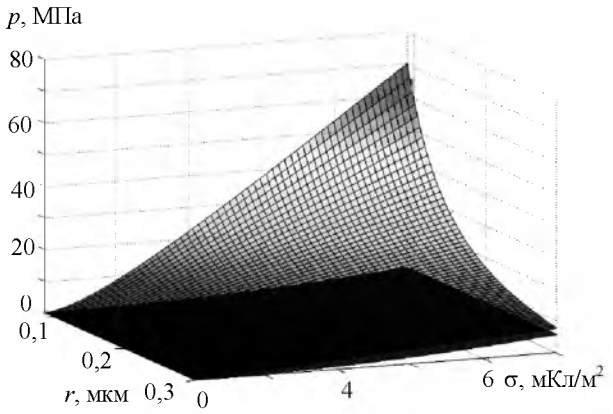

Рис.3. Зависимости пондеромоторного давления от расстояния до плоскости и от поверхностной плотности заряда. Темная поверхность соответствует непрерывному, светлая – дискретному распределению одной и той же величины заряда по плоскости

достаточно рассмотреть случай $L = 1$. Для расчета напряженности электрического поля плоскости с дискретно распределенными зарядами получим выражение.

$$E_{\partial} = \left(\frac{q_1 z}{\pi\varepsilon_0 \varepsilon a^3} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z^2}{a^2} + m^2 + n^2 \right)^{-3/2} \right) + \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon z^2}. \quad (3)$$

Непосредственное использование (3) приводит к вычислительным проблемам, поэтому для практического использования полученного выражения его необходимо аппроксимировать аналитической формулой. Выполненные нами расчеты (ввиду их громоздкости они не приводятся) показывают, что в большинстве практических случаев можно использовать выражение

$$E_{\partial} \approx \frac{\sigma}{\pi\varepsilon_0 \varepsilon} \left[\operatorname{arctg}\left(\frac{z}{a} \right) + \frac{\pi a}{2z} \right]. \quad (4)$$

Покажем, что указанное выражение адекватно отражает ситуацию в предельном случае. Рассмотрим поле при $a = \sqrt{q_1/\sigma} \to 0$, что соответствует модели непрерывного распределения заряда. Аргумент $(z/a) \to \infty$, значит, $\operatorname{arctg}(z/a) \to (\pi/2)$, в то же время пропорциональная бесконечно малой величине функция $\frac{\pi a}{2z}(\pi a/2z) \to 0$ может не учитываться. Получаем $E_{\partial} \to E_{н}$, что соответствует классическому случаю непрерывного распределения заряда по плоскости. Таким образом, можно определить границы применимости классических формул для подсчета зависимости напряженности электростатического поля от расстояния до заряженного объекта (рис.2).

Результаты расчетов показывают, что учет дискретности заряда приводит к существенным поправкам в сторону увеличения в величинах напряженности поля и пондеромоторной силы, действующей на заряд на относительно небольшом удалении от неоднородно заряженной плоскости.

Оценить различия между величинами E_{∂} и $E_{н}$ можно также, используя данные по расчетным значениям пондеромоторного давления $p = 0{,}5\varepsilon_0 \varepsilon E^2$, представленные на рис.3.

Таким образом, при малых расстояниях до заряженной плоскости могут появляться электрические поля, значительно превышающие значения, рассчитанные по классическим формулам. С учетом того, что рассматриваемое поле неоднородно, за счет градиентных сил оно может обладать втягивающим силовым действием даже на электронейтральные объекты, например напыляемые на подложку атомы [1], и иметь другие проявления [4]. Полученные в работе выражения могут быть положены в основу для расчета этих эффектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние постоянного электрического поля на процессы осаждения тонких металлических пленок платины методом ионно-плазменного распыления / В.П.Афанасьев, Д.А.Чигирев, Н.С.Пщелко, Н.П.Сидорова // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2010. Вып.6. С.59-65.

2. *Дерягин Б.В.* Адгезия твердых тел / Б.В.Дерягин, Н.А.Кротова, В.П.Смилга. М.: Наука, 1973. 280 с.

3. *Нагорный В.С.* Анализ динамики процесса формирования электроадгезионного контакта / В.С.Нагорный, Н.С.Пщелко, Н.П.Сидорова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 6. С.166-170.

4 *Пщелко Н.С.* Использование электрического поля для повышения адгезии электропроводящих пленок к диэлектрическим подложкам при вакуумном нанесении // Вакуумная техника и технология. 2010. № 1. С.31-36.

REFERENCES

1. *Afanasev V.P., Chigirev D.A., Pshchelko N.S., Sidorova N.P.* Influence of constant electric field on processes of sedimentation of thin metal films of platinum by a method of ionic-plasma dispersion // News of high schools of Russia. Radio electronics. 2010. Iss.6. P.59-65.

2. *Derjagin B.V., Krotova N.A., Smilga V.P.* Adgesion of solid bodies. Moscow: Nauka. 1973. 280 p.

3. *Nagorny V.S., Pshchelko N.S., Sidorova N.P.* Analysis of dynamics of formation process of anodic bonding contact//Scientific and technical sheets of St.-Petersburg polytechnical university. 2009. № 6. C.166-170.

4. *Pshchelko N.S.* Use of electric field for increase of adhesion of electrospending films to dielectric substrates at vacuum deposition // Vacuum technics and technology. 2010. № 1. P.31-36.