

УДК 621.791

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ В МЕТАЛЛАХ ПРИ НАГРЕВЕ И ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКА

А.И. Трофимов

Обнинский институт атомной  
 энергетики, Национальный  
 исследовательский ядерный  
 университет «МИФИ»

Рассмотрены физические основы эмиссии электронов при нагреве и воздействии ультразвука. Показана аналогия механизмов повышения внутренней энергии в металлах при нагреве и действии ультразвука. Дано теоретическое и экспериментальное обоснование эмиссии электронов под действием ультразвука.

**Ключевые слова:** электронная эмиссия, нагрев, ультразвук.

Физическое явление эмиссии электронов в нагретых металлах впервые было обнаружено Эдиссоном в 1881 г. [1]. Эмиссия электронов под действием ультразвука обнаружена автором в 2011 г. [2]. Ниже приведено теоретическое обоснование данных физических явлений.

Процесс нагрева твердого тела характеризуется его теплопроводностью – переносом тепловой энергии от более нагретых частей тела к менее нагретым. Перенос осуществляется в результате непосредственной передачи энергии колебаний частиц твердого тела (молекул, атомов, электронов), обладающих большей энергией, частицам с меньшей энергией. Ультразвуковое поле в твердом теле так же путем передачи упругой энергии от одной частицы тела к другой в направлении распространения ультразвуковой волны.

При описании процесса повышения внутренней энергии твердого тела при нагреве его представляют как пространственно упорядоченную систему, в которой колебание одной частицы передается соседним частицам. В твердом теле возникает коллективное движение частиц в форме упругой волны, охватывающей все частицы. Если представить пространственно упорядоченную систему твердого тела в виде одномерной модели – линейной цепочки атомов, способной колебаться в направлении, перпендикулярном ее длине, то ее колебания можно рассматривать как колебания

## PHYSICAL BASIS OF ISSUE ELECTRONS IN THE METAL DURING HEATING AND EXPOSURE TO ULTRASOUND

A.I. Trofimov

The physical basis of electron emission during heating and sonication. Shows the similarity of mechanisms to increase the internal energy in metals by heating and the action of ultrasound. Theoretical and experimental justification for the emission of electrons under the influence of ultrasound.

**KEYWORDS:** electron emission, heat, ultrasound.

струны. Самая низкая частота колебаний определяется длиной струны, а самая высокая – удвоенным расстоянием между атомами  $\alpha$

$$\omega_{max} = \frac{2\pi V}{2\alpha} = \frac{\pi V}{\alpha}, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость распространения звука в твердом теле. Эта частота называется частотой Дебая. А температура, при которой возникают колебания решетки с частотой  $\omega$ , называется температурой Дебая.

При повышении температуры твердого тела в области низких температур, т.е. ниже температуры Дебая, энергия колебаний решетки растет пропорционально величине температуры. Наряду с этим повышение температуры вызывает возбуждение новых нормальных колебаний, начиная от низкочастотных и заканчивая максимальной частотой – частотой Дебая. На рис. 1 приведен спектр тепловых колебаний, характеризующих низкочастотный спектр фононов образца кристалла сегнетовой соли с размерами  $4,7 \times 0,5 \times 0,7$  см<sup>3</sup>, при нагреве до температуры Дебая [3]. Упругие волны тепловых колебаний в образце создают на его металлических обкладках за счет прямого пьезоэффекта сегнетовой соли электрическое напряжение, частотный спектр которого соответствует частотному спектру фононов.

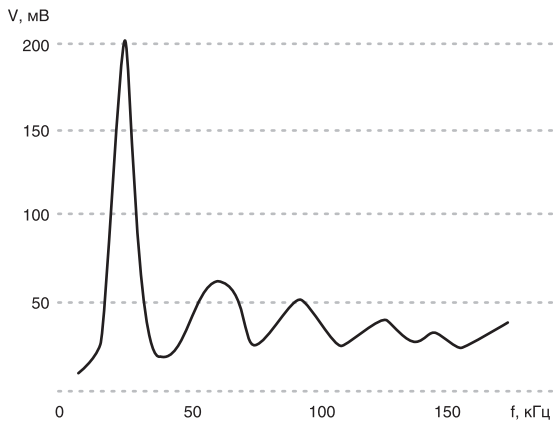


Рис. 1. Спектр тепловых колебаний образца сегнетовой соли

Как видно из рис. 1, при нагреве образца возникают упругие колебания с широким спектром частот от минимальной частоты, соответствующей резонансным размерам образца, до максимальной характеристической дебаевской частоты. При высоких температурах (выше температуры Дебая) возбуждение новых нормальных колебаний не происходит. Повышается только интенсивность, энергия колебаний и, соответственно, внутренняя энергия твердого тела.

Воздействие ультразвука на твердое тело в упрощенном виде воспринимается как возбуждение в нем ультразвуковой волны с амплитудой и частотой, соответствующими интенсивности и частоте колебаний ультразвукового излучателя. Реальное ультразвуковое поле в твердом теле имеет более сложный характер. Во-первых, в ограниченных твердых телах, в отличие от бесконечных сред, распространяются упругие волны, каждая из которых является комбинацией нескольких продольных и сдвиговых волн, число которых определяется геометрическими размерами твердого тела. При взаимодействии нормальных волн в результате дисперсии изменяется фазовая скорость волн. Во-вторых, при распространении в твердом теле ультразвуковых волн большой интенсивности возникают нелинейные эффекты, заключающиеся в том, что при больших амплитудах смещений растяжение и сжатие решетки становятся неодинаковыми, так как сила отталкивания между атомами при сжатии становится больше, чем при растяжении. Сжать уже сжатую решетку труднее, чем растянуть уже растянутую. Возникает зависимость фазовой скорости ультразвука в среде от деформации, от амплитуды колебаний, что приводит к изменению формы волны. Синусоидальная форма вырождается в пилообразную. При этом изменяется спектр волн, возникают спектры высокочастотных волн, определяемых размерами элементов структуры твердого тела: кристаллической решетки, линейных и точечных дефектов.

Поток упругой энергии при ультразвуковом воздействии равен сумме потоков энергии всех нормальных волн. Таким образом, как в температурном, так и в ультразвуковом полях в твердом теле возникают упругие нормальные колебания, имеющие широкий частотный спектр. Рост температуры и интенсивности ультразвука приводит к повышению степени возбуждения колебаний, к повышению их средней энергии, определяющей внутреннюю энергию твердого тела.

Электронная эмиссия в твердых телах возникает при значениях внутренней энергии и, соответственно, энергии электронов, достаточной для преодоления потенциального барьера на границе твердого тела. Это явление наглядно демонстрируется моделью потенциальной ямы, предложенной Шотки (рис. 2) [4].

Электронный газ, находящийся в потенциальной яме, можно рассматривать как тяжелую жидкость. Расстояние до дна ямы является мерой кинетической энергии электронов. Внешнее пространство имеет нулевой потенциал. При абсолютном нуле кинетическая энергия электронов  $W_k$  может заполнять потенциальную яму до высоты, равной энергии Ферми  $\mu$ . При повышении температуры электроны будут обладать энергией, превышающей уровень Ферми. Чтобы совершить работу выхода из металла, кинетическая энергия электрона должна быть выше энергии:

$$W_{\alpha} = qU_{\alpha} = W - \mu, \tag{2}$$

где  $q$  – заряд электрона,  $U_{\alpha}$  – потенциал, эквивалентный работе выхода.

Минимальную скорость, при которой кинетическая энергия электрона соответствует работе выхода, можно рассчитать, исходя из следующего соотношения:

$$\frac{m}{2} V_{вых}^2 = W_{\alpha} \tag{3}$$

При нагреве выход из потенциальной ямы осуществляют только те электроны, направление движения которых перпендикулярно поверхности потенциальной ямы. В трехмерном пространстве, координатами ко-

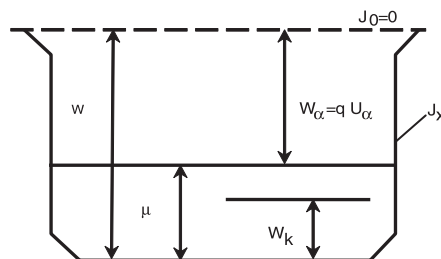


Рис. 2. Модель распределения потенциалов в металле (потенциальная яма)

того являются три взаимно перпендикулярные компоненты скорости:  $V_x, V_y, V_z$ , выход из потенциальной ямы осуществляют электроны, имеющие компоненту скорости  $V_x = V_{\text{вых}}$ , направление движения которых перпендикулярно поверхности потенциальной ямы (поверхности металла). Если в единице объема металла содержится  $dn$  электронов, имеющих компоненту скорости  $V_x$ , то именно эта группа электронов определяет плотность эмиссионного тока:

$$dJ = qV_x dn. \quad (4)$$

Принято [4], что полная плотность тока эмиссии определяется следующим выражением:

$$J = 2q \left( \frac{m}{n} \right) \int_{-\infty}^{+\infty} dV_y \int_{-\infty}^{+\infty} dV_z \int_{-\infty}^{+\infty} V_x e^{(\epsilon - \mu)/kT} dV_x, \quad (5)$$

где  $\epsilon = \frac{m}{2} (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)$ .

Решение уравнения (5) проводится при следующих условиях. Для электронов, тепловая энергия которых достаточна для того, чтобы они смогли выйти из металла, должно выполняться требование  $V_x \geq V_{\text{вых}}$ . На электроны, имеющие скорости  $V_y$  и  $V_z$ , никаких ограничений не накладывается, т.к. они перемещаются внутри металла.

Интегрируя выражение (5), получаем соотношение:

$$J = \frac{4\pi q m k^2}{h^3} T^2 e^{-\frac{W_a}{kT}} = A T^2 e^{-\frac{W_a}{kT}}, \quad (6)$$

которое называется формулой Ричардсона.

$A = \frac{4\pi q m k^2}{h^3}$  – постоянная Ричардсона,  $k$  – постоянная Больцмана,  $h$  – постоянная Планка.

Формула Ричардсона определяет максимальную плотность тока термоэлектронной эмиссии, которую «может» дать накальный катод при температуре  $T$  (плотность тока насыщения).

В табл. 1 приведены значения величины плотности термоэмиссионного тока катода, выполненного из вольфрама [5]. Как видно, термоэмиссионный ток имеет место только в области достаточно высоких температур.

При повышении внутренней энергии твердого тела в ультразвуковом поле свободные электроны получают приращение скорости в направлении распространения ультразвуковых волн. Если направление распространения ультразвуковых волн перпендикулярно по-

верхности потенциальной ямы, электроны, имеющие компоненту скорости  $v_x$ , получают приращение скорости в направлении их движения. Электроны, имеющие компоненты скорости  $v_y$  и  $v_z$  под действием ультразвуковых волн изменяют направление движения в соответствии с соотношением энергий теплового движения и энергий ультразвукового поля.

Механизм данного физического явления заключается в следующем. Если представить ультразвуковую волну в металле как поток фононов, то интенсивность ультразвука будет определяться выражением [1]:

$$I_x = n_{\phi}(x) \hbar \omega c, \quad (7)$$

где  $n_{\phi}(x)$  – число фононов в единице объема в точке  $x$ ;  $\hbar \omega$  – энергия фонона,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $\omega$  – частота ультразвука,  $c$  – скорость ультразвука.

При взаимодействии с электроном фонон обменивается с ним импульсом и энергией. Если фонон отдает свой импульс электрону с эффективной массой  $m^*$ , то выражение закона сохранения импульса можно представить в следующем виде:

$$P_{\phi} = \frac{\hbar \omega}{c} = \Delta V_{эл} \times m^* = P_{эл}. \quad (8)$$

Следовательно, электрон получает прибавку скорости в направлении распространения ультразвуковой волны:

$$\Delta V_{эл} = \frac{\hbar \omega}{m^* c}. \quad (9)$$

Движение электронов в направлении ультразвуковой волны создает электрический ток, который называют акустоэлектрическим током. Плотность акустоэлектрического тока определяется выражением:

$$I_{ae} = q n_e \Delta V_{эл} = \frac{q n_e \hbar \omega}{m^* c}, \quad (10)$$

где  $n_e$  – число электронов, взаимодействующих с фононами.

При этом ультразвуковая волна отдает электронам мощность, величина которой в единице объема:

$$Q_0 = a_{эл} I_x, \quad (11)$$

где  $a_{эл}$  – коэффициент электронного поглощения ультразвука, определяемый выражением:

$$a_{эл} = \frac{n_e}{n_{\phi}} \times \frac{1}{c \tau}, \quad (12)$$

где  $\tau$  – время между столкновениями электронов.

С учетом электронного поглощения ультразвуковой волны получено универсальное соотношение для акустоэлектрического тока (соотношение Вайнрайха) [6]:

$$J_{ae} = \frac{a_{эл} \mu I_x}{c}, \quad (13)$$

где  $\mu = q\tau/m$  – подвижность электронов.

Таким образом, плотность акустического тока находится в линейной зависимости от интенсивности ультразвука.

ТАБЛИЦА 1.

Т, К	2100	2200	2400	2600	2800	2900	3000
J, A/cm <sup>2</sup>	3,9·10 <sup>-3</sup>	1,3·10 <sup>-2</sup>	1,2·10 <sup>-1</sup>	7,0·10 <sup>-1</sup>	3,5	7,3	14,0

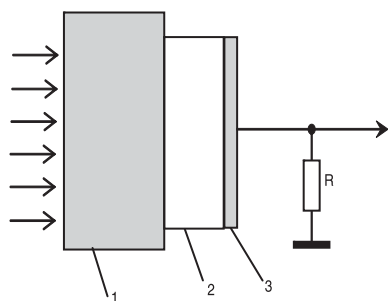


РИС. 3.

Схема экспериментальной установки исследования ударных волн: 1 – образец из алюминия, 2 – образец из висмута, 3 – образец из меди

В работах [7–9] установлено, что при ударном нагружении в металле перед фронтом упругой волны перемещается электронная волна, создающая электрический ток. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3. В образце из алюминия создается ударная упругая волна, которая проходит через образцы из висмута и меди. При переходе ударной волны из алюминия в висмут и из висмута в медь появляется электрический сигнал, который фиксируется осциллографом, имеющим входное сопротивление 100 Ом. Момент входа ударной волны в образцы висмута и меди фиксируется с помощью контактных датчиков. При величине ударной волны, создаваемой давлением 340 кбар, величина электрического сигнала составляет 150 мВ.

Авторы [8] установили, что возникновение ЭДС при прохождении упругой волны через границы алюминий-висмут и висмут-медь происходит за счет термоэлектрического эффекта, возникающего на границе металлов с существенно разными значениями плотности электронов. Плотность электронов в алюминии и меди находится в пределах  $10^{22} - 10^{23}$  на  $1 \text{ см}^3$ , в висмуте –  $10^{18}$  на  $1 \text{ см}^3$ . На основе данного эффекта авторы [9] разработали бесконтактный метод измерения динамических напряжений в металле элементов конструкций АЭС.

Как показали результаты исследований, появление электрического сигнала в образце висмута происходит за 0,5–0,7 мксек до входа в него фронта упругой волны. Проникновение электронной волны в невозмущенное вещество перед фронтом упругой волны составляет 2–3 мм.

Таким образом, под действием упругих волн электроны приобретают кинетическую энергию, достаточную для их диффузии из одного металла в другой. Если кинетическая энергия электронов под действием упругих волн соответствует работе выхода из металла, возникает электронная эмиссия.

На рис. 4 приведена схема экспериментальной установки исследования электронной эмиссии в ме-

талле под действием ультразвука. Установка содержит эмиттер и коллектор, выполненные в виде медных шайб с отполированными обращенными друг к другу поверхностями. Для изменения зазора коллектор закреплен с возможностью перемещения. Эмиттер через волновод сочленен с ультразвуковым преобразователем, подключенным к генератору электрических колебаний. Изменение температуры эмиттера осуществляется с помощью электронагревателя. Для создания вакуума установка помещается в вакуумную камеру.

Ультразвуковой преобразователь создает в эмиттере упругие колебания. При определенной интенсивности ультразвука в эмиттере возникает эмиссия электронов. Ток электронной эмиссии измеряется с помощью миллиамперметра. Электрический сигнал подается также на осциллограф. В табл. 2–5 приведены значения тока электронной эмиссии при интенсивности ультразвука  $\approx 120 \text{ Вт/см}^2$  и частоте 22 кГц. Результаты экспериментов показывают, что ток электронной эмиссии существенно увеличивается при создании вакуума и повышении температуры эмиттера.

На рис. 5 приведена осциллограмма ЭДС тока эмиссии при температуре эмиттера  $20^\circ \text{ C}$  и величине зазора 0,1 мм. Наличие отрицательного полупериода осциллограммы обусловлено тем, что электроны эмиссии во время положительного полупериода ультразвуковой волны (приток электронов) создают на поверхности коллектора потенциал, который во время отрицательного полупериода ультразвуковой волны (отток электронов) становится отрицательным по отношению к потенциалу на поверхности эмиттера. Частота ЭДС соответствует частоте колебаний ультразвукового преобразователя. Наблюдается явление повышения тока эмиссии при температуре  $100^\circ \text{ C}$ . При повышении температуры эмиттера ток эмиссии увеличивается.

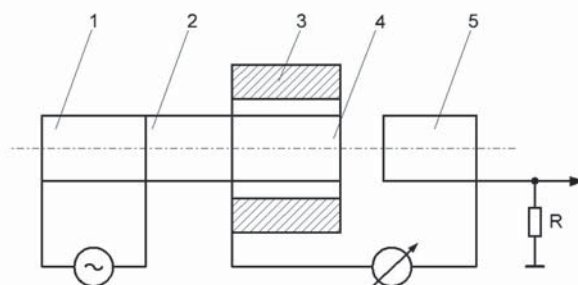


РИС. 4.

Схема экспериментальной установки исследования эмиссии электронов в металле под воздействием ультразвука: 1 – ультразвуковой преобразователь, 2 – волновод, 3 – нагреватель, 4 – эмиттер, 5 – коллектор

ТАБЛИЦА 2.

Температура 20° С, атмосферное давление

Зазор, мм	0,05	0,07	0,10	0,15	0,20	0,25
Эл. ток, мА	0,95	0,71	0,45	0,17	0,12	0,0

ТАБЛИЦА 3.

Температура 20° С, давление 0,1 атм

Зазор, мм	0,05	0,07	0,10	0,15	0,20	0,25
Эл. ток, мА	1,95	1,17	0,74	0,62	0,50	0,0

ТАБЛИЦА 4.

Температура 100° С, давление 745 мм.рт.ст.

Зазор, мм	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Эл. ток, мА	1,5	1,0	0,8	0,5	0,11	0,02

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что при воздействии ультразвука возникает электронная эмиссия. Данное физическое явление после проведения дополнительных исследований при более высоких температурах эмиттера может найти применение при построении термоэмиссионных преобразователей. Воздействие ультразвука на эмиттер может привести к повышению тока эмиссии и смещению температурного диапазона термоэмиссионных преобразователей в область более низких температур.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Трофимов А.И. Физические основы генераторных измерительных и энергетических преобразователей. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 384 с.
2. Трофимов А.И. Диплом на открытие № 426 «Явление ультразвуковой электронной эмиссии», 2011.
3. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 400 с.
4. Мирдель Г. Электрофизика. М.: Мир, 1972. 608 с.
5. Физические величины / Справочник под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 123 с.
6. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П. Голяниной. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
7. Нестеренко В.Ф., Ставер А.М., Стырон Б.К. О диффузии электронов через фронт ударной волны в металлах // ФГВ. 1973. вып. 9, № 3. С. 433-436.

ТАБЛИЦА 5.

Температура 100° С, давление 0,1 атм

Зазор, мм	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Эл. ток, мА	2,2	1,76	1,3	1,0	0,23	0,1

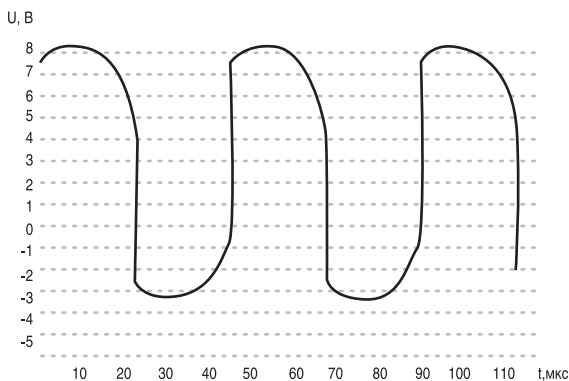


РИС. 5.

Осциллограмма ЭДС тока эмиссии при воздействии на эмиттер ультразвука

8. Трофимов А.И., Трофимов М.А., Худаско В.В. Диплом на открытие № 236 «Закономерность возникновения эдс в контактной области пары металлов с разной плотностью электронов проводимости при ударных нагрузках». 2003.
9. Трофимов А.И., Трофимов М.А. Бесконтактные методы исследования напряженного состояния элементов конструкции АЭС при ударных нагрузках. М.: Энергоатомиздат, 2004. 304с.

**Адольф Иванович Трофимов,**  
д.т.н., профессор Обнинского института атомной энергетики НИЯУ МИФИ, зав. кафедрой автоматизации, контроля и диагностики  
 ☎ 249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1,  
 e-mail: trofimovma@mail.ru