

О ДИФФУЗИИ ЭЛЕКТРОНОВ ЧЕРЕЗ ФРОНТ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В МЕТАЛЛАХ

А. А. Дерibas, В. Ф. Нестеренко, А. М. Ставер
(Новосибирск)

Исследованию электрических эффектов в веществах при прохождении через них ударных волн в последние годы уделяется большое внимание. В результате этих исследований был обнаружен [1] эффект поляризации диэлектриков при ударном сжатии.

В работах [2, 3] экспериментально найдена диффузия заряженных носителей через фронт ударной волны в висмуте. Авторы [3] предположили, что наблюдаемый эффект обусловлен различием концентраций высокоподвижных носителей электрического заряда перед и за фронтом ударной волны за счет сжатия вещества. По мнению авторов [3], это является причиной диффузии электронов через фронт (эффект электронного «предвестника»).

В настоящей работе исследуется диффузия носителей электрических зарядов через фронт ударной волны в поликристаллическом висмуте и сурьме. Постановка эксперимента аналогична описанной в работе [3] (рис. 1) (схема емкостного датчика). Образцы висмута и сурьмы крупнозернистой структуры представляли собой пластинки диаметром 18 и высотой 4 мм. Поверхности образцов плотно притирались к экрану. Исследуемый образец являлся одной из обкладок плоского конденсатора, второй обкладкой которого служил медный диск диаметром 18 и толщиной 5 мм. В качестве изолятора использовалось фторопластовое кольцо толщиной 0,5 мм. Пространство за экраном заливалось воском.

Ударная волна создавалась генератором плоской волны и вводилась в образец через алюминиевый экран толщиной 10 мм. Измерения проводились на осциллографе ОК-33, который работал в режиме внешнего запуска. Давление и температура за фронтом ударной волны рассчитывались по известным уравнениям состояния экрана и исследуемых образцов. Для висмута давление составляло 360 кбар, для сурьмы — 320 кбар.

В опытах изменялось напряжение между обкладками конденсатора от 0 до 600 в, а также знак поля между обкладками.

В результате проведенных опытов были получены осциллограммы изменения тока в измерительной цепи от времени. На рис. 2, а, показана осциллограмма выхода ударной волны на свободную поверхность.

На рис. 2, б, в, г приведены типичные осциллограммы для сурьмы. Напряжение между обкладками составляло для опыта на рис. 2, б — 100 в, для опыта на рис. 2, в — 0 в, для опыта на рис. 2, г — +400 в. Данные для висмута имеют аналогичный характер. Из осциллограмм видно, что качественный характер кривых подобен описанному в работе [3].

Момент выхода ударной волны на свободную поверхность определялся в отдельных экспериментах контактными датчиками и совпадал со

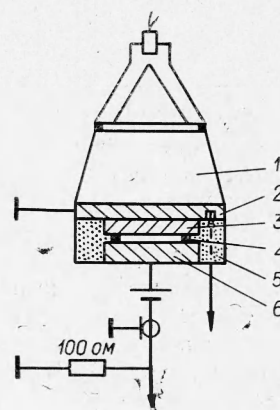


Рис. 1. Схема постановки опыта.

1 — заряд ВВ ТГ 50/50; 2 — алюминиевый экран; 3 — исследуемый образец; 4 — изолятор; 5 — воск; 6 — медный электрод.



Рис. 2. Осциллограммы:

а) выхода ударной волны на свободную поверхность образца; б) при направлении поля от медного электрода к образцу и разности потенциалов между ними 100 в; в) при нулевом напряжении; г) при направлении поля, противоположного случаю б) и разности потенциалов 400 в.

Метки времени поданы с частотой 10 Мгц. Стрелками показан момент выхода ударной волны на свободную поверхность образца. Величина калибрового сигнала составляет 0,15 в.

временем появления скачка тока, связанного с движением свободной поверхности. Величина наблюдаемого сигнала в случае висмута и сурьмы составляла ~ 150 мв. Проникновение заряда «предвестника» в невозмущенное вещество перед фронтом для висмута и сурьмы составляло 0,2—0,3 см.

В результате проведенных экспериментов установлено появление электрического сигнала в Вi и Sb за 0,5—0,7 мксек до выхода ударной волны на свободную поверхность, величина которого в исследуемом диапазоне не зависела от приложенного напряжения. Величина измеряемого сигнала в сурьме существенно изменялась от опыта к опыту, что может быть связано с зависимостью «предвестника» от ориентации кристаллической решетки относительно фронта ударной волны. В меди и алюминии аналогичные сигналы не наблюдались.

Рассмотрим свойства Вi как типичного представителя металлов, в которых наблюдаются подобные сигналы. Число свободных электронов на атом в Вi при комнатной температуре составляет 10^{-5} (или 10^{18} на 1 см³). Эффективная масса этих электронов аномально мала и равна $\sim 0,01 m$, где m — масса электрона. Этими параметрами определяется большой свободный пробег электронов, который при комнатной температуре равен по порядку величины 10^{-4} см [4, 5]. Для сравнения укажем, что в типичных металлах число свободных электронов составляет 10^{22} — 10^{23} см³, их эффективная масса равна примерно массе электрона, а свободный пробег равен 10^{-6} — 10^{-7} см. В Вi наблюдается сильная зависимость числа свободных носителей от давления и температуры T [6, 7]. Анализ этой зависимости от давления в условиях ударного сжатия в настоящее время не представляется возможным. Однако высокая температура за фронтом ударной волны ($T \sim 2000^\circ\text{C}$) дает основание полагать, что плотность носителей n будет существенно увеличиваться. Даже в предположении зависимости n от T в виде [6] $n = n_0 T^{3/2}$ получим увеличение концентрации носителей в условиях нашего опыта более чем на порядок. Отсюда можно сделать вывод, что определяющим для увеличения концентрации свободных носителей является, по-видимому, повышение температуры. Из изложенного следует, что висмут отличается от типичных металлов наличием больших градиентов концентрации носителей на фронте ударной волны, их большими свободными пробегами в невозмущенном веществе перед фронтом и аномально малой эффективной массой. Эти свойства и являются определяющими для эффекта электронного «предвестника».

Механизм появления электронного «предвестника» в материалах типа висмут, по нашему мнению, может быть представлен следующим образом. За фронтом ударной волны существует равновесное распределение электронов с конечной их концентрацией и температурой, равной температуре решетки. Вследствие большой температуры и сравнительно малой концентрации электроны будут иметь максвелловское распределение по энергии, и за фронтом ударной волны будет существовать определенное число электронов с энергией существенно большей, чем средняя тепловая энергия, и которые могут свободно проходить через фронт и диффундировать в невозмущенное вещество перед фронтом.

Для протекания диффузии необходимо выполнение следующих условий:

1. Диффузия должна протекать достаточно быстро, чтобы успеть оторваться от фронта на значительное расстояние. Для этого диффундирующие электроны должны иметь возможно большую энергию.

2. Отрыву диффузии от фронта на достаточное расстояние должно удовлетворять определенное количество электронов, необходимых для создания заметного сигнала. Длина проникновения «предвестника» в невозмущенное вещество перед фронтом ударной волны в предположении, что расстояние, на которое диффундируют электроны, описывается формулой $x = \sqrt{kt}$, равна $L = k/4D$, где $k = lv/3$ — коэффициент диффузии; l — длина свободного пробега электронов; v — скорость электронов; D — скорость ударной волны.

Например, для Bi при энергии диффундирующих электронов больше или равной $10 kT$ величине свободного пробега $4 \cdot 10^{-4}$ см и приняв, что электроны с такой энергией полностью покидают область порядка 10^{-7} см, получим для L значение 10^{-1} см, а для числа диффундирующих электронов значение 10^9 на 1 см², что может вызвать появление наблюдаемого сигнала, где k — постоянная Больцмана.

Аналогичная оценка для типичных металлов ($n \sim 10^{22}$ см³, $l \sim 10^{-6}$ — 10^{-7} см) в предположении о квадратичной зависимости длины свободного пробега диффундирующих электронов от энергии, при температуре за фронтом порядка десятых долей электронвольта, показывает фактически отсутствие электронов, могущих диффундировать вперед фронта на расстояние $\sim 10^{-1}$ см. Их число в 1 см³ составляет anomalously малую величину $< 10^{-200}n$, где n — плотность свободных электронов.

Таким образом, эффект электронного «предвестника» может быть объяснен диффузией в невозмущенное вещество перед фронтом высокоэнергетических электронов, которые имеются за фронтом вследствие максвелловского распределения носителей по энергиям, а параметры наблюдаемого сигнала определяются зависимостью числа свободных электронов за фронтом ударной волны от температуры и давления, их свободными перебегами и количеством в невозмущенном веществе перед фронтом, их эффективными массами.

Величина «предвестника» в опытах не зависела от величины приложенного напряжения и его полярности. Это может служить доказательством того, что электроны не диффундируют в зазор между исследуемым образцом 3 и электродом 4 (см. рис. 1).

Поступила в редакцию
9/XII 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Иванов, Е. З. Новицкий и др. ЖЭТФ, 1967, 53, 41.
 2. А. Г. Иванов, В. Н. Минеев и др. Письма ЖЭТФ, 1968, 6, 191.
 3. В. Н. Минеев, А. Г. Иванов и др. Автореф. докл. Третьего всесоюзн. симп. по горению и взрыву. Ленинград, 1971.
 4. N. Mott. Phil Mag. 1966, 13, 125.
 5. E. H. Sondheimer, Proc. Phys. Soc. 1952, A65, 561.
 6. Д. Балла, Н. Б. Брандт. 1964, ЖЭТФ, 47, 5(11).
 7. А. А. Абрикосов. ЖЭТФ, 1963, 44, 5.
-