

05;07;12

Влияние микроструктуры металла на спектр излучения, возбуждаемый при разрушении проводников с током МГД неустойчивостью

© К.Б. Абрамова, И.П. Щербаков, А.И. Русаков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 20 февраля 1998 г.)

Проведено экспериментальное исследование спектральных характеристик излучения, сопровождающего разрушение медных проводников с различной микроструктурой током большой плотности. Обсуждаются предложенные механизмы генерации излучения и соответствие этих механизмов экспериментальным результатам.

Пропускание по проводникам токов большой плотности $j \sim 5 \cdot 10^7$ А/см² приводит к деформированию и разрушению проводников МГД неустойчивостями [1]. Этот процесс сопровождается яркой световой вспышкой, спектр излучения которой содержит ряд линий и полос, т. е. обширную информацию о системе и динамике электронных уровней как самого металла, так и отдельных его атомов. В работе [2] исследовался спектр излучения, возбуждающийся при МГД разрушении медных проводников. Проведена идентификация наблюдаемых полос излучения, рассмотрены процессы, приводящие к их возбуждению.

Известно, что бомбардировка поверхности металла заряженными частицами с энергией в несколько килоэлектрон-вольт возбуждает катодо- и ионOLUMИНЕСЦЕНЦИЮ [3,4]. Основной вклад в катодOLUMИНЕСЦЕНЦИЮ вносит радиационный распад одночастичных и коллективных возбуждений. Уже в первой работе по катодOLUMИНЕСЦЕНЦИИ меди предполагалось, что наблюдаемое излучение связано не только с радиационным переходом электронов с уровня Ферми ε_F на лежащие ниже дырочные состояния, но и с электронно-дырочной рекомбинацией из состояний над ε_F , т. е. катодOLUMИНЕСЦЕНЦИЯ имеет надкраевой характер [3]. При этом следует ожидать совпадения пиков LЮМИНЕСЦЕНЦИИ с пиками плотности состояний ниже ε_F . Качественно механизм возникновения сильного электрического поля в процессе разрушения вследствие пропускания по проводнику тока большой плотности весьма прост. Развитие перетяжечного возмущения до амплитуды, равной радиусу проводника, приводит к появлению разрывов [5]. Благодаря реакции контура напряжение, приложенное к разрывам, оказывается во много раз больше начального и в разрывах возникает сильное электрическое поле. Ускорение электронов и ионов в возникших таким образом полях должно приводить к возникновению катодо- и ионOLUMИНЕСЦЕНЦИИ, как и в стационарных условиях. Однако при одинаковой энергии частиц быстрые электроны сильнее возбуждают электронную подсистему кристалла, чем медленные ионы. Поэтому в этом процессе основной вклад в излучение вносят электроны.

Разрушение сильным током способно привести к возбуждению плазменной люминесценции. Излучение плазмонов обнаружено при электронной бомбардировке алюминия, серебра и ряда других металлов. Исходя из оценок, произведенных в работе [6], для меди плазменная люминесценция должна быть в ультрафиолетовой области, и в данной работе мы ее рассматривать не будем.

Наряду с возбуждением, вызванным энергичными электронами, при разрушении сильным током возникает свечение, связанное с самим процессом разрушения [7]. Предлагаемый механизм этого излучения заключается в следующем [1]. При вязком разрушении вблизи вершины трещины образуются пластические зоны с высокой концентрацией дислокаций. После снятия нагрузки происходит дислокационный возврат деформируемого слоя, связанный с аннигиляцией пар дислокаций противоположного знака и с выходом подвижных дислокаций на поверхность. Реальные дислокации в металлах имеют сложную структуру, поэтому их полная аннигиляция маловероятна. В каждой дислокационной реакции возможна аннигиляция только отдельных параллельных отрезков. Аннигиляция таких отрезков сопровождается выделением значительной энергии, достигающей нескольких электрон-вольт на одно межатомное расстояние вдоль оси. При аннигиляции дислокаций в меди возможно пересечение термов внутренних d -электронов, локализованных в области ядра дислокаций, с состояниями свободных $s-p$ -зон. Неадиабатические переходы, возникающие при пересечении, приводят к появлению дырок в квазилокальных d -состояниях вблизи дислокаций, образующихся в результате дислокационных реакций.

Отдельные полосы люминесценции, возникающие при разрушении проводников токами большой плотности [2], возбуждались и регистрировались и в других процессах: 1) полоса ($\lambda_{\max} = 5550$ Å) катодOLUMИНЕСЦЕНЦИИ наблюдалась при облучении медного образца электронами [3], 2) полоса ($\lambda_{\max} = 5800$ Å) фотOLUMИНЕСЦЕНЦИИ наблюдалась при облучении медного образца лазером [9], 3) полоса ($\lambda_{\max} = 7300$ Å) механOLUMИНЕСЦЕНЦИИ на-

блюдалась при тыльном отколе (чисто механическое нагружение) [8].

Наиболее интересным, с нашей точки зрения, является подробное исследование люминесценции, связанной с чисто механическим нагружением. Это связано с тем, что если справедлив дислокационный механизм, то механолюминесценция позволяет не только исследовать дислокационные процессы вблизи поверхности металла, но и служит уникальным источником информации о природе поверхностных электронных состояниях. Другие методы возбуждения люминесценции металлов (светом или заряженными частицами) принципиально не способны привести к возбуждению такой люминесценции, так как в этих случаях возбуждаются объемные состояния в металле, а поверхностные практически не затрагиваются.

Нам представляется возможным и важным оценить справедливость одного из основных положений дислокационной модели механолюминесценции металлов, согласно которой [8,10] максимальное значение интенсивности люминесценции можно определить из формулы

$$I = \eta N_m \frac{S_t}{dt},$$

где I — интенсивность механолюминесценции, η — квантовый выход механолюминесценции, N_m — плотность подвижных дислокаций, S_t — толщина пластической зоны, t — время свечения, d — параметр решетки.

Из формулы видно, что для одного и того же металла две величины остаются неизменными при любых условиях нагружения. Это η — квантовый выход люминесценции и d — параметр решетки. Величина пластической зоны S_t может изменяться в зависимости от различных способов нагружения, она будет наибольшей в случае всестороннего растяжения. Время свечения в формуле стоит в знаменателе, поэтому чем быстрее происходит нагружение, тем больше должна быть интенсивность механолюминесценции. Плотность подвижных дислокаций N_m в конечном счете определяется исходной плотностью дислокаций N в образце. Соответственно исходный материал с большей начальной плотностью дислокаций должен излучать больше фотонов, чем материал с меньшей начальной плотностью.

В работе [11] исследовалась зависимость интенсивности механолюминесценции от исходной микроструктуры образца. Регистрировалось и сравнивалось интегральное излучение. Спектральные измерения излучения ввиду его малой интенсивности не проводились. Для подтверждения положений дислокационной модели важно проверить существование зависимости спектра механолюминесценции от исходной микроструктуры образца.

В описываемых в настоящей работе опытах разрушение медных проводников осуществлялось при пропускании по ним электрического тока плотностью $0.7-1.0 \cdot 10^7$ А/см². Разрушавшиеся проводники представляли собой отрезки технически чистой медной проволоки марки М0 длиной 70 и диаметром 0.5 мм. Источником энергии служила батарея конденсаторов емкостью 400 мкФ, заряженная до 1.5 кВ. Скорость нагружения

составляла $V = 1 \cdot 10^3$ м/с, длительность излучения $t = 20$ мкс. Исследуемое излучение фокусировалось на входную щель дифракционного спектрометра, в фокальной плоскости которого располагался фотоэлектрический линейный преобразователь с самосканированием на принципе переноса заряда типа ФППЗ1Л, сигналы с которого поступали в аналого-цифровой преобразователь и затем в ЭВМ. Это позволяло проводить измерения спектральных характеристик вспышки излучения в диапазоне 5400–8100 Å со спектральной разрешающей способностью 6 Å при разрушении одного образца.

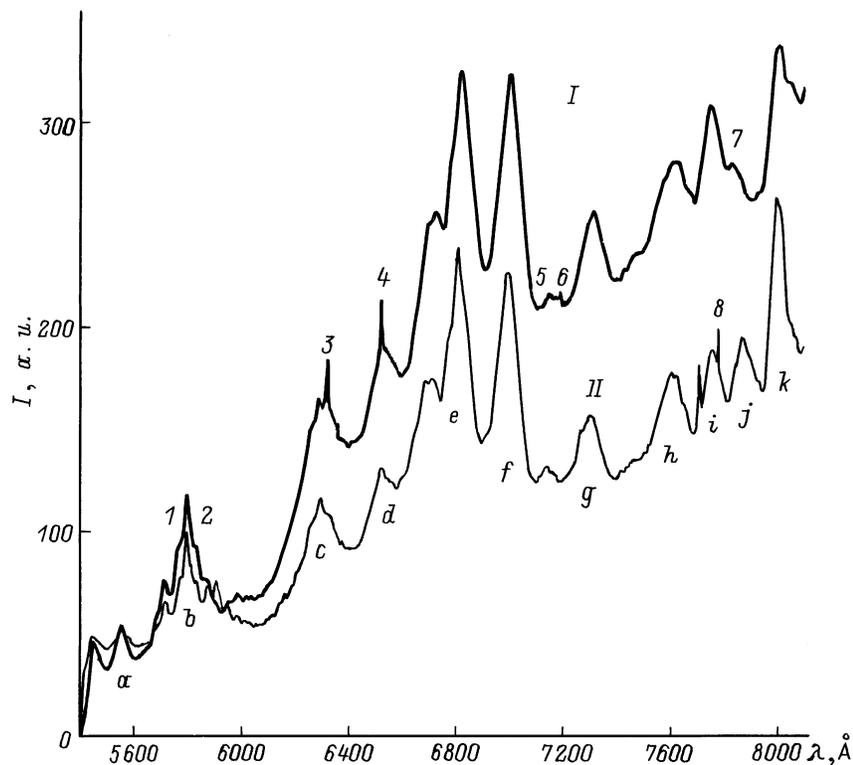
Ранее опубликованный [2] непрерывный спектр излучения, сопровождающий МГД разрушение меди, был измерен в более широком диапазоне — 4500–9000 Å. Однако измерения проводились лишь в 20 точках этого спектрального диапазона и для получения среднего значения величины интенсивности в каждой точке требовалось разрушить 10 образцов.

Настоящие измерения выполнены более подробно и на качественно новом экспериментальном уровне. Во-первых, весь спектр излучения измерялся в одном опыте. Во-вторых, измерения проводились в пятистах точках спектрального диапазона 5400–8100 Å. В-третьих, измерялся не только непрерывный спектр излучения, но и линейчатый. Это позволило повысить точность и надежность получаемых результатов.

На рисунке приведены две характерные зависимости из большого числа полученных. Кривая I — характерный спектр излучения, возникающий при разрушении прокатанной медной проволоки марки М0. Как видно, возбуждены полоса катодолюминесценции a [3], полоса, соответствующая фотолюминесценции меди b [9], полоса экситонной люминесценции закиси меди c [12], а также полоса механолюминесценции, связанная с рекомбинацией электронов в поверхностные электронные состояния g и полосы d, e, f , наблюдаемые при тыльном отколе [6,8], и h, i, k , подлежащие идентификации в дальнейшем. Острые пики, которые видны на некоторых полосах и отмеченные на рисунке цифрами 1–8, соответствуют наиболее интенсивным атомарным линиям меди и примесям, присутствующим в образце [13].

Кривая II — спектр излучения медной, предварительно отожженной проволоки марки М0, разрушенной при тех же самых условиях. Известно, что дислокации с противоположно направленными векторами Бюргерса, лежащие в одной плоскости скольжения, при сближении уничтожают друг друга. Если такие дислокации лежат в разных плоскостях скольжения, то для их аннигиляции требуется переползание. Отжиг способствует переползанию дислокаций, и таким образом понижается их концентрация [14]. Фотографии микроструктуры отожженных и прокатанных образцов были получены в работе [11].

Из сравнения спектров, представленных на рисунке, видно, что полосы катодолюминесценции a [3] и полосы, соответствующие фотолюминесценции меди b [9], повторяют друг друга. Это, по-видимому, связано с тем, что эти полосы возникают вследствие возбуждения



Спектр излучения меди: *I* — прокатанная медная проволока марки М0, *II* — отожженная медная проволока марки М0; *1* — CuI 5700, *2* — CuI 5782, *3* — SbII 6312, *4* — SbII 6503, *5* — NiI 7122, *6* — FeI 7207, *7* — Bi 7838, *8* — OI 7772; *a* — полоса катодолюминесценции $\lambda_{\max} = 5550 \text{ \AA}$, *b* — полоса фотолюминесценции $\lambda_{\max} = 5800 \text{ \AA}$, *c* — полоса экситонной люминесценции закиси меди с $\lambda_{\max} = 6350 \text{ \AA}$, *g* — полоса механолюминесценции $\lambda_{\max} = 7300 \text{ \AA}$.

объемных состояний, которые претерпевают малые изменения в процессе отжига. На других участках спектра кривых *I* и *II* интенсивности различаются, т. е. произошли изменения в относительной интенсивности полос люминесценции разной природы.

Наиболее интересный для нас участок спектра — это полоса механолюминесценции *g*. Как и следовало ожидать, интенсивность полосы *g* при разрушении отожженного образца оказалась меньше, чем в случае неотожженного. Эти результаты подтверждают дислокационную модель механолюминесценции: в процессе отжига уменьшились концентрация дислокаций и интенсивность полосы, которая связана с возбуждением дырочных состояний при неадиабатических переходах, возникающих в момент аннигиляции дислокаций и при выходе дислокаций на поверхность.

Уменьшилась также интенсивность полос *d*, *e*, *f*, наблюдаемых и при тыльном отколе [7]. При других способах воздействия на металл, таких как катодо-, ионо-, фотооблучение, эти полосы не возбуждались. Такими образом, они также возбуждаются только при разрушении образца, как и полоса механолюминесценции *g*. Уменьшение же интенсивности этих полос при разрушении отожженного образца может означать, что интенсивность этих полос определяется концентрацией дефектов в образце, как и полосы *g*.

Интенсивность атомарного спектра, как видно из рисунка, также претерпела изменения. Отжиг не повлиял на линии *1*, *2*, *5*, *6*, в то же время исчезли линии *3*, *4* и *7* и появилась линия *8*. Исчезновение линий *3*, *4* и *7* может означать, что в процессе отжига уменьшилась концентрация примесей серы, сурьмы и висмута. Появление линии *8* и полосы *j*, по-видимому, можно связать с процессом окисления и адсорбцией кислорода в процессе отжига.

Таким образом, анализ полученных спектров излучения, возникающего при разрушении проводников током большой плотности, позволяет сделать следующие выводы.

1. Изменение микроструктуры в процессе отжига уменьшает вероятность возбуждения поверхностных электронных состояний, определяющих возникновение полосы механолюминесценции.

2. Изменение микроструктуры в процессе отжига не влияет на объемные электронные состояния, определяющие возникновение полос катодолюминесценции и фотолюминесценции.

Следует подчеркнуть, что до сих пор не проводились исследования динамики возникновения и изменения спектральных полос во времени. Проведение этих исследований позволит получить информацию о динамике изменения поверхностных и объемных электронных

состояниях в металлическом образце в процессе его деформирования и разрушения, а также о динамике выхода подвижных дислокаций на поверхность.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 97-02-18097.

Список литературы

- [1] *Абрамова К.Б., Златин Н.А., Перегуд Б.П.* // ЖТФ. 1975. Т. 19. Вып. 6. С. 2007–2022.
- [2] *Абрамова К.Б., Перегуд Б.П., Перунов Ю.Н.* // Опт. и спектр. 1985. Т. 58. Вып. 4. С. 809–814.
- [3] *Bonnot A., Debever J.M., Hanus J.* // Sol. St. Commun. 1972. Vol. 10. N 1. P. 173–174.
- [4] *Zivitz M., Thomas E.W.* // Phys. Rev. 1976. Vol. 13. N 7. P. 2747–2761.
- [5] *Трубников Б.А.* // Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций. 1958. Т. 4. С. 87–91.
- [6] *Молоцкий М.И.* // ФТТ. 1978. Т. 20. Вып. 6. С. 1651–1656.
- [7] *Молоцкий М.И., Перегуд Б.П.* // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 3. С. 618–627.
- [8] *Абрамова К.Б., Валицкий В.Л., Златин Н.А.* и др. // ЖЭТФ. 1976. Т. 31. Вып. 5. С. 1873–1879.
- [9] *Moore A.* // Phys. Rev. Lett. 1969. Vol. 22. N 5. P. 185–187.
- [10] *Chandra V.R., Ryan M.S., Seema R., Simon, Ansari M.H.* // Cryst. Res. Technol. 1996. Vol. 31. N 4. P. 495–500.
- [11] *Абрамова К.Б., Щербаков И.П., Пухонто И.Я., Кондырев А.М.* // ЖТФ. 1996. Т. 68. Вып. 5. С. 190–196.
- [12] *Крейгольд Ф.И., Кулинкин Б.С.* // Опт. и спектр. 1972. Т. 33. Вып. 4. С. 706–711.
- [13] *Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М., Шрейдер Е.Я.* Таблицы спектральных линий. М., 1962. 607 с.
- [14] *Иденбом В.Л., Орлов А.Н.* // УФН. 1962. Т. 76. № 3. С. 557–571.