

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПРОТЕКАНИИ ТОКА

*А.Б.Ринкевич, М.В.Пономарева, В.В.Устинов*

Обнаружены нестационарные явления и два типа неустойчивости при распространении поверхностной электромагнитной волны в периодической структуре из чистого алюминия.

В последние годы началось изучение нелинейных явлений, происходящих в чистых металлах при протекании электрического тока. В условиях отклонения вольтамперной характеристики от линейной наблюдается магнитоакустическая неустойчивость<sup>1</sup>, вызванная возбуждением акустических фононов носителями, дрейфующими со звуковыми скоростями, а также гальваномагнитная неустойчивость<sup>2,3</sup>, проявляющаяся в турбулентном протекании тока. Нелинейные высокочастотные явления происходят, как правило, при больших мощностях сигнала, в них проявляется воздействие поля волны на свойства среды. В нашей работе сообщается о наблюдении неустойчивостей и нестационарных явлений при малых амплитудах сигнала, когда напряженность полей волны значительно меньше напряженности поля, создаваемого электрическим током или внешнего магнитного поля.

Изучались характеристики распространения поверхностной электромагнитной волны, бегущей вдоль поверхности периодической структуры типа "меандр", в условиях низких

температур и при протекании через металл электрического тока. Периодическая структура служит для формирования электромагнитной волны; она изготовлена из монокристалла чистого алюминия (рис. 1). Проводники меандра вырезаны вдоль осей типа  $\langle 100 \rangle$  кристалла, они имеют прямоугольное сечение  $0,5 \times 1$  мм. Период меандра 1,6 мм. Через меандровую линию пропускался постоянный или импульсный ток и регистрировались происходящие под влиянием тока изменения высокочастотного сигнала, прошедшего через линию. Магнитное поле налагалось вдоль направления распространения поверхностной электромагнитной волны перпендикулярно к проводникам меандра. Измерения выполнены при температуре 4,2 К.

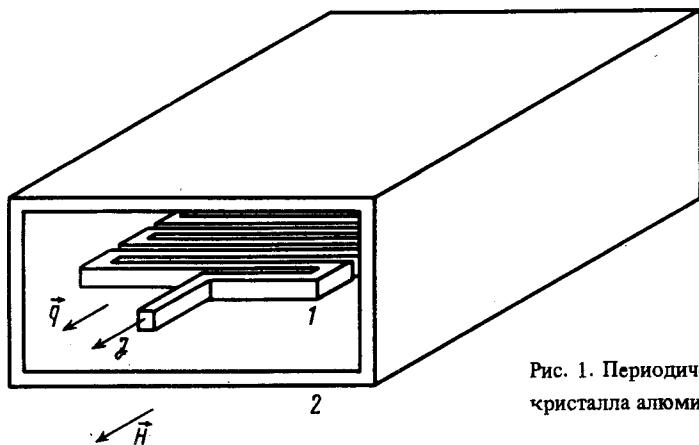


Рис. 1. Периодическая система. 1 — меандр из монокристалла алюминия, 2 — латунный экран

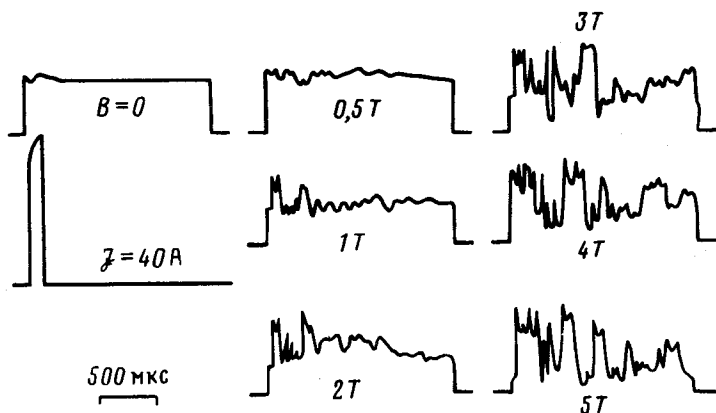


Рис. 2. Нестационарные явления при распространении поверхностной электромагнитной волны. Частота  $f = 1956$  МГц

Нестационарные явления состоят в искажении формы радиоимпульса высокочастотного сигнала. Они возникают в результате воздействия на систему импульса тока и затухают в течение 100–4000 мкс. На вход периодической системы подавался радиоимпульс частотой от 1 до 2,3 ГГц мощностью  $10^5$  Вт. Прошедший через систему в отсутствие тока импульс имел прямоугольную форму огибающей, которая при включении импульсного тока несколько искажалась (рис. 2). Осциллограммы на рис. 2 получены однократным включением развертки. Наложение магнитного поля приводит к увеличению искажений сигнала.

Начиная со значений индукции 2Т форма огибающей принятого сигнала начинает изменяться во времени с характерными частотами в единицы и десятки герц, так что кроме нестационарных явлений в распространении поверхностной волны существует еще и неустойчивость.

Наблюдались два типа временных изменений сигнала, вызванных неустойчивостью. Первый возникает при включении как импульсного, так и постоянного тока и обусловлен изменением средних во времени (или за период следования импульса) значений параметров системы. Последовательность радиоимпульсов длительностью в десятки и сотни микросекунд при этом изменяется по амплитуде без изменений формы. Второй тип нестабильности состоит во временном изменении нестационарных явлений. Он возникает только под воздействием импульсного тока и в достаточно сильном магнитном поле. На огибающей радиоимпульса появляется одна или несколько областей, в которых величина высокочастотного сигнала совершает колебательные движения. Протяженность этих областей и интенсивность колебаний в них зависят от частоты волны, силы тока и напряженности магнитного поля; она меняется от единиц до сотен микросекунд. Колеблющиеся области локализованы внутри области нестационарных искажений радиоимпульса и возникают во время или позже подачи импульса тока. Частотная зависимость величины и характера временных изменений сигнала по-видимому связана с параметрами электромагнитной волны.

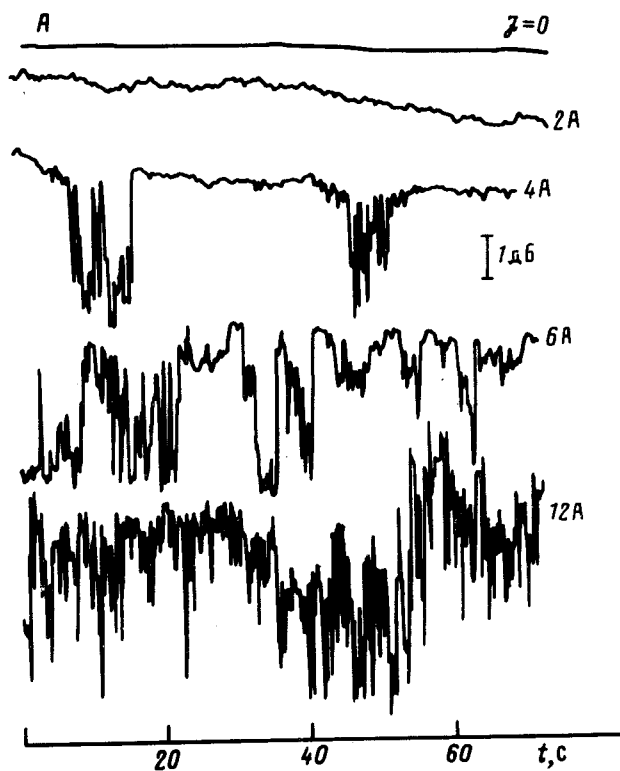


Рис. 3. Запись изменений амплитуды радиоимпульса во времени

На рис. 3 приведена полученная методом пикового детектирования запись временных изменений амплитуды прошедшего через периодическую систему радиоимпульса. Частота сигнала  $f = 2184$  МГц, длительность радиоимпульса 31 мкс, длительность импульса тока 20 мкс, частота повторения 200 Гц. Измерения выполнены в магнитном поле индукцией 6 Т при различных значениях силы тока. Как видно из рис. 3, в отсутствие импульса тока временных изменений амплитуды радиоимпульса нет. Существенные нестабильности амплитуды возникают при пороговой величине силы тока около 4 А. По мере увеличения силы тока характерные частоты нестабильностей увеличиваются. Эти черты явлений подобны наблюдавшимся в <sup>2,3</sup>. Однако, в отличие от <sup>3</sup>, рассматриваемые нами явления нестабильности не подавляются при наложении магнитного поля. Кроме того, временной масштаб нестабильностей может быть во много раз меньше, чем в <sup>2,3</sup>.

Эти явления не связаны с особенностями теплопередачи от образца к гелию или разогрева всего образца, так как среднее за период следования импульсов тока повышение температуры образца не превышает 0,01 К. Повышение температуры свыше 5 К приводило к исчезновению неустойчивости. При этом резко уменьшалась и зависимость амплитуды прошедшего сигнала от силы тока. Эти обстоятельства, а также влияние магнитного поля на неустойчивость и нестационарные явления говорят о том, что мы имеем дело с электронными явлениями в металле.

В рассматриваемых нами явлениях не должны сказываться эффект Есаки или генерация акустических фононов ввиду малости скоростей дрейфа электронов. Существенной оказалась взаимная ориентация направлений тока и магнитного поля, что противоречит попытке объяснения явлений влиянием магнитного поля тока на магнитострикцию и магнитосопротивление проводника. Следует принимать во внимание действие на проводник с током электродинамических сил во внешнем магнитном поле и со стороны соседних проводников. Из-за этих сил возможно изменение геометрических размеров системы, например ее периода, что может сказаться на характеристиках прошедшей через систему волны. Тем не менее, действие этих сил не может объяснить нестационарных явлений и неустойчивостей со временными масштабами в десятки и сотни микросекунд и исчезновения этих явлений при относительно небольшом повышении температуры.

Измерение вольтамперной характеристики нашего образца выявило отклонение ее от линейности при токах свыше 2 А. Переменной составляющей падения напряжения на образце, подобной наблюдавшейся в <sup>3</sup>, не обнаружено.

Предполагаемой причиной наблюдавшихся явлений, в особенности нестационарности, может быть возбуждение термомагнитных волн и их неустойчивость <sup>4</sup>, которые искажают движение электронов, переносящих высокочастотные токи и сказываются на постоянной распространения электромагнитной волны. При протекании тока в проводнике возникают градиенты температуры, которые с течением времени уменьшаются и исчезают. Во время существования градиентов происходит возбуждение и интерференция термомагнитных волн, что может быть причиной нестационарных явлений в распространении электромагнитной волны.

Данные рис. 3 при силе тока  $J = 4$  А и 6 А говорят о том, что при превышении некоторой пороговой силы тока возникают чередующиеся периоды "турбулентного" и "ламинарного" распространения волны. Продолжительность ламинарного периода уменьшается по мере увеличения силы тока. В гидродинамике <sup>5</sup> существует аналог подобного сценария развития турбулентности, имеющий название переход через перемежаемость.

Действие на высокочастотные вихревые токи сил, связанных с протеканием тока и наложением магнитного поля, также может оказывать влияние на параметры волны.

#### Литература

1. Виткалов С.А., Гантмахер В.Ф., Левиев Г.И. ЖЭТФ, 1986, 90, 2233.
2. Копылов В.Н. ФТТ, 1981, 23, 1948.
3. Захарченко С.И., Кравченко С.В., Фишер Л.М. XXV Всесоюзное совещание по физике низких температур, 1988, Ленинград, 92, 5.
4. Гуревич Л.Э., Гельмонт Б.Л. ЖЭТФ, 1966, 51, 183.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. 1986, М.: Наука, с. 733.

Поступила в редакцию  
4 января 1989 г.

После переработки  
16 марта 1989 г.